

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 5 期

总第525期

中原论道 智引未来

——第四届嵩山遥感论坛暨2026年全国博士生（测绘、遥感学科）学术论坛综述

2026 年首期“测绘大讲堂”在河南大学举办

数智赋能千行百业 遥感护航绿水青山

——河南省遥感院创新发展工作扫描

ISSN 1674-053X



中旬 定价: 10 元



扫码关注我们

河南省自然资源厅赴自然资源部信息中心开展专题调研

本刊讯 5月13日，河南省自然资源厅党组成员、副厅长景志刚带领厅测绘地理信息管理处、河南省测绘地理信息技术中心有关人员，赴自然资源部信息中心开展专题调研，重点学习自然资源管理与国土空间规划“一张图”建设相关工作。自然资源部信息中心主任、党委书记丁明柱会见调研组一行，双方就自然资源“一张图”建设举行座谈交流。

座谈会上，景志刚全面汇报了河南省自然资源“一张图”建设工作总体情况，系统阐述了主要工作举措、当前阶段建设成效与推进进度，深入分享了建设思路与后续重点工作安排，并结合河南省工作实际提出意见建议，恳请自然资源部信息中心在专业指导、政策保障及技术支撑等方面给予支持。

丁明柱对河南省调研组一行表示热烈欢迎，详细介绍了自然资源“一张图”自2025年试点实施以来的完善情况、全国统一建设工作规范，以及本年度“一张图”建设工作核心重点，并针对河南省“一张图”建设难点逐一解答，提出专业化、针对性指导意见。

景志刚表示，此次调研成效显著，为河南省“一张图”建设进一步明确路径、指明方向。下一步，河南省自然资源厅将严格贯彻落实自然资源部决策部署，加快推进数据治理及“一张图”统一门户建设、分布式数据库集群构建等重点任务，推动部省“一张图”深度对接融合，夯实自然资源综合改革工作基础，不断优化工作举措，以更高标准助力部省协同联动与自然资源事业高质量发展。☑（康涛 / 文）

河南省测绘地理信息技术中心召开重点工作推进会

本刊讯 5月16日，河南省测绘地理信息技术中心召开重点工作推进会，分析研判面临形势，研究存在的问题短板，针对性推进重点工作。河南省测绘地理信息技术中心党委书记、主任时统成主持会议并讲话，中心党委委员、副主任肖峰和武永斌参加会议。

会议认为，今年以来，各单位、各处室深入贯彻落实中心党委决策部署，各项工作有序推进，实现全年工作良好开局。同时，要清醒看到当前存在的短板弱项，着力解决转型升级深度有差距、攻坚克难速度有差距、开拓创新力度有差距、规范管理精度有差距等问题。

会议强调，中心各单位、各处室要紧盯年初目标任务，保持战略定力，突出抓好“十个突破”，确保上半年时间过半任务过半，确保“十五五”测绘地理信息工作开好局、起好步。一是融入自然资源工作要有突破，二是规划编制要有突破，三是“一张图”建设要有突破，四是农村集体“三资”清查整治要有突破，五是实景三维河南建设要有突破，六是重点项目谋划申报要有突破，七是开拓创新要有突破，八是做好民



生实事要有突破，九是深化改革要有突破，十是加强规范管理要有突破。

会上，中心各单位、各处室汇报了今年以来工作开展情况、存在问题和下一步工作谋划，肖峰、武永斌分别对分管工作进行了点评。

河南省测绘地理信息技术中心所属各单位班子成员、机关副处级以上干部参加会议。☑（吴荒源 / 文 陈庆贺 / 图）

以诚信立行 以自律致远

◎ 本刊评论员

4月27日，郑州一场签约会为河南省测绘地理信息行业标注下关键节点——《河南省测绘地理信息行业诚信自律公约》首场签约活动上，郑州市98家甲级测绘资质单位现场集体郑重承诺。这不仅是全省测绘地理信息行业信用体系建设迈出的标志性一步，更正式开启了“政府监管+行业自律+社会监督”协同治理的全新篇章，是规范市场秩序、净化行业生态的务实之举，更是夯实产业根基、推动高质量发展的长远之策，对行业行稳致远意义深远。

诚信是行业立身之本，自律是市场有序之基。测绘地理信息作为国民经济和社会发展的重要基础性、战略性工作，其成果的准确性、可靠性、时效性，直接关系城市规划、资源管理、生态保护、应急保障等多领域决策的质量与实施效能，堪称行业的“生命线”。

近年来，河南测绘地理信息产业快速壮大，目前全省测绘资质持证单位达1100余家，其中甲级单位120余家，产业集聚效应持续显现，服务能力稳步提升。但伴随着市场主体扩容、业务边界拓展，低价无序竞争、成果质量参差、履约意识薄弱等问题仍时有发生，已成为影像行业整体形象与长远空间的痛点。此次《河南省测绘地理信息行业诚信自律公约》的出台与签署，正是行业主管部门与协会主动作为、回应市场关切的关键举措：10项自律准则清晰划定行为边界，3类违约处置措施明确违规成本，将抽象的诚信要求转化为可落地的操作规范，为破解行业沉痾提供了制度抓手，核心指向引导从业单位依法执业、诚信经营、公平竞争、优质服务。

