资源导刊 信息化测绘

国际标准连续出版物号：ISSN 1674-053X 国内统一连续出版物号：CN 41-1389/D

2026 第9期 总第537期



“天眼”护中原

——河南应急测绘的硬核担当

我国首版全国几何基准影像成果正式发布

经纬标定方位 数据描摹山河

——南阳市自然资源调查规划院工作扫描

ISSN 1674-053X

09>

9 771674 053074

中旬 定价：10元

扫码关注微信

2026年测绘法宣传日暨国家版图意识宣传周河南主场活动成功举办



本刊讯 8月28日，2026年测绘法宣传日暨国家版图意识宣传周河南主场活动在郑州航空港经济综合实验区成功举办。河南省自然资源厅党组成员、副厅长景志刚，河南省测绘地理信息技术中心党委书记、主任时统成，中心党委委员、副主任肖峰等领导参加活动。

在主场活动启动仪式上，景志刚总结了全省测绘地理信息事业发展成绩。近年来，河南省持续优化测绘法治制度环境，落地实施新版测绘相关条例办法，出台产业高质量发展工作指引，地理信息产业规模突破310亿元；实景三维河南、自然资源“一张图”、北斗三号规模化应用、“后土”AI大模型省级试点等重点项目扎实推进，时空数据在政务治理、生态保护、防灾减灾、民生服务等领域赋能作用持续增强。同时，景志刚剖析了当前数据供给、产业升级、安全治理等方面存在的短板与不足，并明确下一步工作要求：一要坚持法治先行，常态化开展测绘普法和行业监管，规范市场秩序；二要强化时空数据供给，丰富三维、一体化空间数据资源，推进公共数据共享赋能；三要加快产业转型升级，推动地理信息与低空经济、智能网联等新业态深度融合；四要严守安全底线，常态化开展涉密数据清查、保密宣教和问题地图整治，全方位筑牢地理信息安全屏障。

此次活动由河南省自然资源厅主办，河南省测绘地理信息技术中心、郑州航空港经济综合实验区自然资源和规划局承办。活动以“维护地理信息安全 激发时空数据潜能”为主题，立足“十五五”开局之年工作部署，集中展示全省测绘地理信息事业发展成效，普及测绘法律法规与国家版图知识，凝聚全社会守护地理信息安全、激活时空数据价值的共识与合力。

启动仪式上，现场宣读全省宣传周活动通知，部署年度普法宣传工作，并通过主题宣传片、专题宣讲等形式，聚焦地理信息数据安全、国家版图保护、应急测绘担当等内容开展科普宣讲，诠释“一点一线皆山河”的版图守护理念，普及规范用图、安全用图知识。

活动表彰了2025年度实景三维河南创新应用典型案例；郑州市自然资源和规划局分享了实景三维建设应用实践经验；河南省测绘地理信息技术中心与郑州航空港区自然资源和规划局签订了数据应用共享协议。

此次活动同步启动“美丽中国”第七届全国版图知识竞赛河南赛区赛事、郑州地铁第三批“测绘号”专列上线发车仪式，以群众喜闻乐见的多元化载体，常态化普及测绘与国家版图知识、传播测绘工作价值。

乙（陈庆贺/文、图）

卷首语

数字堤坝护安澜

◎ 本刊评论员

当台风“白海豚”裹挟百年一遇极端强降雨突袭中原，贾鲁河堤防溃口、清潩河水位暴涨、北汝河险情迭起。抢险一线，冲锋舟破浪前行，迷彩身影筑起生命防线；在这些看得见的背影之外，还有一支看不见的应急测绘队伍闻汛而动。他们依托卫星、无人机、激光雷达与超级算力，在数字世界与洪水竞速，于分秒之间构筑起坚不可摧的“数字堤坝”。

读完本期特别报道《“天眼”护中原——河南应急测绘的硬核担当》，心中满是震撼，也引发深刻思考：灾难面前不退半步，分秒必争守护生命通道，平凡岗位扛起时代使命，正是河南应急测绘人的硬核担当。

纵观河南应急测绘数年来的跨越式发展，本质上是一场由“人海战术”迈向“科技赋能”的应急范式革命。这场变革，以“快”字当头的应急响应机制为核心，把闻令而动从口号淬炼成刻进骨子里的行动本能。

周口贾鲁河发生堤防溃口，技术人员 90 分钟赶制完成高精度 DEM 数据，火速送往防汛专班，为溃口封堵方案推演提供关键数据支撑；许昌汛情告急，应急测绘人通宵鏖战，连夜编制防汛专题图直达抢险一线。这样争分夺秒的成果输出，绝非偶然，而是长期积淀形成的“肌肉记忆”。回望过往实战，2021 年郑州“7·20”特大暴雨，第一批应急测绘成果仅 6 小时便交付使用；2024 年南阳、商丘洪涝灾害，从影像获取到产出专题成果压缩至 4 小时以内；卢氏老灌河锑污染事件中，航摄小队星夜奔赴现场，当夜完成影像解译，将废弃矿坑定位从“无从查找”缩短至“小时级”。

高效响应的背后，是“平战结合”机制的强力托举。全年 24 小时值守、节假日 AB 岗备勤、常态化实战演练，一套成熟完备的应急保障体系，让险情来临之时，队伍拉得出、反应快、顶得上。

这场范式革命，以“准”字为王的科技硬实力为灵魂，以硬核技术筑牢应急测绘的能力底座。洪涝灾害多伴随狂风暴雨，传统光学遥感极易受云雨天气制约，SAR 卫星却可以穿透云雾遮挡，实现恶劣天气下稳定成像。如今，“空天地水”一体化监测网络在中原大地织密成网：“河南一号”卫星俯瞰全域，SAR 雷达破除云雨桎梏，无人机奔赴险区航拍作业，无人船潜入水下勘测地形，北斗系统捕捉大坝毫米级形变。一只只“天眼”“地眼”“水眼”协同发力，推动灾情研判实现“看得见、算得清、测得准”，应急测绘工作由定性描述转向定量测算。设备迭代升级的背后，是数据赋能实战的底气，让每一组测绘数据，都成为抢险救灾的重要参考。

这场范式革命，更以“稳”字托底的体系建设为根基。2026 年 8 月，在多线并发的严峻汛情面前，河南应急测绘多线作战却有条不紊，各条保障链条高效运转。这份从容，来源于多年持续搭框架、建机制、练队伍。过去依靠少数设备、个别专家“单兵突击”的时代已经结束，多部门协同联动、全链条运转的体系作战模式全面成型。卫星、无人机、监测基准站，每一个节点环环相扣，共同编织守护中原安澜的安全防护网。难能可贵的是，面对装备老化、野外保障短板、跨省协同能力不足等现实问题，河南应急测绘人敢于直面短板逐项破解，在自我革新之中持续锻造一支敢打必胜的测绘铁军。

风雨多经志弥坚，关山初度路犹长。应急测绘早已不只是防灾减灾的技术工具，更是守护人民生命财产安全的忠诚卫士。台风终会过境，但守望中原的“天眼”不会停歇。当遥感天眼与民心同频共振，当测绘数据与责任担当深度交融，只要坚守“以山河为卷，以经纬作笔”的初心使命，守住分秒必争、守土尽责的责任担当，河南应急测绘必将在每一次险情警报响起之时，交出令党和人民满意的答卷，持续为中原安澜、百姓平安筑牢牢不可破的数字堤坝。

测绘资讯·政策解读
文化传播·技术交流



社　　长：刘立新
执行总编：肖　峰
总　　编：刘鹏飞
副 社 长：左金安
副 总 编：张中强
编辑部主任：王红闯
责任编辑：王　敏
摄影总监：赵洪山
文字编辑：王　敏
　　栗荣晓
　　陈庆贺
论文编辑：张蓓蓓
美术编辑：宋　珂
发　　行：丁　翔

国际标准连续出版物号：ISSN 1674-053X
国内统一连续出版物号：CN 41-1389/D
邮发代号：36-373　定价：10 元
印刷单位：河南普庆印刷科技有限公司
编辑部：0371-65941858
广告发行部：0371-65941854
投稿邮箱：xxhch2015@163.com
QQ 通联群：185394654
地址：河南省郑州市黄河路 8 号

弘扬测绘正能量的宣传阵地
打造行业主流声音传播平台
孕育测绘工程师的理想摇篮

资源导刊 信息化测绘

2026年 中旬 第9期 总第537期

主管单位：河南省自然资源厅
承办单位：河南省测绘地理信息技术中心
主办单位：河南自然博物馆
编辑出版：《资源导刊》杂志社

顾问

王家耀　中国工程院院士
刘先林　中国工程院院士
李建成　中国工程院院士
龚健雅　中国科学院院士
邹友峰　河南理工大学教授
刘文锴　华北水利水电大学教授
李广云　中国人民解放军网络空间部队信息工程大学教授
王召东　河南省土木建筑学会理事长
杜清运　武汉大学资源与环境科学学院教授
姚宜斌　武汉大学教授
郭增长　河南测绘职业学院教授
毛忠民　河南省测绘地理信息技术中心原二级巡视员

河南省测绘地理信息技术中心编委会

主　任　时统成
副主任　肖　峰　武永斌　王军胜
成　员　赵海滨　赵立明　刘　畅　孙常建　李　辉　许翔云
　　安玉琴　寿燕翩　卢　明　王明强　付治河　张向军
　　田耀永　朱志军　王红闯　曹　源　周学军

核心型宣传合作单位

河南省测绘学会
河南省地理信息产业协会
河南省测绘院
河南省遥感院
河南省地图院
河南省地理信息院
河南省中纬测绘规划信息工程有限公司

友谊型宣传合作单位

东网空间地理信息有限公司
济源市自然资源技术保障中心
郑州市郑土测绘服务有限公司
河南微图信息科技有限公司
师梦勘测设计集团有限公司
中建国信大数据集团有限公司

声明

本刊发表的文字、图片、光盘等的版权归《资源导刊》杂志社所有，未经本社书面许可，不得为任何目的、以任何形式或手段复制、翻印及传播，本刊保留一切法律追究的权利。

网站合作单位

目 录
CONTENTS

卷首语

1　数字堤坝护安澜

国内要闻

4　我国在高端遥感动态成像关键技术领域取得重要突破　等8则

时政传递

6　全国卫星导航定位基准站网服务数据正式授权运营
　　我国首版全国几何基准影像成果正式发布

7　河南省测绘地理信息技术中心组织开展习近平法治思想专题讲座
　　河南省农村集体“三资”清查整治工作技术统筹协调会召开

特别关注

8　“天眼”护中原
　　——河南应急测绘的硬核担当

测绘广角

14　河南省测绘院助力许昌防汛抢险
　　“天地图·河南”AI智能助手正式上线

15　河南省耕地占补平衡动态监管平台通过专家验收
　　禹州市：科普宣传面对面 筑牢国家版图安全防线

经天纬地

16　经纬标定方位 数据描摹山河
　　——南阳市自然资源调查规划院工作扫描

学术研究

18　高职“遥感数字图像处理”课程知识图谱构建及应用研究

技术应用

21　自然资源确权界址点自动提取与编号技术研究

25　基于细节增强Transformer的时序遥感影像变化检测方法研究

28　基于改进BSP算法的World Wind三维模型加载方法

33　大高差山区环境下GNSS B级网观测精度控制策略研究
　　——以水布垭大坝监测网为例

37　YOLO-GS：面向复杂场景的无人机道路病害检测算法

41　人类活动影响下自然生态区火烧迹地时空特征研究

45　基于改进U-Net网络的遥感影像建筑物边缘识别研究

48　基于深度学习的灾前建筑物自动提取

53　基于多源数据的矿山生态修复动态监测方法与成效评估

58　一种基于关键向量的地名地址文本空间化方法

文苑撷英

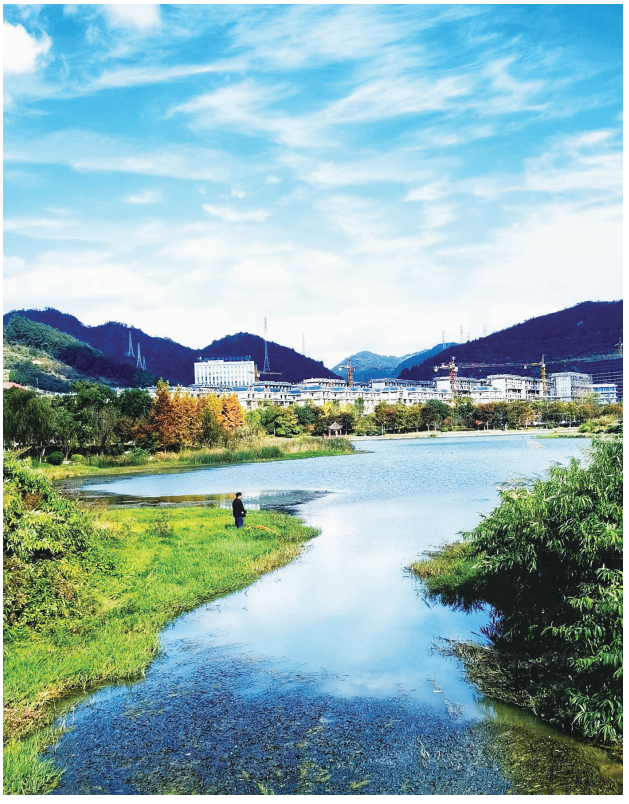
61　热爱可抵岁月漫长

62　鸟唤一河春

64　一纸山河 北斗传薪

封面

黄河安澜　杨其格/摄



关注

我国在高端遥感动态成像关键技术领域取得重要突破

近日，我国在高端遥感动态成像关键技术领域取得重要突破。针对无人机、卫星、机器人等领域亟待解决的轻量化、低功耗、高动态成像性能相互制约的矛盾，依托中国计量大学建立的国家市场监督管理总局重点实验室（光传感与图像计量）联合北京航空航天大学等单位组织开展技术攻关，实现小型低功耗约束下厘米级超高分辨率三维成像，解决了低空经济和智能视觉等产业对场景信息的精准捕捉与解析问题。

据介绍，研究团队突破了“小型化低功耗超高分辨率成像、高精度传递函数动态像差补偿、强噪声环境三维高精度重建”等关键核心技术，相关成果具有自主知识产权，总体技术达到国际先进水平，其中部分技术处于国际领先水平。

目前，相关技术成果已应用于无人机、航空航天、森林防火、安防、边海防、工业机器人、特种设备监测、智慧城市等领域，经济与社会效益显著。

我国完成1∶500万全月地质图编制工作

近日，中国地质科学院地质研究所联合多家科研院校编制的 1∶500 万全月地质图正式完成。

此次完成的全月地质图主图尺寸 280 厘米 ×120 厘米，配套南北极局部专题图件，系统厘清月球全域地质要素，精准标注 13519 个撞击坑、81 个撞击盆地，科学划分 14 类地质构造、17 类岩石类型，全面更新月球地层年代、构造演化、物质分布基础数据，填补多项精细化地质认知空白。图件符号体系、配色规范、编图标准全部实现国产化自主设计，摆脱国外传统编图体系约束。

该成果达到国际月球地质编图先进水平，进一步完善月球基础地质数据库，可为月球地质研究、深空探测及资源评价提供精细权威的基础资料，有力支撑我国深空地质调查工作。

交通运输领域首个北斗应用强制性国家标准发布

近日，市场监管总局（国家标准委）批准发布强制性国家标准《交通运输北斗卫星导航系统定位模块通用技术规范》（GB 48063—2026），这是交通运输领域首项北斗应用强制性国标，将于 2027 年 2 月 1 日起正式实施。

该标准明确了交通运输北斗定位模块技术要求、测试方法和检验规则，要求模块具备北斗独立定位能力，不依赖其他卫星导航系统即可实现定位。同时，规范测速、自主完好性监测、抗窄带干扰、固件升级等核心功能，对定位测速精度、启动响应时间、接收灵敏度、跟踪卫星数量等关键指标设置量化限值，明确产品最低性能标准。

该标准建立型式检验、出厂检验双重质量管控体系，覆盖单品及批量产品核验全流程，健全行业市场准入技术依据，有效解决以往产品规格不一、性能参差、兼容性较差等突出问题，将推动北斗规模化、标准化合规应用，为智慧交通建设和行业数字化转型提供坚实的时空标准支撑。

科技

东方慧眼高光谱AI双星成功发射

8 月 5 日，捷龙三号运载火箭在山东海阳近海实施海上发射，成功将东方慧眼星座高光谱 AI 双星（金山星、银山星）送入 786 千米预定轨道，发射任务圆满完成。

该双星由武汉大学牵头研制，是东方慧眼智能遥感星座的重要组成部分，卫星平台采用轻量化构型，单星重量 300 余公斤，搭载 22 通道精密校准高光谱载荷，覆盖可见光至短波红外波段，实现 5 米空间分辨率、300 千米超大幅宽成像；配置 400TOPS 星载 AI 算力，部署绿水青山大模型，实现星上感知、星上解算，完成从“看见地球”向“看懂地球”的技术跨越。

双星组网运行后，可实现 5 天全球覆盖重访，获取植被、水体、土壤、矿产等多类地表要素定量信息。



卫星将与在轨星座协同组网，构建“普查+详查”业务体系，为自然资源调查监测、生态保护修复、碳汇评估等工作提供高时效、智能化遥感数据支撑，进一步提升我国空天对地智能观测能力。

山地密林地上生物量卫星遥感透视探测获新进展

近日，遥感与数字地球全国重点实验室倪文俭研究员团队在星载大光斑激光雷达山地密林地上生物量透视探测方面取得新突破，相关两项成果先后发表于《Remote Sensing of Environment》。

山地林区地形干扰是星载激光雷达探测的关键难题，以往国别尺度下地形带来的生物量估测不确定性，尚缺乏定量认知。研究团队自研大光斑激光雷达波形指数 SAWA，研发 GEDI-SAWA 产品，并构建生物量估测模型，量化评估地形影响。测算显示，地形造成美国本土地上生物量估测不确定性为 1.11～3.93Pg，中国区域达 2.01～10.14Pg。

针对热带浓密林区激光穿透不足、生物量普遍低估难题，团队提出波形自适应地面检测 WAED 算法，并在巴西亚马孙雨林开展验证，冠层高度反演平均偏差由 -3.94 米收窄至 0.23 米，RMSE 由 7.58 米降至 4.29 米。相较官方产品，该算法性能提升明显，在多类光束与波形条件下稳定性、泛化能力突出，有效缓解浓密森林碳储量低估问题。

我国团队提出白光激光雷达反射比测量新方法

近日，厦门大学海洋与地球学院上官明佳教授团队创新提出白光激光雷达主动测量遥感反射比的方法，通过蒙特卡洛辐射传输模拟验证技术可行性，并系统揭示影响测量精度的关键因素。

遥感反射比是海洋水色遥感的关键基础参数，传统观测依赖太阳光，受光照、海况约束，夜间、高纬度海域难以稳定开展观测。新方法以 400～720nm 宽光谱白光激光为主动光源，依托多套蒙特卡洛辐射传输模型构建完整模拟框架，建立激光雷达观测信号与传统遥感反射比的理论关联，通过模拟验证方法可行性。

研究表明，雷达回波多次散射信号占比是决定测量精度的核心要素，针对船载、机载、星载不同平台，分析接收视场、平台高度、水体光学特性对观测结果的影响，给出系统参数优化方案。该方法突破被动观测条件限制，可为全天时海洋水色探测、水色卫星真实性检验与在轨定标提供全新技术路径与理论支撑。

数字

41.4 亿条

今年以来，我国持续加快自然资源与国土空间规划“一张图”平台建设，累计汇集 41.4 亿条空间数据，全国县级以上自然资源部门基本实现系统全覆盖，构建起国土空间数字化治理核心基础平台。

平台严格落实统一底图、统一标准、统一规划、统一平台建设要求，整合土地、森林、湿地、海洋等全域自然资源空间数据，构建起权威统一、各方通用的国土空间数字底座，有效破解以往数据分散、标准不一、共享不畅等行业难题。

依托平台赋能，全国实现用地、用林、用草、用海联动审批改革，各地依规精简报审材料 5～19 项、压减审批环节 8～20 个，审批时长平均压缩 33%。同时平台全面支撑“三区三线”管控、不动产确权登记等重点业务，实现同类业务集成联办，持续提升自然资源管理精细化、智能化、高效化水平，为国土空间精准管控和资源要素高效保障筑牢数字化支撑。

98%

2026 年上半年，国内市场手机总出货量 1.33 亿部，超 98% 支持北斗定位；超 1400 万辆共享两轮车完成北斗独立定位装车应用，占国内市场保有量 90% 以上。

近年来，我国持续扩大北斗在大众消费、工业制造、融合创新等领域的规模化落地，北斗规模应用取得阶段性成效。截至 2025 年年底，国产北斗兼容型芯片及模块累计出货量接近 26 亿片，各类北斗功能终端产品社会总保有量超过 22 亿台（套）。

城市试点示范效应也在不断显现。数据显示，截至 2026 年上半年，39 个北斗规模应用试点城市累计推广北斗独立定位应用终端超 1200 万台（套）。其中，大众消费领域超 720 万台（套），工业制造领域超 460 万台（套），融合创新领域超 100 万台（套）。多个城市在共享两轮车、巡游出租车、“两客一危”、农用机械、警用装备等特定领域实现 100% 应用北斗。国内重点行业北斗终端设备保有量接近 4000 万台（套），重点行业综合应用渗透率约 90%。

全国卫星导航定位基准站网服务数据正式授权运营

◎ 吕苑鹃

9月4日，由自然资源部、国家数据局联合主办的全国卫星导航定位基准站网服务数据授权运营工作推进会在京举行。会上宣布，全国卫星导航定位基准站网服务数据正式授权运营。这是国家层面首次在时空信息基础设施领域开展公共数据授权运营，将推动基准站网公共数据从尚未充分释放价值的公共资源转化为可以合规流通使用的数据资产，标志着北斗高精度时空数据要素迈入市场化运营新阶段。

全国卫星导航定位基准站网是国家重要的空间信息基础设施。自然资源部统筹整合全国基准站资源，建成了法定权威、标准统一、精准可靠、安全可控的基准站“一张网”，搭建了“1+33”的北斗应用与基准服务中心协同运维管理体系，向社会提供国家统一的测绘基准服务，推进全国基准站统一规划、统一标准、统一监管。目前，“一张网”站点规模已扩展至7569座，其中国家站420座、省级站3293座、协同站3856座，为各行业提供高精度时空服务支撑，有力推动北斗规模化应用。

全国卫星导航定位基准站网数据是支撑数字中国建设和保障国家时空安全的重要资源，具有突出的公共服务属性和商业开发潜力。据悉，全国卫星导航定位基准站网具备完整的数据采集、处理和分发能力，站网数据于2025年在国家公共数据资源登记平台完成登记。

此次授权运营是自然资源部落实“数据二十条”、公共数据“1+3”政策体系等的具体举措。授权运营坚持安全可控、优质高效，兼顾市场需求与创新驱动，将构建覆盖公益服务、重点行业、科研创新、产业发展的全域服务格局。授权运营将推行全流程安全合规管控与数据分类分级保护体系，严守数据安全底线。乙（摘自《中国自然资源报》2026年9月7日第1版）

我国首版全国几何基准影像成果正式发布

◎ 周飞飞

在8月27日自然资源部召开的例行新闻发布会上，我国首版全国几何基准影像成果正式发布，全国空间分辨率整体达到0.5米，遥感影像定位精度整体提升1倍以上。

该项成果是自然资源部积极服务数字中国建设、推动测绘地理信息事业转型升级的重大标志性成果，也是面向社会服务的测绘地理信息新型公共产品。由自然资源部会同省级自然资源主管部门共同构建，是我国首版覆盖全部陆地国土的国家级几何基准影像。

该项成果具有两个特点：一是空间分辨率高，利用国家和地方的高分辨率影像进行生产，全国空间分辨率整体达到0.5米；二是定位精度高，通过突破山区、高原、稀少控制区及无人区精度控制的技术难题，实现全国遥感影像定位精度整体提升1倍以上，解决了我国西部地区长期以来正射影像几何精度不高的问题。

据介绍，几何基准影像主要用于卫星遥感数据生产工作，通过高精度配准，可将原始卫星影像数据处理为具有准确位置坐标的成果。在这个过程中，几何基准影像主要作为底图模板用来校准坐标，从而形成位置精度统一的影像数据成果，类似于雕版印刷中的模具，确保不同批次的生产成果实现严格的位置套合。

构建全国统一的几何基准影像主要具有两方面重要意义：一是可以实现不同企业和单位生产的遥感影像数据成果准确配准套合，形成全国统一精度的卫星遥感影像底图产品，确保基于卫星遥感影像采集的信息空间位置一致；二是提升数据生产效率，更好地实现自动化匹配，大幅降低企业和单位生产高分辨遥感影像数据的成本。后续，自然资源部将推动全国几何基准影像成果的应用和动态更新。乙（摘自《中国自然资源报》2026年8月28日第1版）

河南省测绘地理信息技术中心组织开展习近平法治思想专题讲座

◎ 杜肖 刘红俊

8月18日，河南省测绘地理信息技术中心举办习近平法治思想专题学习暨《河南省测绘条例》《河南省测绘成果管理办法》宣贯讲座，推动习近平法治思想入脑入心，抓实测绘领域法规落地实施，进一步提升干部职工依法履职能力。河南省测绘地理信息技术中心机关全体人员、所属单位班子成员及业务骨干100余人参加学习。

本次讲座邀请河南省委党校（河南行政学院）法学教研部主任、教授徐航，以及河南省测绘地理信息技术中心地理信息应用开发处处长李辉授课。

徐航以《深入学习贯彻习近平法治思想加快推进法治中国建设》为题，从理论溯源、时代特质、核心要义、实践维度，系统阐释习近平法治思想的生成脉络、理论品格，并深度解读了“十二个坚持”核心内涵，授课理论功底扎实、案例丰富鲜活，为参训人员筑牢法治理论根基提供有力指导。

李辉围绕《新在哪里——新〈河南省测绘条例〉〈河南省测绘成果管理办法〉要点解读》开展专题宣讲，结合法规修订过程与测绘工作实际，逐条梳理新规修订背景、现实意义与重点条款变化，明确贯彻落实路径和工作要求。授课紧贴测绘地理信息业务一线，实操指导性强，为规范业务开展提供制度遵循。

参训人员表示，将以此次学习为契机，把学习贯彻习近平法治思想与落实测绘领域法规制度贯通起来，树牢法治思维、规范履职行为，把学习成效转化为推动测绘地理信息工作规范化、法治化、高质量发展的务实举措，为法治河南建设、全省地理信息事业提质增效贡献力量。乙（作者单位：河南省测绘地理信息技术中心）

河南省农村集体“三资”清查整治工作技术统筹协调会召开

◎ 杜啸宇

为压紧压实测绘技术支撑保障职责，统筹推进全省农村集体“三资”清查整治技术支撑各项工作，8月22日，河南省测绘地理信息技术中心组织召开全省农村集体“三资”清查整治工作技术统筹协调会。河南省测绘地理信息技术中心相关业务处室、所属各单位负责人及参与清查整治技术支撑工作的相关技术人员参会。

会议听取了各单位技术保障工作汇报，系统梳理了当前技术服务推进中的堵点、难点问题。结合全省清查工作进度与各地技术实操差异，会议逐项研判问题成因、统一处置思路，细化分工、明确时限，全面部署下一阶段技术统筹、业务指导、数据保障等重点工作。

会议强调，一是要切实提高政治站位，深刻认识测绘地理信息技术在农村集体“三资”清查整治工作中的基础性、关键性支撑作用，从严从细层层压实技术专班工作责任。二是要强化统筹联动与协同配合，统一规范技术标准，精准做好清查底图、空间基底数据供给工作，扎实保障“三资”清查监管大数据平台稳定运维。三是要聚焦基层实操需求，持续优化技术答疑、业务培训、问题闭环处置工作机制，高效解决各地在图斑核查、数据填报、上图入库等工作中的技术难题，全力保障各类空间数据真实、精准、规范，为全省农村集体“三资”清查整治工作提质增效筑牢测绘地理信息技术支撑。乙（作者单位：河南省测绘地理信息技术中心）



“天眼”护中原

——河南应急测绘的硬核担当

◎ 本刊特约记者 张永强

2026 年 8 月，第 13 号台风“白海豚”裹挟百年一遇的极端强降雨扑向中原大地，河南遭遇大范围持续性强降雨。短短数日内，多条河流水位暴涨、堤防失守：周口告急、许昌告急、平顶山告急！贾鲁河川汇区堤防溃口，清潩河鄢陵段险情骤起，北汝河大堤出现渗漏……暴雨洪水与汛情险情交织叠加，防汛抢险救灾面临巨大压力。

危难之际，一支“看不见的队伍”闻汛而动。河南省测绘地理信息技术中心相关处室及所属单位河南省测绘院、省遥感院、省地图院、省地理信息院，在中心党委统筹调度下，同步启动应急测绘响应：卫星巡天、无人机临空、基准站定位、机房通宵出图……他们用“天眼”穿透灾难迷雾，用数据标注救援路标，在分秒必争中为防汛抢险筑起一道坚实的“数字堤坝”。

从 2021 年郑州“7·20”特大暴雨，到 2026 年迎战“白海豚”；从卢氏老灌河锑污染溯源，到辉县地质灾害联合演练；从“河南一号”卫星升空，到“空天地水”一体化监测网成型——河南应急测绘用短短几年时间，完成了从“被动驰援”到“主动设防”、从“单兵突击”到“体系作战”、从“幕后底图”到“台前决策”的历史性跨越。河南应急测绘人在灾难面前不退半步、危难时刻挺身而出，用实际行动诠释了应急测绘保障服务地方发展、助力防灾减灾救灾的硬核担当。



“快”字当头：分秒必争抢出“黄金窗口”

8月13日23时许，周口市川汇区贾鲁河东岸堤防轰然溃口，宽约30米，汹涌的洪水瞬间吞噬了周口市第五人民医院院区和一处驾校，数百名群众被困，险情牵动全省上下。

8月14日13时，河南省水利勘测设计研究有限公司（以下简称“豫水设计”）紧急致电河南省遥感院应急测绘保障服务中心：“周口溃口区域急需高精度DEM（数字高程模型）数据，用于建模模拟淹没推演、分析研判抢险方案！”

此时距溃口发生已过去十几个小时，洪水仍在蔓延，每一分钟都关系着受困群众的生命安全。正准备午休的应急保障中心干部职工闻令而动，迅速调阅该区域历史激光点云数据，融合最新卫星影像，分工协作展开高精度DEM的赶制工作。平日安静的办公室里，这天只听得见键盘敲击声和偶尔的低声讨论。90分钟后，一份覆盖溃口区域的高精度DEM数据制作完成，15时前由专人驱车送达豫水设计防汛专班手中。“你们真是救了急！”豫水设计公司副总经理陆海接过数据时激动地说。

数据到手，如虎添翼。陆海带领技术专家当即把DEM数据叠入贾鲁河数字孪生模型，算出溃口进占断面与淹没水深分布，为“先固裹头、两侧进占”的封堵方案提供了关键的空间数据支撑。

同一时间，另一条战线也在紧张推进。

8月14日凌晨，许昌市自然资源和规划局向省测绘院发出紧急用图诉求：许昌鄢陵东地形图和清潩河东段防汛专用图必须在最短时间内赶制出来，用于指挥调度和抢险决策。

省测绘院党委连夜召集骨干力量，依托省级测绘数据资源体系与数字化智能生产平台，迅速展开数据归集、解析研判和专题制图工作。队员们争分夺秒，从凌晨一直奋战到中午，赶在8月14日中午前完成两幅高精度防汛图纸，第一时间送达防汛指挥一线，为救援决策抢出了宝贵时间。

然而战斗并未结束。8月14日15时左右，许昌市自然资源和规划局再次提出需求——前线需要无人机航拍获取灾区最新影像。副院长李永利立即带领7名技术骨干，携带多旋翼无人机、GNSS接收机等全套应急装备赶赴许昌防汛一线。与此同时，河南省卫星导航定位基准服务系统紧急开通应急测绘公益服务，为参与防汛减灾的无人机、车辆、人员即时免费提供高精度差分账号，实现“天上飞、地上测、后台算”的全链条支撑。汛情平稳后，省测绘院又为许昌加急制作了清潩河全域地形图，为河道常态化堤防巡检、防洪工程规划改造提供精准数据支撑。

许昌市自然资源和规划局8月18日发来感谢信：“贵院干部队伍响应迅速、作风扎实、保障过硬，凭借顶尖专业技术、高度责任担当，为我市安全平稳度汛提供了不可或缺的测绘数据保障……”

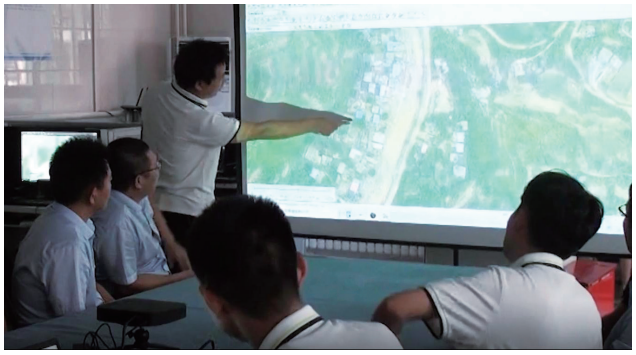
河南应急测绘人的“快”，不是偶然，而是这几年沉淀出的肌肉记忆。

打开时间卷轴，这样的“快”比比皆是——

2021年郑州“7·20”特大暴雨灾害发生后，省遥感院于7月21日凌晨第一时间启动应急测绘响应，紧急收集洪涝受灾区域灾前、灾后多源卫星影像数据。



●抢修溃口



●现场分析

自 7 月 21 日中午起，持续输出灾前光学影像图、灾后 SAR 影像对比图、洪涝灾害分布图等关键图件，保障一直延续至 8 月 1 日，全方位支撑郑州、新乡、鹤壁等多地抗洪救灾指挥决策。应急处置期间，卫星中心实行换人不停岗、24 小时轮班作战，技术人员克服停水停电等困难，第一批应急成果仅用时 6 小时便交付使用。

2021 年 11 月一个傍晚，临下班时省遥感院突然接到通知：“卢氏县发现水污染，急需高清影像数据！”省遥感院党委立即启动应急响应，应急航摄小队星夜兼程奔赴卢氏。原来，受污染的五里川河下游老灌河属于丹江口水库上游，直接威胁南水北调渠首水质安全；污染源极可能是废弃几十年的锑矿坑，但资料缺失、难以定位。应急航摄小队连夜赶到五里川镇，在群山环绕、谷深地狭的恶劣条件下，油电混合无人机贴着山脊爬升，顺利获取高清影像。当晚队员们轮班挑灯夜战，不仅制作出高清正射影像，还人工解译出疑似矿渣图斑，把废弃锑矿坑的定位时间从“未知”压缩到“小时级”，为专家组锁定污染源提供了关键线索。

2024 年 7 月中旬，南阳、商丘部分县区遭遇洪涝灾害。7 月 16 日应急测绘响应启动后，省遥感院技术团队充分发挥SAR卫星不受云雨天气干扰的技术优势，快速识别全域洪涝淹没分布，当天 18 时即输出第一批专题成果图件，从影像获取到成果产出整体耗时不超过 4 小时，精准圈定积水受淹区域，为现场抢险、群众安置、灾情统计提供了第一手测绘支撑。

速度的背后，是一套“平战结合”的机制在支撑。根据《河南省测绘地理信息技术中心应急测绘保障预案》，省遥感院专门建立森林防火和防汛应急值班室，在森林防火紧要期和汛期安排专人 24 小时值班，全年无缝衔接。节假日期间，应急测绘保障值班小组从院应急保障中心抽调技术骨干，组成两支保障小队，由主管院长亲自带队，全体成员保持 24 小时通信畅通，确保灾情发生时能够快速、高效地开展测绘保障任务。

“准”字为王：天空地一体化，让灾情“看得见、算得清”

应急测绘不是简单的“拍张照片”，而是将复杂无序的灾害现场，转化为可量化、可分析、可推演的空间数据成果，为防汛救灾提供精准科学支撑。

2026 年 8 月，在防汛一线，河南省测绘院亮出了一把“尺子”——北斗三号一体化变形监测系统。这套系统安装在叶县燕山水库大坝上，24 小时不间断捕捉坝体的毫米级形变。当暴雨导致水库水位急剧上升时，系统实时回传的形变数据，让技术人员对大坝安全状况一目了然。“以前要靠人工拿着仪器去测，一天也就测几个点；现在系统自动监测，每秒钟都在告诉你大坝有没有‘动’。”现场技术人员介绍说。