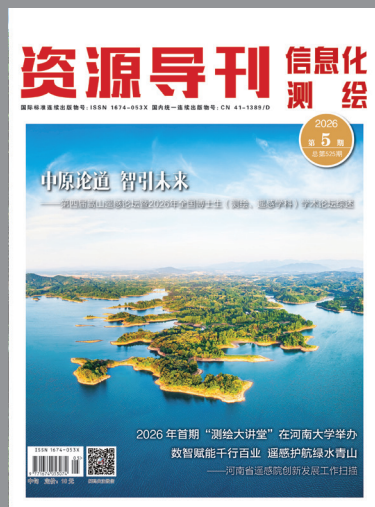
对测绘企业而言，诚信是内生的核心竞争力，是长期增值的无形资产。唯有坚守诚信底线，严格执行技术标准、保障成果真实准确、规范市场竞争行为、压实安全生产责任，才能赢得客户信赖、拓展市场空间、获得社会认可。反之，那些心存侥幸、投机取巧的主体，或许能谋一时之利，终将在日益完善的信用监管中付出代价，在行业洗牌中被淘汰出局。“守信者一路畅通、失信者寸步难行”，正成为河南测绘地理信息行业愈发鲜明的导向。

行业向善，离不开政府引导、协会推动、社会监督同向发力。全省自然资源主管部门立足监管职责，完善信用评价体系，强化常态化督导考核，从严查处失信违规行为，构建全方位、无死角、全覆盖的监管格局，为行业发展划底线、立规矩；省地理信息产业协会充分发挥桥梁纽带作用，牵头制定公约、组织签约履约、开展业务培训，推动行业自我管理、自我约束、自我提升；广大从业单位主动践行承诺，把诚信理念融入生产、管理、服务全流程，形成人人讲诚信、事事守规范的良好氛围。政府、协会、企业同向发力、同频共振，才能让诚信自律从“一纸公约”转化为“自觉行动”，从“集体承诺”转化为“行业风尚”。

当前，河南正加快推进中国式现代化建设河南实践，高质量发展对测绘地理信息保障能力提出了更高要求。从实景三维河南建设到数字政府治理，从低空经济发展到智慧城市运营，从重大工程落地到生态保护修复……都离不开精准、可靠、高效的测绘地理信息支撑。以诚信自律公约签约为新起点，把诚信理念转化为发展动能，把自律要求转化为服务效能，推动行业从“规模扩张”向“质量提升”转变、从“价格竞争”向“信用竞速”转型，才能不断增强行业核心竞争力，更好地服务全省发展大局。

人无信不立，业无信不兴，国无信不强。以“约”为信，方能行稳致远。当前，河南测绘地理信息行业正处在转型升级、提质增效的关键阶段，诚信是最亮的底色，自律是最强的保障。让我们以此次签约为契机，坚守诚信底线、勇担自律责任，携手共建公平竞争、守法诚信、健康有序的行业生态，以精准测绘服务发展，以诚信担当守护安全，为全省经济社会高质量发展、为新时代中原更加出彩贡献更大的测绘力量！

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：王 俊
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5期 总第525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 寿燕翻 卢 明 王明强 付治河 张向军
田耀永 朱志军 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

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 以诚信立行 以自律致远

国内要闻

4 我国地理空间数据智能服务GeoAgent正式上线 等8则

时政传递

6 河南“一张图”建设工作组召开专项工作推进会

河南测绘行业诚信自律公约首场签约会举行

7 2026年首期“测绘大讲堂”在河南大学举办

特别关注

8 中原论道 智引未来

——第四届嵩山遥感论坛暨2026年全国博士生(测绘、遥感学科)

学术论坛综述

测绘广角

12 河南省测绘院以毫米级精度护航上海民生工程

测绘地理信息数据赋能濮阳高质量发展推介会召开

13 河南省遥感院开展中国航天日科普进校园活动

西峡县开展“双随机、一公开”联合检查活动

经天纬地

14 数智赋能千行百业 遥感护航绿水青山

——河南省遥感院创新发展工作扫描

学术研究

16 产教融合提升供需适配度的路径研究

——以测绘类专业“金课”建设为例

技术应用

20 融合GIS空间分析与智能优化的风电场选址研究

24 基于改进的PCA-SIFT算法在公路承灾体普查中的应用

27 FME软件在地籍测绘成果质检中的应用探索

32 多种监测方法在高架桥沉降监测中的应用研究

36 基于DEM的区域独立坐标系长度变形分析系统

39 多源数据协同的城市LOD1.3级三维模型快速构建方法

43 基于改进遥感生态指数的海浸盐渍地区生态质量遥感监测

47 以反光强度为权的平面标靶中心点坐标提取

50 黄河流域植被时空变化及其对气候因子的响应

55 LiDAR激光点云分层切片构建LOD1.3城市三维模型方法研究

经纬讲坛

59 地理信息啥“东东”