黄河沿岸防汛现场，飞航一体智能无人船入水作业，精准开展水下地形测绘、河道流速水位监测，实测数据实时同步上传智慧管理平台，实现河道险情早感知、早预警、早处置。南阳鸭河口水库上空，无人机开展常态化低空巡检，搭载 AI 智能识别系统，自动排查坝体裂缝、边坡滑塌、设施破损等隐患，全面实现隐患排查从“人工肉眼巡查”向“智能精准判识”的技术跨越。

在周口溃口现场，省遥感院送出的高精度 DEM 数据叠加实景三维模型后，水利设计部门可以直接在电脑上推演不同流量下的淹没范围、受困点位分布、抢堵土方量需求，把“凭经验估”变成了“按高程算”。

精准高效的应急测绘保障能力，源自河南省多年持续搭建、迭代完善的“空天地水”一体化立体监测网络，形成了天基卫星遥感、空基无人机航测、地基精准定位、水基水下监测的全域覆盖、全域感知、全域研判保障格局。

天基——2022 年“河南一号”卫星成功发射，搭载 0.75 米高分辨率光学相机，实现全省亚米级影像双月全覆盖。省遥感院持续深耕卫星影像接收、处理、解析工作，2022 年累计产出卫星数据 27134 景，影像产品覆盖面积累计达 1010 万平方千米，数据总量 98TB；2023 年面向省自然资源系统、省直相关厅局、科研院所等 41 家单位提供各类遥感产品 198 批次、35670 景，累计覆盖面积达 1366 万平方千米，数据量 170TB；2024 年为省自然资源系统、相关厅局及科

研院所等 28 家单位分发各类影像产品 60 批次，总覆盖面积 1504.1 万平方千米，数据量超 159.4TB；2025 年面向 21 家单位分发各类影像产品 51 批次，总覆盖面积 1720 万平方千米，数据量超 135TB。同时，依托 SAR 合成孔径雷达卫星无惧云雨、全天候成像优势，搭配百万级 AI 智能解译样本库，构建“河南一号 + 吉林一号 + 国家公益卫星”多星协同观测体系，实现灾中全天候、不间断、高精度遥感成像。

空基 —— 省遥感院配备 ALS80-HP 型机载激光雷达扫描系统、CW30 及 CW25E 中型固定翼无人机、大疆 M300/M400、Matrice4E 多旋翼无人机、SA130 无人机机载激光雷达系统等一批高精尖作业设备。2025 年采购大势智慧“重建大师”、惠普 T650 专业绘图仪等软硬件设备，补齐小范围精细化影像采集、激光数据处理、应急快速出图的技术短板。全年累计获取全省优于 0.2 米分辨率的航空遥感影像近 700 平方千米、激光点云数据 345 平方千米，建成实景三维模型 1300 平方千米，持续充实全省应急测绘基础数据库，大幅提升近距离、高精度、快速化航空应急保障能力。

地基 —— 省测绘院搭建了由近百台服务器组成的高性能运算集群，配齐专业计算机工作站、GNSS 高精度接收机、应急作业车辆等全套软硬件设备。依托全省 CORS 定位服务系统，可 5 分钟内快速开通激活公共服务账号，为一线应急作业人员提供实时轨迹监测、厘米级精准定位服务。省地理信息院优化涉密测绘成果应急审批机制，开通应急绿色通道，可在 30 分钟内完成受灾区域 1∶10000 涉密地理信息数据库、第三次国土调查成果数据库的查询、审批、调取、出图、刻盘等全流程工作。

水基 —— 依托搭载多波束测深系统的智能无人船，可实现水下地形、河道断面、水位流速的厘米级精准测量，有效破解传统水下监测精度低、盲区多、效率差的难题。同步落地的数字孪生贾鲁河系统，深度融合“降雨—产流—汇流—演进”全链条水文模型，实现水情动态精准预判，为河道防汛、险情预判、调度决策提供高精度数据支撑。

极致精准的技术能力，在一次次实战任务中落地见效。

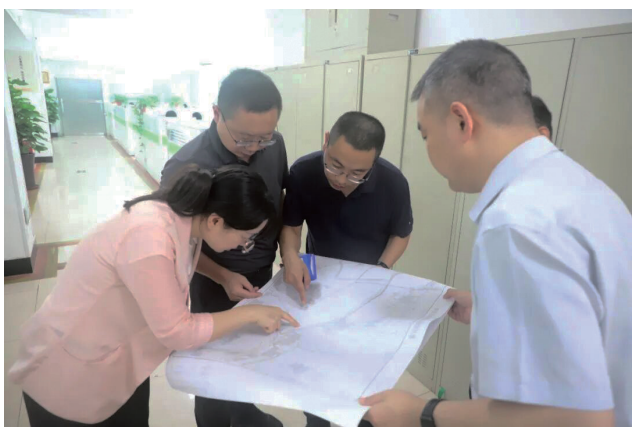
河南省应急测绘保障服务中心自建成运行以来，在一次次急难险重任务中逆行冲锋，用实战检验技术与担当。2017 年，启动国家应急测绘保障能力建设河南节点工程，2020 年顺利通过竣工验收；2022 年成功获评省级骨干专业救援队伍。在郑州“7·20”特大暴雨灾害处置中，全天候不间断获取航空、卫星遥感影像，研发防汛巡查、灾害对比专项系统，为全国多支外省救援队伍提供核心灾情底图支撑；台风“杜苏芮”防汛抢险期间，跨省驰援北京房山，完成山区高压线路遥感巡查，为首都供电恢复提供关键数据依据。近年来，河南省应急测绘保障服务中心不仅高效完成省内各类洪涝、地质灾害应急保障任务，还多次跨省出征抢险救灾，凭借“拉得出、冲得上、打得赢”的过硬能力，以精准遥感影像、专题分析成果、数字化推演报告，为各级应急指挥决策提供坚实支撑，先后获得国家部委、省级多部门的表彰通报与感谢信。

“稳”字托底：从单兵突击到体系作战，筑牢全年应急保障防线

2026 年 8 月的应急响应之所以“稳”，核心得益于省测绘地理信息技术中心历经数年深耕积淀、搭稳织密的应急测绘保障工作体系，实现从单点应急、单兵作战向全域联动、体系制胜的转型升级。

在省自然资源厅党组统一部署下，省测绘地理信息技术中心组建了应急测绘保障领导小组及办公室，出台《应急测绘保障预案》，构建起权责清晰、规范有序的应急工作机制。领导小组办公室依托地理信息应用开发处开展日常工作，定期组织开展全要素、实战化应急测绘综合演练。

省测绘地理信息技术中心所属四家业务单位分工明确、各司其职、协同联动，形成闭环保障格局。省测绘院负责搭建维护应急测绘基准体系，提供应急导航与位置服务，承担大面积、规模化应急测绘数据采集、加工处理与可视化展示工作；省遥感院作为河南



●省测绘院应急突击队连夜赶制地形图



●参加综合演练

省应急测绘保障服务核心依托单位、省级骨干应急救援队及国家应急测绘保障体系省级重要节点，可为各类突发事件提供全方位、全链条应急测绘技术保障；省地图院统筹应急地图成果储备、专项应急专题地图编制与快速出图工作；省地理信息院负责统筹现有测绘成果调取供给，快速完成基础测绘成果出图落地，开展灾害动态监测、态势分析与损失评估等研究工作。

常态化值守是应急保障平稳落地的关键抓手。2024 年，省测绘地理信息技术中心进一步健全森林防火、防汛应急 24 小时值班值守制度，在森林防火紧要期、防汛关键期，常态化安排专人全天候在岗值守，确保各类应急测绘需求第一时间响应、第一时间处置。值班人员全程保持通信畅通，精准接收、梳理、处置各类灾情信息。同时，完善值班记录、信息报送全流程制度，严格按照规范流程逐级上报，全力保障信息传递精准高效、及时规范。

这份“稳”的底气，既源于体系机制的坚实支撑，更来自应急测绘队伍日常的深耕苦练、技能精进，以及汛期全员在岗、枕戈待旦的备战状态。

省测绘地理信息技术中心坚持以练促战、以练提能，常态化开展实战化应急演练，持续锤炼队伍应急处置能力。2024 年 6 月 18 日，“2024 年河南省地质灾害应急防范与应急测绘联合演练”在辉县市回龙镇回龙村顺利开展。演练期间，省遥感院迅速启动应急测绘保障二级响应，20 余名专业技术人员即刻投入实战状态，完成 2.3 平方千米多旋翼倾斜摄影作业，4 小时快速输出实景三维模型。通过电子沙盘叠加历史数据模型，可直观清晰研判泥石流影响区域内居民构筑物损毁情况、人员疏散最优路径，完整呈现从卫星遥感首图获取、无人机遥感数据快速采集处理，到灾情态势演示、综合评估分析的全流程保障能力，充分彰显了应急测绘队伍快速响应、精准支撑的实战水平。

2025 年 7 月 25 日，省自然资源厅联合水利部黄河水利委员会河南黄河河务局，在黄河马渡段组织开展实战化应急测绘综合演练。本次演练创新采用“空基侦察—地基测量—孪生推演”一体化技术模式，依托无人机实时回传高清现场影像、卫星遥感捕捉大范围灾情态势、无人测量船精准测算河道水位流速，搭配数字孪生黄河系统动态推演险情发展趋势，成功搭建“空天地水”立体化、一体化监测保障网络。本次演练首次将实景三维成果应用于河道险情推演，实现应急指令下达、现场作业、成果输出的无缝衔接、高效闭环。演练现场，省自然资源厅党组成员、副厅长景志刚强调，要持续强化成果转化应用，全面复盘总结、补齐能力短板，持续优化应急测绘保障预案，切实擦亮应急救援的“第一双眼睛”。

2026 年主汛期来临前，省测绘地理信息技术中心提前谋划、主动部署，聚焦组织动员、专业培训、实战演练三大关键环节，持续优化应急测绘统筹协调、指挥调度、联动沟通机制，层层压实所属单位应急工作领导小组主体责任，对队伍调度、装备运维、值班值守、成果供给等重点工作细化举措、周密部署，全

面夯实应急指挥保障体系。同时，指导各所属单位围绕坐标框架运维、无人机航飞作业、遥感影像解译、应急快速制图、成果快速调取、数据安全保密、野外作业安全等核心业务，开展差异化、实操性专项培训。各单位针对性模拟大堤汛情、基准站故障等突发场景开展专项科目演练，全面检验无人机应急作业、定位服务保障、24 小时应急响应、应急成果绿色通道运转等工作质效，全方位筑牢地理信息应急保障安全防线，为全省防汛救灾工作提供坚实技术支撑。

针对过往工作中存在的装备功能单一、综合保障能力不足、野外作业保障设备短缺、跨区域应急协同保障能力薄弱、多队伍协同作业安全责任边界模糊等短板弱项，省测绘地理信息技术中心统筹各所属单位逐项梳理、靶向施策、系统整改，常态化开展无人机等核心应急装备管护与安全隐患排查，最大化挖掘现有装备性能潜力；紧跟测绘地理信息领域科技发展趋势，按需迭代更新应急保障装备，积极引入长航时无人机、轻型卫星通信设备等新型智能化设备；制定高风险环境应急测绘作业安全操作指南，实现野外作业、应急处置全流程闭环安全管控。

完善高效的指挥体系、精干专业的应急队伍、齐备先进的软硬件设施，共同构筑起河南应急测绘保障工作的坚实底座。正是依托这套系统化、常态化、实战化的保障体系，2026 年 8 月全省多线并行的应急测绘保障工作才能有条不紊、高效推进，各项任务全线落地、全程可控、无一缺位。

保障无止境：以山河为卷，以经纬作笔

河南应急测绘人常说：“我们手中的设备，是穿透灾难迷雾的利剑；我们获取的数据，是指引救援方向的路标。”这句话在 2026 年 8 月被再次验证——周口溃口 90 分钟的 DEM 数据、许昌凌晨的防汛专用图、贾鲁河上空的无人机、叶县水库坝体毫米级变化的数据，都是这句誓言的注脚。

河南省测绘地理信息技术中心党委书记、主任时统成表示，应急测绘保障服务之路永无止境，前路仍有沟坎要跨越、有困难要克服。下一步，省测绘地理信息技术中心将持续升级空天地一体化应急测绘体系，迭代人才队伍、硬件装备与核心技术，深化卫星遥感、无人机集群、实景三维、干涉激光雷达地表形变监测技术在应急场景的落地应用，完善平战结合、省市县联动的应急响应机制，全力服务森林防火、防汛抗旱、地质灾害防治、生态环境保护、突发公共事件处置，以精准的时空数据守护中原人民群众的生命财产安全，为现代化河南高质量发展筑牢坚实的应急测绘屏障。

台风“白海豚”终会远去，但中原上空的“天眼”不会眨眼。当下一次警报响起，卫星仍会过顶、无人机仍会起飞、机房仍会亮灯、DEM 数据仍会在 90 分钟里送达——因为应急测绘不仅是一个岗位，更是一份沉甸甸的使命：以山河为卷，以经纬作笔，在每一次分秒必争的实践中，写下应急测绘人对人民生命财产安全的忠诚与担当。



河南省测绘院助力许昌防汛抢险

◎ 蒋达

8 月 19 日，许昌市自然资源和规划局有关负责同志专程来到河南省测绘院，送来一封感谢信。信中对省测绘院及全体奋战在应急测绘一线的干部职工表达了崇高敬意和衷心感谢。

这封信的来由，还要追溯到几天前那场极端强降雨。受台风“白海豚”影响，许昌市全域普降大暴雨，河流水位猛涨，汛情险情交织，防汛压力陡增。关键时刻，河南省测绘院迅速响应，第一时间调集专业力量，为许昌市提供精准的应急测绘技术支撑，为科学研判和部署抢险工作提供了数据保障。

8 月 14 日凌晨，许昌市紧急用图需求传来。省测绘院党委当即启动应急测绘预案，突击队员连夜到岗，迅速梳理现有数据，依托测绘数据资源体系和数字化生产平台，加紧处理、编绘。大家分工协作，争分夺秒，赶在 14 日中午完成许昌鄢陵东地形图和清潩河东段防汛图，并及时送达防汛指挥一线。从接到任务到出图交付，用时不到半天。

当日 15 时许，许昌市自然资源和规划局再次提出应急测绘需求。省测绘院党委紧急会商，迅速调配数据处理服务和应急车辆，无人机分队随即赶赴灾区，为获取最新影像数据做好准备。与此同时，河南省卫星导航定位基准服务系统紧急开通应急测绘公益服务，免费为参与防汛减灾的无人机、车辆和人员提供高精度差分账号，用技术手段助力精准防汛。

洪峰过境后，汛情趋于平稳，但测绘服务并未停歇。省测绘院又加急制作了许昌市清潩河全域地形图，为河道堤防巡检、隐患点位管控和防洪工程改造提供地理数据支撑，进一步巩固了许昌市河湖治理与防灾减灾的测绘基础。

在此次极端强降雨防汛阻击战中，省测绘院队伍响应迅速、作风扎实、保障过硬，以专业技术和责任担当，为许昌市安全平稳度汛提供了不可或缺的测绘数据保障，生动诠释了省级测绘队伍守土尽责、守望相助的使命情怀。下一步，河南省测绘院将继续发挥技术优势，持续深化与许昌市的应急联动机制建设和常态化业务合作，合力提升防灾减灾和应急测绘综合保障能力，以实际行动践行测绘人的职责与担当。

（作者单位：河南省测绘院）

“天地图·河南”AI 智能助手正式上线

◎ 梁琢奇

为持续提升公共地理信息便民服务水平，近日，河南省地图院自主研发的 AI 智能助手在河南省地理信息公共服务平台门户网站正式上线运行。AI 智能助手深度融合大语言模型技术与省级地理信息服务能力，立足天地图平台权威时空数据资源，进一步拓宽地理信息服务渠道，为社会公众提供更加便捷高效的智能化地理信息服务。

此次上线的 AI 智能助手界面简洁友好，交互流程流畅，支持自然口语化对话交互模式。用户无需熟悉平台复杂操作逻辑，直接输入相关问题，即可快速完成地图信息查询、坐标查询转换、测绘地理信息专业术语解读等多项业务操作。针对以往平台使用过程中群众需要跨功能模块反复切换、操作流程烦琐、部分测绘地理信息专业内容理解门槛较高等现实痛点，AI 智能助手实现问答式直达服务，有效降低地理信息资源的使用门槛，推动优质公共地理信息服务普惠可及，更好地满足社会大众多样化的地理信息使用需求。广大用户直接登录“天地图·河南”门户网站首页，即可找到 AI 智能助手入口，免费体验该项智能化服务。

下一步，河南省地图院将持续发挥天地图省级节点平台数据资源优势，立足群众实际使用反馈，迭代优化 AI 模型问答精准度、优化交互体验，不断拓展智能检索、空间分析、多场景地理信息应用等服务能力，持续提升地理信息公共服务供给能力，以数字化、智能化技术赋能民生普惠服务，助力数字河南建设提质增效。

（作者单位：河南省地图院）

河南省耕地占补平衡动态监管平台通过专家验收

◎ 邓丽

8月27日，河南省自然资源厅组织专家在郑州对河南省地理信息院完成的“河南省耕地占补平衡动态监管平台”项目进行验收。

来自中国人民解放军网络空间部队信息工程大学、河南省林业科学研究院、河南省乡村产业发展服务中心、河南理工大学、华北水利水电大学的5位专家组成验收组，听取了项目汇报，审阅了项目资料，观看了系统演示，经质询和讨论，认为项目文档资料齐全规范，平台基础层、数据层、服务层等架构合理，补充耕地入库、非农化建设项目挂钩等功能模块齐全，界面友好、操作简便，满足河南省耕地占补平衡动态监管信息化建设需要，同意通过验收。

据了解，河南省耕地占补平衡动态监管平台自今年1月12日上线试运行以来，已稳定运行7个多月。平台依托河南省国土空间基础信息平台搭建，打通了多系统间的数据壁垒，实现业务数据互通共享。平台围绕耕地占补平衡全链条管理需求，整合指标入库、指标结转、指标管控、指标调剂以及非农建设项目挂钩等核心功能，可实现非农建设占用耕地全流程记录与监管，保障耕地占补数量平衡、质量匹配。不同于传统的数值化管理模式，该平台以地块为最小管理单元，推行图斑化管理，将过去纸质流转、多系统切换、人工对账的业务环节全部转为线上办理。通过并联审批、坐标前置校验等机制，大幅提升了审批效率和数据准确性；管理人员可直观掌握每一块补充耕地的空间分布、质量等级和利用状态，真正实现“以图管地”，为耕地保护决策提供精准支撑，有效防范占多补少、占优补劣等问题。

下一步，河南省地理信息院将根据专家意见建议持续优化平台功能，更好地服务河南省耕地保护工作，为夯实河南省粮食安全根基提供有力的技术支撑和信息化保障。（作者单位：河南省地理信息院）

禹州市：科普宣传面对面 筑牢国家版图安全防线

◎ 张延伟

8月29日是第23个全国测绘法宣传日。连日来，禹州市自然资源和规划局围绕“维护地理信息安全，激发时空数据潜能”主题，组织开展测绘法暨国家版图意识宣传周活动，坚持普法宣传与市场检查同频发力，切实提升全社会国家版图意识，筑牢地理信息安全防线。

“地图上的每一寸土地、每一片山河，都是‘绿水青山’转化为‘金山银山’的根基。测绘地理信息工作不仅是标注版图边界的‘标尺’，更是守护生态屏障、服务绿色发展的‘眼睛’和‘大脑’，容不得丝毫马虎。”8月28日，在禹州市新华书店，该市自然资源和规划局工作人员正向市民进行国家版图意识宣传。

“工作人员的讲解使我认识到，地图虽小却事关国家主权和领土完整。”带孙子来买教辅资料的禹州市民王先生深有感触地说，“熟悉国家版图构成，正确使用地图，是每个公民的责任和义务。”

活动期间，禹州市自然资源和规划局工作人员深入新华书店、个体书报摊点、文具店等销售地图及地图类制品的场所，在广泛开展国家版图意识宣传的同时，对商家销售的地图集（册）、地球仪、地理辅导书等进行合规性检查，向商家和群众普及《中华人民共和国测绘法》《地图管理条例》等法律法规，分享“问题地图”识别技巧，在全社会营造“规范使用地图，一点都不能错”的良好氛围，教育引导市民自觉抵制“三无”地图（无编制单位、无出版单位、无审编号），坚决维护国家版图尊严。

禹州市自然资源和规划局相关负责人表示，下一步将持续推动测绘法治宣传与国家版图意识教育常态化、多样化，不断增强全社会的国家版图意识和地理信息安全保密意识，坚决筑牢国家版图安全防线，为全市测绘地理信息事业健康发展提供坚实保障。（作者单位：禹州市自然资源和规划局）

经纬标定方位 数据描摹山河

——南阳市自然资源调查规划院工作扫描

◎ 本刊记者 栗荣晓　通讯员 廖松然 李战华

伏牛毓秀，白河奔流。从古宛名城到省域副中心城市，南阳的蓬勃发展，离不开测绘地理信息事业坚实有力的空间支撑。测绘工作者扎根宛城大地，脚踏青山原野，坚守测绘初心，在守护渠首绿水青山、深耕资源调查、实景三维建设等重点领域，持续输出高精度地理信息成果，助力全市自然资源精细化治理、城乡建设提质升级、生态保护永续发展。

南阳市自然资源调查规划院（以下简称“调查规划院”），立足南阳发展大局，恪尽职守、实干笃行，不断夯实空间数据基底，拓展地理信息应用场景，以精准测绘保障各项重点项目落地实施，以经纬标定方位，以数据描摹山河，为南阳高质量建设省域副中心城市贡献测绘力量。本刊记者走进调查规划院，带你一起感受南阳测绘人砥砺前行的坚实步履。

精准护航绿水青山

守护渠首绿水青山，筑牢北送清水屏障。2023 年，南水北调中线工程水源地（南阳片区）历史遗留废弃矿山生态修复示范工程项目启动（以下简称“示范工程”），涉及邓州市、淅川县、西峡县、内乡县、南召县、镇平县、卧龙区、方城县 8 县（市、区），调查规划院以专业技术力量保障项目科学实施、规范落地。

“示范工程最大难点是矿点数量多、分布极度分散、地域跨度大，多数治理区域位于深山峡谷、库区沿岸，道路不通、地形复杂，需逐项完成踏勘，工作量大、覆盖面广、作业难度高，是对工作人员意志和技术能力的双重考验。”调查规划院院长廖松然说。

调查规划院职工发扬特别能吃苦、特别能战斗、特别能奉献的工作精神，长期野外作业，一天奔波五六百千米是家常便饭。他们夏季不畏酷暑，冬日不惧冰霜，爬陡坡、过坑塘，面对蚊虫叮咬、坡面滑塌、落石坠物等安全风险从不退缩，对数百个零散矿点逐一踏勘、逐点核查，开展地形复测、影像采集、工程核查和植被监测等工作，全力保障示范工程质量、安全、进度、成效同步达标。

同时，技术人员紧盯边坡治理、客土覆土、截排水工程、苗木栽植等关键工序，对照技术标准开展核验督导，建立问题台账、逐项闭环整改；依托无人机遥感技术、实地勘测、数据比对等手段，实现全过程动态监测。

参加示范工程的人员大多四十岁左右，上有老下有小，全是家庭的顶梁柱，但他们舍小家顾大家，一心扑在工作中。朱大伟的父母是老病号，孩子正在读高三，但每次都身先士卒带队外出踏勘；妻子预产期的前一天，技术人员刘涛还在野外核查复测；丁志刚的父亲脑梗生活不便，妻子的工作岗位又不在市区，两个女儿在上学，但是他从来没有请过假……是他们的无私奉献，使调查规划院承担的示范工程高效推进。

目前，调查规划院已完成示范工程绩效面积 1393.63 公顷，将于近期实施市级验收。接下来，调查规划院将持续发挥专业技术优势，坚守水源地生态底线，以精准调查、精细监测、严格把关，巩固矿山生态修复成果，以实实在在的生态治理成效，保障一泓清水永续北上。

筑牢农田优化调整

民以食为天，粮以地为本。2026 年 1 月，调查规划院承担西峡县永久基本农田优化调整专项任务。西峡县地处豫西南伏牛山区，具有“八山一水一分田”的典型地貌，该院依托“三调”成果、国土空间规划、“三区三线”数据体系，精准开展永久基本农田优化调整工作，守护全县 21.69 万亩保护底线，实现耕地保护提质、空间布局优化、县域发展增效的双向共赢。

此次优化调整工作面广量大、地块分散，政策标准严苛，对空间位置、地块现状核查精度提出极高要求。为高效推进项目任务，调查规划院统筹制定作业实施

方案，构建“遥感预判—无人机航拍—实地勘测举证—内业核查质检”技术链条，发挥地理信息数据与实地勘测技术优势，全力做好图斑核查、外业举证、数据建库等技术支撑保障工作。

寒冬时节，调查规划院技术人员深入山区乡野田间，携带测绘仪器开展全域实地核查。对照规划底图，对拟调出地块、备选补划耕地逐一现场核实，实地判别地块耕作现状、灌溉条件、地质坡度，精准测定地块拐点坐标，现场拍摄举证材料，做到图、数、实地三者完全一致，杜绝错划、漏划问题。

内业作业阶段，技术人员将外业采集数据入库处理，叠加国土空间规划、耕地质量等别、生态保护红线等多层数据，开展空间叠加分析，科学研判地块适宜性。严格对照技术规范逐条自检、交叉复核、集中终审，从严把控成果精度、边界拓扑、属性信息，确保每一条矢量边界精准无误，每一项地块资料真实完整。

“本次优化调整成效显著，县域基本农田布局更加规整集中，优质耕地占比大幅提升，粮食稳产保供能力持续增强，有效破解了山区农田碎片化难题。”西峡县农业农村局相关负责人说。调查规划院探索形成的技术赋能、市县协同的山区农田优化模式，为豫西南同类山区县域耕地保护工作提供了实践经验。

下一步，调查规划院将持续做好后续成果完善、数据汇交等保障任务，以扎实可靠的地理信息成果，守护南阳沃土良田，保障全市农业高质量发展。”南阳市自然资源和规划局测管科科长朱丁文表示。

匠心绘就民生工程

近年来，调查规划院干部职工以严谨细致的工作作风完成各项任务，用精准可靠的数据，为全市重大项目落地、民生工程实施筑牢坚实的技术保障。

南阳市中心医院新院区作为市级重点三甲医疗民生项目，总建筑面积 38.6 万平方米，建筑功能分区复杂、配套设施繁多，对测绘数据精度要求高。

在实测中，正值 7 月高温天气，调查规划院技术团队冒着酷暑规划核实，深入院区施工现场认真比对规划审批内容，精准完成规划核实测绘、房屋实测、面积核算等工作。医院场地面积大，部分作业场地受限，他们分工协作、相互补位，严谨完成每一组数据采集，严把成果每一个质量关口，为医院建设项目顺利完成规划核实、不动产登记提供可靠的测绘数据。

河南国医学院建设项目为南阳市重大民生工程，



●南阳市自然资源调查规划院院长 廖松然

总建筑面积 36 万平方米。作为全国唯一以“国医”命名的公办本科院校，该项目备受南阳市人民瞩目。为保障按期招生办学，项目需加快推进建设，确保尽早建成投用。

2025 年 12 月，调查规划院接到测绘任务，立即组建工作专班，抽调骨干技术力量，细化作业流程、明确责任分工、倒排时间节点，全面铺开项目测绘保障工作。时值寒冬风雪天气，一线测绘人员不畏严寒、迎风而上，开展外业实地踏勘与精准测量。作业中，技术人员严格对照规划许可图纸，逐项核实建筑轮廓、结构布局及空间指标，系统开展外业数据采集工作。

在内业处理方面，技术人员对测绘数据逐条核验、反复比对、严谨演算，精准校核建筑面积、套内面积、公共分摊面积等关键指标，严格落实测绘成果质检规范，不放过任何一处细节偏差。团队人员主动担当、加班加点、协同攻坚，高质量完成项目规划核实测绘与房产实测全套技术服务，有力保障河南国医学院如期投用。

笃行实干创佳绩，砥砺耕耘结硕果。近年来，调查规划院多项成果荣获国家级测绘成果金奖、河南省优质测绘工程（成果）一、二等奖、河南省测绘科技进步奖、河南省优秀城乡规划设计奖、南阳市人民政府科技成果二等奖、南阳市科学技术进步奖等奖项。

“我们将紧紧锚定南阳建设省域副中心城市目标，坚持弘扬不畏艰苦、精益求精的实干精神，不断强化新技术、新装备应用场景，锤炼高素质技术队伍，以精准可靠的调查测绘成果，全力服务全市自然资源高质量发展大局，为南阳城乡建设、生态保护、粮食安全贡献技术力量。”廖松然说。

高职“遥感数字图像处理”课程知识图谱构建及应用研究

李孟迪　梁晓宇

（河南水利与环境职业学院，河南 郑州 450008）

摘　要：随着信息技术的发展与职业教育改革的深化，高职“遥感数字图像处理”课程教学面临理论抽象、知识点零散等问题，制约了教学效果与学生综合能力的提升。知识图谱是一种高效的知识组织与可视化工具，为课程建设与教学创新提供了新路径。研究以该课程为对象，构建知识图谱，明确课程核心知识点与多维语义关联，形成层次清晰的知识结构，并整合各类教学资源完成图谱实例化填充与可视化呈现。实践表明，该知识图谱能帮助学生构建系统化知识网络、拓宽个性化学习路径，显著提升了课程的实践教学效果，可为高职同类课程教学改革提供借鉴。

关键词：遥感数字图像处理；知识图谱；实践教学；个性化学习

1　引言

在数字经济与产业升级的双重驱动下，高等职业教育承担着培养高素质高技能人才的重任。《教育强国建设规划纲要（2024—2035 年）》明确提出推进教育数字化，塑造“智能 +”教育新生态。知识图谱作为结构化表示与管理领域的有效工具，正深度融入教育领域，为课程建设与教学改革注入创新动力[1]。“遥感数字图像处理”是高职测绘地理信息类专业的核心课程，旨在培养学生进行遥感影像增强、分类、信息提取及应用的能力。该课程融合多学科理论，概念抽象、原理性强[2]，同时与专业软件操作高度耦合，技能点繁多。传统教学模式按照模块或流程平铺直叙，学生难以建立物理原理、软件操作与行业应用间的内在逻辑，知识结构碎片化；教学以教师演示、学生模仿为主，缺乏个性化指导，学生综合应用能力薄弱。

鉴于此，研究借鉴多学科课程知识图谱构建的成功经验[3-4]，以高职“遥感数字图像处理”课程为对象，探索其领域知识图谱的构建方法与应用路径。通过结构化知识网络实现课程知识体系化重组与可视化呈现，驱动教学模式智能化变革，提升学生实践创新能力。

2　课程知识图谱的构建

2.1 确定知识图谱的构建目标与范围

知识图谱紧密服务于课程教学实践与学生学习需求，严格对标课程标准，系统涵盖“遥感数字图像基础”“遥感数字图像存储与读取”“遥感数字图像运算”“遥感数字图像校正”“遥感数字图像去噪声”“遥感数字图像增强”“遥感数字图像目标提取”“遥感数字图像分类及制图”等八大关键能力模块。研究团队走访 20 余家企事业单位，采用半结构化访谈与问卷调查方式，深入对接遥感数据处理员等岗位的典型工作任务，构建岗位能力图谱，具体如图 1 所示。通过分析数据预处理、影像校正与增强、地物特征提取、遥感影像解译、专题产品制作等岗位核心能力要求，将其映射到课程知识点，确保课程内容与行业需求精准对接。



图1　岗位能力图谱

基金项目：1.河南省高等学校重点科研项目计划支持（项目编号：27B420005）；2.河南省教育科学规划课题（课题批准号：2024YB0473）

作者简介：李孟迪（1988—），女，汉族，硕士，副教授，主要从事遥感数字图像处理的教学与研究工作。

2.2 定义课程知识体系与语义关系

依据《人工智能知识图谱技术框架》国家标准，采用“章—节—知识点”三级分层架构组织课程内容。一级知识点对应八大核心模块，二级知识点是对一级模块的细化分解，三级知识点为最小知识单元或技能点，形成层次分明、细节完备的知识点体系。定义五类核心语义关系：包含关系、先后关系、并列关系、因果关系、对比关系，具体如表 1 所示。这些关系使知识图谱从静态列表转化为动态网络，支撑学习路径规划、对比分析与深度推理。

表1　课程知识图谱核心语义关系

关系类型	形式化定义	典型实例	教学价值
包含关系	A包含B，当且仅当B是A的子集或组成部分，且A的知识范围完全覆盖B	“遥感数字图像去噪声”包含“常见噪声类型及其识别”	明确知识从属，支撑章节导航与渐进式学习
先后关系	A先后B，表示A是B的逻辑前提，掌握A后方可学习B	“遥感数字图像几何校正原理”先后“几何校正软件操作”	规划最优学习路径，避免认知跳跃
并列关系	A并列B，表示A与B处于同一层级，无包含或先后依赖，共同隶属于同一上位知识点	“监督分类”并列“非监督分类”	引导对比分析，培养分类与归纳思维
因果关系	A因果B，表示A的发生或变化直接导致B的产生或变化，具有物理或逻辑上的必然性	“太阳高度角变化”因果“遥感影像阴影比例变化”	理解现象背后的原理，强化深层推理能力
对比关系	A对比B，表示A与B在功能、方法或效果上具有相似性或差异性，适合并置比较	“均值滤波”对比“中值滤波”	辨析易混淆概念，提升决策能力

2.3 实例填充与图谱构建

课程知识涉及原理性文本、数学公式、软件操作、遥感影像、算法流程图、仿真实验及案例数据集等多模态资源。研究采用人工精标为主、工具辅助为辅的策略，核心数据资源来自课程教材、教学大纲和行业规范，同时整合网络教学资源与企业工程案例。对非结构化多模态资源（图片、视频、动画、仿真实验等）采用“资源唯一标识（UUID）+ 分类目录 + 元数据标注”的规范化管理。资源库按照类型、核心模块、知识点 ID 三级目录存储；元数据包含资源 ID、名称、类型、来源、适用知识点 ID、认知目标层级等。资源与知识点通过 Neo4j 图数据库中知识节点的“关联资源”属性关联。MOOC 课程按知识点片段化裁剪与标注，文本类资源通过链接整体关联，将结构化程度高的核心定义、定理等直接作为知识点的文本实例存储。

通过上述填充的知识实例，借助预定义语义关系形成纵横知识架构。“包含”“先后”“因果”等关系构成纵向递进架构，遵循认知规律，支撑课前—课中—课后线性学习路径；“并列”“对比”等关系编织横向关联，打破章节界限，支撑联想学习与知识迁移。

2.4 知识图谱存储与可视化

研究将构建完成的结构化三元组数据导入 Neo4j 图数据库进行存储与管理[1]，节点表示知识点或资源实体，边表示语义关系。知识点节点属性包括：节点 ID、名称、所属章节、类型标签（理论型 / 操作型 / 综合型）、认知难度、建议学时；资源节点属性包括：UUID、名称、类型、存储路径、来源、创建时间、适用知识点 ID 等。边属性包括关系类型及关系依据。结合可视化技术实现知识图谱交互式呈现，用户可点击节点查看详情并沿边遍历，实现多层级可视化功能：课程概览层呈现完整网络，建立宏观认知；章节导航层自动抽取相关子图；知识点详情层提供多模态资源链接、习题和案例，形成覆盖全流程的教学支持系统，有效支撑学情诊断、资源精准推送、知识网络可视化讲授与智能答疑。课程知识图谱如图 2 所示。

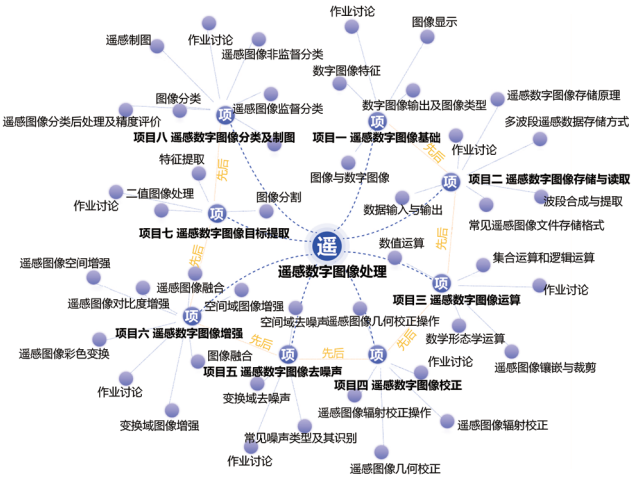


图2　课程知识图谱

3　课程知识图谱的教学应用实践

3.1 教学实践应用模式

知识图谱的价值在于深度融入教学实践，研究将其应用于“课前—课中—课后”全流程，并与项目式学习、虚实结合实验等模式深度融合，构建了智能教学场景，确保教学活动与岗位典型工作任务精准对接。