文苑撷英

60 他问、自问、天问

61 沙棘与挂篮的交响

62 风梳林海醉故道

封面

光山泼水水库 杨其格/摄



关注

我国地理空间数据智能服务
GeoAgent正式上线

近日，国家基础学科公共科学数据中心地理空间数据库正式发布地理空间数据智能服务（GeoAgent）。

该服务基于大语言模型与检索增强生成技术构建，核心突破传统地理空间数据检索依赖专业操作的瓶颈，支持数据集类型、空间范围、时间跨度、云量阈值等多条件组合智能检索，实现目标数据的精准快速定位。同时集成检索结果智能分析能力，可自动生成数据总量、可下载率、云量分布、时间趋势等核心指标的可视化报告，并提供基于数据质量的智能排序推荐，大幅提升数据筛选与评估效率。

GeoAgent 依托地理空间数据云平台汇聚的数十颗国内外主流遥感卫星数据资源，可广泛应用于自然资源调查、生态环境监测、城市规划、灾害应急等领域。其上线将显著降低地理空间数据使用门槛，推动数据服务从“被动提供”向“主动智能服务”转型，为地球科学研究和行业数字化发展提供坚实支撑。

我国测绘生产基础GIS平台自主研发取得关键突破

近日，由自然资源部第三地理信息制图院牵头承担的“测绘生产基础 GIS 平台自主研发”项目取得关键阶段性成果，成功研发出拥有完全自主知识产权的测绘生产基础 GIS 平台 1.0 版，已通过实际生产验证。

该平台以开源技术为基础，聚焦测绘生产核心环节，重新设计并优化了坐标转换、拓扑检查、节点捕捉等关键算法与交互逻辑，累计完成 120 项功能优化修改，全面覆盖地图导航、矢量编辑等基础操作，包含空间关系分析等专业工具，以及 DOM 影像智能镶嵌分幅等高级专项功能，全方位匹配测绘生产实际需求。

平台适配一线操作习惯，集成多款智能作业工具，攻克了大区域 DOM 影像镶嵌分幅效率与效果难题，研发出水网与等高线智能匹配方法，显著提升生产自动化水平。目前该平台已通过专家评审，在多个实际测绘任务中运行稳定可靠。

北斗时空智能装备助力人形机器人实现自主奔跑

4 月 19 日，2026 北京亦庄半程马拉松暨人形机器人半程马拉松鸣枪开跑，参赛人形机器人整体能力显著提升，奔跑速度和自主“认路”能力均明显增强，

其中超过三分之二的“自主跑”赛队搭载了北斗时空智能套件装备。

相较于 2025 年首届比赛中绝大部分机器人依赖遥控操控的情况，本届赛事中更多队伍采用自主导航模式参赛。据介绍，人形机器人实现自主奔跑难度较大，要在逾 21 千米的开放城市环境中，独立完成定位、路径规划、运动控制与实时决策，精准定位是关键。

北斗时空智能套件装备通过“星地一体、云芯一体、软硬一体”的一体化服务，为机器人提供厘米级定位、稳定定向与姿态感知能力，保障路径规划与运动控制精准执行。部分参赛机器人搭载的轻量化终端，可实现高精度定向，为复杂赛道环境中的自主导航提供可靠时空数据支撑。

科技

北大发布生成式摄影测量方案
卫星图可一键生成3D城市

近日，北京大学王选计算机研究所联合智能学院与高德地图，发布全新生成式摄影测量方案 Orbit2Ground，破解了传统城市 3D 建模成本高、效率低的行业痛点，为大规模城市级数字资产快速生成提供了低成本解决方案。

此前，高精度 3D 城市模型构建需数千人美术团队耗时数年手工建模，或动用昂贵专业设备扫描，难以满足数字孪生、低空物流、应急响应等领域的迫切需求。该方案大幅降低建模门槛，仅需输入 3 张卫星图像，即可实现 4 平方千米区域高质量三维城市网格的全自动重建。该团队通过几何约束解决建筑外立面重建的“空心楼”难题，利用专用纹理修复网络提升画面真实感，输出的标准网格模型可直接对接主流开发引擎。



目前，依托该技术构建的三维卫星地图已正式部署于高德业务，覆盖北京、广州等8个核心城市主城区，为数字城市建设提供了有力技术支撑。

我国团队提出激光雷达遥感弱监督融合新范式

近日，我国科研团队在激光雷达遥感与弱监督学习融合领域取得重要理论突破，相关成果发表于遥感领域权威期刊《ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing》，为大尺度激光雷达遥感应用提供了全新技术路径。

针对传统激光雷达遥感高度依赖昂贵人工标注、多源平台与复杂环境导致领域偏移的行业痛点，科研团队打破数据解译与参数反演割裂的传统，提出激光雷达“双重角色”创新理念，既作为需解译的三维数据源，也作为稀疏且具有物理意义的真值信号，引导大尺度遥感参数反演。

团队梳理了广义弱监督视角下激光雷达数据解译的四大方向，提出“由稀疏到密集、由离散到连续”的反演策略，可应用于森林冠层高度估计等关键对地观测任务，同时分析了激光雷达数据的模态特异性、时空动态性等独特挑战，明确了严谨的交叉验证方法。该研究还提出六大未来发展方向，并得到国家自然科学基金资助。

我国成功发射高精度温室气体综合探测卫星

4月17日，我国在酒泉卫星发射中心使用长征四号丙运载火箭，成功将高精度温室气体综合探测卫星发射升空。

高精度温室气体综合探测卫星是国家民用空间基础设施中长期发展规划的业务卫星。卫星运行于太阳同步轨道，搭载5台有效载荷，能够采用多种方式实施温室气体和污染气体高精度探测，同时满足自然资源、农业农村、林业和草原以及气象等部门有关探测需求，支撑“双碳”战略实施和美丽中国建设。

该卫星将在全球首次实现主被动温室气体联合探测及紫外红外污染气体联合探测，通过主动激光探测雷达及宽幅高光谱温室气体监测仪，对全球温室气体进行高精度、大范围、高分辨率三维监测，采用天底临边联合、紫外红外联合等手段，大幅度提升污染气体探测空间分辨率和垂直探测能力，为行业应用的观

测要素信息提取、业务专题产品批量化生产等业务化运行提供遥感数据支撑，有力服务现代化基础设施体系构建。

数字

3000⁺

近日，中国科学院空天信息创新研究院水环境遥感研究团队在青藏高原湖泊长时序透明度监测领域取得重要技术进展，相关成果发表于遥感领域顶级期刊《环境遥感》。

针对高原地形复杂、实地观测匮乏的技术难题，团队整合1986年以来Landsat系列及MODIS卫星观测数据，构建多源卫星数据透明度半解析模型协同反演框架，突破不同传感器波段差异与反射率系统性偏差的一致性处理瓶颈，实现对青藏高原3000余个面积大于0.1平方千米湖泊的1986~2024年长时序高精度透明度反演。研究结果表明，近40年来青藏高原湖泊总体呈显著清澈化趋势，平均透明度年增长速率达0.019米，西部和中部地区增幅尤为明显，并识别出植被调节、稀释效应、温度调节三种气候变化驱动模式。该成果为理解高寒湖泊生态系统对全球变暖的响应提供了关键科学依据，对保障水资源安全具有重要支撑作用。

30万架

4月23日，从2026年一季度农业农村经济运行情况新闻发布会上获悉，我国农业智能化转型加速推进，农用无人机保有量已超过30万架，数量位居全球首位，成为推动农业生产方式变革的核心智能装备，为农业绿色发展提供支撑。

据了解，我国农用无人机已集成北斗厘米级高精度定位、AI病虫害智能识别、变量精准作业、自主航线规划等核心技术，广泛覆盖植保、播种、施肥、农田巡检等全生产环节。单架无人机日均植保作业面积可达300亩以上，是传统人工效率的30倍，同时可实现农药精准喷施，减少农药使用量20%以上，节水30%以上，显著提升农业生产效率与绿色发展水平。

“十四五”以来，我国农业科技进步贡献率超过64%，农作物耕种收综合机械化率达76.7%。未来，我国将持续加大农业智能装备研发力度，完善技术标准体系，推动农用机械向更智能、更高效方向发展。[Z]

河南“一张图”建设工作组召开专项工作推进会

◎ 朱琳 娄晨曦

5月9日，河南省自然资源厅“一张图”建设工作组召开专项工作推进会。会议传达自然资源部最新工作部署，通报全省建设工作进展，进一步明确任务，为高质量推进“一张图”建设锚定方向、凝聚合力。

会上，河南省自然资源厅副厅长景志刚对高效推进“一张图”建设作出全面部署。一要提高站位，立足全局抓推进。深刻认识“一张图”建设是重构自然资源全流程、全口径业务体系的核心举措，是健全完善治理体系、提升数智化治理能力的重要抓手。

二要认清差距，对标提速抓攻坚。精准对标自然资源部工作标准和先进省份建设成效，坚持问题导向、目标导向、结果导向相统一，补齐工作短板，细化提速举措，全力追赶建设进度。

三要明确责任，协同联动抓落实。强化业务处室履职担当，加强横向协同联动，发挥牵头处室统筹协调作用，集中攻坚跨部门、跨业务矛盾和技术难题，

构建一盘棋统筹发力的工作格局。

四要聚焦重点，靶向攻坚抓突破。科学统筹工作轻重缓急，聚焦制约政策落地、影响系统运行的重点问题，集中资源优先破解，以重点突破带动整体提升，全面激活建设工作动能。

五要统筹资源，集约高效抓建设。坚持节约集约、务实高效原则，充分依托现有业务基础、数据资源和系统平台，深度盘活、整合、复用已有建设成果，优化资源配置。

六要上下联动，借力赋能抓提升。密切关注国家政策导向，主动加强与对口司局的对接汇报，常态化开展与先进省份的沟通交流，借力赋能全省建设工作。

七要加强督导，闭环监督抓实效。细化各项建设任务的时间节点和责任处室，建立定期调度工作机制，构建闭环管理体系，确保各项工作落地落实。（作者单位：河南省自然资源厅）

河南测绘行业诚信自律公约首场签约会举行

◎ 栗荣晓 温梦媛

为深化河南测绘地理信息行业信用体系建设，规范行业经营行为，引导从业单位依法执业、诚信经营、自律发展，4月27日，由河南省地理信息产业协会主导的行业诚信自律公约首场签约会在郑州举行。