课前：学情精准诊断与自适应预习。教师发布图谱预习任务，系统基于学生历史画像，采用知识追踪模型估算每个三级知识点的掌握程度，生成个性化预习地图，以颜色深浅标识薄弱点并高亮前置节

点，同时智能推送岗位相关的预习微课。学生完成后，系统记录浏览路径、驻留时间及测验结果，生成班级学情诊断报告，教师据此调整课堂重难点，实现以学定教。

课中：图谱引导探究式教学与虚实融合实验。例如讲解“遥感数字图像分类”时，教师引导学生从“分类”节点出发，自主探索“监督分类”“非监督分类”等子节点及其对比关系，通过关联案例动画直观理解方法差异，教学从“讲授”变为“引导探索”。在实践环节，构建“实验目标—操作步骤—理论依据—数据标准”的关联框架，系统在学生操作中实时指导：当学生操作失误时，自动链接相关理论节点推送修正建议。实验结束后 AI 对比结果与标准数据，分析误差原因，突破时空限制，降低试错成本。

课后：个性化巩固拓展与智能助学。学生利用知识图谱复习，系统根据课堂互动与作业数据动态更新学习者画像，基于图神经网络算法预测薄弱节点，自动生成个性化复习路径：针对学优生推送挑战性案例，针对学困生强化薄弱节点及前置练习。作业系统动态生成个性化作业包，自动批改并生成掌握度雷达图。AI 助学智能体 24 小时在线，支持学生追问并追溯关联资源。

3.2 教学实践效果分析

3.2.1 实验设计

为验证方案的有效性，研究抽取学院 2023 级摄影测量与遥感技术专业 23 摄测 1 班 45 人（对照班）、23 摄测 2 班 48 人（实验班）开启一学期的教学对比实验。两班学生均由同一招生批次录取，入学成绩无显著差异；授课教师、教学周数、教材及实验环境均保持一致，仅教学模式不同，对照班采用传统教学模式，实验班采用基于知识图谱的教学模式，通过理论测试、实践考核、学习行为分析和问卷调查等方式对教学效果进行多维度评价，并通过提升幅度计算公式（1）定量分析教学效果：

$$\text{提升幅度} = \frac{\text{（实验班均值} - \text{对照班均值）}}{\text{对照班均值}} \times 100\% \quad (1)$$

3.2.2 学习成绩对比

对照班与实验班考核成绩对比如表 2 所示。实验班在理论考试、实践操作和综合项目环节的平均分均显著高于对照班（独立样本 t 检验，$p < 0.01$）。特别是在综合项目环节，实验班学生展现出更强的知识迁移能力和问题解决能力，能更清晰地阐述技术选择背后的理论依据，而非机械套用操作步骤。

表2　两班教学效果对比（均值±标准差）

考核环节	对照班（n=45）	实验班（n=48）	提升幅度
理论考试	76.4±8.2	84.7±6.5	+10.9%
实践操作	79.3±7.6	88.2±5.8	+11.2%
综合项目	81.5±6.9	90.6±5.1	+11.2%
对比关系	A对比B，表示A与B在功能、方法或效果上具有相似性或差异性，适合并置比较	“均值滤波”对比“中值滤波”	辨析易混淆概念，提升决策能力

3.2.3 学习行为分析

通过教学平台采集的学习行为数据显示，实验班平均自主学习时长增加 42.6%，资源访问次数增加 67.3%。虚实融合实验中 AI 实时指导使操作一次正确率提高约 35%。学生平均探索跨章节关联节点数量达 8.7 个，表明知识整合倾向更强。在“几何校正控制点选取”节点上，实验班驻留时间减少 23%，测试正确率提高 18%，学习效率更高。

3.2.4 学生满意度与反馈

课程结束后进行了问卷调查，学生满意度对比如表 3 所示。调查结果显示，实验班学生在学习兴趣（91.7%）、知识体系清晰度（93.8%）、学习效率提升（87.5%）、实践能力提升（91.7%）、教学满意度（93.8%）方面均显著高于对照班。访谈中学生普遍反映，知识图谱帮助他们建立了整体框架，理清了知识点联系，个性化学习路径明确了个人知识薄弱点。

表3　学生满意度对比

评价维度	对照班	实验班
课程学习兴趣	71.1%	91.7%
知识体系清晰度	64.4%	93.8%
学习效率提升	66.7%	87.5%
实践能力提升	73.3%	91.7%
教学满意度	75.6%	93.8%

3.2.5 企业反馈

课程实施结束后，研究团队邀请合作企业的技术专家对学生综合实训成果进行评审。合作企业技术专家依据企业新人考核标准（方案合理性、操作规范性、成果精度、报告逻辑、问题论证深度）对学生综合实训成果进行评审，实验班平均得分 86.2 分，对照班 78.4 分。专家指出，实验班学生展现出更强的系统性思维和知识迁移能力，能清晰阐述技术选择理由，成果报告逻辑清晰，达到初级工程师水平。企业反馈雷达图对比如图 3 所示。

（下转第 24 页）

自然资源确权界址点自动提取与编号技术研究

杨文锋　柴香　韩一

（贵州省水利水电勘测设计研究院股份有限公司，贵州 贵阳 550002）

摘　要：自然资源确权工作中，采用人机交互模式提取界址点及编号存在效率低、准确性差等问题，研究提出一种基于格林公式边界识别与拓扑约束优化算法的自动处理方法，通过批量读取面矢量数据集，利用格林公式区分面矢量的内、外边界，结合顶点夹角与距离约束条件提取有效界址点，以面要素左上角为起点按顺时针方向实现自动编号，并通过优先级规则处理交叉边界，避免重复编号。通过典型自然资源登记单元验证，该算法处理效率较人机交互模式提升上千倍，界址点处理准确率提升 3.94%，误差率由 3.95% 降至 0.01%，界址点的提取与编号效率、准确率均显著提升，可有效支撑自然资源确权工作的高效化与自动化。

关键词：自然资源确权；界址点；格林公式；拓扑约束；自动化处理

1　引言

自然资源统一确权登记是生态文明建设的基础性工作[1]，其确权数据成果的空间准确性与拓扑一致性直接决定权属界定的法律效力。界址点作为自然资源权属界线的几何转折点，是界定权属边界的核心标识[2-3]。在自然资源权属调查中，需由相邻双方指界人现场共同指认，并精确测定其空间位置[4]，界址点连线构成完整的权属界线。自然资源确权登记建库工作中，需将界址线、界址点等空间数据录入空间数据库，入库前需对界址点进行统一编号，根据自然资源确权工作统一规范，将地块左上角界址点作为起点，沿地块边界顺时针方向完成该地块所有界址点的编号。

目前，界址点的提取与编号主要依赖人工及人机交互模式，如通过GIS技术手动提取面矢量边界顶点，并按顺时针方向逐一编号，该模式耗时较长，难以保障界址点编号的准确性与规范性，且受地块复杂程度、操作人员熟练度等多种因素影响，稳定性较差，严重影响项目生产进度与成果质量。在实际生产场景中，现有界址点提取多依赖简单顶点筛选方法，编号过程未考虑边界优先级及复杂地块交叉处理需求，导致无法适配自然资源确权工作中交叉地块等复杂确权场景。

研究通过融合格林公式边界方向判定与拓扑约束过滤算法，实现“边界分类获取—特征提取—有序编号—编号输出”全流程自动化，可有效解决现有方法存在的效率低、错误率高、适配性差等问题，为自然资源确权工作提供高效、精准的技术支撑。

2　方法原理与流程

2.1 总体思路

以面矢量数据集为输入，通过算法实现“边界分类获取—特征提取—有序编号—编号输出”四步自动化：（1）遍历面矢量数据集，基于格林公式区分面矢量的内、外边界，建立边界拓扑关系；（2）结合顶点夹角与距离约束提取有效界址点，剔除冗余顶点；（3）以左上角为起点，按顺时针方向对界址点排序编号，通过优先级机制处理交叉边界的重复编号问题；（4）编号存档输出。具体技术流程如图 1 所示。

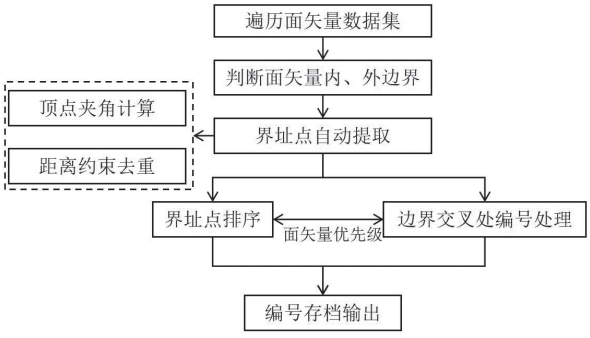


图1　技术流程

2.2 面矢量边界识别与分类

自然资源确权的权属边界以面矢量数据集形式存储。实际应用中，待生成界址点并完成编号的面矢量数据集通常包含多组，且各类面矢量存在编号优先级关系。根据自然资源确权工作统一规范，面矢量编号按照“国家权属地块—集体权属地块—登记单元范围”的优先级排序，基于 MATLAB 语言对该方法进行编程。

作者简介：杨文锋（1987—），男，汉族，硕士，工程师，主要从事测绘地理信息工作。
通信作者：柴香（1998—），女，汉族，硕士，工程师，主要从事测绘地理信息工作。

根据面矢量优先级批量读取 K 个面矢量要素，遍历面矢量要素，获取面矢量边界。在实际应用中，面矢量要素存在内边界情况，因此界址点生成需同时考虑面矢量的内、外边界，如图 2 所示。



图2　面矢量的内、外边界

2.2.1 面矢量数据集读取

批量读取自然资源确权面矢量数据集，设读取的面矢量总数为 K，按类型（国家权属地块—集体权属地块—登记单元范围）赋予编号优先级（优先级高的面矢量先处理）。遍历每个面矢量，提取边界集合，包括内边界和外边界。

2.2.2 内、外边界判断

采用格林公式判断边界方向，区分内、外边界。设面矢量边界顶点分别为 $P_1(x_1,y_1)$，$P_2(x_2,y_2)$，$P_3(x_3,y_3),\cdots,P_{n-1}(x_{n-1},y_{n-1})$，$P_n(x_n,y_n)$，其中，$P_1(x_1,y_1)$ 与 $P_n(x_n,y_n)$ 为同一个点。根据格林公式计算边界沿顶点 (x_1,y_1)，(x_2,y_2)，$(x_3,y_3),\cdots,(x_{n-1},y_{n-1})$ 的曲线积分，公式如下：

$$D=-\frac{1}{2}\sum_{i}^{n-2}\left(y_{i+1}+y_i\right)\times\left(x_{i+1}-x_i\right) \tag{1}$$

根据格林公式定义，若 $D>0$，该面矢量边界呈逆时针旋转，反之，呈顺时针旋转。依据面矢量定义，边界以逆时针旋转，该边为内边界；边界以顺时针旋转，该边为外边界 [5]。研究方法可准确识别面矢量的内、外边界，有助于后续准确提取界址点。

2.3 界址点自动提取算法

界址点为边界方向发生显著变化的顶点，研究方法通过“夹角阈值＋距离约束”双重条件判断和提取。

2.3.1 顶点夹角计算

将第 i 个面矢量表示为 $F_i(i=1,2,3,\cdots,k)$，F_i 中第 j 个边界表示为 $b_j^i\in F_i$。面矢量边界 b_j^i 由节点连接为闭环线。通过界址点提取算法提取边界 b_j^i 界址点，设 θ_T 为顶点 (x_k,y_k) 邻近顶点 (x_{k-1},y_{k-1})、(x_{k+1},y_{k+1}) 构成向量夹角的角度判断阈值，边界 b_j^i 第 k 顶点 $p_k^{i,j}$ 坐标表示为 (x_k,y_k)，该节点夹角 θ_k 求解公式为：

$$\theta_k=\arccos\left(\frac{v_1,v_2}{\|v_1\|\|v_2\|}\right) \tag{2}$$

其中，$\arccos(.)$ 为反余弦函数，θ_k 为第 k 个顶点的夹角，v_1 和 v_2 分别为顶点 (x_k,y_k) 邻近顶点 (x_{k-1},y_{k-1})、(x_{k+1},y_{k+1}) 构成的向量，v_1 为 $(x_{k-1}-x_k,y_{k-1}-y_k)$，$v_2$ 为 $(x_k-x_{k+1},y_k-y_{k+1})$。若该夹角 $\theta_k<\theta_T$，则该顶点即为界址点 (x_k,y_k)，反之则为非界址点 [6]。

为避免边界局部几何变化剧烈，产生密集界址点，除夹角判断外，边界界址点识别顾及节点距离，即在规定距离范围内，将最大角度节点作为界址点。遍历 K 个面矢量及每个面矢量所有边界，获取界址点集 $\{P\}$。

2.3.2 距离约束去重

对面矢量 F_i 界址点进行编号，设 F_i 边界为 $b_i^j\in\{b^i\}$ $(i=1,2,3,...,k)$，依据左上角原则对边界 $\{b^i\}$ 进行优先级排序。依据边界优先级，检索界址点集 $\{P\}$ 中位于边界 b_j^i 的点集 $\{P'\}$。设某界址点坐标为 $\{x_0,y_0\}$，d_t 为距离阈值，边界直线方程为 $A_x+B_y+C=0$，距离判断公式为：

$$d=\frac{\left|Ax_0+By_0+C\right|}{\sqrt{A^2+B^2}} \tag{3}$$

其中，d 为界址点到面矢量边界线的距离，若 $d<d_t$，则界址点位于该边界，反之，不位于该边界。面矢量边界是由多个线段连接起来的闭合环，因此，通过遍历界址点集 $\{P\}$ 与边界 b_j^i 的每个线段，即可获得位于边界 b_j^i 的界址点集 $\{P'\}$，并将其作为该边界界址点集，沿边界顺时针方向对 $\{P'\}$ 进行排序。设界址点集 $\{P'\}$ 包含 N 个节点，将左上角界址点索引为 M，将界址点集 $\{P'\}$ 位于边界左上角 b_j^i 的点作为编号起始点，并将界址点集 $\{P'\}$ 索引重新排序为 $M, M+1, M+2, \cdots, N, 1, 2, 3\cdots M-2, M-1$。

读取 K 个面矢量要素，将第 i 个面矢量表示为 $F_i(i=1, 2, 3, \cdots, k)$，$F_i$ 第 j 个边界表示为 $b_j^i\in F_i$。依据面矢量边界优先级，将面矢量边界依次输入距离判断公式，完成界址点判定与编号，实现所有面矢量边界界址点的逐一编号。

多组面矢量要素可能存在边界相交、边界重叠，因此，界址点可能位于不同面矢量要素或不同边界，若界址点已编号，便不再对该点重复编号，以此遍历所有面矢量要素，完成各面矢量边界的界址点提取。

2.4 界址点排序与编号

2.4.1 起始点确定与顺时针排序

对每个面矢量边界，以左上角界址点为编号起点

（通过坐标比较，取 y 最大且 x 最小的点），沿边界顺时针方向排序。

读取 K 个面矢量要素，将第 i 个面矢量表示为 $F_i(i=1,2,3,\cdots,k)$，F_i 第 j 个边界表示为 $b_j^i \in F_i$。按照面矢量边界优先级，依次完成各边界的起始点定位与顺时针排序，再分别对边界界址点进行编号[6]。

2.4.2 交叉边界编号处理

权属界线空间关系较为复杂，多个面矢量要素交叉时，同一个界址点可能属于多个边界。按照面矢量边界优先级依次编号：高优先级边界的界址点优先编号，遍历过程中低优先级边界若遇到已编号界址点则直接跳过，避免重复编号，最终生成无重复界址点的矢量成果文件，边界相交重叠如图 3 所示。

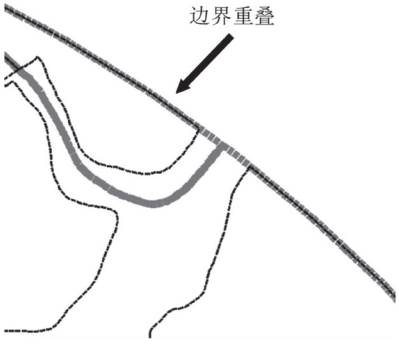


图3　边界相交重叠

3　方法验证与结果分析

3.1 验证数据与参数设置

对界址点自动提取与编号方法进行验证，参数设置及成果验证如下：

（1）方法参数设置：对研究方法验证后确定，设角度判断阈值 θ_T 为 175°，界址点距离范围设置为 110m，距离阈值 d_t 为 0.01m。当面矢量边界第 k 个顶点的夹角 $\theta_k < 175°$ 时，将该顶点提取为界址点，反之则为非界址点。为避免边界局部几何变化剧烈产生密集界址点，除夹角判断外还要顾及界址点间距离，即在 110m 内，将该范围角度最大的顶点作为界址点；设 d 为某一界址点到面矢量边界的距离，若 $d < 0.01$m，则判定该界址点位于该边界；反之则不在该边界。

（2）数据成果验证：研究方法中界址点编号严格遵循“从西向东、由北向南”的空间顺序原则，按照“国家权属地块—集体权属地块—登记单元范围”的面矢量编号优先级顺序逐级开展。多组面矢量要素可能存在边界相交、边界重叠情况，界址点可能位于不同面矢量要素或不同边界。对已编号界址点不再重复编号，对新增未编号界址点，延续已有编码序列，在最大界址点号后续编，以确保界址点编号的连续性与唯一性，界址点提取与编号成果如图 4 所示。

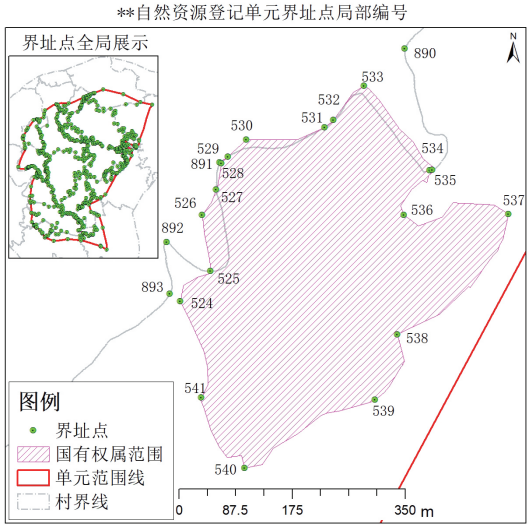


图4　界址点提取与编号

3.2 结果对比

3.2.1 效率对比

选取 5 个自然资源登记单元，对人机交互模式与基于格林公式边界识别与拓扑约束优化算法的自动处理方法进行对比论证，结果如表 1 所示。验证结果表明，平均处理 144 个地块，采用人机交互模式需要 7.4h 完成，采用研究算法自动处理仅需 15.6s，处理效率提升上千倍，尤其在地块形状复杂区域，人机交互模式因需反复核对拓扑关系与编号逻辑，耗时成倍增加，而研究方法则展示出显著的规模化处理优势。

表1　两种模式的界址点准确率及效率对比

		#1登记单元	#2登记单元	#3登记单元	#4登记单元	#5登记单元	平均值
人机交互模式	地块数/个	45	89	126	188	274	144
	界址点数/点	229	532	822	1587	2694	1173
	界址点位置正确量/点	211	504	798	1541	2622	1135
	界址点位置正确率	92.14%	94.74%	97.08%	97.10%	97.33%	95.68%
	界址点编号正确量/点	219	516	783	1544	2611	1135
	界址点编号正确率	95.63%	96.99%	95.26%	97.29%	96.92%	96.42%
	界址点提取、编号时效	3h	4.5h	5.5h	8h	16h	7.4h
算法处理模式	界址点数/点	180	405	764	1360	2123	966
	界址点位置正确量/点	180	405	764	1360	2123	966
	界址点位置正确率	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	界址点编号正确量/点	180	405	764	1360	2121	966
	界址点编号正确率	100%	100%	100%	100%	99.91%	99.98%
	界址点提取、编号时效/s	5s	8s	12s	15s	38s	15.6s

3.2.2 准确性验证

两种模式的界址点综合准确率及误差率对比如表 2 所示，平均处理 144 个地块，采用研究算法对界址

点提取与编号，综合准确率高达 99.99%，较人机交互模式提升 3.94%，误差率从 3.95% 降至 0.01%，显著提升了界址点自动提取与编号的准确性。

表2　两种模式的界址点综合准确率及误差率对比

	人机交互模式	算法处理模式	准确率提升度
界址点位置准确率	95.68%	100%	+4.32%
界址点编号准确率	96.42%	99.98%	+3.56%
界址点处理综合准确率	96.05%	99.99%	+3.94%
界址点处理误差率	3.95%	0.01%	

4　结论

传统自然资源确权工作中，界址点提取与编号主要依赖人机交互模式，难以保障界址点提取效率及编号的准确性，研究提出一种基于格林公式边界识别与拓扑约束优化算法的自动处理方法，并选取典型自然资源登记单元进行对比验证。结果显示，与传统人机交互模式相比，自动处理算法效率提升上千倍，界址点处理准确率提升 3.94%，误差率从 3.95% 降至 0.01%，可有效解决传统模式效率低、错误率高的问题，为高效、精准开展自然资源确权登记工作提供可靠技术支撑，具有重要的工程应用价值与推广前景。

参考文献

[1] 中华人民共和国自然资源部.自然资源统一确权登记暂行办法[Z].2019.

[2] 刘耀林,唐旭,尹章才.面向不动产登记的界址点快速匹配方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(3):412-418.

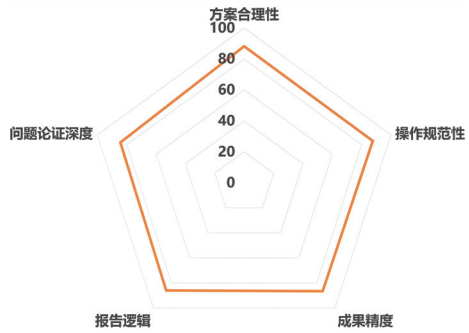
[3] 杨霄翼,李维庆.一种面向分类界址点的快速提取方法[J].测绘,2021,44(2):51-55.

[4] 赵文吉,段福洲,宫辉力.基于矢量边界特征的界址点自动提取方法[J].地理与地理信息科学,2017,33(2):35-39.

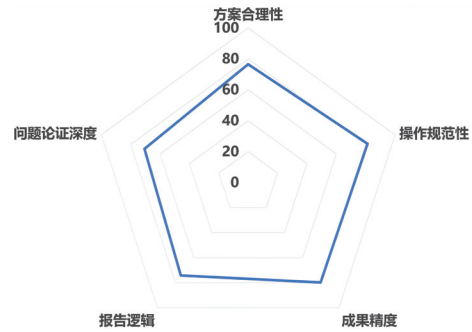
[5] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础[M].武汉:武汉大学出版社,2010:125-128.

[6] 贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司.一种自然资源确权自动提取界址点和生成界址点编号的方法[P].中国专利:ZL 2024 10948836.8,2024.

（上接第 20 页）



（a）实验组企业反馈雷达



（b）对照组企业反馈雷达

图3　企业反馈雷达图对比

4　结论

针对高职“遥感数字图像处理”课程教学痛点，研究借鉴“AI+ 知识图谱”双轮驱动技术范式，完成从领域知识图谱构建到深度教学融合的创新实践，构建涵盖八大核心模块、三层知识架构、多种语义关系的课程知识图谱，实现课程知识体系化重组和可视化呈现。研究将知识图谱用于“课前—课中—课后”全流程教学，与虚实融合实验、项目式学习结合，构建智能化、个性化教学新生态。实践表明，实验班在理论考试、实践操作和综合项目上相比对照班有显著提升，在增强学生学习兴趣、知识掌握度、实践能力和学习满意度方面成效显著。研究以知识图谱为智能底座，重塑课程教学生态，是提升高职测绘类人才培养质量的有效策略，为职业教育数字化转型提供了实践范例。

参考文献

[1] 邓健峰,叶威,张仁朝,等.高职“电工电子技术”课程知识图谱构建及应用研究[J].时代汽车,2026(4):52-54.

[2] 王凯丽.混合式教学中大学计算机基础课程知识图谱的构建与应用研究[J].湖北开放职业学院学报,2025,38(23):193-195.

[3] 冯徽徽,王威,邹滨,等.基于知识图谱的测绘类课程思政建设现状分析[J].测绘通报,2023(S2):34-39.

[4] 张纯,刘辉,喻鹏,等.基于“知识图谱+AI辅助”的材料科学基础课程教学改革与实践[J].中国教育技术装备,2025(23):111-113,131.

基于细节增强Transformer的时序遥感影像变化检测方法研究

管怀干

（安徽开诚房地产土地资产评估咨询有限公司，安徽 合肥 230000）

摘　要：针对现阶段遥感变化检测模型存在漏检、误检问题，提出一种基于细节增强的 Transformer 变化检测模型。采用孪生金字塔 PVT 编码器提取双时相多尺度特征，设计变化细节增强模块 CEM，通过交叉注意力强化时相尺度差异，结合多尺度卷积感知地物边缘；提出背景信息引导模块 BGM，利用深层背景特征优化浅层特征，平衡伪变化抑制与细节保护。以 DSIFN-CD 数据集为基础，引入 FC-Siam-Conc、BiT、S^2CD 开展对比实验，结果表明：模型交并比（IoU）达到 84.54%，精确率（Precision）达到 93.53%。定量精度统计与可视化结果表明，该模型能够更好地保留变化图斑轮廓，检测精度优于主流 CNN 与 Transformer 类变化检测方法。

关键词：遥感变化检测；Transformer；细节增强；交叉注意力；背景引导

1　引言

遥感影像时序变化检测是开展国土变更调查、生态区保护、灾害监测评估的重要技术手段，可大范围、高效监测区域地表特征的动态变化[1]。随着我国遥感技术的发展，卫星遥感影像的时空分辨率快速提升，但传统变化检测方法，如变化矢量分析、马尔科夫随机场、支持向量机等，仅能利用光谱与浅层纹理特征，存在微小变化目标边缘检测模糊、椒盐噪声严重等诸多问题；基于 CNN 的全卷积 U-Net 类变化检测模型，可通过多层卷积提取空间特征，但原生卷积模块感受野相对固定，在未引入注意力等增强机制条件下，全局上下文特征融合能力受限，对跨空间、跨通道特征依赖关系建模能力不足，难以量化不同维度特征对变化检测结果的贡献权重[2-3]。

近年来，基于 Transformer 网络的方法可顾及影像全局信息，能有效挖掘双时相影像语义差异。但现有 Transformer 模型双支特征融合较为简单，缺乏跨时相自适应交互机制，固定尺寸 Token 分块编码会破坏变化目标精细边界，解码器难以区分真实变化与伪变化，检测能力不足，存在漏检、误检问题[4]。基于此，研究提出细节增强 Transformer 的时序遥感影像变化检测方法，采用权重共享孪生金字塔 PVT 作为编码器，引入交叉注意力细节增强模块，实现双时相特征交互与边缘细节增强；同时引入背景引导降噪模块，过滤伪变化噪声并保留细微变化，以提升变化检测精度。

2　研究方法

研究提出变化细节增强 Transformer 网络 CDETR，整体架构分为孪生金字塔 PVT 编码器、多尺度变化细节增强模块 CEM、背景信息引导解码器 BGM、预测输出头四部分，模型整体结构如图 1 所示。双时相 T_1、T_2 影像输入权重共享 PVT 编码器，输出 4 层不同分辨率多尺度特征；各层级多尺度特征分别输入独立的 CEM 模块，逐层提取尺度自适应变化特征；多层变化特征逐层输入 BGM 解码器，深层背景语义约束浅层特征抑制噪声；最终预测头输出二值变化检测图。

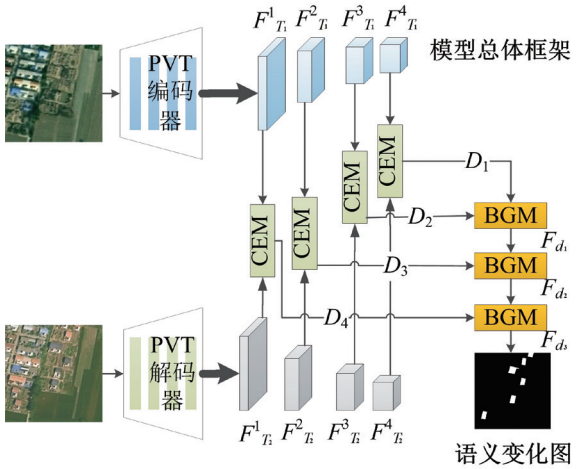


图1　模型总体结构

2.1 孪生金字塔 PVT 编码器

孪生金字塔 PVT 编码器[5]可同步提取双时相深度特征，并减少模型参量，使双时相特征映射空间一致，

作者简介：管怀干（1987—），男，汉族，本科，工程师，注册测绘师，主要从事工程测量、房产测量、摄影测量与遥感等生产研究工作。

便于进行特征差异性对比分析。PVT 共包含四个编码步骤，各步骤由图像嵌入层与 Transformer 编码层组成，逐级下采样获取 4 级多尺度特征，各层级分辨率分别为原图的 1/4、1/8、1/16、1/32，通道数逐级增加，可同步融合浅层纹理细节与高层全局语义信息。若输入双时相影像分别为 x_{T_1}，x_{T_2}，则编码器逐级输出多尺度特征 $F_{T_1}^i$，$F_{T_2}^i$，表达式如下：

$$\begin{cases} F_{T_1}^1, F_{T_2}^1 \in R^{(H/4\times W/4)\times C_1}, & F_{T_1}^2, F_{T_2}^2 \in R^{(H/8\times W/8)\times C_2} \\ F_{T_1}^3, F_{T_2}^3 \in R^{(H/16\times W/16)\times C_3}, & F_{T_1}^4, F_{T_2}^4 \in R^{(H/32\times W/32)\times C_4} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 变化细节增强模块（CEM）

传统依靠差值、特征堆叠分析等提取变化特征方法，易造成边界丢失问题，因此，研究在各编码阶段增加变化细节增强模块（CEM），深度挖掘多尺度变化信息。该模块引入交叉注意力机制，提升模型对变化信息的表征能力，可针对交叉注意力输出特征构建多尺度卷积模块，强化地物变化细节感知能力。

对编码器第 i 级特征图 $\{F_{T_1}^i, F_{T_2}^i\}$，采用交叉注意力机制模型提取 T_1、T_2 时相的变化特征 CA_i，并通过 T_1 时相特征图 $F_{T_1}^i$ 计算获取查询特征 $Q_{T_1}^i$，通过 T_2 时相特征图 $F_{T_2}^i$ 计算键（$K_{T_2}^i$）和值（$V_{T_2}^i$），计算公式如下：

$$\begin{aligned} Q_{T_1}^i &= \mathrm{GroupConv}_1(\mathrm{Conv}_{1\times1}(F_{T_1}^i)) \\ K_{T_2}^i &= \mathrm{GroupConv}_2(\mathrm{Conv}_{1\times1}(F_{T_2}^i)) \\ V_{T_2}^i &= \mathrm{GroupConv}_3(\mathrm{Conv}_{1\times1}(F_{T_2}^i)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中，GroupConvi( ) 表示不同级参数的分组卷积；$\mathrm{Conv}_{1\times1}$ 表示 1×1 卷积，通过交叉注意力机制计算两时相影像像素的相似度，自适应强化变化区域的特征权重、抑制未变化背景特征响应，变化特征 CA_i 的计算公式如下：

$$CA_i = \mathrm{CrossAtt}(Q_{T_1}^i, K_{T_2}^i, V_{T_2}^i) = \mathrm{softmax}\left(\frac{Q_{T_1}^i \cdot (K_{T_2}^i)^{\mathrm{T}}}{\lambda}\right) V_{T_2}^i \quad (3)$$

式中，λ 为通道归一化系数，T 表示矩阵转置运算。将交叉注意力输出特征与双时相原始特征融合，经 1×1 卷积降维，得到初始变化特征 $\hat{D}_i$：

$$\hat{D}_i = \mathrm{Conv}_{1\times1}(CA_i + F_{T_1}^i + F_{T_2}^i) \quad (4)$$

2.2.1 多尺度卷积细节增强

对初始变化特征 $\hat{D}_i$ 进行层归一化处理，沿通道维度均分特征后，分别送入 3×3、5×5 深度可分离卷积，提取多尺度边缘细节，通过 Sigmoid 激活函数，强化空间差异响应，计算公式如下：

$$\begin{aligned} D_{3\times3}, D_{5\times5} &= \mathrm{Div}(\mathrm{Conv}_{1\times1}(LN(\hat{D}_i))) \\ D_{sa} &= \mathrm{Conv}_{1\times1}\left(\begin{bmatrix} \sigma(\mathrm{DWConv}_{3\times3}(D_{3\times3})) \\ \sigma(\mathrm{DWConv}_{5\times5}(D_{5\times5})) \end{bmatrix}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中，DWConv 为深度可分离卷积。

2.2.2 全局通道信息融合

采用全局平均池化（GAP）压缩特征空间维度，结合 3×3 卷积建模通道关联特征，将全局通道特征、多尺度细节特征与初始变化特征逐元素融合，得到最终层级变化特征 D_i 公式：

$$D_i = \mathrm{Conv}_{3\times3}(\mathrm{GAP}(D_{sa})) \odot \hat{D}_i \quad (6)$$

式中，⊙为逐像素乘积运算。

2.3 背景信息引导解码器（BGM）

传统解码器通过转置卷积形式恢复特征原始分辨率，但难以权衡与筛选真实变化细节与伪变化信息，致使浅层特征掺杂噪声，变化目标细节丢失。针对此问题，研究构建双支结构 BGM 解码器，包含前景变化分支与背景分支两部分。

BGM 模块接收上级解码输出特征 $F_{d_{i-1}}$ 与同层级 CEM 输出变化特征 D_i（公式 6），该模块首先对上级解码特征执行上采样，以匹配本级特征分辨率，随后将上采样得到的特征与本级变化特征沿通道维度连接，再通过卷积、归一化以及 ReLU 激活运算，获得真实变化区域的前景特征，计算公式如下：

$$F_{d_i} = \begin{cases} \mathrm{BGM}(D_1, D_2), i = 1 \\ \mathrm{BGM}(F_{d_{i-1}}, D_{i+1}), i > 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$D_i^f = \mathrm{Conv}(\mathrm{Cat}(\mathrm{upsampling}(F_{d_{i-1}}), D_i)) \quad (8)$$

式中，upsampling() 表示上采样、Cat() 表示拼接操作、Conv() 表示卷积、归一化、激活等操作，下同。

依托深层特征稳定的全局背景语义，将上采样后的深层解码特征输入 Sigmoid 激活函数，生成前景注意力权重图 $F_{d_{i-1}}$，对权重图进行 $1-F_{d_{i-1}}$ 操作，获取背景抑制掩码，并与本级变化特征相乘，以滤除噪声引起的虚假变化公式：

$$D_i^b = (1 - \sigma(\mathrm{upsampling}(F_{d_{i-1}}))) \otimes D_i \quad (9)$$

式中，⊗ 表示逐像素乘积运算，σ 为 sigmoid 激活函数，1-σ() 为背景注意力图，并通过下式计算得到本级完整解码输出特征 F_{d_i}：

$$F_{d_i} = \mathrm{upsampling}(F_{d_{i-1}}) + \mathrm{ReLU}(\mathrm{Conv}(D_i^b)) + D_i^f \quad (10)$$

全部解码层级迭代完成后，将解码器末层输出特征送入 1×1 卷积预测头，实现像素级二分类，输出二值化变化检测图 CD，最终预测表达式如下：

$$CD = \mathrm{Conv2}D_{1\times1}(F_d) \quad (11)$$

2.4 损失函数

为解决变化检测任务中正负样本不平衡问题，研究引入 Focal Loss 损失函数，模型训练过程中通过降

低负样本权重比例，优化模型参数，平衡漏检、误检问题，公式如下：

$$\mathrm{FL}(p_t)=-\alpha(1-p_t)^{\gamma}\log(p_t) \quad (12)$$

式中，p_t 为模型预测影像像素类别概率，α 为平衡负样本系数，γ 为难分样本调制系数。研究分别设置平衡系数与难分样本调制系数，α=0.25，γ=2，α 用于均衡背景与变化区域样本权重，γ 用于增强边缘难分像素的损失约束，适配遥感影像变化检测样本分布特征。

3 实验与结果分析

3.1 实验环境

实验选用电脑搭载 NVIDIA GeForce RTX 3090（24G 显存）显卡，模型基于 PyTorch1.10 深度学习框架搭建，采用 Adam 优化器训练，初始学习率设置为 1×10^{-4}，衰减系数为 0.0005，采用余弦退火学习率衰减策略，训练总轮数为 200。训练过程中引入垂直翻转、旋转等策略扩充样本，以保障模型泛化能力。