会议宣布，《河南省测绘地理信息行业诚信自律公约》涵盖10项自律准则与3类违约处置措施，要求从业单位将诚信自律融入经营管理全过程。此次集中签约，标志着河南省测绘地理信息行业正式开启“政府监管+行业自律+社会监督”的综合治理新模式。

签约会上，郑州市甲级测绘资质单位代表依次上台，签署递交《河南省测绘地理信息行业诚信自律公约》承诺书，以实际行动践行诚信从业、规范经营的理念，彰显行业责任与担当。针对郑州市乙级测绘资质单位，会议明确由各辖区测绘地理信息主管部门统筹组织，分批有序完成签约工作，确保公约覆盖全行业。

按照签约工作部署，采取“分片推进、属地落实”的方式组织实施，后续将在其他省辖市陆续组织召开专场签约会，逐步实现全省测绘地理信息从业单位诚信自律签约全覆盖，全面营造公平竞争、守法诚信、健康有序的行业发展环境。

同时，河南省自然资源厅测绘地理信息管理处将通过完善信用评价体系、强化常态化考核督导等举措，从严查处各类违规失信行为，持续净化行业发展生态，推动行业诚信建设走深走实。

与会签约代表表示，将严格恪守公约各项要求，坚守诚信底线、规范从业行为，共同推动河南省测绘地理信息行业高质量发展。

省自然资源厅、省测绘地理信息技术中心、郑州市自然资源和规划局、省地理信息产业协会、郑州各区（市）测绘主管部门及行业代表150余人参会。

2026 年首期“测绘大讲堂”在河南大学举办

◎ 张磊 栗荣晓



5月7日，由中国测绘学会主办，河南省测绘学会、河南大学联合承办的2026年首期“测绘大讲堂”在河南大学郑州校区隆重举办。活动以“科学·人生——传承院士精神 凝聚榜样力量”为核心主题，创新采用“线上直播+线下参会”双线联动模式，面向全国测绘地理信息行业科技工作者及广大高校师生同步直播。活动当日线上观看量再创新高，线下汇聚了河南测绘领域高校、科研院所及企事业单位代表，现场井然有序，学术氛围浓郁。

中国工程院院士、河南大学教授王家耀，中国测绘学会理事长宋超智，河南省科学技术协会党组书记尹洪斌，河南大学党委书记季波，河南省自然资源厅副厅长景志刚，河南省自然资源厅测绘地理信息管理处处长王军胜，河南省测绘地理信息技术中心副主任肖峰等到场参加活动。河南省测绘学会常务副理事长杜清华主持活动开幕式和院士精神宣讲报告环节。

开幕式上，宋超智、季波、景志刚、尹洪斌等领导分别致辞。他们高度肯定测绘地理信息事业在服务国家重大战略、助力地方高质量发展、培育科技创新人才中的基础性、战略性支撑作用，着重强调传承测绘院士科学家精神、深化产学研用深度融合、培育新时代测绘青年人才的深远意义，并对多方携手推动测绘地理信息事业提质增效、行稳致远寄予深切期望。

在院士精神宣讲报告环节，网络空间部队信息工

程大学教授李广云、郑州大学教授李健、华北水利水电大学教授刘辉、河南大学教授韩志刚，分别讲述了许其凤、高俊、刘先林、王家耀四位院士深耕行业数十载的科研攻坚历程、潜心治学的敬业事迹以及心怀家国的责任担当。四位教授生动感人的宣讲，淋漓尽致地展现了老一辈测绘科学家“热爱祖国、忠诚事业、艰苦奋斗、无私奉献”的测绘精神，深深感染了线上线下的每一位参会者，引发强烈思想共鸣。

最后，“科学·人生”主题沙龙对话将活动推向高潮。王家耀院士亲临主题沙龙现场，与青年学者、高校学子、行业骨干面对面交流，围绕人生职业规划、学科交叉创新、关键技术攻关、行业未来走向等核心话题，分享从业感悟、精准答疑解惑，为广大青年测绘科技工作者明晰成长路径、坚定从业信念、汲取奋进力量提供方向指引与精神滋养。

此次活动是河南省测绘学会弘扬科学家精神、搭建高端学术交流平台、助力青年人才培养的务实举措，也是该学会成立60周年系列纪念活动的重磅环节。

下一步，河南省测绘学会将持续发挥桥梁纽带作用，不断完善高水平学术交流与产学研协同创新载体，传承弘扬测绘精神，凝聚全行业奋进合力，为推动河南从测绘大省迈向测绘强省、服务国家高水平科技自立自强、助力经济社会高质量发展贡献更大的智慧与力量。☑



中原论道 智引未来

——第四届嵩山遥感论坛暨2026年全国博士生（测绘、遥感学科）学术论坛综述

◎ 本刊特约记者 张永强

中原形胜，黄河汤汤。群贤毕至，共话遥感。

4月24日至26日，郑州迎来一场测绘遥感领域的科技盛会——由国务院学位委员会测绘与遥感学科评议组、中国测绘学会、中国遥感应用协会指导，网络空间部队信息工程大学联合武汉大学、中国资源卫星应用中心主办的第四届嵩山遥感论坛暨2026年全国博士生（测绘、遥感学科）学术论坛隆重举行。

李德仁等20余位院士、50余位权威专家齐聚黄河之滨，奉上思想盛宴；5场院士主旨报告、4场专题学术论坛、9场博士生分论坛干货密集；全国首届遥感科普讲解大赛、空间智能挑战赛角逐激烈；领军企业集中亮相，共话技术前沿、共促成果转化……

从4月24日的双赛决赛，到25日的院士报告与主论坛，再到26日的博士生论坛，三天会期紧凑充实。1500名专家教授与青年学子共聚一堂，融学术研讨、成果转化、人才培养、科普竞技于一体，共绘全域遥感与空间智能发展蓝图。

本届论坛以“全域遥感、智引未来”为主题，恰逢嵩山遥感论坛创办十周年、军事测绘教育八十华诞、全国博士生论坛创办二十周年三重节点交汇，是我国测绘遥感领域规格最高、规模最大、影响力最广的年度学术盛会，更是中国测绘遥感事业从跟跑、并跑向领跑跨越的生动注脚。

十年砺剑：“嵩山”品牌闪耀中原

遥感作为具备全域立体、多维透视、动态监测特征的战略新兴技术，被誉为“大国之眼”，是支撑国家安全、资源环境、智慧城市、低空经济发展的核心引擎，正推动对地观测向空天地海一体化、全域全天候、实时智能化加速演进。

自2016年创办以来，嵩山遥感论坛始终锚定国家重大战略需求，依托中国嵩山卫星遥感定标场这一国家级基础设施，由网络空间部队信息工程大学、武汉大学、中国资源卫星应用中心三大顶尖主体联合主办，每两年一届，坚持学术引领、产业协同、人才共育，已成为国内测绘遥感领域规格最高、影响力最广、产学研用结合最紧密的高端平台之一，堪称中国遥感技术发展的“风向标”与“思想策源地”。

本届论坛学术阵容堪称历届之最：由中国科学院院士、中国工程院院士、国家最高科学技术奖获得者李德仁领衔，20余位两院及欧亚科学院院士，国务院学位委员会测绘与遥感学科评议组成员、国际学术组织负责人组成顶级学术委员会，全国高校、科研院所、企事业单位1500余名代表参会，创下了规格最高、阵容最强、人数最多的纪录。

4月25日上午的开幕式上，河南省科技厅副厅长陶曼晞，网络空间部队信息工程大学校长蒋猛，武汉大学副校长龚威，中国资源卫星应用中心党总支书记、副主任钟璞，国务院学位委员会测绘与遥感学科评议组召集人李建成，中国测绘学会理事长宋超智先后致辞。

网络空间部队信息工程大学校长蒋猛在致辞中表示，作为全军测绘导航人才培养核心基地，该校将以论坛为纽带，深化军地协同、产学研融合，为科技强国、航天强国建设贡献力量。

巅峰论道：院士天团解码全域遥感与AI新范式

本届论坛最大的看点无疑是顶级的学术阵容。4月25日上午，备受期待的院士主旨报告会重磅开启。李德仁、杨元喜、李建成、李清泉四位中国科学院、中国工程院院士，与加拿大皇家科学院院士李军联袂登台，围绕商业航天、空天智能、PNT体系、AI赋能测绘、低空基础设施、GeoAI等前沿方向，带来五场兼具高度、深度与前瞻性的重磅报告，为全场1500余名参会者奉上一场顶级思想盛宴。

李德仁院士以宏大视野指出，中国航天已进入国家航天+商业航天双轮驱动新阶段。未来遥感必须走

军民商深度融合之路，构建空天一体化智能观测体系，实现从数据获取到信息服务的全链路自主可控。他强调，空天智能是未来竞争制高点，要以大模型、大数据、大系统支撑航天强国建设，服务全球可持续发展与国家安全。

杨元喜院士聚焦PNT（定位、导航、授时）这一时空信息“心脏”，系统阐述了新一代PNT体系的发展战略。他提出，面向全域感知、深空探测、低空经济等新需求，PNT必须向多源融合、自主可控、智能服务、广域覆盖升级，支撑全天候、全场景、高精度时空服务，为数字中国、智慧社会提供坚实底座。

李建成院士直面AI带来的学科变革，深入分析人工智能如何重构测绘理论、技术、方法与应用体系。他指出，AI不仅是工具升级，更是范式革命，推动测绘从“数据驱动”向“知识驱动”、从“人工解译”向“智能认知”跨越，未来测绘学科将深度融合空间智能、自主智能、群体智能，形成全新学科生态。

李清泉院士聚焦低空经济这一国家战略新赛道，提出以无人机网构建广域覆盖、自主值守、即时服务的新型测绘感知基础设施。该体系可实现大范围、常态化、低成本立体监测，为智慧城市、应急救援、自然资源、生态环保等提供即取即用的空间信息服务，打开低空遥感产业化新空间。

加拿大皇家科学院院士李军带来GeoAI前沿理念，提出地理空间智能将从数据处理走向认知理解，通过多模态大模型、知识图谱、时空推理，实现对地球系统的深度感知、精准认知、科学预测，为复杂地理问题提供全新解决路径，推动遥感与地理信息科学进入“认知时代”。