3.2 不同模型检测成果对比分析

模型对比实验选用国际通用高分遥感变化检测数据集 DSIFN-CD，该数据集以 2m 卫星遥感影像为基底数据源，构建 256×256 像素样本集，样本划分为训练集 2400 对、验证集 1200 对、独立测试集 1320 对。研究各项精度指标均基于独立测试集统计，并选取 4 种主流方法作为对比基线，涵盖传统 CNN、CNN+Transformer 混合、纯 Transformer 三类：FC-Siam-Conc（CNN 孪生基线）；BiT（CNN+Transformer 混合）；S^2CD（纯 Transformer），并引入遥感变化检测领域通用的模型定量评价指标，即精确率（Precision）、召回率（Recall）、F1 分数、交并比（IoU）、总体精度（OA）[6]，衡量模型分类识别效果，横向对比各模型变化检测精度及效果。各模型精度指标统计结果如表 1 所示，模型提取结果对比如图 2 所示。

由表 1 可见，CDETR 全部评价指标达到最优结果：Precision 较 S^2CD 等模型提升 1.41%，IoU 提升 1.76%。Precision 的提升表明研究模型的变化信息检测精准度有所提高，在一定程度上可避免噪声干扰引起的伪变化特征；交并比（IoU）提升表明细节增强及背景引导模块能够优化变化特征轮廓提取精准度。相较于 FC-Siam-Conc、BiT、S^2CD 模型，CDETR 各项性能提升显著，表明 Transformer 全局建模能力对复杂场景变化检测有较大优势，同时 CEM、BGM 模块的引入进一步改善了模型检测精度。研究结果表明，相较于 S^2CD 基线，引入 CEM、BGM 模块后的 CDETR 参数量仅增加 2.44M（增幅约 9.6%），单张 256×256 影像推理耗时仅增加 2.2ms，该方法在实现精度提升的同时，计算开销处于可控范围。

表1 各模型检测精度对比（%）

检测模型	Precision	Recall	F1	IoU	OA
FC-Siam-Conc	91.99	76.77	83.69	71.96	98.49
BiT	89.24	89.37	89.31	80.68	98.92
S^2CD	92.12	89.08	90.58	82.78	99.06
CDETR（研究）	93.53	89.80	91.62	84.54	99.16

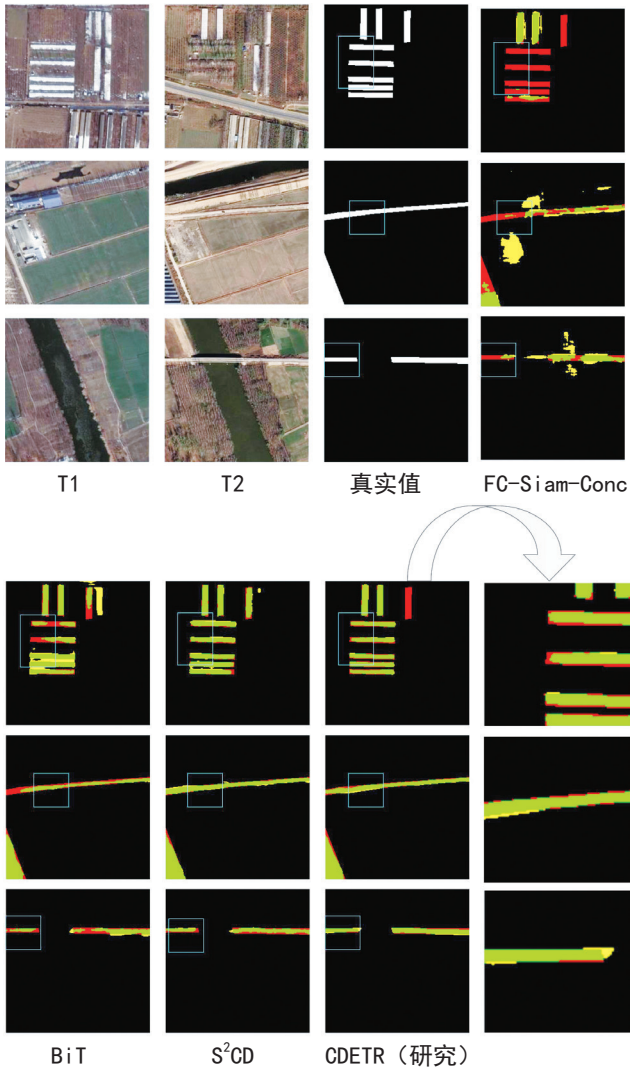


图2 模型提取结果及细节对比分析

3.3 消融实验

为验证 CEM、BGM 模块的有效性，开展模块消融实验，实验结果如表 2 所示。Baseline 为仅保留孪生 PVT 编码器的基础网络；在依次加入 CEM、BGM 模块后，各项精度指标均得到提升。仅增加 CEM 模块时，IoU 提升 3.26 个百分点，说明 CEM 模块能够强化变化地物

（下转第 32 页）

基于改进BSP算法的World Wind三维模型加载方法

张昭[1] 周学军[2] 王星东[3]

(1. 河南中柱建设集团有限公司，河南 郑州 450000；2. 河南省地理信息院，河南 郑州 450003；3. 河南工业大学信息科学与工程学院，河南 郑州 450000)

摘 要：针对开源三维GIS引擎World Wind缺乏三维模型原生加载接口、导致场景构建效率低下的问题，提出一种基于改进BSP算法的单模型及批量模型加载方法。该算法首先利用球体树空间划分策略对传统BSP进行改进，通过粗粒度包围球剔除降低场景遍历计算复杂度；然后基于World Wind平台分别实现单模型加载流程与基于JSON配置的批量加载机制。测试结果表明，与传统BSP算法相比，改进BSP算法将模型平均加载时间由35.76s缩短至24.22s，降幅达32.3%，有效提升了大规模三维场景的渲染速度。

关键词：World Wind；BSP算法；模型加载

1 引言

美国NASA开发的World Wind作为一款开源三维GIS引擎，在科研与工程领域应用广泛，但其原生框架并未提供三维模型（如Collada）的专用加载与场景组织接口。在数字城市、虚拟校园等应用中，通常只能通过对模型文件自行解析，并将几何对象逐个加入场景图，缺乏有效的空间划分与视锥体裁剪机制，致使场景初始化时需进行大量全量解析与遍历计算，易引发模型加载耗时长、显存与内存占用偏高以及视景体剔除效率低造成交互卡顿等问题，严重限制了World Wind在大规模三维场景的应用深度[1]。

针对三维模型加载效率低的问题，现有研究主要分为两个方向：一是模型数据简化，如李玉娟等利用LOD技术加快模型生成[2]；李钦等采用线性四叉树分块算法减少实时渲染数据量[3]；王青云等利用四叉树简化地形，并借助多核CPU并行计算提升效率[4]。这些方法虽能降低数据规模，但在World Wind复杂的球面场景，单纯的数据简化难以从根本上解决场景组织与管理的效率瓶颈。二是空间索引与场景组织，其中BSP（二叉空间剖分）树因良好的空间划分能力而被广泛应用。例如，Olanda等提出小波平铺金字塔结构，实现地形数据压缩，有利于海量地形数据的高效传输与调度[5]。张凯利用BSP树在Vega软件中完成模型加载与虚拟场景管理，实现高效的交互式漫游[6]。然而，传统BSP算法采用细粒度的多边形平面分割策略，在处理World Wind大规模、开放式的球面场景时，会导致计算复杂度急剧增加，反而降低加载与渲染效率。

针对上述问题，研究提出一种基于改进BSP算法的World Wind三维模型加载方法，核心思路是重构BSP空间划分的基本逻辑。传统BSP算法依托多边形平面开展细粒度递归分割，以几何精确性为目标，分割过程易破坏模型原有拓扑结构，且节点数量随场景复杂度呈指数增长。通过引入球体树空间划分策略，将多边形集合的包围球作为最小划分单元，仅当节点内多边形数量超过阈值时进行分割，避免不必要的几何切割。这种粗粒度划分方案将传统BSP逐多边形视锥体裁剪，优化为常数时间的包围球相交测试，能够大幅缩减场景遍历的计算开销。在此基础上，设计基于JSON配置的批量加载机制，实现多模型参数的统一管理与高效调度。实验结果表明，改进BSP算法在加载效率与渲染性能上均优于传统BSP算法。

2 加载研究

2.1 模型加载算法研究

针对World Wind缺乏原生模型加载接口导致渲染效率低下的问题，通过优化底层空间划分架构，摒弃传统立体空间分割方式，引入球体树空间划分策略，从模型底层重构技术框架，实现单一模型独立加载、批量模型批量调度以及三维场景快速初始化功能。算法具体实现如下：

首先，为实现高效的视锥体裁剪，需对空间几何关系进行严格的数学定义。设三维场景任意裁剪平面的齐次坐标为$K=(A,B,C,D)$，其中(A,B,C)为平面法向量，D为偏移量。为判断该平面与经过球体树

作者简介：张昭（1985—），男，汉族，本科，主要从事测绘工程工作。

划分后的节点位置关系，需将平面坐标从世界坐标系变换至裁剪坐标系。设 P 为投影矩阵，M 为世界坐标系到相机坐标系的模型视图矩阵，变换后的平面坐标计算如下：

$$K' = \left[(PM)^{-1}\right]^{T} \cdot K \tag{1}$$

式中，参数 K 用于表征三维场景坐标系平面属性，P 为空间投影变换矩阵，M 则是三维场景初始→目标坐标系转换的变换矩阵。

其次，传统 BSP 算法需要逐多边形进行平面相交测试，计算量大。而改进 BSP 算法则利用球体树节点的包围球进行快速剔除。通过计算变换后的平面法线与视锥体包围盒对角线点积的最大值和最小值，可以判断球体与视锥体的位置关系。点积的最大值 $d_{\max}$ 与最小值 $d_{\min}$ 可通过如下公式求解：

$$d_{\max} = \left|K_x'\right| + \left|K_y'\right| + \left|K_z'\right| \tag{2}$$

$$d_{\min} = \left|K_x'\right| - \left|K_y'\right| - \left|K_z'\right| \tag{3}$$

通过判断点积最小值 $d_{\min}$ 的正负属性，完成三维物体负半空间的判定识别。若 $d_{\min} > R$（球体半径），则球体完全在视锥体外，可直接剔除；若 $d_{\max} < -R$，则球体完全在视锥体内。这一步骤将原本复杂的多边形遍历简化为常数（时间）的球体检测，是提升 World Wind 渲染效率的关键。

再次，在三维场景跨域裁剪过程中，选取区域竖直方向的顶点集合构成凸多边形顶点序列 $V=\{V_1, V_2, V_3, \cdots, V_{n1}\}$，当顶点数据同时满足公式（4）和公式(5)的约束条件时，即可完成新增节点 w 的添加。

$$L \cdot V_i > 0 \tag{4}$$

$$L \cdot V_{i+1} < -\varepsilon \tag{5}$$

其中，参数 L 用于表征空间裁剪平面；ε 为容差阈值，可用于消除浮点数计算误差引起的几何关系误判，参照计算机图形学中几何相交测试的通用设置（$\varepsilon=10^{-6}$）。

因此，研究依托 BSP 空间分割算法求解当前点位与相邻特征点构成的裁剪平面，有效筛除无效遮挡区域，大幅缩减冗余计算开销。

基于球体树划分策略，当节点内多边形数量未超过预设阈值时，不再进行几何切割，而是将其视为一个整体进行空间索引。新增节点 w 的求解公式如下：

$$w = V_i + t\left(V_{i+1} - V_i\right) \tag{6}$$

$$L_i = \left\langle \frac{V_{i+1} \cdot V_i}{\left\| V_{i+1} \cdot V \right\|}, 0 \right\rangle \tag{7}$$

由顶点 V_i 与 V_{i+1} 构造得到全新裁剪平面，求解公式如下：

$$t = \frac{L \cdot V_i}{L \cdot \left(V_{i+1} - V_i\right)} \tag{8}$$

经上述改进，原有的立体空间精细分割方法被优化为球体树空间分割方法。该粗粒度划分方式与 World Wind 地球椭球体瓦片化管理机制高度适配，可有效协同 LOD（层级细节）调度策略。该算法能够先完成模型整体视域剔除，再实施局部精细化渲染，从而显著提升模型加载与渲染效率。

改进 BSP 与传统 BSP 算法的对比分析如下：

传统 BSP 算法利用超平面（多边形平面）对空间进行递归分割，构建二叉树以管理场景内的几何对象。该方法虽可保障空间划分精度，但在处理 World Wind 这类大规模球面三维 GIS 场景时，仍存在如下问题：

（1）分割粒度过细：传统 BSP 算法倾向于对多边形进行精细切割，导致节点数量剧增；树的深度过大，会显著增加遍历产生的计算开销。（2）裁剪测试频繁：在视锥体裁剪阶段，传统 BSP 算法需对每个叶节点的多边形进行逐面与平面相交测试，计算量大。（3）不适合球面场景：World Wind 基于地球椭球体进行瓦片化管理，传统轴对齐或平面对齐的 BSP 分割方式难以与地球曲率及瓦片层级（LOD）有效融合。

针对上述问题，研究提出基于球体树的改进 BSP 算法，核心思路是将原本精细的多边形切割方式转变为以包围球为单元的粗略分割。相较于传统 BSP 算法，改进 BSP 算法在空间划分依据、裁剪测试方式及场景适配性等方面均有显著差异。

在空间划分方面，传统 BSP 算法以多边形所在平面为分割依据，递归细分直至达到设定深度或节点为空；改进 BSP 算法以多边形集合包围球为划分单元，当节点内多边形数量低于预设阈值时停止分割，避免过度拆分几何体。这种粗粒度划分大幅降低树的深度和节点数量，减少场景遍历时计算量，可解决传统 BSP 算法处理大范围复杂场景时复杂度急剧上升问题。

在裁剪测试方面，传统 BSP 算法在视锥体裁剪阶段，需对节点内多边形逐一进行平面相交测试，计算复杂度与多边形数量呈线性关系；改进 BSP 算法利用包围球与视锥体位置关系实现快速剔除。根据公式（2）和公式（3），计算变换后平面法线与视锥体包围盒对角线点积的最大值 $d_{\max}$ 和最小值 $d_{\min}$，在常数时间内判断球体是否位于视锥体，降低裁剪测试计算开销。

在场景适配性方面，传统 BSP 算法的平面分割方

式难以与 World Wind 基于经纬度的瓦片机制和 LOD 调度策略有效结合；而球体树的空间划分方式与地球表面网格分布更为契合，能高效配合 World Wind 的瓦片加载和层级细节管理，实现“先整体剔除，后局部渲染”。

此外，传统 BSP 算法在分割过程中常将一个多边形切割为多个，破坏了模型原有的拓扑结构，增加了渲染批次；改进 BSP 算法通过保留多边形集合的完整性，减少了绘制调用次数，进一步提升了渲染效率。

综上所述，通过将 BSP 的精确平面分割替换为球体树的粗粒度空间划分，研究算法在保证渲染正确性的前提下，大幅降低了 CPU 在场景遍历和裁剪测试中的计算负载，从而提升三维模型加载与渲染速度。

2.2 算法实现

2.2.1 单个模型加载

对预处理后的三维模型数据进行格式转换，统一输出为 dae 标准格式，依托改进 BSP 算法完成单体模型加载处理。结合远程模型渲染技术从底层数据层读取模型数据源，最终实现模型加载解析与平台三维场景的整体初始化，完整算法流程如图 1 所示。

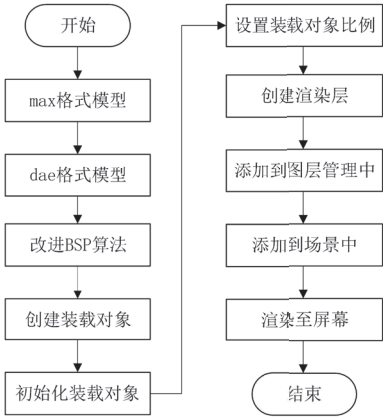


图1　单个模型加载流程

在系统开发阶段，首先，对 max 格式的三维模型源数据进行格式转换处理，将其转化为平台可兼容识别的 dae 通用数据格式，基于改进 BSP 三维空间剖分算法，完成模型数据预处理。通过实例化 World Wind ColladaLoader 类构建模型加载实例 ColladaLoader，导入目标三维模型资源，并将其挂载至场景指定坐标 position 完成场景部署。其次，将模型文件的本地存储路径作为入参传入 ColladaLoader 实例，通过 init 方法完成加载对象的初始化配置，并自定义设置模型缩放比例（scale）、透明度（opacity）等基础显示参数。在此基础上，基于 World WindRenderableLayer 类实例化生成专属模型渲染图层 SModelLayer，依托 wwd 对象的图层挂载接口将新建渲染层接入系统图层管理器，实现图层的场景注册。最后，调用 wwd 对象的界面重绘方法刷新渲染画面，完成三维模型的屏幕可视化加载，最终实现完整的单体模型加载流程。具体实现伪代码如下：

Algorithm 1: Single Model Loading
Input: ModelPath, Position, Scale, Opacity
Output: Rendered Model in Scene
（1）Initialize ColladaLoader with ModelPath
（2）Set Model Position and Scale
（3）Create RenderableLayer
（4）Add RenderableLayer to WorldWind Viewer
（5）Add Model to RenderableLayer
（6） Set Layer Opacity
（7）Redraw Scene

2.2.2 多个模型加载

批量模型加载机制依托单体模型加载技术迭代拓展而来。针对三维场景海量模型资源的加载需求，若逐次重复调用单一模型加载接口，会大幅拉长整体加载耗时、降低系统运行效率，造成代码冗余度高、程序耦合性强、可维护性差等问题。为此，研究预先批量存储多组模型的配置参数与资源信息至配置文件，统一调度加载接口完成批量模型导入，有效压缩场景加载耗时、显著提升三维场景批量建模与初始化效率。

JSON 文件是一种轻量级数据格式，便于网络传输、解析和生成[7]。为此，研究采用 JSON 文件统一存储各类场景模型的参数配置信息，依托 JavaScript 语言完成结构化数据解析，实现多模型自动化批量加载，有效降低模型配置难度，提升场景参数的可编辑性与通用性。大批量三维模型加载时，模型数据量不宜超出系统设置的缓冲区上限，否则容易引发浏览器崩溃，缓冲区大小应当与模型数据量相匹配[8]。

程序运行时，通过异步请求获取 JSON 配置文件，解析得到各模型的文件路径、位置及渲染参数，循环调用单模型加载接口完成场景构建。此方法能有效降低系统耦合度，提升模型加载效率。多模型批量加载伪代码如下：

Algorithm 2: Batch Model Loading
Input: JsonConfigFile
Output: Multiple Rendered Models
（1）Load JsonConfigFile
（2）Parse JSON to get ModelList

（3）For each model in ModelList:

a. Get LayerName, Position, Path, Scale, Opacity

b. Call SingleModelLoading(Path, Position, Scale, Opacity)

（4）End For

3 实验结果

3.1 开发环境

（1）硬件运行环境

为保障平台开发调试与稳定运行，满足二三维图形高效渲染、场景绘制等核心图形处理需求，研究所采用的硬件设备配置参数如下：

中央处理器采用 Intel Core i5-9400，主频 2.90GHz，为三维场景运算与数据处理提供稳定算力保障；系统搭载 16GB DDR4 2666MHz 高速内存，适配多模型批量加载、场景初始化、数据解析等并行运算任务；图形硬件配置为NVIDIA GeForce GTX 1660独立显卡，搭载 6GB GDDR5 高速显存，显存位宽达 192bit，高效支撑复杂三维场景渲染、模型可视化绘制等高性能图形计算任务；存储介质选用 Intel 500GB 高速固态硬盘，提升模型数据读写与系统响应速度；显示终端采用常规标准显示器，支持 1366×768 分辨率，满足系统开发调试、场景可视化需求。

（2）软件环境

为适配平台三维场景开发、模型数据处理、功能调试与稳定运行全流程需求，研究搭建了配套的标准化软件运行开发环境，具体如下：

底层操作系统选用 Windows 10 系列版本；三维场景开发依托 World Wind 开源框架搭建整体技术架构；程序代码编写与项目开发调试采用 JetBrains WebStorm 2022.2.3 开发工具；空间数据存储与管理选用 PostgreSQL/PostGIS 开源空间数据库，可高效适配极地空间地理数据的存储、检索与分析处理；服务端程序依托 Node.js 环境部署运行，保障后台业务逻辑高效调度；系统兼容 Microsoft .NET Framework 4.0 基础运行框架，为程序功能稳定运行提供底层软件支撑；前端可视化适配多类主流浏览器，包含 IE 11 及以上版本、Chrome、Opera、Firefox、搜狗浏览器等，保障平台具备良好的通用性与适配性。

3.2 实验结果

实验选用某高校数字校园三维建筑模型数据集进行加载测试，共加载校园主体建筑模型 32 个，单体模型三角面片数介于 4800～28000 之间，场景总三角面片数约 86 万，纹理主要采用 512×512 及 1024×1024 分辨率 JPEG/PNG 格式，单模型 .dae 文件大小为 0.4～3.2MB，模型数据总量约 68MB。模型通过 JSON 配置文件指定经纬度偏移、缩放比例及透明度参数。

为保证对比公平性，选取传统 BSP 算法作为基线，采用多边形平面递归分割，视锥体裁剪为逐多边形平面相交测试，不引入球体树及包围球预剔除；其余模型解析、渲染层构建及场景重绘流程与改进算法一致。

采用基于球体树划分的改进 BSP 算法，成功在 World Wind 引擎实现校园三维建筑模型的批量加载，加载效果如图 2 所示，场景渲染流畅，模型显示完整，验证了该算法在实际应用中的可行性。

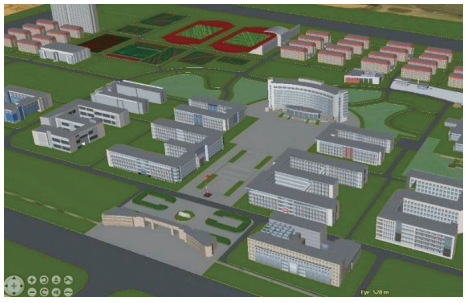


图2 基于改进BSP算法的World Wind三维模型批量加载效果

研究在网络状态、模型数量一致的统一测试环境下，对改进 BSP 算法模型加载方案与传统加载方法开展对比实验，每组实验重复运行 5 次，保证测试结果的可靠性与稳定性。两组技术方案的模型加载耗时对比如表 1 所示，渲染性能指标对比（在相同硬件环境，以相同校园场景持续渲染 30 秒取均值）如表 2 所示。

表1 改进BSP算法模型加载与未改进模型加载方法对比

运行次数	传统BSP算法	改进BSP算法
1	35.32s	23.56s
2	36.51s	24.06s
3	35.83s	24.13s
4	36.48s	23.81s
5	34.68s	25.15s

表2 渲染性能指标对比

性能指标	传统BSP算法	改进BSP算法
平均渲染帧率（FPS）	38.2	52.6
内存占用（MB）	486	412
CPU占用率/%	27.4	19.8

由表 1 可知，改进 BSP 算法的加载效率显著优于传统 BSP 算法。5 次重复测试中，改进算法的加载时间介于 23.56～25.15s 之间，平均值为 24.22s；而传统 BSP 算法的加载时间介于 34.68～36.51s 之间，平

均值为35.76s。改进算法平均加载耗时较传统算法缩短11.54s，降幅达32.3%。

为进一步验证改进BSP算法性能提升的可靠性，对两组各5次的模型加载时长数据开展独立样本t检验。结果表明，改进BSP算法平均加载时间为2422.2±56.3ms，显著低于传统BSP算法的3576.4±78.6ms，二者差异具有高度统计学意义（t=28.47，p＜0.001）。由此证实，研究所提改进算法在加载效率方面具备显著优势。

4 结论

基于World Wind开源三维GIS引擎，提出一种融合球体树空间划分策略的改进BSP三维模型加载方法，实现单模型加载与基于JSON配置的批量加载。实验结果表明，该算法有效解决了原生框架缺乏模型加载接口导致的效率低下问题；在校园建筑模型场景测试中，平均加载时间降幅约32.3%（p＜0.001）；同时，渲染性能得到显著优化，平均渲染帧率增幅约37.7%，系统资源占用也明显下降：内存占用由486MB降至412MB，CPU占用率由27.4%降至19.8%。该方法可为大规模三维GIS场景的高效构建提供技术参考。

参考文献

[1] 于淑云,马继军.基于WorldWind的三维模型植入研究[J].电脑知识与技术,2013,7(30):7356-7357,7366.

[2] 李玉娟,谭同德.三维场景中大规模地形地貌的生成[J].计算机应用与软件,2013,30(11):131-135.

[3] 李钦,戴树岭,赵永嘉,等.分块LOD大规模地形实时渲染算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2013,25(5):708-713.

[4] 王青云,罗泽.基于LOD的海量地形数据并行渲染技术[J].计算机系统应用,2017,26(12):200-206.

[5] Olanda R,Perez M,Orduna J M,et al.Improving hybrid distributed architectures for interactive terrain visualization[J].Journal of Supercomputing,2017,73(1):17-28.

[6] 张凯.沉浸式三维虚拟漫游技术研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2016,39(1):104-106.

[7] CROCKFORD D. Introducing JSON[EB/OL].(2006)[2026-07-02]. https://www.json.org.

[8] MOZILLA DEVELOPER NETWORK. WebGL best practices[EB/OL].(2023)[2026-07-02]. https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API/WebGL_best_practices.

（上接第27页）

边缘细节；仅增加BGM模块时，IoU提升2.56个百分点，体现BGM模块对伪变化噪声有抑制效果。当两个模块共同作用时取得最优检测结果，证明CEM与BGM模块可协同发挥作用，共同提升模型变化检测性能。

表2 模块消融实验结果（%）

实验配置	Precision	Recall	F1	IoU
Baseline（仅PVT孪生骨干）	90.26	86.14	88.15	78.82
Baseline+CEM	92.07	88.32	90.16	82.08
Baseline+BGM	91.81	87.75	89.74	81.38
Baseline+CEM+BGM（完整CDETR）	93.53	89.8	91.62	84.54

4 结论

针对现阶段变化检测模型存在差异特征提取能力不足、变化边界细节不完整、噪声导致误提取问题，研究提出一种引入细节增强与背景引导的Transformer检测网络，通过细节增强模块CEM，引入跨时相交叉注意力，结合多尺度卷积感知地物边缘，弥补固定Token分块造成的细节丢失；同时引入背景信息引导解码器模块BGM，深度挖掘深层特征背景语义，生成注意力权重，实现噪声滤除与细节保留。模型对比结果显示，研究提出的检测模型在Precision、Recall、F1、IoU等指标上均优于FC-Siam-Conc、BiT、S^2CD检测模型，整体精度较好，验证了该模型在遥感影像变化检测任务中的有效性与优越性。

参考文献

[1] 张祖勋,姜慧伟,庞世燕,等.多时相遥感影像的变化检测研究现状与展望[J].测绘学报,2022,51(7):1091-1107.

[2] 刘英,何雪,李单阳,等.注意力引导全尺度连接网络的高分辨率影像变化检测[J].遥感学报,2024,28(4):1052-1065.

[3] 刘文力,高峰,张浩鹏,等.基于通道变换和Transformer的高光谱图像变化检测方法[J].计算机学报,2025,48(4):971-984.

[4] 苏志鹏,王欢,潘清莹.基于可变形卷积与Transformer的遥感影像变化检测方法[J].遥感信息,2026,41(1):155-162.

[5] Wang W H, Xie E Z, Li X, et al. Pyramid vision transformer: A versatile backbone for dense prediction without convolutions [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Montreal:IEEE,2021:568-578.

[6] 李健慷,张桂欣,祝善友,等.融合多尺度特征Transformer的高分辨率遥感图像变化检测[J].遥感学报,2025,29(1):265-277.

大高差山区环境下GNSS B级网观测精度控制策略研究——以水布垭大坝监测网为例

胡霓　张康　杨威

（湖北清江水电开发有限责任公司，湖北 宜昌 443000）

摘　要：大高差山区GNSS静态观测受对流层延迟、多路径及卫星遮挡影响显著，高程误差尤为突出，现行规范对复杂峡谷工况缺乏细化规定。以水布垭大坝（233m）GNSS B级监测网为例，分析主要误差源及机理，从网形优化、点位埋设、仪器标定、外业管控、内业解算、质量检核六个维度构建全流程精度控制体系，形成针对GB/T 18314—2024的工程化补充。采用多系统融合、提高截止高度角、延长观测时段、精密对流层估计、抗差平差及多环闭合检核等措施，有效削弱大高差引起的残余误差。实测表明，基线水平中误差优于5mm，垂直优于10mm，相对精度优于1×10^{-7}，环闭合差满足规范要求，达到B级网精度与大坝监测基准需求。研究成果可为同类山区高坝工程GNSS基准网建设提供参考。

关键词：GNSS B级网；大高差山区；大坝变形监测；精度控制；对流层延迟

1　引言

我国已建高面板堆石坝多分布于高山峡谷地区，坝高坡陡、地形起伏剧烈、局地气候复杂，对外部变形监测基准的精度与稳定性提出极高要求。GNSS技术凭借全天候、全自动、三维同步定位优势，已成为高坝工程变形监测基准构建的核心手段。GNSS B级网作为国家级高精度控制框架，其观测精度直接决定大坝监测的可靠性与长期稳定性。

在大高差山区环境，对流层延迟垂直梯度变化剧烈。经相关实例数据分析表明，高差对基线解算的残余对流层延迟影响较大，经验模型改正后的残余误差显著，对垂直定位精度影响尤为突出；山体遮挡与库区水面等强反射界面会加剧多路径效应，容易导致模糊度固定率下降、高程误差放大。现行《全球导航卫星系统（GNSS）测量规范》（GB/T 18314—2024）虽明确规定了B级网精度指标，但对大高差、高遮挡及复杂气象耦合等特殊工况的观测与解算缺乏细化规定，致使工程实践中大多依赖经验作业，成果质量参差不齐。

针对上述问题，已有专家学者开展了相关研究探索，例如姚宜斌等[1]构建了大高差对流层改正模型；蒋光伟等[2]引入对流层约束改善网平差稳定性；黄观文等[3]将GNSS技术应用于边坡与滑坡监测，取得一系列研究成果。然而，针对200m级超高面板堆石坝、深切割峡谷环境的B级网全流程精度控制体系，现有研究仍较为薄弱，缺乏可直接推广应用的工程化实施方案。

鉴于此，以水布垭大坝GNSS B级监测网为工程载体，从网形设计、外业观测、内业解算、质量检核全链条构建精度控制策略，形成针对大高差山区环境的可复制质控方案，并通过实测数据验证其有效性，以期为同类工程提供技术参考。

2　工程概况与GNSS B级网技术要求

2.1 水布垭坝区环境特征

水布垭水利枢纽位于湖北省清江干流中游，是清江流域梯级开发的控制性工程。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高233m，坝顶长666m，坝体填筑量大、受力条件复杂，运行期间需对坝体沉降、侧向位移及两岸边坡稳定性开展精密监测。坝区属典型高山峡谷地貌，两岸山体高耸陡峭，河道狭窄深切，基准点与监测点相对高差普遍为200～600m。区域植被以常绿阔叶林和灌木为主，部分点位邻近库区水面、陡崖及裸露基岩，易形成强反射界面。当地属亚热带湿润季风气候，全年湿度大、雾天多、水汽含量高，对流层湿延迟时空变化剧烈，昼夜温差与局地云雾易引发大气折射异常，成为制约GNSS高精度观测的主要不利因素。水布垭坝区地理位置如图1所示。

作者简介：胡霓（1987—），男，汉族，本科，高级工程师，主要从事水利水电安全监测研究工作。

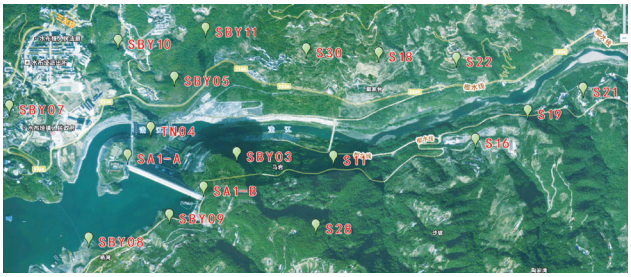


图1　水布垭坝区地理位置

2.2 GNSS B 级网精度指标

依据《全球导航卫星系统（GNSS）测量规范》（GB/T 18314—2024），结合大坝变形监测专项需求，水布垭坝区 GNSS B 级基准网主要精度指标如表 1 所示。

表1　GNSS B级网精度指标要求

精度指标	规范要求	工程控制目标
相邻基线水平分量中误差	≤5mm	≤5mm
相邻基线垂直分量中误差	≤10mm	≤10mm
基线相对精度	优于1×10^{-7}	优于1×10^{-7}
环闭合差	坐标分量≤5mm；环线全长≤10mm	坐标分量≤4mm；环线全长≤8mm
重复基线较差	$\leq2\sqrt{2}\sigma$（σ为基线中误差）	水平≤8mm；垂直≤15mm

2.3 大高差山区观测核心难点

（1）对流层延迟差异显著。大高差导致测站间天顶对流层延迟（ZTD）差异可达厘米至分米级，标准模型改正残余误差大，垂直方向系统偏差突出。

（2）多路径效应强烈。山体、水面、岩面反射造成观测值抖动、信噪比下降、模糊度固定困难。

（3）卫星遮挡严重。峡谷地形导致低仰角卫星易被遮挡，可见卫星数量减少，位置精度衰减因子（PDOP）值偏大，定位几何强度减弱。

（4）局地气象扰动频繁。云雾、湿度突变、昼夜温差等极易引发大气折射异常，影响解算稳定性与高程精度。

3　大高差山区 GNSS 观测主要误差源分析

3.1 对流层延迟误差

对流层延迟是 GNSS 信号因大气折射率变化产生的传播延时效应。对流层为非色散介质，延迟量取决于折射率沿路径的积分，折射率由干分量（气压、温度）和湿分量（水汽压、温度）组成。在大高差山区，测站高程差异会导致大气密度分布明显不同，湿延迟随高程指数衰减，垂直梯度达 -40～-80mm/km。当测站高差超过 200m 时，天顶湿延迟差异可达 30～100mm。常规经验模型（Saastamoinen、Hopfield）采用标准大气剖面，难以表征局地水汽的垂直非均匀分布特征，残余误差会直接映射至高程分量。因此，需采用分段随机参数估计，结合实测气象约束，方能有效削弱对流层延迟误差。

3.2 多路径效应误差

多路径效应是直达信号与反射信号在接收天线处的相干叠加，反射信号存在附加路径延迟、相位偏移和幅度衰减问题，导致载波相位测量值出现周期性波动。山区陡峭岩壁、库区水面、湿润土壤等地物的反射系数可达 0.3～0.8，使伪距观测值产生米级偏差，载波相位多路径误差理论上限为 1/4 波长（约 5cm），但其低频分量难以通过差分消除。水布垭坝区的多路径干扰主要表现为载波相位抖动、信噪比降低、模糊度固定率下降，在毫米级精度控制要求下，该误差不可忽视。

3.3 电离层与卫星轨道误差

电离层为色散介质，延迟量与电子总含量（TEC）成正比、与频率平方成反比。双频消电离层组合可消除一阶项（约 99.9%），但二阶（厘米级）和三阶残余不可忽略。湖北地处磁纬 20°～40°，春秋分时节电离层扰动易引发周跳与模糊度固定失败。卫星轨道方面，IGS 精密星历的残余误差随基线长度累积。因此，须采用多系统融合观测、精密星历与长时段观测方法。

3.4 仪器安置与操作误差

在毫米级精度控制下，天线对中整平偏差、天线高量取误差、天线指北偏差、强制对中基座微形变等均会直接影响成果质量。水布垭坝区基准墩长期暴露野外，受温度、风载、雨水侵蚀影响，标石可能出现微小位移，若外业操作不规范，极易引入系统性偏差，导致基准网内部一致性下降。

4　GNSS B 级监测网优化设计与点位布设

4.1 网形优化设计原则

研究遵循“稳定优先、几何强健、冗余充足、便于复测”原则，采用两级网形结构：

（1）外围布设深埋基岩点，构成核心 B 级基准网，保证框架稳定；

（2）内部衔接坝体、边坡监测点，实现基准统一、全网联动。

两级网形以三角形与大地四边形闭合环为主，保证每个测点具备多条独立基线，以提高抗粗差能力与平差可靠性。同步观测时，要布设充足的冗余基线，

便于粗差识别与剔除。GNSS B级监测网网形布置如图2所示。



图2 GNSS B级监测网网形布置

4.2 点位选址与埋设控制

点位选址要求如下：（1）布设于完整基岩、地质稳定区，避开滑坡体、破碎带及岩溶区；（2）远离库区水面、陡崖等强反射界面，抑制多路径；（3）确保仰角15°以上无遮挡。观测墩采用钢筋混凝土强制对中基座，深埋浇筑，配套防雷、防水、防盗设施，从源头降低误差，保障点位长期稳定。