五位院士的报告，共同勾勒出“全域遥感+空间



●李德仁院士作主旨报告



● 参会专家在本刊展示台前交流

智能”的未来图景：空天地海一体化观测、AI 全域赋能、即时服务落地、产学研用协同，成为中国测绘遥感下一阶段发展的核心主线。

四维深耕：四大专题论坛打通技术到应用全链条

4月25日下午，新域新质遥感、智能探测处理、遥感系统工程、遥感行业应用四大专题分论坛同步开讲，为参会者提供多维度、深层次的交流平台。38位知名专家学者、学科带头人围绕全域时空智能、空天地海立体探测、量子遥感与导航等前沿热点，展开深度研讨，覆盖“基础理论—关键技术—系统集成—产业落地”全链条，现场交流热烈，学术氛围浓厚。

新域新质遥感是支撑新质生产力的前沿方向。与会专家围绕深空遥感、量子遥感、极端环境遥感、隐蔽目标探测、新型载荷机理等展开交流，一批原创性理论与颠覆性技术成果集中亮相，为我国遥感技术突破国外封锁、实现领跑提供创新源头。

人工智能与遥感深度融合是本届论坛最热门议题之一。专家们聚焦遥感大模型、多模态数据协同、弱监督学习、目标智能解译、变化动态监测等核心技术展开研讨，展示了AI在提升遥感数据处理效率、精度、自动化水平方面的突破性进展，推动遥感从“海量数据”向“高效信息”“精准知识”跃升。

遥感技术的价值最终要通过系统工程实现。论坛围绕卫星系统、载荷平台、地面系统、定标检验、运维保障等全流程展开交流，强调以系统思维提升遥感装备可靠性、稳定性、国产化率，为技术规模化、业务化、产业化应用筑牢根基。

遥感的价值在于应用，服务经济社会发展。专家

们分享了遥感在自然资源监测、生态环境保护、灾害预警救援、智慧城市建设、农业农村发展、交通物流、低空经济配套等领域的典型案例，充分展现了遥感技术服务国家、服务社会、服务民生的重要价值，推动技术成果快速转化为现实生产力。

四大分论坛各有侧重、互为支撑，既保持了学术前沿性，又突出了工程实用性，形成顶天立地的完整创新体系。

薪火相传：二十载博士生论坛铸就人才摇篮

作为论坛同期活动重头戏，2026年全国博士生（测绘、遥感学科）学术论坛迎来创办二十周年。论坛从2006年由“军测”（现信息工程大学地理空间信息学院）发起，每年一届，历经16家单位接力传承，已成为测绘、遥感领域汇聚青年才俊、展示最新成果、促进深度融合的重要平台，被誉为行业“青年人才摇篮”。

二十年来，论坛始终以培育青年创新人才、推动学科交叉创新、助力高水平科技自立自强为初心，累计为数万名青年学子提供成长舞台，如今他们大多已成长为行业骨干、学术带头人，为中国遥感事业持续注入了新鲜血液。

本次论坛聚焦国家重大战略需求，汇聚学术精英，展现学科前沿趋势与青年学者的创新活力，亮点纷呈：

投稿规模创新高：收到全国论文351篇，评选出优秀论文24篇、优秀口头报告72个、优秀海报16个；

议题覆盖更全面：围绕大地测量、智能时空信息技术、遥感科学与信息工程等9大方向，研讨深度与广度兼具；

成果转化更高效：优秀论文直接推荐至《测绘学报》等权威核心期刊发表，打通了学术交流到成果出版的通道。

4月26日，200余名博士研究生围绕9大议题深入研讨交流，在学术思辨中启迪心智，在思维碰撞中凝聚共识，全面展现青年一代的创新活力，为我国测绘遥感事业储备坚实的后备力量。

双赛联动：科普与竞技共筑遥感生态

遥感视界，智竞空间。本届论坛一大创新亮点，是首次举办全国首届遥感科普讲解大赛与空间智能挑战赛，以赛促学、以赛促用、以赛育才，为高端学术平台注入青春动能与科普温度，推动遥感知识走近大众，构建“科技创新+科学普及”双轮驱动生态。

两项赛事于4月初拉开帷幕，经过半个月的线上比拼，入围选手于4月24日展开线下决赛，为论坛增添鲜活的青春气息。

全国首届遥感科普讲解大赛以“智眼感知全域，科普点亮未来”为主题，面向全国高校与科研院所青年学子，旨在打破专业壁垒、普及遥感知识、提升科学素养，推动遥感从“实验室”走向“大众视野”，实现高水平科技创新与大众化科学普及协同发展。20位晋级决赛的选手围绕卫星遥感、空间智能、智慧地球等主题，用通俗语言、生动案例讲述遥感故事：从农作物光谱分析到碳储量评估，从极地冰川探测到象群智能守护，从城市烟火感知到战场态势研判，多维度展现了全域遥感的应用广度与社会价值。最终，网络空间部队信息工程大学罗歆迪、史瑞恩获一等奖；该校王鹏鸽、何沁蔚，南京信息工程大学杨梦真、武汉大学王昕竹获二等奖。