4.3 仪器设备选型

采用四系统多频高精度GNSS接收机，支持BDS观测；配备抗多路径扼流圈天线；外业同步布设精密气象仪，逐时记录气温、气压、湿度；辅以高精度全站仪进行边长外部检核。

5 外业静态观测与内业数据处理精度控制

5.1 外业观测精度控制

5.1.1 观测参数优化设置

结合大高差山区特点，观测参数从严控制：（1）截止高度角提高至15°；（2）同步有效卫星数≥6颗；（3）单时段连续观测≥23h；（4）全网统一采样率，同步开关机。

执行“长时段、多重复、强冗余”策略：每点完成不少于3个独立观测时段，每个时段大于23h；同步观测设置15%以上冗余基线，实现粗差自动识别，模糊度固定率稳定在98%以上。

5.1.2 观测时段与气象条件优选

基于2018～2023年连续观测数据的统计结果，水布垭坝区最佳观测窗口期为每年12月20日至次年3月20日，其中12月25日至次年1月20日为黄金时段。该时段水汽含量低、对流层延迟小、电离层TEC稳定，多路径误差≤3mm，模糊度固定率达99.2%，较其他季节提升12～15个百分点，不同季节的观测条件与精度对比如表2所示。观测应避开恶劣天气，同一闭合环内基线同步连续观测，每小时记录气象参数。

表2 不同季节观测条件与精度统计

时段	平均气温/℃	相对湿度/%	平均水汽压/hPa	水平中误差/mm	垂直中误差/mm	模糊度固定率/%
冬季（12~翌年2月）	5.2	68.5	6.8	2.1	4.8	97.6
春季（3~5月）	14.6	79.2	13.5	3.8	8.5	86.3
夏季（6~8月）	24.3	85.7	21.2	4.2	9.8	82.7
秋季（9~11月）	15.8	78.6	12.8	3.5	7.9	89.1

5.1.3 现场作业标准化管控

天线对中整平误差≤1mm；天线高量取三次，互差≤2mm，取均值；天线严格指北；实时监测接收机状态、数据完整率、信噪比及PDOP；外业当日完成数据初检，出现异常及时补测。

5.2 内业数据准备与误差改正

5.2.1 解算软件与基础数据

采用专业高精度GNSS数据处理软件，引入IGS最终精密星历、地球自转参数及官方天线相位中心改正模型。

5.2.2 关键误差精密改正

（1）对流层延迟：采用“先验模型+分段湿延迟随机参数估计”策略。干对流层天顶延迟（ZHD）由Saastamoinen模型基于实测气压计算；湿对流层天顶延迟（ZWD）作为随机游走过程状态参数，通过逐时段卡尔曼滤波进行估计（谱密度1～5mm/$\sqrt{h}$）。针对大高差基线，引入高程约束的指数衰减垂直梯度函数，通过局部梯度参数关联不同高程测站的湿延迟，以此削弱垂直方向残余偏差。

（2）电离层抑制：采用双频消电离层组合：

$$L_{LC}=\frac{f_1^2\cdot L_1-f_2^2\cdot L_2}{f_1^2-f_2^2}$$

式中，L_{LC}为无电离层组合（Ionosphere-Free Combination）；L_1、L_2分别为$L1$、$L2$载波相位观测值，单位为m。利用该组合消除电离层一阶项，引入几何

无关组合（Geometry-Free，GF）作为检验量，识别并剔除高阶残余污染时段。

（3）抗差估计：采用休伯估计型（Huber）抗差估计，该方法的权函数在残差小于阈值时采用平方型权函数（保证正常观测值的效率），残差超过阈值时采用线性权函数（抑制异常值影响）。阈值 c 取 1.5～2.0 倍中误差，对超阈值观测值进行降权而非剔除，通过迭代计算辨识并抑制周跳与粗差影响，提高基线解算的稳健性。

（4）模糊度固定：采用最小二乘模糊度降相关平差法（LAMBDA）进行模糊度固定，利用固定解与次优浮点解残差二次型比值（Ratio）判定固定质量。针对固定率偏低的基线，采用“宽巷（Wide-Lane，WL）-窄巷（Narrow-Lane，NL）”逐级固定策略，降低模糊度搜索空间维度，可将模糊度固定成功率提升至 98% 以上。

5.3 基线检核与全网平差

首先开展三维无约束平差，剔除粗差基线；再引入国家高等级 GNSS 点作为起算基准，开展约束平差；检核同步环、异步环闭合差与重复基线较差，满足规范要求后提交成果。

5.4 多级质量检核验收体系

建立三级质控：一级外业自检（数据完整性、点位记录、气象资料、天线高）；二级基线互检（闭合差、重复基线较差、模糊度固定率、解算残差）；三级平差终检（点位中误差、基线相对精度），并与全站仪边长、精密水准成果外部比对验证。

6 工程实测精度分析

采用上述策略完成水布垭大坝 GNSS B 级网的观测与解算。此次共布设基准点 2 个、解算点 4 个，形成闭合环 15 个、独立基线 31 条、重复观测基线 15 条。实测精度统计结果分别如表 3、表 4、表 5 所示。

表3 基线向量坐标差统计

序号	基线起点	基线终点	D_X/mm	D_Y/mm	D_Z/mm	限差/mm
较差最小基线	TN04	Z2	0	0.2	0.4	3.2
较差最大基线	SA1-A	SBY09	1.4	-2.4	-1.7	3.6

从表 3 可以看出，较差最大基线为 SA1-A～SBY09，D_Y 分量较差为 -2.4mm，满足 ±3.6mm 限差要求。

表4 环闭合差统计（mm）

项目	闭合差	ΔX	ΔY	ΔH	ppm	备注
最优环	0.1	0	0	0.1	0.08	优
最差环	6.0	2.3	-3.4	-3.3	1.73	合格

从表 4 可以看出，最差环闭合差坐标分量为 3.4mm，在 ±4mm 范围内。

表5 重复基线较差统计（mm）

项目	起点点名	终点点名	较差	限差	结论
最小重复基线较差	SBY10	SA1-A	0.1	6.3	合格
最大重复基线较差	SA1-A	SBY09	0.8	5.1	合格

从表 5 可以看出，最大重复基线较差为 0.8mm，均小于相应限差（5.1mm），满足规范要求。

统计结果表明，研究构建的精度控制体系可有效克服山区大高差、复杂气象条件与多路径干扰的影响，实现毫米级高精度定位，完全满足大坝长期变形监测基准要求。

7 结语

研究以水布垭大坝 GNSS B 级监测网为例，针对大高差高山峡谷环境，构建全流程精度控制技术体系。对流层湿延迟差异与多路径效应，是制约垂直分量精度的主要因素；通过将卫星截止高度角提高至 15°、单次观测时段延长至 23h 以上、引入分段湿延迟及抗差估计等措施，基线解算精度得到显著提升，模糊度固定率稳定在 98% 以上。

工程实践表明，在优化观测与解算策略下，全网基线水平分量中误差优于 5mm、垂直分量中误差优于 10mm，同步环、异步环闭合差及重复基线较差均满足规范限差要求，研究建立的三维基准具备良好的内符合精度与长期稳定性，可为水布垭大坝及同类高坝工程提供稳定可靠的空间基准。

后续研究可进一步融合北斗三号新信号以增强观测冗余与可用性，结合 InSAR 及精密水准观测实现多源监测数据融合，构建基于实时气象参数的对流层延迟动态改正模块，推动 GNSS 监测系统向自动化、智能化及动态基准实时更新方向发展，持续提升高坝工程安全监测技术水平。

参考文献

[1] 姚宜斌,张良,张琦,等.面向大高差RTK的对流层延迟改正模型及实时差分服务构建[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1019-1028.

[2] 蒋光伟,王盼龙,郭春喜,等.附加对流层约束的大高差区域短时GNSS网解算及其性能[J].测绘学报,2022,51(11):2255-2264.

[3] 黄观文,陈孜,徐永福.膨胀土边坡GNSS实时监测技术[J].测绘学报,2023,52(11):1873-1882.

YOLO-GS：面向复杂场景的无人机道路病害检测算法

宋丽丽　宋幸龙　耿志强

（河南四维远见信息技术有限公司，河南 郑州 450001）

摘　要：针对无人机道路病害检测中复杂背景干扰、多尺度特征融合不足的问题，提出改进的检测算法 YOLO-GS。该算法以 YOLOv11 为基线，通过引入全局特征金字塔网络（GFPN）增强跨尺度特征交互，并结合 Slide Loss 动态优化难易样本的梯度贡献。其中，GFPN 采用 CSPStage 结构，实现浅层细节特征与深层语义特征的双向融合，有效缓解了梯度冗余，增强了多尺度特征传递效率；Slide Loss 则以训练批次中候选框 IoU 的算术平均值作为自适应阈值，对困难样本赋予更高权重，从而平衡模型对不同尺寸目标的检测能力。在 UAPD 数据集的实验表明，YOLO-GS 的 mAP@0.5 达到 68.5%，较基线 YOLOv11（63.2%）提升 5.3 个百分点，mAP@0.5∶0.95 达到 40.7%，精确率和召回率分别为 68.7% 和 63.9%，在检测精度上均优于 YOLOv5、YOLOv10 等对比算法，同时，保持了 158 FPS 的实时检测速度，验证了在复杂场景的有效性与鲁棒性。

关键词：无人机道路病害检测；YOLO-GS；全局特征金字塔网络；Slide Loss

1　引言

道路病害精准检测是保障路面结构完整性与行车安全的关键环节。裂缝、坑洞等早期病害若未能及时识别，将在荷载与水侵等作用下急剧扩展，显著加剧养护成本，更可能诱发严重交通事故[1]。传统人工巡检方式效率低、成本高，难以满足现代化道路养护需求[2]。近年来，无人机平台因操作灵活、可获取大范围高分辨率影像等优势，结合深度学习目标检测算法，为道路病害自动化检测提供了可行路径[3]。

道路病害检测技术经历从传统图像处理到深度学习方法的演进。早期研究主要依赖边缘检测、阈值分割及小波变换等浅层特征算子，实现裂缝识别[4]，此类方法计算效率较高，但对光照变化、阴影遮挡及路面污渍等环境干扰极为敏感，鲁棒性不足。随着深度学习技术的发展，基于卷积神经网络的方法成为主流。以 Mask R-CNN 为代表的两阶段检测框架和以 SSD 为代表的单阶段检测框架被相继应用于路面病害检测[5]，前者检测精度较高但推理速度难以满足无人机实时巡检需求，后者虽提升了检测效率但在多尺度特征融合方面仍存在局限。近年来，Transformer 架构凭借自注意力机制在长程依赖建模上的优势被引入裂缝检测领域，在复杂纹理识别上展现出潜力，但参数量与计算开销对无人机边缘端部署构成显著挑战。

在诸多目标检测算法中，YOLO 系列凭借端到端推理架构与实时性优势受到广泛关注。其中，YOLOv11 作为该系列较新版本，在检测速度与计算效率方面均有显著提升，可作为进一步优化的基础模型。针对道路病害检测任务，已有研究在 YOLO 框架上开展了多方面改进。例如，张振海等[6]面向隧道病害场景提出轻量化检测网络 MDS-YOLO；胡晓伟等[7]通过融合状态空间模型构建了 YOLOM。然而，现有方法仍面临以下关键瓶颈：

（1）无人机视角下，道路病害目标尺度变化剧烈、形态复杂，且背景干扰严重。传统特征金字塔网络（如 FPN）难以有效融合跨尺度特征，导致多尺度病害检测精度不足，尤其对小尺寸病害目标的召回率有限。

（2）道路病害样本常伴随阴影遮挡、低对比度等干扰因素，致使困难样本天然稀疏。常规损失函数对此类样本的梯度贡献不足，导致模型在复杂场景下误检率较高，制约了自动化检测的实际应用效能。

基于上述分析，以 YOLOv11 为基准模型，针对道路病害检测任务对网络结构进行优化，提出一种改进型检测算法 YOLO-GS。该算法围绕特征提取、特征融合及目标定位等关键环节展开优化，旨在增强模型对道路病害目标的表征能力，提升检测精度与定位性能，并改善模型在复杂场景下的鲁棒性与泛化能力。

作者简介：宋丽丽（1987—），女，汉族，本科，工程师，主要从事遥感变化监测和遥感算法应用研究工作。

2 研究方法

2.1 YOLO-GS

YOLOv11 在检测速度与计算效率方面具有良好性能。面向无人机航拍影像道路病害检测任务，针对病害尺度多变、背景复杂导致的多尺度特征融合能力不足、检测精度受限等问题，研究引入全局特征金字塔网络（Global Feature Pyramid Network，GFPN），强化跨层特征交互，并结合滑动损失（Slide Loss）优化难易样本的梯度贡献，构建了改进型道路病害检测模型 YOLO-GS，结构如图 1 所示。

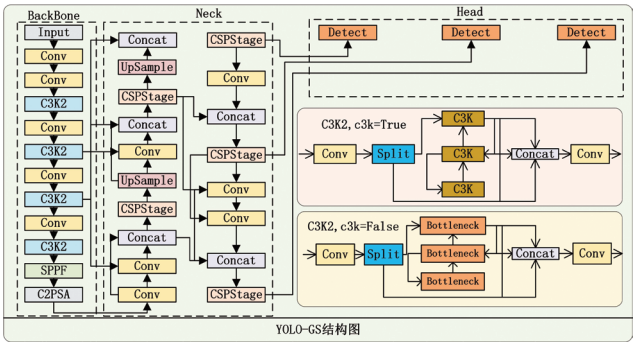


图1 YOLO-GS结构

2.2 全局特征金字塔网络（GFPN）

在无人机道路病害检测任务中，由于病害目标尺度差异较大，且易受复杂背景和光照变化影响，传统特征金字塔网络（FPN）主要采用单向特征融合方式，对多尺度目标的特征表达能力有限。为增强网络对不同尺度病害目标的检测能力，在 YOLO 模型中引入全局特征金字塔网络（GFPN）。

GFPN 通过增加跨尺度连接和多层特征融合机制，实现浅层细节特征与深层语义特征充分交互。其中，浅层特征空间分辨率较高，能保留裂缝、坑槽等小目标的纹理信息；深层特征则具有丰富的语义信息，有助于提升目标识别能力。GFPN 利用双向特征传递和跳跃连接，使不同层级特征充分融合，增强网络对多尺度目标的表达能力。GFPN 的工作流程如图 2 所示。

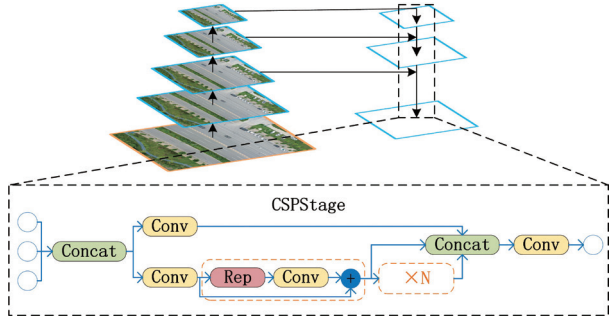


图2 GFPN工作流程

GFPN 以 CSPStage 作为基础特征提取单元，该模块将输入特征划分为两个分支：一个直接参与跨层特征融合，另一个通过卷积运算进行深层特征提取，最终对两支输出进行融合。该结构能有效抑制冗余计算，提升特征利用效率，同时保障梯度传播稳定性。在 YOLO-GS 中，GFPN 替代原 YOLOv11 的 Neck 结构，接收骨干网络输出的 P3、P4、P5 三个尺度特征作为输入，通过自顶向下与自底向上相结合的双向融合路径实现多尺度特征信息交互。各融合节点采用 Concat 操作完成特征拼接，并利用 CSPStage 提取融合特征，最终输出三个尺度的检测特征图，为后续 DySample 动态上采样与检测头提供更丰富的语义表征。设输入特征为 X，CSPStage 的输出 Y 可由公式（1）表示：

$$\begin{cases} X_1, X_2 = \mathrm{Split}(X) \\ Y_1 = F(X_1) \quad \text{(多层卷积操作)} \\ Y = \mathrm{Concat}(Y_1, X_2) \\ Y = \mathrm{Conv}_{1\times1}(Y) \quad \text{(融合后卷积降维)} \end{cases} \tag{1}$$

其中，将 $\mathrm{Split}(X)$ 输入通道均分为两部分（或按比例划分）；$F(X_1)$ 为主分支的卷积序列，可包含残差连接或注意力模块；$\mathrm{Concat}(Y_1, X_2)$ 沿通道维度拼接特征，保留深浅层信息的互补性。

2.3 Slide Loss

在道路病害检测任务中，病害目标尺寸和形状存在差异，且无人机航拍影像普遍存在遮挡、扭曲和模糊等情况，导致不同目标的识别难度不一。通常，容易样本占比较高，困难样本分布相对稀疏。基线模型 YOLOv11 采用的损失函数未能有效平衡模型对难易样本的关注度，训练时模型更关注容易样本，困难样本得不到充分训练，最终造成困难样本检测精度偏低。

通过引入 Slide Loss 损失函数以缓解样本不平衡问题，重点增强模型对困难样本的拟合能力。Slide Loss 加权机制以预测框与真实框之间的 IoU 为依据，通过自适应阈值对困难样本赋予更高权重，强化其在训练过程中的梯度贡献。Slide Loss 加权函数公式为：

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \leqslant \mu - 0.1 \\ \mathrm{e}^{1-\mu}, & \mu - 0.1 < x < \mu \\ \mathrm{e}^{1-x}, & x \geqslant \mu \end{cases} \tag{2}$$

其中，μ 表示所有样本的平均 IoU，加权函数将 IoU 小于 μ-0.1 的样本权重设置为 1，将 IoU 在 μ 和 μ-0.1 范围内的权重设置为较高的 $\mathrm{e}^{1-\mu}$，而将 IoU 大于 μ 的样本设置为较小的 e^{1-x}，且随着 IoU 的增加逐渐减小。阈值参数 μ 并非预先设定的固定值，而是在训练过程中动态、自适应计算得出，其核心机制是使用当前训练

批次中所有候选框 IoU 的算术平均值作为 μ 的取值。通过自适应调整阈值参数 μ，提高模型对较难检测目标的关注度，以此平衡模型对多尺寸目标的检测能力。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境与实验数据

实验平台为 Windows11，配备 AMD Ryzen 7 6800H 处理器。系统内存 16GB，独立显卡采用 Nvidia GeForce RTX 3060，显存容量 6GB，深度学习使用 PyTorch，框架版本为 2.5.1+cu121，python 编程版本为 3.9.21，优化器采用 SGD，初始学习率为 0.01，动量因子 0.937，权重衰减系数 0.0005，采用余弦退火学习率衰减策略。数据增强采用 Mosaic、MixUp、随机翻转及色彩抖动等策略。将 Batch size 设为 4，图像大小统一为 512×512，训练次数（epochs）400 轮。所有实验采用相同超参数进行训练和验证，且均未使用预训练模型，整个过程均在相同条件进行。

为全面覆盖各种尺寸及典型道路病害，采用公开的 UAPD 无人机道路病害数据集，该数据集采集自中国南京东吉大道，由 DJIM600Pro 无人机搭载索尼 Alpha 7R III 相机拍摄，原始图像分辨率为 7952×5304 像素，经裁剪预处理后形成 2401 张 512×512 像素的有效图像，包含六类典型沥青路面病害：横向裂缝、纵向裂缝、鳄鱼裂缝、斜向裂缝、坑洞及修复。

3.2 评价指标

为定量评估 YOLO-GS 检测性能，采用以下评价指标：精确率 P（Precision）衡量模型预测正样本的准确性；召回率 R（Recall）反映模型识别真实正样本的能力；平均精度 AP（Average Precision）通过计算精确率 - 召回率（P-R）曲线下面积，表征模型在不同召回率的精确率表现；平均精度均值 mAP（mean Average Precision）为所有类别 AP 的平均值，用于评估模型整体检测性能。参数量（Parameters）反映模型复杂度与存储需求，每秒十亿次浮点运算数（GFLOPs）量化模型推理所需运算量，每秒帧数（FPS）衡量模型推理速度，FPS 值越高，处理效率越高。

3.3 对比实验

为评估 YOLO-GS 算法的检测性能，与多种主流一阶段目标检测算法（YOLOv5、YOLOv10、YOLOv11）进行对比分析。评价指标包括精确率（P）、召回率（R）、GFLOPs、参数量、mAP@0.5、mAP@0.5∶0.95、FPS，实验结果如表 1 所示。

表1　YOLO-GS对比实验（%）

方法	参数量	GFLOPs	P	R	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95	FPS
YOLOv5	2.50	7.1	70.0	54.2	60.5	37.0	178
YOLOv10	2.27	6.5	65.8	50.3	58.2	36.2	167
YOLOv11	2.58	6.3	60.4	60.1	63.2	37.8	177
研究方法	3.67	8.2	68.7	63.9	68.5	40.7	158

结果表明，YOLO-GS 检测精度优于对比算法。从整体指标看，mAP@0.5 和 mAP@0.5∶0.95 分别达到 68.5% 和 40.7%，优于对比模型，说明模型在目标定位精度和边界回归能力方面优势显著。从精确率（68.7%）与召回率（63.9%）平衡关系看，YOLO-GS 可降低误检，提升检出能力，表现出更好的综合检测性能。

从效率角度分析，尽管 YOLO-GS 在参数量（3.67M）和计算量（8.2GFLOPs）上略高于对比模型，但仍保持 158FPS 的推理速度（测试条件：输入分辨率 512×512，硬件环境为 Nvidia GeForce RTX 3060），远超常规实时检测标准及工业高速场景要求，满足无人机巡检需求。综合来看，YOLO-GS 在精度与效率之间实现更优权衡，但性能提升主要集中于中大尺度和结构明显目标，对小尺度和复杂形态目标仍需优化。

为验证 GFPN 和 Slide Loss 有效性，在相同条件下进行消融实验：两者单独使用均能带来稳定精度增益；单独引入 GFPN 和 Slide Loss 时，mAP@0.5 分别达到 66.3% 和 65.8%，且联合使用时增益最大，说明二者在特征融合与样本重加权两个维度具有互补性。

3.4 可视化分析

为分析 YOLO-GS 在实际复杂场景的适应能力，选取 UAPD 测试集典型样本进行可视化分析。YOLO-GS 在 UAPD 测试集的效果如表 2 所示。UAPD 测试集的定量评估数据表明，当交并比（IoU）阈值为 0.5 时，YOLO-GS 模型在所有类别的精确率达到 68.7%，召回率为 63.9%，mAP@0.5 为 68.5%；若将 IoU 阈值调整至 0.5∶0.95，mAP 值为 40.7%。实验表明，YOLO-GS 对各类道路病害的检测性能存在差异。其中，坑洞在图像中占据较大面积且特征显著，相较其他类型病害，检测效果尤为突出。UAPD 数据集倾斜裂缝样本较少，斜向裂缝检测效果不佳。数据样本中横向裂缝居多，纵向和鳄鱼裂缝的检测结果明显弱于横向裂缝。

YOLO-GS 在 UAPD 测试集的道路病害检测结果如图 3 所示。该模型在不同环境表现出一定的鲁棒性，但检测性能仍受场景条件影响。在光照层面，模型在均匀光照、中等阴影环境能准确检测裂缝与坑洞，但在强光反射或局部阴影遮挡情况下，部分低对比度裂缝

易出现漏检，说明模型对光照变化的适应能力有待提升。在道路类型方面，模型在沥青路面表现较好，能利用纹理与边缘信息完成检测；在水泥路面或颜色均匀区域，裂缝与背景灰度差异较小，检测精度有所下降。

表2　YOLO-GS在UAPD测试集的效果（%）

类别名称	精确率	召回率	mAP@0.5	mAP@0.5:0.95
整体	68.7	63.9	68.5	40.7
纵向裂缝	71.2	61.4	66.5	31.2
横向裂缝	80.4	66.7	74.7	39.8
鳄鱼裂缝	56.0	45.5	45.0	23.4
倾斜裂缝	60.1	58.3	48.6	33.8
修补	82.9	76.8	85.2	63.2
坑洞	61.2	75.0	91.2	65.5

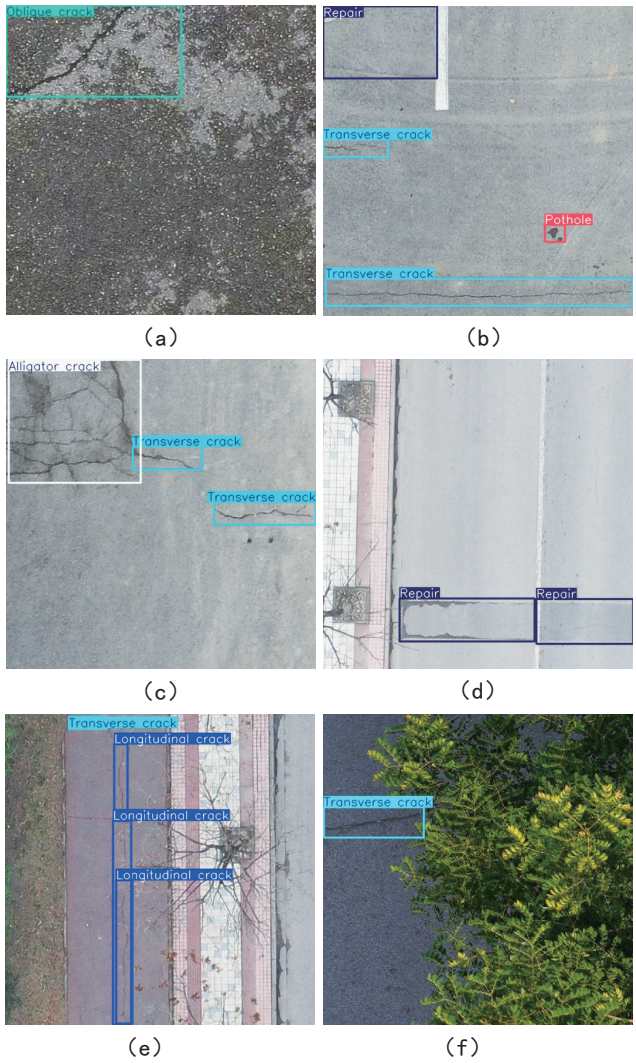


图 3　YOLO-GS 在 UAPD 测试集上的道路病害检测结果

在复杂背景条件（如植被遮挡、污渍干扰及路面标线），YOLO-GS 能抑制部分非结构性噪声，但仍易将污渍或阴影误判为裂缝，反映出模型语义判别能力不足。在多目标及密集病害场景，模型整体检测效果稳定，但对细小裂缝和边缘模糊区域识别能力有限，存在尺度敏感问题。综上所述，YOLO-GS 对结构清晰、对比明显的病害检测能力较强，在低对比度、小尺度及复杂纹理背景下性能下降。后续研究将进一步提升模型在无人机实际巡检场景的泛化能力与稳定性。

4　结论

针对无人机航拍影像道路病害检测任务中存在复杂背景干扰、多尺度特征融合不足等问题，提出一种基于 YOLO-GS 的道路病害检测算法，以 YOLOv11 为基准架构，通过引入全局特征金字塔网络（GFPN）增强跨尺度特征交互，并结合 Slide Loss 优化难易样本的梯度贡献，实现多尺度特征的高效融合与检测边界的精准定位，有效提升模型对不同尺寸病害的检测能力。UAPD 数据集的实验结果表明，YOLO-GS 的 mAP@0.5 达到 68.5%，较原始 YOLOv11 提升 5.3%，mAP@0.5∶0.95 达到 40.7%，同时保持 158FPS 的实时检测速度，验证了研究方法在复杂场景下的鲁棒性与有效性。

当前方法仅基于单一可见光模态，在夜间及恶劣天气的检测能力受限，且复杂背景干扰与多尺度特征融合问题仍是制约检测精度提升的关键因素。后续研究可融合红外、激光雷达点云数据，构建多源数据融合框架，提升模型全天候检测能力；通过模型压缩与量化技术，在保障精度前提下实现无人机机载的轻量化部署，提升算法的工程实用价值。

参考文献

[1] 罗向龙,王彦博,蒲亚亚,等.多病害并发复杂场景下的道路病害检测RGT-YOLOv7模型[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(12):107-118.

[2] 王鹏,刘凯,王鹏飞,等.LRDNet:融合多尺度上下文的轻量级道路病害检测网络[J/OL].计算机工程与应用,1-14[2026-07-03].https://link.cnki.net/urlid/11.2127.tp.20251204.1637.009.

[3] 程传祥,金飞,林雨准,等.应用多尺度融合策略和改进YOLOV5的道路病害无人机检测[J].地球信息科学学报,2024,26(8):1991-2007.

[4] 彭博,蒋阳升,韩世凡,等.路面裂缝图像自动识别算法综述[J].公路交通科技,2014,31(7):19-25.

[5] 赵雪寒,刘庆华.改进SSD模型的路面病害图像检测系统[J].软件导刊,2020,19(11):217-220.

[6] 张振海,孙岩,李哲远.基于MDS-YOLO的轻量级隧道表观病害检测算法[J].交通运输工程学报,2025,25(6):271-283.

[7] 胡晓伟,闫奕昕,王大为,等.基于YOLOM算法的路面病害轻量化检测方法[J].中国公路学报,2024,37(12):381-391.

人类活动影响下自然生态区火烧迹地时空特征研究

王和超

（四川水发勘测设计研究有限公司，四川 成都 610072）

摘　要：针对自然生态区火灾监测时效性差、火烧迹地空间关联不明等问题。基于2017～2022年时序卫星数据，通过归一化燃烧指数（INBR）、Mann-Kendall趋势分析法和莫兰指数等方法，分析赣南自然森林生态区2017～2022年期间森林火烧迹地时空分布、变化趋势以及空间相关性。研究分析表明：（1）赣南自然森林生态区内火烧迹地空间分布总体呈现“中部聚集、东西侧并重”特征，数量上呈现“先缓慢增长、后逐年下降”趋势。（2）INBR值呈下降趋势的区域占比为64.27%，其中，呈极显著上升趋势的区域占比为21.80%。而火烧迹地值保持不变的区域占火烧迹地总面积的13.29%，呈上升趋势的区域仅占22.44%。研究成果可为江西省南部自然森林生态保护和火灾防控提供参考依据。

关键词：火烧迹地；遥感监测；变化趋势；时空特征

1　引言

自然生态区作为区域生态系统环境的重要组成部分，其形成与演变过程受到自然因素与人类活动的双重影响[1]。近年来，随着全球气候变化和人类活动的不断加剧，自然生态区火烧迹地的时空分布特征发生了显著变化，对区域生态系统的稳定性和生物多样性构成了严重威胁[2-3]。深入研究人类活动影响下自然生态区火烧迹地的时空特征，对于理解火灾发生机制、制定科学有效的防火措施、促进生态系统恢复与重建具有重要意义。

为精准掌握火烧迹地时空演变规律，遥感卫星时序监测技术已广泛应用于自然生态区火烧迹地研究，目前相关研究主要从火灾发生频率、火烧迹地面积变化、火灾季节性分布等角度展开[4]。贺忠华等以浙江省2019～2021年间7个中小型林火为研究对象，利用Sentinel-2与Landsat-8卫星影像自动提取火烧迹地，经目视判读和实测数据验证，实验自动提取结果面积偏差3.69hm^2，提取精度达94.2%，优于人工阈值判识[5]。李淑君等把Stacked Conv-LSTM时空检测方法应用于时间序列森林火烧迹地检测中，既能避免带有主观性的后处理操作，又能确保结果具备较佳的空间连续性，达成端到端提取森林火烧迹地信息的目标，提高了森林火烧迹地的提取精确度[6]。韩丽等以昆明地区2016～2020年间Sentinel-2数据、高温火点数据及土地利用分类数据为依据，通过差分归一化火烧比率（dNBR）提取该区域火烧迹地面积；结果表明，将Sentinel-2数据与dNBR指数相结合，单个火场的提取精度平均可达89%以上，具有较高的适用性[7]。上述研究多依赖于传统的地面调查和有限的遥感数据，在一定程度上揭示了火烧迹地的时空演变规律，但仍存在数据时效性差、空间分辨率低、难以全面反映火烧迹地空间关联等问题，不利于充分支撑精细化森林防火管控工作。

针对以上问题，研究基于Landsat-8卫星的短重返周期（16天）优势，通过趋势分析和空间相关性模型对研究区火烧迹地的空间分布和内在关联特征进行全面分析。以赣南自然森林生态区为研究区域，基于归一化燃烧指数（Index of Normalized Burn Ratio，INBR），对2017～2022年期间Landsat-8卫星影像数据进行森林火烧迹地提取，并通过Mann-Kendall趋势分析法和莫兰指数（Moran's Index，MI），分析自然森林生态区火烧迹地的时空变化特征，挖掘其演变趋势与空间集聚规律，研究成果可为江西自然森林生态保护和火灾防控提供参考。

2　研究区域

2.1 研究区基本情况

研究区位于江西赣江源国家级自然保护区，空间范围为东经114°23′～115°46′、北纬25°11′～25°52′，涉及赣州南部龙南市、全南县、定南县、寻乌县，面积16100.85公顷，属典型的森林生态系统类型自然保护区，是我国南方地区重要的生

作者简介：王和超（1988—），男，汉族，本科，工程师，主要从事工程测量与测绘地理信息工作。

态屏障。近年来，随着气候变化和人类活动持续加剧，保护区内生态环境稳定性受到扰动，零星火烧迹地现象频繁发生，开展火烧迹地的时空特征研究对于保护区可持续发展具有重要意义。研究区地理概况如图 1 所示。



图1　研究区地理概况

2.2 数据源

收集 2017～2022 年 Landsat-8 卫星影像数据、数字高程模型（DEM）、全国范围 10m 精度土地覆盖数据 ESRI-LUCC、行政区划基础数据以及人类活动行为遥感影像样本资料，各类数据的基本参数如表 1 所示。2017～2022 年卫星影像数据来源于地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn），主要利用 Landsat-8 卫星影像的短波红外、近红外波段数据，通过辐射定标、大气校正、几何校正、区域网平差等一系列操作，对卫星影像数据进行预处理；对 ESRI-LUCC 数据进行降尺度和重采样操作，让土地利用现状尺度与卫星监测尺度相适应；同时对行政区划等基础数据进行空间坐标系统一化和几何校正等处理，保障多源数据在空间层面能够精准匹配。

表1　研究数据情况

数据名称	格式	时间	精度	处理方法
Landsat-8	Tif	2017~2022	30m	辐射定标、大气校正、几何校正、区域网平差、影像融合、拼接裁剪
ESRI-LUCC	Tif	2017~2022	10m	降尺度、重采样
DEM	Tif	2018.12	12.5m	—
行政区划数据	Shp	2020	—	空间坐标系统一化、几何校正
人类活动遥感影像样本	Tif	2017~2022	1m	—

3　研究方法

研究围绕森林火烧迹地开展系统分析，总体研究框架涵盖三大核心环节，分别为森林火烧迹地遥感提取、火烧迹地分布特征分析以及空间关联分析。其中，基于归一化燃烧指数（I_{NBR}）对 2017～2022 年期间 Landsat-8 卫星影像数据进行遥感分析，提取森林火烧迹地空间信息；通过 Mann-Kendall 趋势分析法统计分析研究区森林火烧迹地的变化趋势类别；然后利用莫兰指数（MI）系统分析森林火烧迹地的局部空间自相关特征。

3.1 归一化燃烧指数

基于健康植被在近红外光谱中显示出高反射率、而火烧迹地区域在短波红外光谱中具有高反射率的原理，LÓPEZ 等提出归一化燃烧指数（I_{NBR}），通过计算近红外波段和短波红外波段的比值来强化火烧迹地特征，主要用于森林区域火烧迹地的空间提取[8]，具体公式如下：

$$I_{NBR}=\frac{\rho_{nir}-\rho_{swir}}{\rho_{nir}+\rho_{swir}} \tag{1}$$

I_{NBR} 值的计算需要基于具有近红外和短波红外波段的卫星影像数据，其取值范围为 [-1, 1]。ρ_{swir}、ρ_{nir} 分别为 Landsat-8 卫星影像数据的短波红外、近红外波段。

3.2 Mann–Kendall 趋势分析法

曼－肯德尔（Mann-Kendall，MK）检验是一种非参数性的时序趋势检验方法，无需测量值遵循正态分布，且不受缺失值和异常值干扰，适用于对长期时序数据进行趋势显著性检验。其算法流程如下：对于时序数据序列 $X_t=\{X_1, X_2, \cdots, X_n\}$，首先确定所有成对观测值（$X_i, X_j, j>i$）中 X_i 与 X_j 的数值关系，以 S 表征，随后进行假设检验：H_0 表示序列中的数据是随机排列的，即不存在显著趋势；H_1 则表明序列中存在上升或下降趋势[9]。检验统计量 S 计算公式：当 $S>0$ 时，分子为（S-1），具体计算方法如下：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(X_j-X_i) \tag{2}$$

式中，sgn() 为符号函数，计算格式为：

$$\mathrm{sgn}(X_j-X_i)=\begin{cases}1, & X_j-X_i>0\\ 0, & X_j-X_i=0\\ -1, & X_j-X_i<0\end{cases} \tag{3}$$

对检验统计量 S 进行趋势检验，以 M 值表征趋势检验分析结果，具体计算格式为：

$$M=\begin{cases}\dfrac{S}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S>0\\ 0, & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S<0\end{cases} \tag{4}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{5}$$

式中，n 为序列中数据个数；X_i, X_j 为所有成对观测值中第 i 个和第 j 个随机数据。

3.3 空间相关性分析

莫兰指数（Moran's Index，MI）是一种研究空间要素相关系数的参数，也是开展空间分析的参考指数，一般分为全局莫兰指数（Global Moran's I，GMI）和局部莫兰指数（Anselin Local Moran's I，ALMI）两种类型。莫兰指数通过测度空间关联程度来反映要素的空间关联和聚集性。

研究使用全局莫兰指数对研究区各年度森林火烧迹地分布空间相关关系进行判断分析，其数值范围为[-1，1]。当数值大于 0，表示火烧迹地存在空间正相关关系；当数值小于 0，表示火烧迹地存在空间负相关关系；当数值为 0，则代表火烧迹地的空间关系为随机分布。莫兰指数的计算公式如下：

$$I=\frac{n\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{(\sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}w_{ij})\sum_{j}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \tag{6}$$

式中，n 为火烧迹地点位总数；w_{ij} 为空间权重矩阵；x_i、x_j 分别表示 i 区域和 j 区域的单位火烧迹地点位数量；$I\leqslant(-1，1)$，当 $I\geqslant 0$ 时，表明火烧迹地点位存在空间自相关，且呈聚集分布；当 $I\leqslant 0$ 时，空间差异明显，呈分散分布；当 I=0 时，呈随机分布不相关。

Pearson 相关性分析是一种通过计算两个变量之间协方差和标准差的商来衡量相关性的分析方法，公式如下：

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})-(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

Pearson 相关系数 R 主要用于衡量两个变量之间的线性关系强度，取值范围为 [-1，1]，其中 $R>0$ 代表正相关；$R<0$ 代表负相关；$|R|$=1 代表完全线性相关；$|R|$=0 则代表无显著线性相关。x_i 表示 i 区域的单位火烧迹地点位数量，y_i 表示 i 区域的人类活动强度。

4 时空特征分析

4.1 火烧迹地空间特征

研究利用归一化燃烧指数（INBR）对 2017～2022 年期间 Landsat-8 卫星影像数据进行时序分析，并提取出研究区火烧迹地时空分布信息，具体分布情况如图 2 所示。

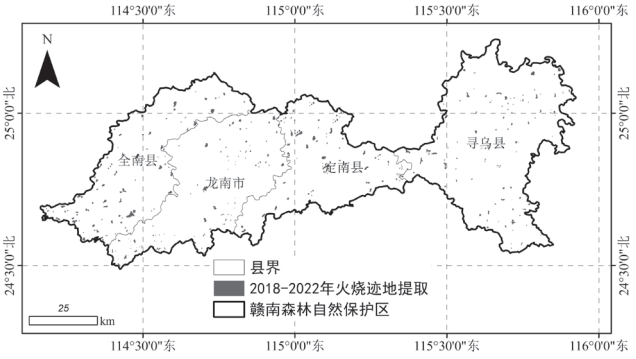


图2 研究区火烧迹地总体分布

赣南自然森林生态区内火烧迹地数量总体呈先缓慢增长、后逐年下降趋势，以 2021 年为分界，2017～2020 年呈增长态势，2021 年后提速下降，火烧迹地空间分布以“中部聚集度高、东西侧并重”为主要特征。县域分布上，2017 年火烧迹地集中分布于全南县（36.7%）、寻乌县（30.6%）；2018 年总量较 2017 年升高，定南县占比由 22.3% 提高至 26.6%。年度数量变化方面，2019 年研究区火烧迹地数量同比减少 6.4%，2020 年同比增长 18.5%，2021 年同比减少 14.6%，2022 年同比减少 17.3%。逐年火烧迹地分布变化情况如图 3 所示。

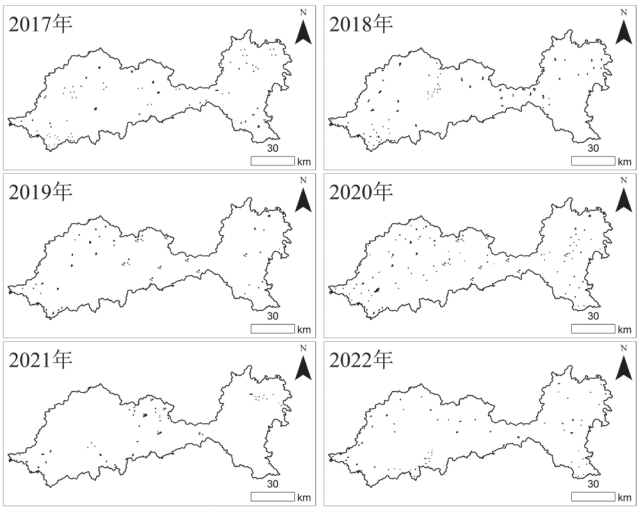


图3 2017~2022年研究区火烧迹地分布变化情况

4.2 趋势性分析

采用 Mann-Kendall 趋势检验法，对研究区

2017～2022年火烧迹地变化趋势显著性及趋势类别进行统计分析，结果如表2所示。显著性统计结果显示，研究区火烧迹地INBR值呈下降趋势的区域占火烧迹地总面积的64.27%，呈上升趋势的区域占22.44%（其中极显著上升区域占21.80%），保持不变的区域占13.29%，上升区域零星分布于部分耕地区域。结果表明，2017～2022年赣南自然森林生态区的火烧迹地显著减少，该变化与近年来赣南自然森林生态区实施天然林保护工程、退耕还林还草工程、国家重点生态功能区建设等措施密切相关。

表2　火烧迹地INBR值变化趋势显著性统计

I_{NBR}	Z值	趋势类型	比例/%
＞0.0005	＞2.58	极显著上升	8.22
＞0.0005	＞1.96~2.58	显著上升	4.63
＞0.0005	＞-1.96~1.96	微显著上升	9.59
＞-0.0005~0.0005	＞-1.96~1.96	无变化	13.29
≤-0.0005	＞-1.96~1.96	微显著下降	15.77
≤-0.0005	＞-2.58~-1.96	显著下降	26.7
≤-0.0005	≤-2.58	极显著下降	21.8

4.3 局部空间自相关分析

火烧迹地局域空间关联指数显著性水平如图4所示。由图4可知，2017～2018年，赣南自然森林生态区火烧迹地主要集中在东部和南部边缘地带。这些区域邻近人类居住区和农业活动区，火灾发生率较高，局部空间自相关性呈较强正相关，相邻区域火烧迹地同步聚集。

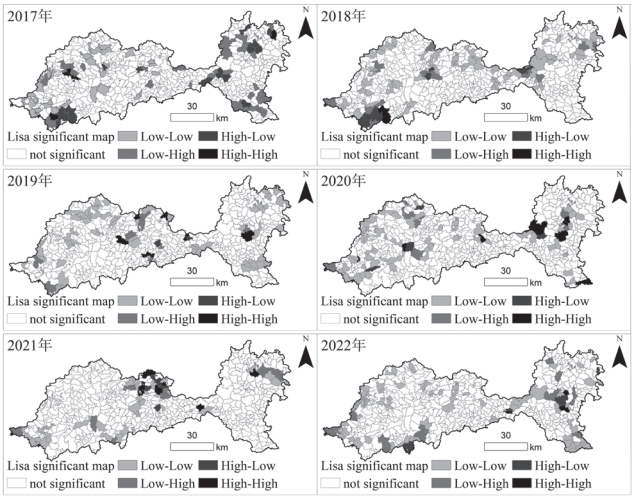


图4　火烧迹地局域空间关联指数显著性水平

2019～2020年，火烧迹地向保护区内部扩展，多分布在植被茂密、地形复杂区域。受干旱天气增加等自然条件影响，火灾更容易蔓延扩散，局部空间自相关性有所增强，部分区域呈现显著聚集特征。2021～2022年间，保护区火烧迹地分布更趋于分散，局部空间自相关性减弱，受生态保护政策强化和森林管理措施影响，火情蔓延态势得到有效控制，相邻区域火烧迹地的关联性有所降低，空间分布趋于随机。

5　结语

针对自然生态区火灾监测时效性差、火烧迹地空间关联不明等问题，研究以赣南自然森林生态区为研究区域，基于归一化燃烧指数（INBR）对2017～2022年期间Landsat-8卫星影像数据开展时序分析，并提取森林火烧迹地时空分布情况，通过Mann-Kendall趋势分析法和莫兰指数综合分析森林火烧迹地的时空变化特征。结论如下：

（1）赣南自然森林生态区火烧迹地在空间上总体呈现“中部聚集度高、东西两侧均衡”的分布模式，在数量特征上则表现为“先缓慢增长、后逐年减少”的态势。

（2）在火烧迹地分布中，呈下降趋势的区域占比为64.27%，其中呈极显著上升趋势的区域占比达到21.80%，火烧迹地值保持不变的区域占火烧迹地总面积的13.29%，呈上升趋势的区域仅占22.44%，这与近年来江西省南部推动实施天然林保护工程、退耕还林还草工程、国家重点生态功能区建设等生态工程密切相关。

参考文献

[1] 苏维翰,张楚然,邓云,等.基于Landsat影像评估鸡足山火烧迹地近40年间植被恢复动态[J].生态学报,2025(3):1-17.

[2] 张吕成,孙志超,董灵波.基于Landsat时间序列数据的火烧迹地识别与恢复效果评价[J].森林工程,2024,40(5):8-16.

[3] 王健,杜玉玲,高钊,等.基于MODIS时序数据的大兴安岭火烧迹地时空变化及其森林恢复研究[J].自然资源遥感,2024,36(2):142-150.

[4] 曾爱聪,郭新彬,郑文霞,等.基于MODIS卫星火点数据的浙江省林火时空动态变化特征[J].北京林业大学学报,2020,42(11):39-46.

[5] 贺忠华,李少虹,毛燕军,等.基于增强型燃烧指数的中小型火烧迹地自动提取研究[J].自然灾害学报,2023,32(3):192-204.

[6] 李淑君,郑柯,唐娉,等.基于Stacked ConvLSTM的时间序列森林火烧迹地检测[J].遥感学报,2022,26(10):1976-1987.

[7] 韩丽,高启,王秋华,等.基于Sentinel-2数据的火烧迹地提取研究[J].自然灾害学报,2023,32(6):123-130.

[8] LÓPEZ GARCÍA M J,CASELLES V. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data[J].Geocarto International,1991,6(1):31-37.

[9] 杨德彬.五大连池自然保护区人类活动遥感识别与分析[J].测绘与空间地理信息,2021,44(7):115-118,122.

基于改进U-Net网络的遥感影像建筑物边缘识别研究

袁豹

（苏州市测绘院有限责任公司，江苏 苏州 215000）

摘　要：针对高分辨率遥感影像中建筑物边缘提取易受植被、阴影等地物干扰，传统 U-Net 存在细节丢失、噪声混入、边缘约束不足等问题。研究对 U-Net 开展针对性改进：用残差特征增强模块重构编码器，嵌入边缘感知注意力模块优化跳跃连接，并构建边缘感知混合损失函数。选取南京地区遥感影像完成对比实验，结果显示，相较于原始 U-Net，改进模型总体精度提升 1.35%，精确率提升 1.64%，召回率提升 4.13%，F1 分数提升 3.89%，各项指标均优于 FCN、SegNet 等模型。该方法能有效解决边缘断裂、锯齿、粘连等问题，可高精度提取复杂场景下的建筑物边缘。

关键词：U-Net 网络；建筑物边缘识别；残差特征增强；边缘感知注意力；混合损失函数；遥感影像

1　引言

建筑物作为城市的重要人工地物，其精准轮廓信息是建筑物矢量化、违建排查、城市形态分析、实景三维重建等应用的基础[1]。相较于建筑物主体区域，建筑物边缘属于影像高频细节区域，易受植被、阴影、道路、空地等周边地物干扰，呈现出形态曲折、像素占比低、梯度变化剧烈等特征，是遥感地物识别的难点[2]。

近年来，以 FCN、SegNet、U-Net 为代表的语义分割深度学习模型，凭借强大的自动特征提取能力，被广泛应用于遥感地物分割领域[3]。其中 U-Net 凭借编码器－解码器对称结构与跳跃连接机制，在像素级分割任务中优势突出。但将原始 U-Net 直接应用于建筑物边缘识别任务时仍存在明显短板：第一，网络基础卷积堆叠结构在层数加深时易出现梯度消失，对弱边缘、细小轮廓等高频特征提取能力不足，造成边缘细节丢失；第二，原始跳跃连接直接拼接编码与解码特征，未区分边缘有效特征与背景干扰信息，易引入植被、阴影等噪声，导致边缘粘连、轮廓失真[4]；第三，单一交叉熵损失仅对全局像素分类进行约束，未针对边缘像素设计专项损失，模型对边缘区域学习权重不足，最终分割结果普遍存在边缘锯齿、不连续等问题[5]。

为此，研究以精细化建筑物边缘识别为目标，对 U-Net 网络进行改进，保留 U-Net 整体编码－解码架构，采用残差特征增强模块重构编码器，引入边缘感知注意力模块优化跳跃连接路径，设计边缘感知混合损失函数，通过实验、可视化分析验证模型性能，实现复杂遥感场景下建筑物边缘的高精度、高完整性提取。

2　研究区与数据源

研究以 2025 年 5 月高景一号卫星获取的南京市 0.5m 融合遥感影像为数据源，开展建筑物边缘提取。高景一号为国产四星组网商业遥感星座，全色波段分辨率 0.5m、多光谱波段 2m，融合影像兼具精细建筑轮廓纹理与蓝、绿、红、近红外四波段光谱信息，可清晰区分建筑墙体、道路、乔木、水体等地物边界；南京市主城区建筑物密集，高层、多层、低矮民居等建筑类型多样，植被、道路、水系与建筑物紧密相邻，树冠遮挡、阴影混淆、路面光谱近似等干扰要素齐全，依托高景一号亚米级影像细节优势，为建筑物边缘提取算法提供场景复杂、干扰类型丰富的实验环境。

在样本预处理流程中，针对建筑物提取任务，将人工标注的建筑物矢量进行二值化映射，设定建筑物为前景（Label=1），其余地类统一归为背景（Label=0）。随后，利用滑动窗口技术将影像及对应标签切割为 512×512 像素的图块，并在剔除建筑物占比小于 10% 的无效图斑后，通过旋转、翻转等手段进行数据增强，最终构建出包含 80000 张样本对的专用数据集，并按 8∶2 比例划分为训练集与验证集。

3　研究方法

3.1 改进 U-Net 网络整体架构

U-Net 网络应用于建筑物边缘识别时，易产生梯度消失问题，对高梯度的建筑弱边缘、细边缘提取能

作者简介：袁豹（1988—），男，汉族，硕士，测绘工程师，注册测绘师，主要从事工程测量、摄影测量与遥感等生产与应用研究工作。

力不足。为此，研究围绕编码器特征提取、跨层特征融合、损失函数约束三个维度对 U-Net 开展系统性优化，提升复杂场景下建筑物边缘的检测精度与完整性。

U-Net 改进模型保留原始 U-Net 编码－解码框架，核心改进集中在编码器、跳跃连接、损失函数三大模块，整体流程为：遥感影像输入→残差特征增强编码器→边缘感知注意力模块→解码器特征上采样与轮廓还原→边缘感知混合损失函数反向传播优化参数。三大改进模块相互协同，从特征提取、特征融合、模型监督全流程，优化网络对建筑物边缘的感知能力，改进 U-Net 模型网络架构如图 1 所示。

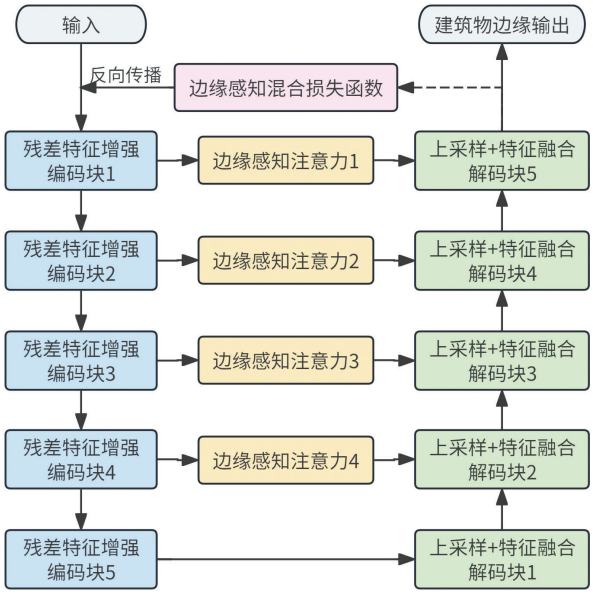


图1　改进U-Net模型网络架构

3.2 残差特征增强模块

传统 U-Net 编码器对遥感影像建筑边缘、细小轮廓等高梯度高频细节表征能力不足，多层卷积与连续下采样会持续损耗浅层空间细节，难以适配建筑物高精度边缘提取任务。为此，改进模型将编码器全部基础卷积块替换为残差特征增强模块，借助双分支残差架构同步实现深层语义建模与浅层细节保留，并内置高频特征筛选机制强化边缘特征响应，同步提升编码器特征提取精度与模型训练稳定性。

该模块采用主分支－捷径分支并行结构，搭配特征融合单元实现全局语义与局部细节的互补提取。主分支作为深层语义通路，由两层 3×3 卷积、BN 层与 ReLU 激活函数串联组成，依靠多层非线性变换拓展感受野，充分挖掘影像抽象高层语义，学习建筑物全局轮廓与整体结构特征。捷径分支为细节补偿通路，仅通过 1×1 卷积完成通道维度匹配，无多余非线性变换，直接传递浅层原始影像信息，完整留存纹理、边缘梯度等精细特征，弥补深层卷积造成的细节丢失。双分支输出特征通过逐元素相加完成融合，在几乎不增加计算量的前提下，融合全局语义与局部边缘信息，提升特征图综合表征能力。

残差短路连接可抑制深层网络梯度消失，保障深度网络稳定收敛。模块内置自适应高频筛选机制，通过计算特征图像素梯度幅值动态调整特征权重，对梯度突变的建筑边缘区域赋予高权重，压低植被、空地等平坦背景特征响应，从特征提取源头拉大边缘与背景的特征差异。经该模块重构后的编码器，兼顾全局语义判别与局部细节捕捉，能够输出高辨识度多尺度特征图，为精细化建筑物边缘识别提供可靠特征支撑。

3.3 边缘感知注意力模块

原始 U-Net 跳跃连接直接对编码与解码特征进行拼接，缺乏特征筛选与噪声抑制能力。为此，模型在每一级跳跃连接路径中嵌入边缘感知注意力模块（EEAM），实现边缘特征自适应增强与背景噪声主动抑制。

EEAM 模块融合通道注意力、空间注意力双重机制，并引入 Sobel 边缘检测算子作为先验约束，构建多维度特征优化体系。该模块对输入特征图分别实施全局平均池化与全局最大池化，生成精准通道权重系数，对富含建筑物梯度、纹理的高频特征通道强化权重，对承载背景噪声的无效通道进行权重抑制，实现特征通道的自适应筛选。同时，该模块引入 Sobel 算子完成特征图边缘检测，生成精准的二值边缘掩码，实现建筑物边缘像素与背景像素的精准区分。最后融合通道与空间双重权重得到综合注意力权重图，与原始特征图逐像素相乘，完成特征增强与噪声过滤。

3.4 边缘感知混合损失函数构建

针对单一交叉熵损失对边缘像素约束不足的问题，研究构建边缘感知混合损失函数，结合全局分类损失与局部边缘损失，实现全局像素分类与边缘轮廓精细化约束的双向优化。混合损失函数表达式为：

$$L_{\text{total}} = \alpha L_{\text{BCE}} + \beta L_{\text{edge}} \quad (1)$$

式中，L_{total} 为模型总损失；L_{BCE} 为二元交叉熵损失；L_{edge} 为边缘一致性损失；α、β 为权重系数，通过多组对照实验确定最优取值，设置 α=0.7，β=0.3。

二元交叉熵损失 L_{BCE}：适用于二分类分割任务，计算所有像素预测值与真实标签的全局误差，保证建筑物与背景、边缘与非边缘的整体分类效果，公式为：

$$L_{BCE}=-\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[y_i\log(p_i)+(1-y_i)\log(1-p_i)] \quad (2)$$

式中，N为单张影像总像素数，y_i为第i个像素的真实标签，p_i为网络对第i个像素的预测概率。

边缘一致性损失L_{edge}：锁定所有边缘像素区域，针对该区域计算预测边缘与真实边缘的像素误差与梯度误差。该损失函数可弥补传统损失对边缘区域监督不足，改善边缘断裂、锯齿、轮廓不连续等问题。

4 实验结果与分析

4.1 不同模型定量对比分析

为验证改进模型的有效性，选取FCN、SegNet、原始U-Net三种主流语义分割模型作为对照组，在同一数据集、相同实验环境开展对比实验，各模型精度统计结果如表1所示。

表1 不同模型建筑物边缘识别精度对比（%）

模型	总体精度OA	精确率Precision	召回率Recall	F1分数
FCN	86.15%	82.37%	80.12%	81.23%
SegNet	88.72%	84.61%	83.59%	84.10%
U-Net	89.28%	85.94%	85.73%	86.33%
改进U-Net网络	90.63%	87.58%	89.86%	90.22%

由表1可见，U-Net改进模型四项指标均达到最优。FCN模型缺少跨层细节补偿机制，下采样丢失大量边缘高频特征，总体精度与F1分数仅86.15%、81.23%，综合性能最差；SegNet模型借助池化索引恢复浅层空间信息，各项指标小幅提升，但未对边缘特征做专项优化；原始U-Net整体分割效果优于前两类模型，但受限于编码器特征提取能力弱、特征融合无筛选、损失函数约束单一缺陷，召回率仅85.73%，边缘漏检问题突出。U-Net改进模型所有评价指标均达到最优，相较于原始U-Net，总体精度提升1.35%，精确率提升1.64%，召回率提升4.13%，F1分数提升3.89%，召回率涨幅最明显，说明残差特征增强编码器大幅提升弱边缘捕获能力，减少边缘漏检；精确率同步上涨，证明跳跃连接嵌入的边缘感知注意力模块可抑制植被、阴影等干扰，降低伪边缘误检率；边缘感知混合损失函数专门约束边缘像素，改善轮廓锯齿、断裂缺陷。

4.2 可视化结果分析

为观察建筑物边缘提取效果，研究对模型提取的建筑物面进行矢量化，套合原影像进行对比。从可视化结果观察，研究所提U-Net改进模型输出的红色轮廓线条连续平滑，在地物交错的复杂遥感场景能精准锁定建筑边界。残差特征增强编码器可充分捕获影像高频梯度特征，还原建筑复杂外轮廓，规避弱边缘漏检、轮廓断裂问题；边缘感知混合损失函数对边缘像素施加专项约束，可清晰分割相邻建筑的细微分界，防止轮廓融合失真。定量数据提升与目视解译效果形成互证，说明三项改进模块协同，可提升建筑物边缘识别精准度与完整性。建筑物边缘提取效果如图2所示。



图2 建筑物边缘提取效果

5 结论

针对传统U-Net网络在遥感影像建筑物边缘识别中存在边缘细节丢失、噪声干扰、边缘约束不足等问题，研究从编码器、跳跃连接、损失函数三个维度完成网络改进：采用残差特征增强模块重构编码器，解决梯度消失问题，并强化边缘高频特征提取；引入边缘感知注意力模块优化跳跃连接，实现边缘特征增强与背景噪声过滤；构建边缘感知混合损失函数，专项约束边缘像素的连续性与完整性。

基于高分辨率遥感建筑物数据集开展多模型对比与改进模块对比实验，结果表明：相较于FCN、SegNet、原始U-Net模型，U-Net改进模型的总体精度、F1分数等指标均有提升，可有效提取复杂场景下建筑物曲折边缘、细小轮廓，抑制伪边缘、边缘断裂、粘连等问题，模型鲁棒性与泛化能力更强。

参考文献

[1] 李小祥,黄亮,朱娟娟,等.边缘增强的EDU-Net遥感影像建筑物提取[J].遥感信息,2023,38(2):134-141.

[2] 胡明洪,李佳田,姚彦吉,等.结合多路径的高分辨率遥感影像建筑物提取SER-UNet算法[J].测绘学报,2023,52(5):808-817.

[3] 关世杰,刘继豪,姜月秋.基于改进SegNet网络的遥感图像语义分割方法研究[J].兵器装备工程学报,2023,44(7):237-242.

[4] 刘卓涛,龚循强,夏元平,等.KU-Net:改进U-Net的高分辨率遥感影像建筑物提取方法[J].遥感信息,2024,39(5):121-131.

[5] 刘建超.基于改进U-Net网络的高分辨率遥感影像建筑物提取[J].测绘与空间地理信息,2026,49(1):171-174.

基于深度学习的灾前建筑物自动提取

朱雅雯[1]　王希文[1]　杜爱恒[2]

（1. 武汉市测绘研究院，湖北 武汉 430021；2. 中国地质大学，湖北 武汉 430074）

摘　要：针对高分辨率遥感影像建筑物提取存在空洞、边缘模糊及误检问题，研究提出基于 Segformer 的改进模型 DCSA-Former。该模型采用分层编码器提取多尺度特征，结合密集连接和 SimAM 注意力机制增强建筑物边缘与关键特征表达，并通过逐步上采样恢复图像细节，实现高精度建筑物分割。实验表明，在 xBD 数据集中，相较于 Segformer，DCSA-Former 在 Recall、F1 分数和 IoU 上分别提升 7.48%、2.52% 和 3.94%。在迁移至 Islahiye 地区的实验中，该模型在迁移 + 微调策略下表现最优，四项指标分别达到 89.73%、87.81%、87.68% 和 78.02%，展现出良好的泛化能力与应用潜力。

关键词：建筑物提取；语义分割；深度学习；迁移学习

1　引言

随着城市化进程的加快，建筑物的空间分布、形态及结构信息，对城市规划、灾害评估等具有重要影响[1]。在建筑物损毁评估中，灾前建筑物定位是灾后损毁分析的基础，因此，如何从高分辨率遥感影像中高效、准确地提取建筑轮廓，是当前亟待解决的技术难题。

传统建筑物提取方法主要分为基于物理规则和面向对象两类[2]，通过设定规则提取建筑物或基于像素聚类进行识别，受人为因素影响较大，效率低且泛化性不足。近年来，借助高分辨率影像普及与深度学习发展，数据驱动的建筑物提取取得显著进展。卷积神经网络（CNN）可自主学习深层特征，并通过平移不变性、局部连接及权重共享提高模型泛化能力[3]，但在捕捉全局上下文上仍显不足。Transformer 则利用自注意力机制能直接建模全局依赖，并通过分层注意力融合多尺度特征[4]。二者已在建筑物提取中得到广泛应用。建筑物提取本质是语义分割任务，主流方法多采用编码器 - 解码器架构（如 U-Net[5]、U-Net++[6]、Swin-UNet[7] 等）和多尺度特征融合网络（如金字塔池化网络[8]、STTNET[9]、MSRF-Net[10] 等）。

现有语义分割模型在高分辨率影像建筑物提取中仍面临挑战，如建筑物与周边地物混淆导致边缘细节缺失、建筑本身结构复杂造成内部空洞或信息缺失，以及人工地物与建筑物误判等[11]。为应对上述问题，研究提出 DCSA-Former（Dense Connect SimAM-Former）算法，采用分层 Segformer 作为编码器降低特征图空间维度，提取多尺度特征，解码器结合密集连接与 SimAM 注意力强化特征融合，抑制背景干扰，恢复精细的建筑物提取结果。

2　方法

2.1　DCSA-Former 模型构建

DCSA-Former 模型结构如图 1 所示，模型整体呈 U 型，包括编码器、解码器和注意力机制模块。编码器以 Segformer[12] 结构为主干，使用分层结构来降低特征图的空间维度，并增加通道数提取多尺度特征；解码器沿用类似 U-Net 的逐步上采样结构，融合来自不同尺度的编码器特征，增强模型对细节的恢复能力。为增强跨尺度特征交互，在解码器各个阶段引入简单注意力机制（Simple，Parameter-Free Attention Module，SimAM）[13]，并结合密集连接策略，实现低维特征和高维特征高效整合，在强调目标特征的同时抑制背景干扰。为提高模型的泛化能力，DCSA-Former 的卷积层后添加了批归一化层（Batch Normalization，BN）和 ReLU 激活函数，采用加权损失函数对模型训练过程进行约束。

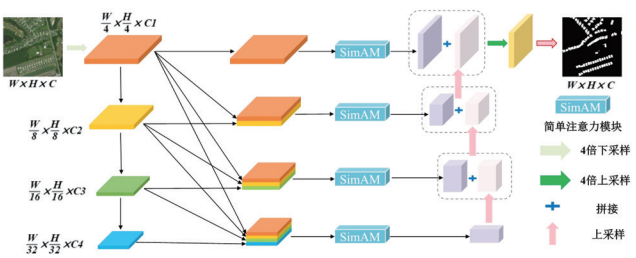


图1　DCSA-Former模型结构

作者简介：朱雅雯（1997—），女，汉族，硕士，工程师，主要从事工程测量、数据处理等工作。

2.2 Segformer 编码器

分层 Transformer 结构通过重叠补丁合并（Overlapped Patch Merging）可提取高分辨率图像多尺度特征，提升语义分割性能。输入图像（$H\times W\times 3$）经合并生成四层特征图 F_i，尺寸为 $\frac{H}{2^{i+1}}\times\frac{H}{2^{i+1}}\times C_i$，通过滑动窗口保留空间连续性，首阶段使用较大窗口（宽高 7、步长 4、填充 3）实现局部细节充分捕捉。

Segformer 编码器使用高效自注意力机制（Efficient Self-Attention）降低了传统自注意力机制的 n^2 复杂度，减小了计算量和显存需求。该机制使用缩减比对序列进行下采样，并结合线性变换和归一化策略，显著减少了查询（Q）和键向量（K）的维度，从而缓解计算瓶颈。

此外，ViT（Vison Transformer）中固定位置编码（PE）会造成输入尺寸变化时精度下降。为此，Segformer 使用带有空间感知卷积（3×3）替代 PE[14]，并结合 MLP 构建混合前馈网络 Mix-FFN（Mix-Feed Forward Neural Network），有效融合位置信息与通道特征。

2.3 SimAM 模块

SimAM 模块是一种无参数、基于能量函数的注意力机制，通过模拟生物神经元的激活特性，为特征图的每个神经元生成 3D 注意力权重。其核心思想是：神经元的重要性取决于其与周围神经元的差异，无需额外的学习参数。这种方法通过计算神经元与周围神经元的差异来自适应地确定每个神经元的注意力权重。

最小能量表达式如公式（1）所示，用于衡量神经元的重要性，能量值越低，神经元 t 与邻近神经元之间的差异越显著，其重要性越高。

$$e_t^*=\frac{4\left(\hat{\sigma}^2+\lambda\right)}{\left(t-\hat{u}\right)^2+2\hat{\sigma}^2+2\lambda} \tag{1}$$

式中，e_t^* 为元素，$\hat{u}$ 为该通道内所有神经元的均值，$\hat{\sigma}^2$ 为该通道内所有神经元的方差，λ 为正则化项。神经元的重要性可通过 $\frac{1}{e_t^*}$ 量化。按照注意力机制定义，对特征进行增强处理，得到公式（2）：

$$\tilde{X}=\mathrm{sigmoid}\left(\frac{1}{E}\odot X\right) \tag{2}$$

式中，E 为按像素位置计算的能量图，X 为输入的特征图，⊙为逐元素乘法，添加 sigmoid 函数对 E 的极大值进行约束。

2.4 密集连接

在密集连接（Densely Connected）网络中，第 i 层生成的特征不只传递给第 i+1 层，还被后续各层共享。该过程主要分为以下步骤：

（1）特征提取：编码器通过分层 Segformer 结构对输入影像进行多尺度特征提取，记为 r_1，r_2，r_3，r_4。

（2）特征融合：解码器各层将对应的编码器特征与上一层解码器输出拼接和 1×1 卷积操作进行融合，公式如下：

$$f_i=\mathrm{Conv}_{1\times1}\left(\otimes_{j=1}^{i+1}\mathrm{down}\left(r_i\right)\right) \tag{3}$$

式中，f_i 为融合特征，$\mathrm{Conv}_{1\times1}$ 为 1×1 卷积，$\otimes_{j=1}^{i+1}$ 为通道拼接，j 为被融合的编码层索引，为下采样。

（3）注意力机制：使用 SimAM 模块对编码器特征进行加权处理，突出重要的特征信息。

（4）逐层解码：解码器通过逐层上采样，融合对应编码器特征及前一层解码结果，表达式如下：

$$\left.\begin{cases}d_i=\mathrm{Conv}_i\left(SA_{att}\left(r_i,f_i\right)\oplus up\left(d_{i+1}\right)\right)\\ d_4=\mathrm{Conv}_4\left(SA_{att}\left(r_4,f_4\right)\right)\end{cases}\right\}\ i=1,2,3 \tag{4}$$

式中，d_i 是解码器第 i 层输出，r_i 表示编码器第 i 层的输出，$up()$ 表示上采样，⊕表示特征拼接，$SA_{\mathrm{att}}(r_i,f_i)$ 表示第 i 层注意力机制函数，Conv_i 为第 i 层卷积。

通过这种密集连接方式，解码器能够有效利用编码器提取的多尺度特征，保持影像细节信息，提高模型精度。

3 实验配置

3.1 数据集及迁移地区

（1）xBD 数据集

实验采用 xBD 数据集作为预训练数据集，xBD 数据集是全球最大的灾害数据集，配对的双时相影像数据采用 RGB 三波段，大小为 1024×1024，影像分辨率为 0.5m。该数据集容纳 15 个国家发生的 6 大类 19 起自然灾害事件，影像资源丰富。xBD 数据集依据 8∶1∶1 比例被划分为训练集、测试集和验证集，具体划分如表 1 所示。研究仅使用 xBD 数据集的灾前影像和建筑物标签数据，同时为了得到更具有泛化性的预训练模型，在训练时将测试集和验证集合并为测试集进行验证。

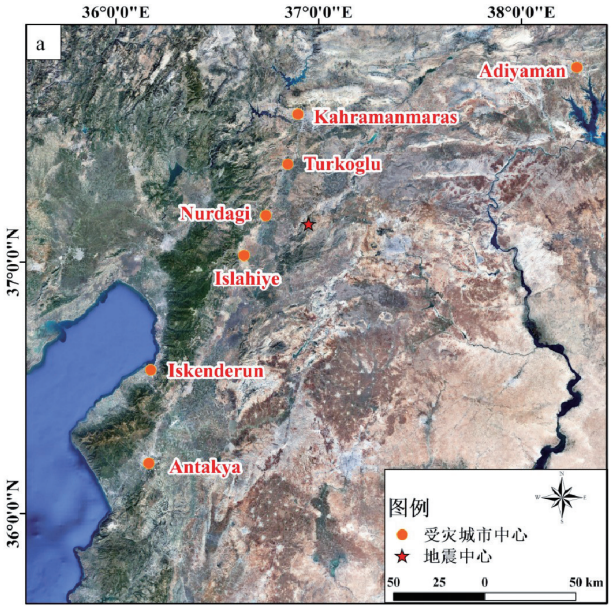
表1　xBD数据集划分

数据集	影像数量/对	建筑物多边形数量/个
训练集	9168	632228
测试集	933	109724
验证集	933	108784

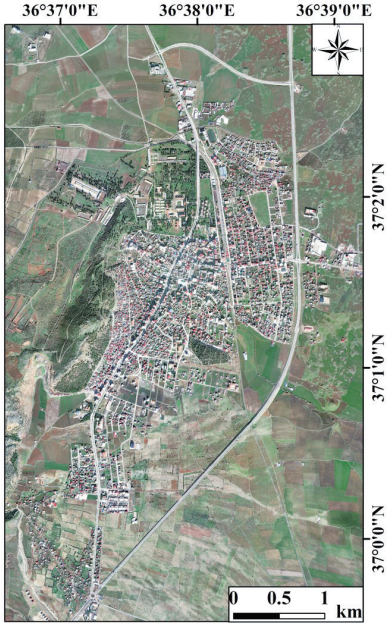
（2）Islahiye 地区

2023 年 2 月 6 日凌晨 4 点 17 分，土耳其发生两次 Mw7.8 级地震，震源深度 20km，此后发生多次余震。

Islahiye 地区影像如图 2 所示。由图 2（a）可知，在地震中心 300km 范围有 7 个受灾较为严重的地区。图 2（b）为 Islahiye 研究区卫星影像，Islahiye 镇位于北纬 37° 1′、东经 36° 38′。选取 Islahiye 镇主城区作为研究区域，通过人工标注并修正建筑物轮廓。数据来源为 Maxar 公司提供的灾后高分辨率影像，采用 WorldView2 号卫星获取的 0.5m 分辨率全色影像，震前影像时间为 2022 年 12 月 27 日。



（a）受灾城市分布图



（b）Islahiye震前高分辨率影像

图2　Islahiye地区影像

3.2 实验配置

实验在 Linux 平台基于 Pytorch 框架进行，软硬件信息如表 2 所示。由于 GPU 限制，训练阶段将影像随机裁剪为 512×512 尺寸。训练阶段，训练集和测试集 batch-size 分别设为 8 和 4，迭代 100 次，保存 $F1$ 分数最高的模型。编码器采用 ImageNet 预训练的 B3 模型权重完成初始化，优化器选用 AdamW，初始学习率为 1.5×10^{-4}，权重衰减系数为 1×10^{-6}。为了让网络快速收敛，使用分步学习率调整算法，在模型第 15、40、65、80 次迭代时将学习率减半，加快模型收敛。

表2　实验条件

硬件设备	CPU：Intel 8336C*12RAM： 24GGPU：NVIDIA Geforce RTX 3090
系统平台	Ubuntu 20.04
开发环境	Python 3.8.13，Pytorch 1.11.0
编译环境	PyCharm 2023.3.2，Anaconda3

3.3 损失函数

为解决遥感影像中正负样本比例严重失衡问题，研究采用 Focal Loss 在训练过程中动态调整正、负样本权值，具体的损失函数如下：

$$L_{\text{Focal}}=\begin{cases}-(1-\hat{y})^{\delta}\log(\hat{y}) & y=1\\ -\hat{y}^{\delta}\log(1-\hat{y}) & y=0\end{cases} \tag{5}$$

式中，y 为标签值，$\hat{y}$ 为预测值，δ 用于控制难易分类样本的权重因子。

为了提高建筑物边界预测精度、解决样本分布极不均匀的情况，研究采用 Dice Loss 作为建筑物分割损失函数，公式如下：

$$L_{\text{Dice}}=1-\frac{2\sum t_i\hat{y}_i}{\sum t_i+\sum\hat{y}_i} \tag{6}$$

式中，t_i 为像素 i 在标签图中的值，$\hat{y}_i$ 为像素 i 在预测图中的值。

为了更好地区分背景和建筑物，同时获得更好的建筑物边界信息，采用 LovászHinge Loss 优化交并比（IoU），公式如下：

$$L_{\text{Lovász-Hinge}}=\frac{1}{|y_+|}\sum_{i=1}^{|y|}\Delta_i^{\text{IoU}}\cdot\left(1-y_i f_i\right)_+^{\downarrow} \tag{7}$$

式中，f_i 为第 i 个像素的预测概率，y_i 为真实标签；$(\,)^{\downarrow}$ 按错误程度降序排列；Δ_i^{IoU} 为 Lovász 梯度；$|y_+|$ 代表正样本数量，用于归一化。

最后，采用 Focal Loss、Dice Loss 和 Lovász-Hinge Loss 加权组合作为分割损失函数，计算公式如下：

$$L_{\text{seg}}=L_{\text{Dice}}+3L_{\text{Focal}}+1.5L_{\text{Lovász-Hinge}} \tag{8}$$

3.4 评价指标

为综合评价模型性能，选取 $F1$ 分数、IoU、精确率 P（Precision）、召回率 R（Recall）作为模型精度评估指标，各指标计算方式如下：

$$\begin{cases} P=\dfrac{TP}{TP+FP} \\ R=\dfrac{TP}{TP+FN} \\ F1=2\times\dfrac{P\times R}{P+R} \\ \mathrm{IoU}=\dfrac{TP}{TP+FP+FN} \end{cases} \tag{9}$$

式中，*TP*、*FP*、*FN* 分别为正确分类真像素数、错误分类真像素数、错误分类错误像素数。

3.5 对比实验

基于xBD数据集，选择U-Net、Segformer、Swin-UNet和DCSA-Former进行预训练，精度指标对比结果如表3所示。DCSA-Former模型在Recall、*F*1分数和IoU三个关键指标均取得最高值，分别为87.44%、88.23%和78.93%，表明该模型在整体检测能力和像素级区域匹配方面具有明显优势。Segformer在Precision指标表现最为突出，达到90.91%，但在召回率（Recall）方面略低于DCSA-Former，存在漏检现象。U-Net和Swin-UNet作为经典的卷积神经网络结构和其变体，整体性能相较于Transformer系列模型表现偏弱，尤其是在语义分割最重要的指标IoU，仅为72.58%和68.81%，这表明传统卷积神经网络在复杂场景难以有效捕捉多尺度信息和全局上下文信息。综上，DCSA-Former模型通过SimAM和密集连接组合策略，在保持精度的基础上显著提升了建筑物分割能力。

表3　对比实验精度指标

模型	Precision/%	Recall/%	*F*1分数/%	IoU/%
U-Net	88.47	77.16	82.12	72.58
Segformer	90.91	79.76	85.71	74.99
Swin-UNet	83.99	79.22	81.53	68.81
DCSA-Former	90.57	87.44	88.23	78.93

各模型在xBD数据集的可视化结果如图3所示，图3（a）和图3（b）为建筑物边缘缺失，图3（c）和图3（d）为建筑物内部空洞，图3（e）和图3（f）为建筑物与人工地物误检场景。DCSA-Former在各类场景均表现最优，得益于分层Segformer编码器与密集连接、SimAM结合，构建了全局-局部协同优化的网络结构，显著提升了建筑物提取过程中的边缘完整性、内部空洞修复能力和干扰抑制效果。Segformer和U-Net在不同场景表现各异，体现了对局部和全局信息处理的差异。而Swin-UNet算法凭借Swin-Transformer的滑动窗口机制与U-Net的编解码结构，增强了对复杂场景中长距离依赖和细节特征的捕捉能力，能够有效解决大尺度建筑物内部空洞问题，但误检和边缘检测效果有限。

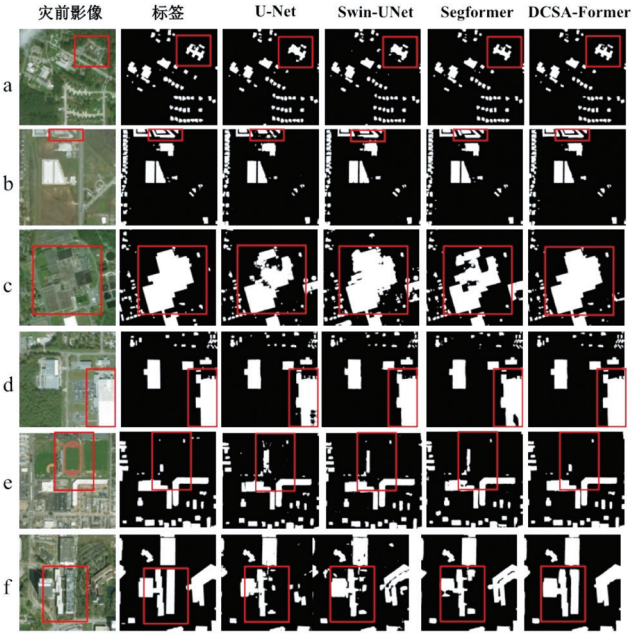


图3　xBD数据集提取结果

3.6 消融实验

消融实验精度评价指标如表4所示。结果表明，尽管原始Segformer模型在Precision模型保持领先，但Recall及*F*1分数相对较低，说明其特征解码结构在恢复目标细节方面存在一定局限；SC-Former通过引入卷积解码器提升了R额力量擦了和*F*1分数，增强了局部信息提取；通过引入密集连接模块的DC-Former，进一步提升了Recall和*F*1分数，表明密集连接有助于缓解梯度消失并增强特征复用；最终的DCSA-Former模型，在保留上述结构的基础上融入SimAM注意力机制，有效提升了对重要特征的关注能力，相较于Segformer模型，在Recall、*F*1分数和IoU上分别提升7.48%、2.52%和3.94%，综合性能最佳，且在不显著增加参数量（47.22M）和计算量（34.71GFLOPs）的情况下，提升了分割性能，表明所添加的模块对建筑物语义分割有显著效果。

表4　消融实验精度评价指标

模型	模块	Precision/%	Recall/%	*F*1分数/%	IoU/%	参数量/M	GFLOPs
Segformer	—	90.91	79.76	85.71	74.99	44.60	35.93
SC-Former	卷积解码器	90.72	83.16	86.78	76.06	58.69	47.91
DC-Former	密集连接+卷积解码器	89.51	85.50	87.46	77.73	47.22	34.71
DCSA-Former	密集连接+SimAM+卷积解码器	90.57	87.44	88.23	78.93	47.22	34.71

4 Islahiye 迁移

四种语义分割模型采用三种不同的训练策略迁移至 Islahiye 地区，迁移评价指标结果如表 5 所示，其中，迁移 + 数据微调策略使用 30% 的数据进行训练，用 70% 数据进行测试，对所有模型的性能提升最为显著。以 Segformer 为例，采用该策略后，其 Precision、Recall、*F*1 分数和 IoU 相较于直接迁移策略分别提升 6.7%、2.75%、4.65% 和 7.1%。DCSA-Former 同样在此策略下表现优异，取得最高的 Recall、*F*1 分数和 IoU，展现出强大的语义分割能力和模型泛化性能。相比之下，直接迁移策略的表现普遍不佳，尤其是 Swin-UNet 模型，在该策略下的 IoU 仅为 45.46%，说明该模型在跨区域推理时因遥感影像空间异质性出现了语义解耦偏移。

表5　Islahiye地区迁移评价指标

模型	策略	Precision/%	Recall/%	*F*1分数/%	IoU/%
U-Net	直接迁移	59.20	87.85	70.73	54.41
	直接训练	82.92	63.63	72.01	56.02
	迁移+数据微调	89.82	86.66	85.14	70.17
Segformer	直接迁移	83.48	82.21	82.84	70.68
	直接训练	89.74	76.18	82.40	69.91
	迁移+数据微调	90.18	84.96	87.49	77.78
Swin-UNet	直接迁移	56.18	72.33	63.24	45.46
	直接训练	70.61	70.57	70.59	54.36
	迁移+数据微调	84.36	75.36	79.60	66.11
DCSA-Former	直接迁移	86.59	80.00	83.17	71.21
	直接训练	84.88	82.14	83.49	71.46
	迁移+数据微调	89.73	87.81	87.68	78.02

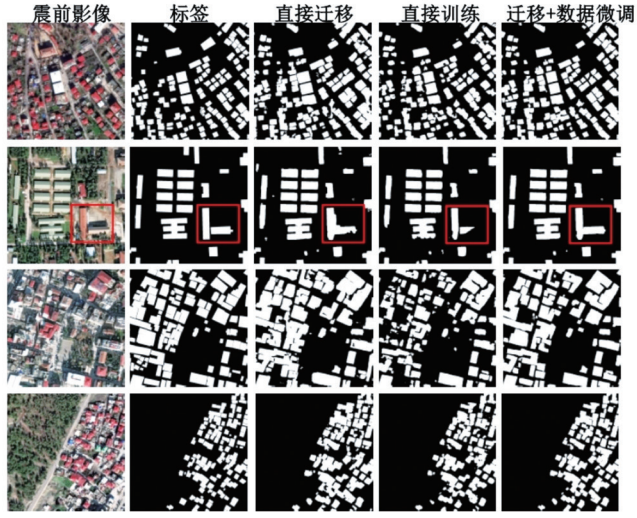


图4　DCSA-Former迁移结果

DCSA-Former 模型采用三种学习策略在 Islahiye 地区的迁移结果如图 4 所示。由图 4 可知，迁移 + 数据微调的方式能够有效解决建筑物密集区域边缘细节模糊问题；直接迁移策略由于数据量较少，网络学习不充分，建筑物密集区域呈现粘连成片现象；直接迁移缺少对本地数据进行特定特征微调，分割结果存在明显错分或漏分。以图 4 第二行为例，红框中建筑物只有迁移 + 数据微调策略识别出完整的建筑物，且在红框左侧可以明显观察出这种方式能够有效避免误检，并恢复建筑物完整形状。

5 结论

针对高分辨率遥感影像建筑物提取存在建筑内部空洞、边缘细节模糊和人工地物误检等问题，研究基于 Segformer，提出一种 DCSA-Former 模型，旨在提供精准的建筑物轮廓信息。该模型使用分层 Segformer 编码器，引入密集连接与 SimAM 注意力机制，强化不同尺度建筑物信息的提取，增强目标语义特征和空间特征，并有效抑制背景信息，通过逐步上采样恢复图像细节。实验结果表明，在 xBD 数据集上，DCSA-Former 模型的 Recall、*F*1 分数和 IoU 三项精度指标均优于 U-Net、Swin-UNet 和 Segformer 模型，分别提升 7.48%、2.52% 和 3.94%，且模型复杂度并未出现明显增长。

采用三种不同的学习策略将模型迁移至 Islahiye 地区时，DCSA-Former 模型在 Precision、Recall、*F*1 分数和 IoU 四项精度指标中表现最佳，表明该模型具有良好的泛化性能。相比于直接迁移、直接训练策略，采用迁移 + 数据微调策略，DCSA-Former 的各项精度指标均得到显著提升，Precision、Recall、*F*1 分数和 IoU 四项指标分别为 89.73%、87.81%、87.68% 和 78.02%。

参考文献

[1] 余岸竹,陈俊铭,刘冰,等.面向遥感影像建筑物提取的大模型自适应方法[J].遥感信息,2025,40(2):30-38.

[2] Li J,Huang X,Tu L,et al. A review of building detection from very high resolution optical remote sensing images[J].GIScience & Remote Sensing,2022,59(1):1199-1225.

[3] 谢跃辉,李百寿,刘聪娜.结合多种影像特征与CNN的城市建筑物提取[J].遥感信息,2020,35(5):80-88.

[4] 高亦远,余江峰,赵强,等.基于自注意力机制的遥感影像建筑物提

（下转第 57 页）

基于多源数据的矿山生态修复动态监测方法与成效评估

孙萌　卜江颜　李亚琼

（河南省遥感院，河南 郑州 450003）

摘　要：矿山开采活动对区域生态环境造成严重破坏，科学监测并评估生态修复成效是保障区域生态安全的关键环节。以河南省三门峡市陕州区为研究区，融合Landsat-8与Sentinel-2多源遥感数据，构建归一化植被指数（NDVI）、增强型植被指数（EVI）、裸土指数（BSI）及植被覆盖度（FVC）综合监测指标体系，开展2020～2024年矿山生态修复过程的长时序动态监测与成效评估。结果表明：研究期内陕州区NDVI均值由0.329升至0.346，增幅5.3%；EVI均值由0.83升至0.89，增幅5.9%；BSI均值由−0.074降至−0.087，降幅17.6%；植被覆盖度从58.5%提升至60.4%，其中高植被覆盖区（FVC＞0.8）面积由405.46km^{2}扩大至408.97km^2。变化检测结果显示，研究区生态修复明显改善区占比78.2%，基本稳定区占比17.5%，明显退化区仅占4.3%。Landsat-8与Sentinel-2数据计算的NDVI相关系数达0.89，验证了多源遥感数据融合用于矿山生态修复监测的可行性与可靠性。研究表明，多源遥感数据融合方法可实现矿山生态修复的高效、长时序、大范围动态监测，能精准揭示矿山生态修复的时空演变特征，为区域矿山生态修复效果评估、生态环境管理及修复工程优化提供科学依据与技术支撑。

关键词：矿山生态修复；多源遥感；动态监测；植被指数；植被覆盖度

1　引言

矿山开采活动在促进区域经济发展的同时，也对生态环境造成严重破坏，主要表现为植被破坏、土壤侵蚀、地形改变和生物多样性降低等问题[1-2]。传统矿山生态修复监测以地面调查与样方监测为主，虽可获取精细局部数据，但存在成本高、周期长、覆盖范围小等局限，难以支撑大范围、长时序动态监测[3-4]。遥感技术以宏观、快速、经济的优势，逐渐成为矿山生态修复监测的重要手段。目前，生态修复遥感监测常用指标包括：归一化植被指数（NDVI），能够反映植被生长状况，但在高植被覆盖区易饱和[5]；增强型植被指数（EVI），通过引入蓝光波段，改善了高植被覆盖区的监测精度[6]；裸土指数（BSI）可有效识别裸露土壤、矿渣等无植被覆盖区域，适用于矿山地表裸露程度及恢复过程中土壤覆盖恢复监测[7]。多种遥感指标有机结合能更全面地监测矿山生态修复效果。

河南省三门峡市陕州区作为传统矿业集中区，煤矿、金矿和铝土矿等资源开采历史悠久，矿山生态修复任务艰巨。科学监测和评估矿山生态修复效果，对于指导生态修复工程实施、保障区域生态安全具有重要意义[3]。目前针对三门峡陕州区矿山生态修复的遥感监测研究相对匮乏。因此，以陕州区为研究区，整合Landsat-8和Sentinel-2多源遥感数据，构建多指标生态修复监测体系，开展2020～2024年长时序矿山生态修复动态监测研究，揭示2020～2024年研究区矿山生态修复时空演变特征，对比、评估不同矿山类型的生态修复效果，验证多源遥感监测方法在矿山生态修复评估中的适用性与可靠性，为同类矿业集中区的生态修复监测提供技术参考。

2　研究区概况

研究区位于河南省三门峡市陕州区（东经110°21′～111°11′、北纬34°13′～34°48′），总面积约1609km^2，研究区概况如图1所示。陕州区地处豫西黄土高原与秦岭山地过渡地带，地势南高北低，南部属熊耳山余脉，中部为黄土丘陵区，北部为黄河冲积平原。区域属暖温带大陆性季风气候，年平均气温13.8℃，年降水量550～700mm，降水集中在7～9月。陕州区矿产资源丰富，主要包括煤炭、黄金、铝土矿、铁矿等，矿业开采历史超过50年。长期开采形成了多处大型矿山，主要分布在观音堂镇、张汴乡、大营镇等地。近年来，随着生态文明建设的推进，陕州区启

作者简介：孙萌（1985—），男，汉族，本科，工程师，主要从事摄影测量、遥感监测等工作。

动了大规模矿山生态修复工程，截至 2024 年，陕州区已完成矿山生态修复面积约 15km^2，主要采取土地平整、客土回填、植被重建等措施。

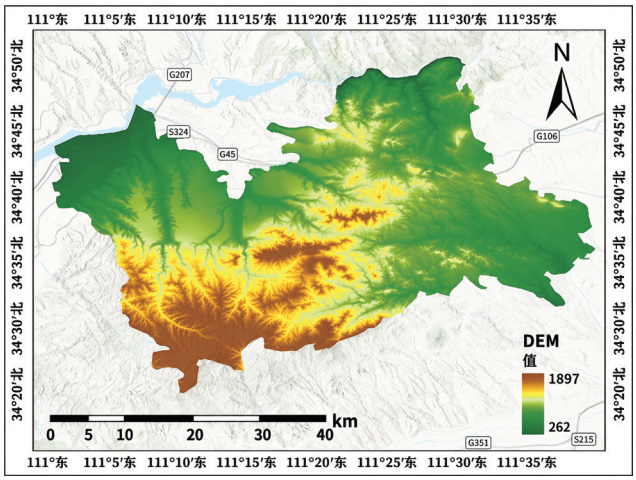


图1　河南省三门峡市陕州区概况

3　数据来源与研究方法

3.1 数据来源

研究采用的遥感数据均为公开共享的标准化产品，包括 Landsat-8 OLI/TIRS 地表反射率产品（LANDSAT/LC08/C02/T1_L2）、Sentinel-2 MSI 地表反射率产品（COPERNICUS/S2_SR），同时选取 SRTM 数字高程模型（DEM）数据用于辅助地形特征分析。各数据源技术参数与应用场景如下：Landsat-8 数据空间分辨率 30m、时间分辨率 16d，主要用于 NDVI、EVI、BSI 等生态指数的计算与长时序监测；Sentinel-2 数据空间分辨率 10m、时间分辨率 5d，用于高分辨率植被生长细节监测，并与 Landsat-8 数据计算的生态指数进行交叉验证；SRTM DEM 数据空间分辨率 30m，用于研究区地形特征提取与坡度分析。

研究时段为 2020～2024 年，每年选取 5～9 月植被生长季遥感影像，经云掩膜去除云与云阴影区域后，采用中值合成法生成年度无云合成影像，为后续生态监测指标计算与分析提供高质量、标准化的遥感数据基础。

3.2 研究方法

3.2.1 技术路线

研究矿山生态修复动态监测技术路线为：首先，收集并预处理 Landsat-8、Sentinel-2 多源遥感数据，生成 2020～2024 年度无云影像数据；其次，基于波段运算计算 NDVI、EVI、BSI、FVC 等生态监测指标，构建综合监测体系；再次，通过时序分析揭示生态指标的年际变化特征，结合矿山类型开展差异化生态修复效果评估；然后，利用差值法开展生态修复变化检测，识别生态改善、稳定与退化区域的空间分布特征；最后，对 Landsat-8 与 Sentinel-2 数据计算的生态指标进行交叉验证，以证明多源遥感数据融合监测方法的可靠性，最终形成研究区矿山生态修复动态监测与成效评估成果。

3.2.2 生态修复监测指标

选取 NDVI、EVI、BSI 为核心生态修复监测指标，从植被生长状况、地表裸露程度两个维度刻画矿山生态修复过程，各指标计算公式如下：

$$NDVI=\frac{\rho_{NIR}-\rho_{Red}}{\rho_{NIR}+\rho_{Red}} \quad (1)$$

$$EVI=G\cdot\frac{\rho_{NIR}-\rho_{Red}}{\rho_{NIR}+C_1\cdot\rho_{Red}-C_2\cdot\rho_{Blue}+L} \quad (2)$$

$$BSI=\frac{(\rho_{SWIR}+\rho_{Red})-(\rho_{NIR}+\rho_{Blue})}{(\rho_{SWIR}+\rho_{Red})+(\rho_{NIR}+\rho_{Blue})} \quad (3)$$

式中，ρ_{Blue}、ρ_{Red}、ρ_{NIR}、ρ_{SWIR} 分别代表蓝光、红光、近红外和短波红外波段的地表反射率。其中，增益系数 G=2.5，红光波段调节系数 C_1=6，蓝光波段调节系数 C_2=7.5，土壤调节参数 L=1。

3.2.3 植被覆盖度估算

研究利用像元二分模型，基于 NDVI 进行植被覆盖度（FVC）估算，计算公式如下：

$$FVC=\frac{NDVI-NDVI_{soil}}{NDVI_{veg}-NDVI_{soil}} \quad (4)$$

式中，$NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值，取研究区 5% 分位数；$NDVI_{veg}$ 为完全植被覆盖区域的 NDVI 值，取 95% 分位数。

根据植被覆盖度将生态修复等级划分为 5 级：极低植被覆盖、低植被覆盖、中等植被覆盖、较高植被覆盖、高植被覆盖，具体等级划分如表 1 所示。

表1　植被覆盖度生态修复等级

等级	类型	FVC
1	极低植被覆盖	FVC≤0.2
2	低植被覆盖	0.2<FVC≤0.4
3	中等植被覆盖	0.4<FVC≤0.6
4	较高植被覆盖	0.6<FVC≤0.8
5	高植被覆盖	FVC>0.8

3.2.4 变化检测方法

采用差值法检测生态修复变化，公式如下：

$$\Delta NDVI=NDVI_{t2}-NDVI_{t1} \quad (5)$$

式中，$NDVI_{t1}$ 和 $NDVI_{t2}$ 分别为 $t1$ 和 $t2$ 时期的 NDVI 值。研究将 ΔNDVI 数值划分为三个等级，具体如表 2 所示。

表2　ΔNDVI数值划分等级

等级	类型	ΔNDVI
1	植被明显改善	ΔNDVI＞0.05
2	植被基本稳定	-0.05≤ΔNDVI≤0.05
3	植被明显退化	ΔNDVI＜-0.05

4　研究结果与讨论

4.1 植被指数时空变化特征

基于Landsat-8数据计算的2020～2024年生态监测指标统计结果如图2所示，各生态指标的时间序列变化呈现出明显的年际波动特征。NDVI和EVI在2022年出现短暂下降，这与该年度降水偏少、气温偏高的气候条件有关，导致植被生长受到一定程度的水分胁迫。据三门峡市气象局发布的《2020—2024年陕州区气候年报》数据显示，2022年陕州区年降水量为528.3mm，较常年平均（610.2mm）偏低13.4%；年均气温为14.6℃，较常年平均（13.8℃）偏高0.8℃。干旱和高温叠加效应抑制了植物蒸腾作用与光合作用，进而影响植被生长，表现为NDVI和EVI的阶段性回落。2023年后，随着生态修复措施的持续推进和降水条件的改善（2023年降水量达652.1mm，接近多年均值），NDVI和EVI均出现明显回升，2023年达到研究期内的最高值。BSI变化趋势与植被指数呈显著负相关，表明植被恢复与裸土面积减少存在明显耦合关系。

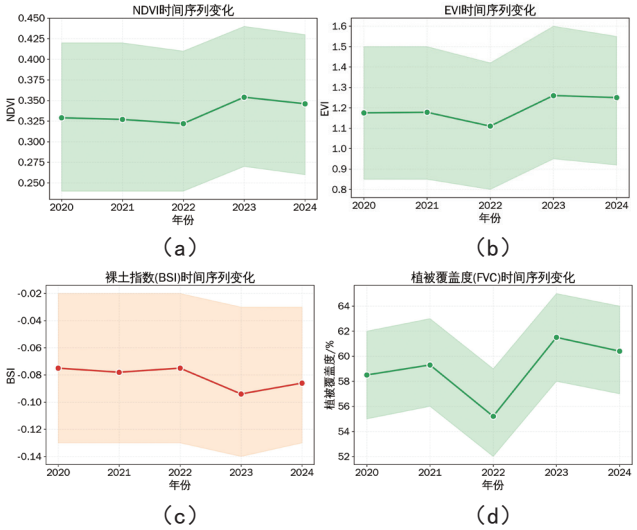


图2　生态指标时间序列变化

为评估不同矿山类型生态修复效果，按照矿产类型对研究区进行分区，分别计算煤炭、铝土矿、金矿等矿山的NDVI、EVI、BSI和FVC变化指标，结果显示：

煤矿山：NDVI增幅为6.1%，EVI增幅为6.8%，BSI降幅为18.2%，FVC从56.2%提升至58.9%；

铝土矿山：NDVI增幅为4.5%，EVI增幅为5.2%，BSI降幅为15.6%，FVC从52.1%提升至54.7%；

金矿山：NDVI增幅为5.8%，EVI增幅为6.3%，BSI降幅为16.7%，FVC从59.3%提升至61.2%。

对比分析结果表明，不同矿产开采对生态环境的破坏程度及修复难度存在显著差异：铝土矿开采具有深度大、地形扰动剧烈、土壤破坏严重等特点，导致生态修复进程相对缓慢，修复效果低于煤矿山与金矿山；金矿开采规模相对较小，且修复措施实施及时、针对性强，生态修复效果优于煤矿山与铝土矿山；煤矿山虽开采规模大，但修复工程投入力度大、措施体系完善，生态修复效果处于中等水平。上述结果实现不同矿山类型生态修复效果的差异化评估，验证了多源遥感技术在矿山生态修复精细化评估中的应用价值。

4.2 植被覆盖度等级变化

利用像元二分模型计算的植被覆盖度（FVC）显示，2020～2024年期间，研究区FVC均值从58.5%提升至60.4%，净增长1.8个百分点。植被覆盖度面积变化如图3所示，高植被覆盖区（FVC＞0.8）面积由2020年的405.46km^{2}扩大至2024年的408.97km^2，增加了3.51km^2；较高植被覆盖区（0.6＜FVC≤0.8）面积从377.95km^{2}增至457.89km^2，增幅达21.1%。极低植被覆盖区（FVC≤0.2）面积从138.26km^{2}减少至122.38km^2，减少了11.5%；低植被覆盖区（0.2＜FVC≤0.4）面积从255.78km^{2}减少至206.95km^2，减少了19.1%。NDVI空间分布特征如图4所示。

植被覆盖度等级变化表明，研究区生态修复呈现“低覆盖区减少、高覆盖区扩张”的良好态势，特别是2023～2024年期间，较高和高植被覆盖区面积持续增加，这与陕州区大规模实施矿山生态修复工程密切相关。通过土地平整、客土回填和植被重建等综合措施，原有裸露矿山逐步转变为植被覆盖良好的生态修复区。植被覆盖度空间分布特征如图5所示。

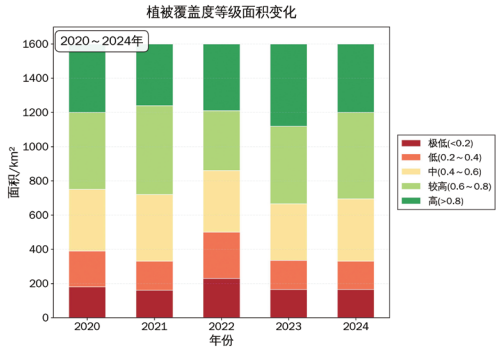
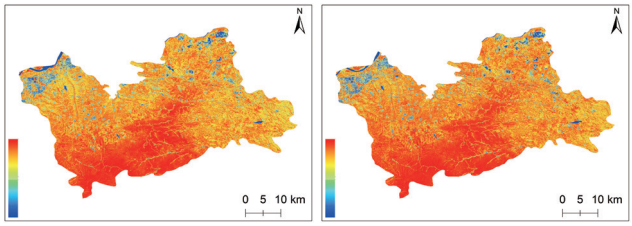
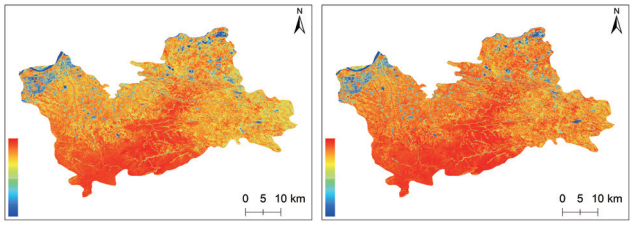


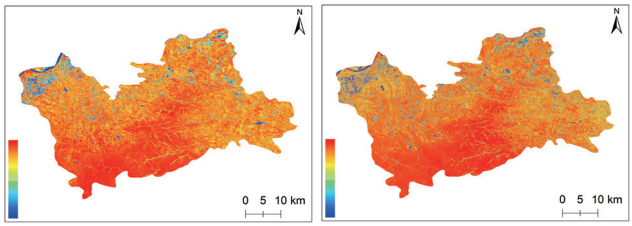
图3　植被覆盖度面积变化



（a）2020年　（b）2021年

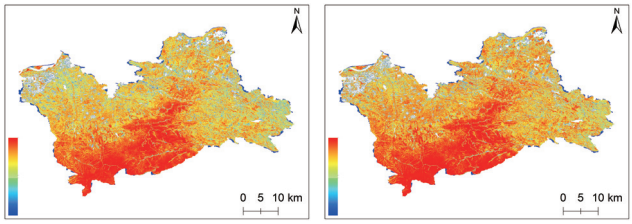


（c）2022年　（d）2023年

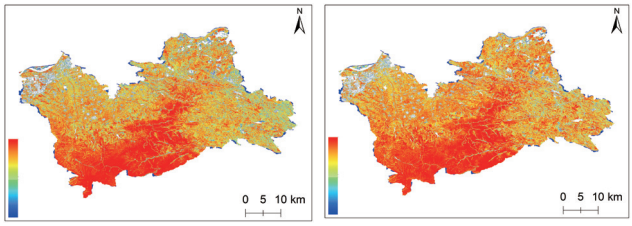


（e）2024年　（f）2025年

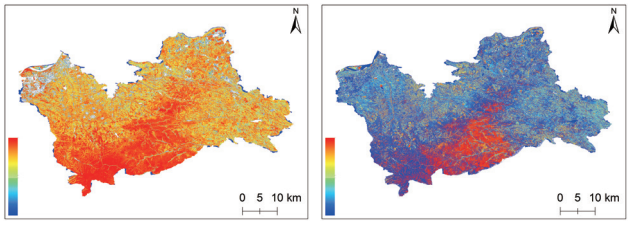
图4　2020~2024年NDVI分布



（a）2020年　（b）2021年



（c）2022年　（d）2023年



（e）2024年　（f）2025年

图5　2020~2024年FVC分布

4.3 植被变化空间格局

2020年和2024年NDVI差值变化检测结果显示，植被明显改善区（ΔNDVI＞0.05）面积为282.11km^2，占总面积的78.2%，主要分布在观音堂镇、张汴乡和大营镇等矿山集中分布区；基本稳定区（-0.05≤ΔNDVI≤0.05）面积为1260.95km^2，占比17.5%，主要分布在原有植被覆盖较好的山地林区；明显退化区（ΔNDVI＜-0.05）面积为69.14km^2，仅占4.3%，零星分布于新增矿山开采区与建设用地扩张区。

植被明显改善区的大面积分布充分证明了陕州区矿山生态修复工程的有效性。通过对比Sentinel-2高分辨率影像，发现这些改善区域与实际修复工程实施地点高度吻合，验证了多源遥感监测方法的可靠性。少量植被退化区主要与城镇建设扩张和新增矿业活动有关，未来需在生态管理时加强监控和保护。

4.4 多源数据融合验证

为验证多源遥感数据融合监测方法的可靠性，选取2024年Landsat-8与Sentinel-2数据计算的NDVI、EVI、BSI生态指标进行交叉验证，结合均值、相对误差、决定系数（R^2）开展定量分析，同时选取500个随机样点进行相关性验证。以Landsat-8数据计算的生态指标为基准值（适配长时序监测需求），以Sentinel-2数据指标为验证值，计算依据如下：

（1）相对误差：反映数据源偏差，计算公式如下：

$$\text{相对误差}=\frac{X_{S2}-X_{L8}}{X_{S2}} \quad (6)$$

（2）决定系数（R^2）：反映线性相关程度，通过最小二乘法拟合线性回归方程计算，公式如下：

$$y=ax+b \quad (7)$$

式中，R^2越接近1，数据一致性及监测可靠性越高。

经验证可知：两种数据源计算的生态指标具有高度一致性：NDVI均值分别为0.346（Landsat-8）和0.351（Sentinel-2），相对误差仅1.4%，决定系数R^2达0.89；EVI均值分别为1.249和1.257，相对误差0.6%，R^2为0.87；BSI均值分别为-0.87和-0.85，相对误差2.3%，R^2为0.84。500个随机样点的相关性分析证实，Landsat-8与Sentinel-2数据在刻画研究区植被生长状况和地表裸露程度方面具有良好的可比性，为构建多源遥感综合监测体系提供了数据基础。

从数据源技术优势看，Sentinel-2数据凭借10m高空间分辨率，能精准识别小面积矿山修复区的细微植被变化，提升监测空间精细度；Landsat-8数据有更长的时间序列（自1972年开始）和稳定的数据质量，适合开展大尺度、长时序生态修复动态监测。两种数据源优势互补、协同使用，可保障生态修复监测结果的时间连续性和监测精度，提升空间细节识别能力。

5 结论

以河南省三门峡市陕州区为研究区，融合Landsat-8与Sentinel-2多源遥感数据，构建综合生态监测指标体系，开展2020～2024年矿山生态修复长时序动态监测，揭示矿山生态时空演变特征，评估不同矿山类型的修复效果，验证多源遥感监测方法的可靠性，主要结论如下：

（1）2020～2024年陕州区矿山生态修复成效显著。NDVI、EVI均值分别增长5.3%、5.9%，BSI均值下降17.6%，植被生长状况改善，地表裸露降低；虽2022年受气候影响植被指数回落，但2023年后快速回升，区域生态修复稳定性与韧性显著提升。

（2）陕州区植被覆盖水平与等级结构同步优化。FVC均值从58.5%提升至60.4%，高植被覆盖区扩张，增长21.1%，极低与低植被覆盖区分别减少11.5%和19.1%，实现植被覆盖等级向中高等级有序转换，生态修复质量与稳定性有所提升。

（3）陕州区矿山生态修复呈“整体改善、局部稳定、零星退化”格局。明显改善区占78.2%，空间分布与修复工程核心区吻合；基本稳定区分布在原有植被良好的山地林区；明显退化区仅占4.3%，受新矿开采与城镇建设影响，需加强管控。

（4）陕州区不同矿山类型修复效果差异显著。金矿修复效果最优，煤矿修复效果中等，铝土矿修复进程相对缓慢，需针对性优化生态修复方案。

（5）多源遥感数据融合监测方法可靠适用，Landsat-8与Sentinel-2数据计算的NDVI相关系数达0.89，各生态指标相对误差低于3%，两种数据优势互补，可支撑矿山生态修复高效、长时序、大尺度动态监测与精细化评估。

研究构建的监测体系能精准揭示矿山生态时空演变特征，实现精细化、差异化评估，为矿山生态修复提供科学依据。后续可结合地面调查数据完善评价体系，开展生态修复成效的长期预测，为区域生态修复提供更全面的技术支撑。

参考文献

[1] 陈珲,崔一涵,汪海明,等.矿山生态修复及其固碳潜力研究进展[J].地球科学,2024,49(12):4594-4607.

[2] 李晶,闫星光,闫萧萧,等.基于GEE云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J].煤炭学报,2021,46(5):1439-1450.

[3] 杜康硕,鲁明星,刘硕,等.矿山迹地生态修复效果评价及应用研究：以涞源县南马庄乡矿山为例[J].矿业安全与环保,2024,51(3):172-178.

[4] 张进德,杨利亚,田磊,等.矿山生态修复技术方法研究与展望[J].水文地质工程地质,2025,52(4):16-25.

[5] Wanders N , Wada Y , Van L H A J .Global hydrological droughts in the 21st century under a changing hydrological regime[J].Earth System Dynamics,2015,6(1):1-15.

[6] 杨静,张亚杰,陈金威,等.基于MODIS数据的三种植被指数在海南岛植被监测中的适用性研究[J].干旱气象,2024,42(2):274-282.

[7] Nguyen C T,Chidthaisong A,Kieu Diem P,et al.A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia using Landsat 8[J].Land,2021,10(3):231.

（上接第52页）

取方法研究[J].信息技术与信息化,2022(11):5-8.

[5] 余快,宋宝贵,邵攀,等.基于层级尺度交互的UNet建筑物提取方法[J].广西师范大学学报(自然科学版),2025,43(2):121-132.

[6] 邹永康.基于多尺度特征改进UNet++的遥感影像建筑物提取方法[J].长江信息通信,2024,37(7):40-42.

[7] Xiao D,Kang Z,Fu Y,et al.Csswin-unet: a Swin-UNet network for semantic segmentation of remote sensing images by aggregating contextual information and extracting spatial information[J]. International Journal of Remote Sensing,2023,44(23):7598-7625.

[8] Liu J,Huang H,Sun H,et al.LRAD-Net: An improved lightweight network for building extraction from remote sensing images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2022,16:675-687.

[9] 张云佐,郭威,武存宇.融合CNN和Transformer的遥感图像建筑物快速提取[J].光学 精密工程,2023,31(11):1700-1709.

[10] Zhao Y,Sun G,Zhang L,et al.MSRF-Net: Multiscale receptive field network for building detection from remote sensing images[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023,61:1-14.

[11] 陈婕.基于孪生网络的遥感影像建筑物损毁评估方法研究[D].北京:中国测绘科学研究院,2023.

[12] Xie E,Wang W,Yu Z,et al.Segformer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers[J]. Advances in Neural Information Processing Systems,2021,34:12077-12090.

[13] Yang L,Zhang R Y,Li L,et al.Simam: A simple, parameter-free attention module for convolutional neural networks[C]// Proceedings of the International Conference on Machine Learning. PMLR,2021:11863-11874.

[14] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV).2018:3-19.

一种基于关键向量的地名地址文本空间化方法

邵改革

（中建国信大数据集团有限公司，河南 郑州 450000）

摘　要：地名地址匹配是连接空间数据和属性数据的纽带，实质上是研究地名、地址、坐标三者之间的联系和转换方法。针对目前地名地址文本空间化匹配精度低、匹配效果差的问题，汲取现有算法优点，研究提出一种基于关键向量的地名地址文本空间化匹配方法，通过分析地名地址文本中的关键向量，结合已有的地名地址空间库和关键向量词库，提高匹配精度和整体匹配率，在具体工程实践中取得较好的应用效果。

关键词：地名地址；关键向量；地址匹配；空间化；匹配率

1　引言

随着新型智慧城市的推进，行政职能部门在信息化建设中普遍存在大量历史业务数据缺少坐标、无法在空间信息系统可视化管理的问题。若由外业人员重新实地核查定位，将耗费大量人力物力，大幅提高信息化建设成本。因此，可通过地址匹配方式，将非空间数据的地址描述文本与已有城市基础地理信息数据比对匹配，完成地址信息关联与文本数据空间化，获取对应空间坐标。地名地址匹配建立了非空间信息和空间信息的关联，满足数据匹配和信息转换需求，支撑服务各行各业发展和群众日常生活[1]。

不少专家学者围绕地名地址开展了多层次、多维度研究。现阶段，地址文本空间化匹配方法主要有：全文检索、字符串匹配、基于词典分词的逐级匹配、语义规则匹配、基于神经网络的机器学习方法等[2-5]。全文检索实现简便、匹配精度高，但整体匹配率较低；字符串匹配通过计算字符串相似值完成地址匹配，但字符串相似度较高的地址文本可能指代不同的地理位置，匹配精度难以保障；基于词典分词的逐级匹配使用分词后的文本进行匹配，效果优于全文检索，但分词结果直接影响匹配精度，算法实现复杂度较高；语义规则匹配能识别不同方式描述的同一地址文本，但不确定性较强，算法稳定性较差；基于神经网络的机器学习方法可有效匹配训练样本覆盖范围的地址，但算法复杂度高、难以处理样本外异常地址。

2　需求分析

近年来，城市建设步伐加快，辖区空间不断拓展，规划命名时有变更，不同业务领域采集的数据描述不一，给地址文本空间化匹配带来挑战。各部门（行业）对地名地址的管理与应用虽略有侧重，但总体上地名地址研究离不开三个要素：地名、地址、坐标。三者既有区别，又相互依赖，三者关系如图 1 所示。

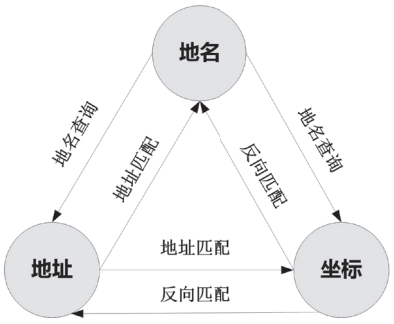


图1　地名地址坐标三者关系

地名是空间位置的专有简称，地址是对空间位置的结构化描述，坐标是空间位置的数字化表示。地名地址匹配本质上是研究地名、地址、坐标之间的关系及转换规则，总体需求有以下 3 个方面：

（1）由地名查找坐标或地址，即地名查询，根据地名关键词查找相似地名，获取其对应坐标（地图定位）和地址信息。（2）由地址查找坐标或地名，即地址匹配，多见于实现地址信息的坐标空间化（将文本属性信息变为带有空间坐标的信息），地名只用于辅助显示。（3）由坐标查找地名或地址，即反向匹配，通过地图定位，缓冲半径内查找附件的地名或地址信息。

对地名地址数据清洗处理后，按照规范将数据标准化，建立含空间坐标的标准地名地址数据库。根据需求分析结果，地名查询和地址匹配主要解决文本字符串到文本字符串的匹配，在标准地名地址库查找符合条件的记录（含空间坐标位置）；反向匹配是空间坐标到空间坐标的匹配，从返回记录中获取地名地址

作者简介：邵改革（1990—），男，汉族，硕士，工程师，高级系统架构师，主要从事空间数据挖掘研究工作。

属性信息。

3 关键技术

常见地名地址文本匹配算法有适用范围，实验效果不理想，缺乏对不规范地名地址文本匹配的场景分析。面向地名地址文本空间化匹配现存问题与算法不足，结合不同业务领域地名地址描述形式的差异，研究提出一种基于关键向量的地名地址文本匹配方法，在初次匹配失败时，提取地址文本关键向量开展二次匹配，应对局部文本描述不一致造成的无法匹配问题，有助于提高整体匹配率，减少外业核查工作量。

3.1 关键向量选取

地名地址文本是空间位置的客观形象描述，坐标是地名地址文本的空间表达。词向量能将单词语义投射到低维稠密向量空间，要充分利用其泛化能力挖掘文本潜在句法和语义信息[6]。借鉴该思路，关键向量是地址文本描述与其他地址具有明显区分的重要字符要素，具有标识性，是地址描述不可拆分的要素单元；当关键向量不一致，则该匹配结果不予采信。

地址文本描述具有层次性，通常以行政区划起始，包含道路、小区、标志物、兴趣点等信息，逐步细化到最后一级。例如：地址“XX 市 XX 区（XX 街道 /XX 社区）XX 路 XX 号（XXX）”，其中，“XX 市 XX 区（XX 街道 /XX 社区）”是行政区划信息，“XX 路 XX 号”是道路名称和门牌号描述，若地址文本中道路名称不一致，则对应的空间坐标不具有参考价值，因此，将道路名称定义为“关键向量”。

当地址缺少道路描述信息时，如地址“XX 市 XX 区（XX 街道 /XX 社区）XX 小区 XX 楼 XX 单元 XXX”，同样前段内容是行政区划，“XX 小区 XX 楼”是小区名称和楼栋号描述。若该地址文本中小区名称不同，则判定匹配不成功，小区名称即定义为“关键向量”。

当地址无道路名称也不含小区名称时，如地址“XX 市 XX 县 XX 镇 XX 村 XX 号”，行政区划层级划分到村，“XX 号”是门牌信息，若村名不一致，地址间相关性较低，村名就是地址文本描述的“关键向量”。

如果地址描述包含多个关键向量，比如道路门牌号后附带小区名称，则道路名称和小区名称均为该地址的关键向量，但二者重要性依次递减，即小区名称优先级高于道路名称，在地址匹配中应优先被使用。

3.2 基于关键向量的空间化匹配策略

基于关键向量的地址文本空间化匹配方法，以待匹配地址文本为输入数据，通过地址匹配算法输出坐标信息。关键向量可从已有地址空间库提取，也可根据职能部门的业务数据生成。一座城市的地址数据规模可达几百、上千万，但关键向量可能只有几千或几万条（如城市道路信息），需结合数据情况进行筛选，形成城市关键向量库。伴随城市的持续发展，各类地理要素名称可能发生变更，造成地址描述前后不一，对关键向量造成影响，因此，需建立关键向量库的同义词描述，解决时序变化带来的地址匹配难题。

地址文本空间化匹配通过文本比对获取空间坐标，实现地址描述文本的空间化表达，支撑地图定位展示及深层次数据挖掘。地址匹配算法将输入地址文本和已有地址空间库数据进行比较，得到相似度最高的记录，提取该记录的空间坐标赋予输入文本，完成地址文本空间化匹配。当精确匹配无法得到有效结果，地址匹配算法依托关键向量信息，按照部分匹配原则，检索相似或附近数据，通过插值拟合得到目标坐标并输出，基于关键向量的匹配策略如图 2 所示。引入关键向量能减少待匹配字符串文本，在保证匹配可信度的同时最大限度寻找相关记录，提升整体地址匹配率。

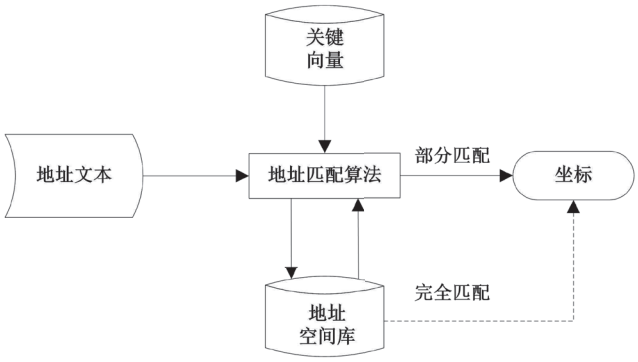


图2 基于关键向量的匹配策略

3.3 地址文本匹配流程

地址文本匹配流程如图 3 所示，具体如下：（1）对用户输入的待匹配地址文本进行检查，若不满足条件直接返回，满足条件进入下一步。（2）将待匹配文本以全文匹配方式在已有地址空间库进行比较，若有结果，计算两者匹配度，输出坐标信息；若无匹配记录，则进入下一步。（3）结合关键向量库，获取待匹配地址文本的关键向量。（4）使用关键向量在地址空间库进行匹配，查找附近或相似记录。（5）上一步搜索结果的附近地址若不满足插值条件，直接计算结果相似度（包含空间距离和文本），并输出结果。（6）若满足插值条件，按照坐标进行空间拟合插值，得到推算

的坐标信息，将拟合插值结果加入结果集输出。

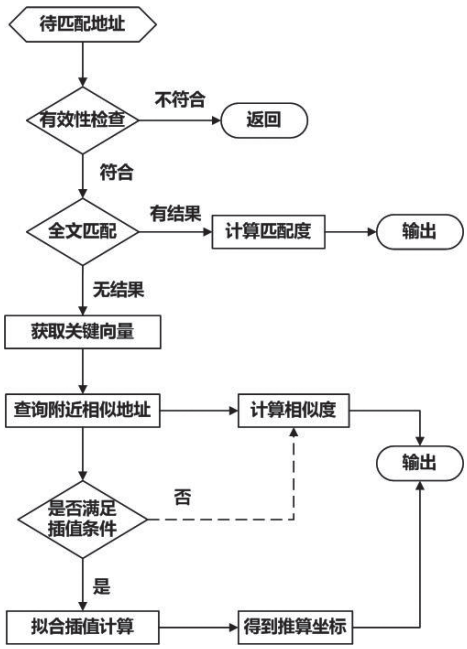


图3　地址文本匹配流程

4　实验分析

地名地址匹配结果通常采用匹配率和准确率指标开展评价。其中，匹配率代表各类查询出现有效搜索结果的概率，准确率用于衡量搜索结果正确有效的概率。二者均与数据质量、查询测试用例有关，但数据质量和查询测试用例往往是既定条件，要求地名地址匹配系统一方面具备强大的搜索功能，支持多形式组合查询；另一方面不断提高匹配结果准确性，提供高相似度的查询结果。对于中大型城市，地名地址数据可达百万、千万级别，对匹配算法运行性能提出高要求，地名地址查询匹配响应时间不应超过 3s，否则会影响用户体验。因此，地名地址匹配系统需在匹配率、准确率、运行性能之间寻求平衡，尽可能满足用户对地名地址匹配的功能与性能需求。

4.1 实验环境

实验环境配置如下：（1）硬件配置：8 核 CPU，64G 内存，1TB 硬盘；（2）数据库版本：PostgreSQL 18；（3）网络条件：1000M/S；（4）编程语言及版本：Java，JDK17；（5）监测指标：匹配率、准确率、网络请求耗时。

4.2 实验结果与分析

研究选取试点城市的地名地址数据，在相同实验环境将研究方法与数据库直接匹配方法进行对比。结果表明，研究方法的匹配率和准确率得到明显提升，查询响应速度有所提高。该方法依托关键向量开展匹配，能削弱无关因素干扰，保证地址标识性与可信度，提升匹配精度和匹配率，减少匹配运算耗时，优化程序运行效率，测试结果如图 4 所示。

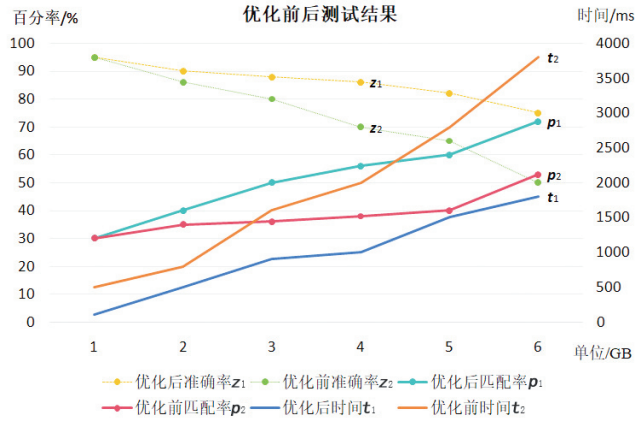


图4　测试结果

5　结语

随着城市的发展与变迁，地名地址数据不断更新，地名地址描述有待规范。研究方法可适用于地名地址描述不规范，但仍保留可供匹配的关键特征向量场景，能有效提高地名地址的匹配率和准确率。若应用场景不满足上述条件，研究方法的适用性与匹配精度可能受到制约，开发人员还需结合数据特征对算法进行调整。地名地址匹配属系统性工程，需深入剖析问题本质、把握核心要点，攻克工程实践中的技术难点，兼顾匹配率、准确率与运行性能间的平衡。未来，地名地址匹配技术仍需进一步增强语义解析能力，搭建更加人性化的交互接口，逐步实现智能化地址匹配。

参考文献

[1] 廖菊燕,杨绍兴.面向柳州市时空信息云平台的地名地址全生命周期更新运营管理建设实践[J].测绘通报,2024(S1):230-236.

[2] 吴怡雯,周煜.浅析浙江省天地图地名地址数据库设计与数据处理实现[J].测绘与空间地理信息,2024,47(3):72-75.

[3] 魏金明,仲伟政.基于置信度的地址匹配方法初探[J].测绘科学,2015,40(1):122-125.

[4] 王克永,刘纪平,罗安,等.前后缀与特征词相结合的地名地址提取[J].测绘通报,2016(2):64-68.

[5] 李玮佳,姚丰.河南省1∶1万地形图地名更新工作的实践和探索[J].资源导刊,2025(16):28-30,35.

[6] 郭飞.基于词向量的跨语言文本相似度检测关键技术研究[D].重庆:重庆大学,2025.

热爱可抵岁月漫长

◎ 陈鲁民

“用一辈子干一件事，你不觉得乏味吗？”对记者这个提问，“中国核潜艇之父”黄旭华毫不犹豫反问一句：“你难道不喜欢一直干自己喜欢的事情吗”，然后又掷地有声地说了这样一句话：“热爱可抵岁月漫长。”

岁月漫长，风雨交加，有热爱相伴，就会如诗如画，满眼风景。晚年的袁隆平，早已功成名就，誉满天下，“天下无人不识君”，在这个领域已是登峰造极，无出其右，但还是做着“禾下乘凉梦”，三天两头下到稻田里搞杂交水稻研究，苦心孤诣，殚精竭虑，每每是一身泥一身水的，却甘之如饴，乐此不疲，就是因为热爱。

因为热爱，齐白石直到耄耋之年还每日作画，一日不画就难安生，寝食不宁，心绪不佳，第二天一定要补上。其时，他早已成为享誉国内外的大画家，随便画几笔，就够平常人家吃几年的，他的名作更是价值连城。虽然既不缺钱，也不缺名，他还是画不停手，废寝忘食，“不教一日闲过”，还是因为热爱。

因为热爱，《哪吒 2》的导演饺子，父亲早逝，他与母亲相依为命，一度靠着母亲每月 1000 元的退休金勉强维持生活。他没有任何收入来源，生活捉襟见肘，左支右绌，在家“啃老”三年零八个月，却始终未曾磨灭他对动画的热爱，还是每天在家里苦心钻研动画艺



术，到了走火入魔的地步。饺子说：“热爱无敌，我心中一直有团无名火在烧。”

运动员也是如此。体操是吃青春饭的典型运动项目，体操运动员通常都是在二十岁出头就退役了，而体操老将乌兹别克斯坦选手丘索维金娜，却从 17 岁夺得巴塞罗那奥运会金牌一直比赛到现在，和一群小姑娘们一起腾高跃低，她今年已满 50 岁，没想到又夺得一枚跳马金牌。

前世界乒乓球冠军倪夏莲，已进入耳顺之年，却不在家含饴弄孙、安享天伦之乐，仍然活跃在国际赛场上，且成绩不俗，不容小觑，几乎每次比赛都有斩获，被称为“乒坛常青树”，是祖母级运动员。和她同场竞技的对手都是她的孙子辈，不管胜负，都得恭恭敬敬叫她一声奶奶。

已故科学家李政道，20 世纪 50 年代 31 岁就获得诺贝尔物理学奖，可谓大器早成，名满天下。但他没有止步不前，躺在荣誉上睡大觉，仍在科研之路上奔跑不止，常常在实验室一待就好几天，吃喝睡都在那里，精神抖擞地挑战物理界的难题，探索粒子世界的科学奥秘，原因无他，就是无可遏制的热爱。

无论是科研攻关，还是赛场显威，无论是画坛竞秀，还是稻田挥汗，这些杰出人物的所作所为都与名气无关，与利益无涉。什么金钱财富、名声地位、输赢利钝、成败得失，早就不在他们的视野之内，成为他们看轻的身外之物，之所以还是这样孜孜矻矻、不辞辛苦，纯粹就是因为热爱，是他们发自内心无可抑制的热爱，是一种愉悦至极的身心享受，一种无法言喻的人生体验，一种超凡脱俗的高雅境界。

某人才研究所在对古今中外 5012 名成功者的经历研究后出版了一本书，得出这样一句总结：“三分钟热度不是热爱。热爱是热情的延续，是心中永不熄灭的一团火。”

热爱无敌，热爱如天，唯热爱能抵岁月漫长，唯热爱能战胜寂寞枯燥。热爱是人类最好的老师，是不竭的生命之火，是多巴胺的重要产生之源，也是人类不断前进的巨大动力。一个人如果有真心热爱的事业，如痴如醉，心心念念，是十分幸运的、值得珍贵的，也是令人羡慕的。可以肯定，人生的成功成才成气候，也是水到渠成，自然而然的。

岁月漫长，有热爱相伴，就会一路高歌，如诗如画。

（作者系中国人民解放军网络空间部队信息工程大学原教授、中国作家协会会员）

鸟唤一河春

◎ 李宁宁

“关关雎鸠，在河之洲”，这是《诗经》里最美的河畔画卷。两千多年后，当我行走在山东省沂源县的螳螂河畔，耳边声声鸟鸣，让我真切体会到了“绿水青山就是金山银山”的生动内涵。

河叫螳螂河，《水经注》里说“沂水又东南，螳螂水入焉，水出鲁山，东南流，右注沂水……”说的就是这条河。涓涓细流从鲁山之阳蜿蜒而下，盘山绕崮，走走停停，一路招兵买马，一会儿走成个“一”字，一会儿走成个“丫”字，一会儿又走成个“几”字，一个竖折折过后，螳螂河便像打了胜仗的将军一般，神气活现地涌进沂源县城。

进了城的螳螂河更是得到了最高规格礼遇，一个名字带“水”的县城对水的亲近与喜爱，早已刻进了骨子里。河水意气风发地穿城而过，在埠下村投入沂河的怀抱，自此一路向南，“百川东到海”，黄海成了螳螂河最后的归宿。《辞海》和江苏省一些地方史志均称螳螂河为沂河的源头，沂源县因此得名。其实，三点水偏旁的沂源，不仅是沂河之源，还是弥河、汶河之源，“三河之源”名副其实。

螳螂河在县城的时光短暂而不失光芒，依河而生的沂河源省级湿地公园成了“山东屋脊”上的绿色明珠。站在螳螂河大桥，只一眼，你就会被那铺天盖地的绿所震撼。两岸站满了垂柳，如天地间一幅徐徐舒展的绿纱屏风。河道里挤满了芦苇，密密匝匝，从眼前一直延伸到视野尽头，与远处的青山相接，像饱蘸墨汁的画笔，将天地涂抹成一片醉人的绿。风是最高明的指挥家，它掠过苇丛，掀起层层叠叠的绿浪。而那嘹亮的歌声，便藏在这无边的绿浪里。起初是零星的、试探般的几声，随即应和者众，高亢的、低回的、清脆的、沙哑的……各种鸟鸣从不同角落响起，此起彼伏，无休无止。

我向河水诉说着听鸟的快乐，这条河则向我分享着它的记忆，这喧腾的生机，并非亘古如斯。20 世纪 90 年代，当地经济进入快速发展期，经济浪潮席卷了每一个人，河流也未能幸免，忙于发展经济的人们并没有意识到突如其来的污水、农药残留和私采滥挖河沙对螳螂河的影响，河流日渐萎靡，光泽黯淡，水鸟、鱼类近乎绝迹。那时的河畔，寂静得可怕。

所幸，人们听懂了她的哭诉。一场深刻的觉醒与浩大的修复工程随之启幕。当地以壮士断腕的决心推进产业结构调整，关停高污染企业，通过疏浚清淤、植被恢复等综合措施，逐步恢复流域生态功能，划定 262 平方千米生态保护红线，严格落实“林长制”“河长制”。我曾在晨跑时遇见巡河的河长，他拿着手机，熟练地打开“河湖长制信息系统 App”，拍照上传数据，裤脚沾满泥水也浑然不觉；也曾见过志愿者们在河边捡拾垃圾，他们弯腰拾起的不仅是杂物，更是对母亲河的敬畏。昔日采砂坑遍布的“秃河岸”，如今水草丰茂，吸引了近百种鸟类栖息。

最先感知到春天讯息的，总是那些精灵——

顶着个大红脑袋的黑水鸡，正迈着醒目的黄绿色大脚，慢吞吞地巡视着自己的“领地”，不时发出“咯咯咯”或“咕咕咕”的声音，妥妥的湿地“麦霸”。被乡亲们唤作“王八鸭子”的小鹡鸰，有时发出“可、可，纠、纠”的叫声，有时发出“叽叽咕咕”的叫声，单调又随意，压根和“婉转”两字不搭边，但就是让人听得舒坦。最温馨莫过于育雏时节，鸟夫妻会把孩子驮在背上，不安分的小脑袋不时从鸟爸鸟妈的翅膀下探出来，又懵又萌的模样，能让岸上最活泼的孩子也屏住呼吸。

白鹭，是螳螂河畔最优雅的主角。有时一只孤立水边，像古代怀才不遇的文士，一脸的忧国忧民；有时两只深情对望，然后载歌载舞地向对方表达爱意；有时几十只像



云朵一般从天边飘来，它们来自不远处的北张良村。村里有处大型鹭类集中繁殖地，200 余只鹭鸟在此安家落户。清晨，数十只白鹭排成“人”字形，飞出张良村，去往湿地、田野或河滩；傍晚，像放学的小学生一样闹哄哄地排着队回家。回家后也不急于归巢，而是站在树冠上或梳理羽毛，或高谈阔论，叽叽嘎嘎一片，如树上开满了白花，广玉兰一样大朵大朵的白花。不远处的村庄，炊烟升起，“咯咯嗒”的鸡鸣声中，有人“唰唰唰”扫着天井，有人开着三轮车“噔噔噔”地回家，电视机里播音员抑扬顿挫：“深意不只在山水，更在绿色变革间……”

鸟鸣声声里，最激动人心的音符，属于那些“贵客”的莅临。一天清晨，我慢跑过西河北大桥，被一只白色大鸟攫住了目光，它有着雪白的羽翼与红色的大长腿，如大侠般孤傲、淡定、机警，身后成千成万根随风摇曳的芦苇成为背景，很是玉树临风。那不是寻常的白鹭！我慌忙拍下照片，发给同事小崔。电话很快响起，那头的声音因兴奋而急促：“东方白鹳！是东方白鹳！有‘鸟中国宝’的美誉！”我的心脏随之狂跳。

这种对栖息环境挑剔到极致的世界濒危珍禽，它的驻足，是一枚分量最重的生态勋章。小崔说，不止于此，螳螂河下游的下龙巷村还发现了同样珍稀的黑鹳，沂源的鸟类名录不断刷新，斑鱼狗、阿穆尔隼等以往只存在于图鉴上的名字，如今都成了摄影师镜头里的常客。鸟儿和大自然的沟通，一定蕴含着许多人类看不懂的密码。它们不关心这里是否挂着“国家生态文明建设示范区”的牌子，它们只相信清澈的水流、丰饶的食物与安宁的环境。这声声陌生的、珍贵的鸣叫，是生态好转最权威、最动人的认证。

这些认证，换来了“美丽经济”，很多外地游客来沂源不再只是看山水，还为了看鸟。摄影师们为了拍鸟，可谓绞尽脑汁，摄影师老赵便是其中之一。为了捕捉蓝翡翠鸟夫妻的曼妙身姿，他能在简易观鸟棚里蛰伏一个多月。在他的镜头下，蓝翡翠鸟如身姿曼妙的舞娘，在空中跳着霓裳舞，裙裾似烟霞，细腰婀娜，水袖一挥，倾倒众生，每一幅照片都美得让人起鸡皮疙瘩。拍鸟时间长了，老赵也成了半个专家，在他嘴里戴胜又美又臭、煤山雀是歌手中的实力派、四声杜鹃天天叫嚷着“光棍好苦”、红尾水鸲的尾巴最会搔首弄姿……谈起鸟儿来，他絮叨起来像个老太太。“赵老太”常挂在嘴边的一句话是：爱鸟，拍鸟，不惊鸟，更不能伤害鸟。这份小心翼翼的呵护，是喧嚣鸟鸣背后最朴素的守护。

隆冬时节，喧闹并未止息。来自远方的白骨顶鸡大军如期而至，将这片湿地当作迁徙路上的“补给站”。它们成群结队，在水面上游来荡去，如同在自家后院闲逛。刚离巢的雏鸟懵懂地打量着岸边那些手持“长枪短炮”、却连呼吸都刻意放轻的人们。没有惊扰，只有默契的守望。年复一年，随着西伯利亚的寒风南下，越来越多的候鸟将这里视为值得信赖的中途家园。它们盘旋、鸣叫，仿佛在与熟悉的芦苇和田野寒暄：“嗨，我们又来了！”它们不似过客，似归人。

和煦的风，拂过螳螂河两岸，垂柳已浓，芦苇正韧，河水仍泛着锦缎般的光华。鸟鸣声比往日更稠密、更欢快了。新生的东方白鹳幼鸟晒着太阳，悠然自在，无所谓家乡与他乡；灰椋鸟在电线上舞蹈，每一次落脚都像踮在琴键上；归来的燕子贴着河面低回，惊起一圈圈细碎的鱼影；喜鹊在柳梢起落，大嗓小嗓，仿佛把日子说得格外郑重……这鸟唤，早不只是自然复苏的乐章，更是沂河儿女护着绿水长流的笃定足音。就在这一河悠悠里，“春”不再是一个季节，而是岁岁不歇的生机，是螳螂河此刻最温柔也最有力的模样。乙

（作者单位：山东省沂源县自然资源局）

一纸山河 北斗传薪

◎ 张桢

身边总有人对我的职业充满好奇：测绘到底是干啥的？

走亲戚时长辈问我：“测绘是不是天天扛着奇怪设备满山跑的那些人？”发小约我次次被拒，忍不住吐槽：“天天加班，你这是在挣什么大钱？”我坐在电脑前，盯着满屏密密麻麻的数据，突然就卡壳了。入行这些年，我每天都在重复着相似的流程：画图、改图、上图，像上了发条一样往前赶，却从来没有真正停下来想过，测绘的内核到底是什么？

我想起了那天在档案室翻到的一本旧笔记本，在某一页最下边，看见一行用蓝色墨水写的小字：“今日遇暴雪，迷路一夜，数据无误。”这个旧本子是 1978 年院里老测绘人留下的。河南省测绘院是新中国最早成立的测绘单位之一，老一辈人背着几十斤重的老式仪器，靠干粮、布鞋和铅笔，把中原大地的每一道河湾、每一处山梁，一笔一笔标进了纸质地图里。写下这句话的老周，就是我师父的师父，当年他从山上的暴雪里被接回来，鞋底磨穿了洞，怀里的记录本却连半片雪都没沾。我第一次出野外前，师父没讲复杂的操作技巧，而是告诉我：“测绘人的第一课，是把数据看得比命重。”这份攥紧数据的较真，就这么隔着两代人的手，稳稳递到了我们这代人手里。

推开河南省测绘院省级数据中心的门，整面大屏跳动着全省北斗卫星导航定位基准站的实时运行数据，这里就是河南北斗基准服务系统的“中枢神经”。前两年我们啃下了北斗三号升级的硬骨头，从站点设备到后台软件全链条实现全国产化，河南正式迈入完全自主可控的北斗新时代。现在我们的运维队伍常年给所有站点做常态化“体检”，盯着每一组数据的稳定运行，从来不让服务掉链子。

现在这套系统早就像水电一样，悄悄融入了大家的日常。安阳烟草物流的配送员老张，每天出发前点开手机上的智能调度 App，系统就自动给他规划出最顺的路线，精准避开路上的拥堵点。装上北斗高精度终端之后，老张每天能多跑好几个配送点，不用再绕以前那些坑坑洼洼的冤枉路，月底算下来，整个车队的配送效率提了一大截，大家都笑着说北斗是他们配送路上的“活向导”。从田里自动播种的智能农机，到山边 24 小时盯守的地灾监测点，北斗的高精度服务早就藏进了各行各业的细节里。

现在再有人问我“测绘到底是干啥的”，我再也不会对着满屏数据卡壳了。

我们测绘人从来不是什么“扛着设备满山跑的怪人”，我们是把老辈人在雪地里守了一夜的“数据无误”，接成了北斗信号里永不掉线的“中原坐标”。当年老周揣在棉袄里的那本手写笔记，今天变成了覆盖千万百姓日常的时空底座——我们守的从来不是冰冷的数字，而是脚下每一寸土地的安全，是每一个普通人出行、务农、过日子的踏实。往后我们还会把这份较真攥得更紧，给这片生养我们的土地，交出一份代代相传、永远零误差的山河答卷。乙

（作者单位：河南省测绘院）

河南省自然资源厅代表队荣获省十五运会广播体操比赛一等奖

本刊讯 8月7日，河南省第十五届运动会社会组广播体操项目（省直机关组）决赛圆满落幕。由河南省测绘地理信息技术中心牵头组建的河南省自然资源厅代表队凭借过硬功底与昂扬精神风貌，斩获团体一等奖。

此次参赛代表队队员来自河南省自然资源厅机关、河南省测绘地理信息技术中心机关及所属单位。全体参赛人员坚持业务工作与文体练兵两手抓、两不误，科学统筹日常工作与训练备赛，利用工余时间勤学苦练、互学互促，把测绘人求真务实、精益求精的工作底色融入每一节动作打磨、每一次队列规整，在保障各项业务平稳推进的同时，扎实提升训练质效。赛场上，全体队员精神抖擞、步调一致，以标准规范的动作、整齐划一的队列完成全套展演，生动诠释了凝心聚力、奋勇争先的团队精神，充分彰显了新时代自然资源干部队伍的过硬作风。

此次参赛是落实全民健身国家战略的具体行动，更是深化机关精神文明建设、锤炼干部队伍作风的生动实践。队员们一致表示，将把赛场凝聚的奋进力量、拼搏姿态转化为履职担当的强大动能，砥砺实干作风、激发干事活力，助推全省自然资源事业高质量发展，为中国式现代化建设河南实践贡献力量。乙（李华/文）

河南省测绘地理信息技术中心驻村工作队金秋助学获群众点赞

本刊讯 近日，信阳市固始县黎集镇茶棚村村民曾付阳将一面印有“心系百姓办实事 情暖一方解民忧”的锦旗送至河南省测绘地理信息技术中心驻茶棚村工作队，对工作队开展金秋助学帮扶、纾解家庭就学困难表达诚挚谢意。

为深入落实教育帮扶政策，阻断贫困代际传递，助力乡村人才振兴，切实保障农村困难家庭学子顺利入学，近期，河南省测绘地理信息技术中心驻茶棚村工作队联合省扶贫基金会、河南中烟工业有限责任公司，组织实施2026年“金秋助学”帮扶项目，精准帮扶村内困难学子圆梦大学。驻村工作队对村内2026年高考本科录取新生开展全面摸排，重点聚焦脱贫户、监测户及特殊困难家庭学生，精准锁定帮扶对象。针对助学申请流程烦琐、材料填报难度大等实际问题，驻村工作队提供“一对一”全程指导服务，耐心协助学子及家长整理、核对申报材料，高效办结助学申请各项手续，同步建立完善帮扶台账，确保帮扶不漏一人、资金精准到户。

此次“金秋助学”项目共帮扶茶棚村3名困难家庭本科新生，按照每人2000元的资助标准，累计发放助学资金6000元。截至8月30日，助学资金已全部足额发放到位，有效缓解困难学子的入学经济压力，为学子顺利开启大学生活筑牢保障。

下一步，河南省测绘地理信息技术中心驻茶棚村工作队将常态化推进教育帮扶工作，广泛汇聚社会爱心资源，用心用情用力切实解决农村学子求学实际难题。同时引导受助学子勤学奋进、学有所成，鼓励他们反哺家乡、回报社会，以扎实的教育帮扶成效持续巩固拓展脱贫攻坚成果，助力茶棚村全面振兴。乙（扶彦/文 郝丞志/图）





● 云阔湖清　程昌静／摄