“慧眼辨识微毫 智能决胜未来。”空间智能挑战赛聚焦真实场景下的遥感影像细粒度目标识别，以实战导向加速AI+遥感技术转化，为行业选拔储备高水平算法与工程人才。10支入围团队基于分辨率优于0.5米的真实卫星光学影像展开比拼，现场完成智能解译、跨区域跨时段目标型号甄别等环节，随后登台答辩阐释算法思路。经专家评审，北京观微科技有限公司明

亮队获一等奖，北京理工大学洞察千里队、国防科技大学飞龙在天队分获二等奖。

赛事期间，专家们从科普传播技巧到技术研究方向、从行业趋势到青年成长路径逐一作了点评指导，勉励青年深耕专业、精进本领，让遥感科学真正服务社会发展。

面向未来：全域遥感开启发展新征程

十年磨一剑，砺得梅花香。第四届嵩山遥感论坛的成功举办，是中国测绘遥感事业发展的重要里程碑，标志着行业正式进入全域感知、即时服务、空间智能的全新发展阶段。

面向未来，主办方将持续擦亮“嵩山遥感论坛”品牌：坚持学术引领，打造世界一流遥感学术交流高地；强化产业协同，推动产学研用深度融合与成果转化；突出人才共育，构建覆盖院士、专家、青年学子、产业人才的完整生态；服务国家战略，在航天强国、科技强国、数字中国、平安中国、美丽中国建设中展现更大担当。

全域遥感，智引未来；中原论道，再启新程。让我们共同期待，下一届嵩山遥感论坛续写新篇，为实现高水平科技自立自强、全面建设社会主义现代化强国贡献更大力量！

第四届嵩山遥感论坛暨2026年全国博士生（测绘、遥感学科）学术论坛
The 4th Songshan Remote Sensing Forum & 2026 National Academic Forum for Doctoral Students(Surveying and Mapping & Remote Sensing)

优秀论文

题目	作者	第一作者单位
据融合解算地球定向参数方法	杨一、马慧斌等	61363部队
方法	孙志豪、袁亮等	安徽理工大学
	张浮聪、胡海等	武汉大学
特征一致性增强的宽视角地理定位方法	陈杰、何月顺等	东华理工大学
面沉降预测与极端天气推演	陈、周、等	桂林理工大学
多尺度高频增		

论文题目	作者	第一作者单位
梯度频域双驱的多尺度海底地形超分辨率重建框架	崔昕晔、李厚朴等	海军工程大学
基于分形维数粗糙度耦合的行道树胸径高精度提取方法	孙尔云、李永强等	河南理工大学
基于多源数据与机器学习的全天气地表长波辐射估算	李静、唐伯惠等	昆明理工大学
基于AMSR2和SMAP的海-气多参数联合反演算法研究	高飞磊、王天星	中山大学
接接T-CERES、FY-4ERM-1000层顶大气辐射通量与海洋	王萌卉、刘会增等	深圳大学
	钟代琪、韦耐等	同济大学

●李德仁院士、王家耀院士为优秀博士生论文获得者颁奖

河南省测绘院以毫米级精度护航上海民生工程

◎ 李锦



4月13日，河南省测绘院协同上海市测绘院第二分院，完成上海桃浦污水处理厂初期雨水调蓄工程地下隧道贯通精密测量，以毫米级精度保障工程顺利推进。

据悉，该工程是上海践行“海绵城市”理念的重要民生项目，建成后服务面积达21.56平方千米，将显著提升区域防汛排涝能力。此次测量的地下隧道总长3254.2米，包含国内软土地区最小曲率半径 R 为65米的急曲线段，最大埋深约37米；隧道穿越粉砂承压水层，基坑周边还分布有35kV高压电力线，施工

扰动强、通视条件差、方位传递易累积误差，对贯通测量的毫米级精度要求构成极大考验。

为确保隧道高质量贯通，项目团队采用“高精度陀螺仪+0.5秒级全站仪”组合模式，制定“洞外控制—联系测量—洞内控制—贯通联测—成果平差”全流程精密测量方案，严控误差传递。洞外仪器架设采用强制对中基座，观测环节通过多测回观测与严密平差，为洞内测量提供稳定统一的基准起算数据；运用“陀螺全站仪定向+精密导线”组合测量技术，实现地面至地下坐标、方位、高程的安全传递，进入急曲线段后，额外加测“陀螺仪定向边”复核方位，确保洞内导线方位精准无误。项目实施过程中，团队将安全与质量贯穿全过程，严格执行安全生产规定，进场前完成全员安全培训与技术交底。面对复杂施工环境和紧张工期节点，项目人员连续奋战15小时，圆满完成测量任务，实现安全零事故、数据零超标。

下一步，河南省测绘院将继续严守安全生产底线，深耕精密工程测量前沿技术，深化与上海市测绘院的协同合作，以专业技术和严谨作风，为各类重大工程建设提供有力支撑。☑（作者单位：河南省测绘院）

测绘地理信息数据赋能濮阳高质量发展推介会召开

◎ 秦怡美

4月17日上午，由濮阳市自然资源和规划局主办的测绘地理信息数据赋能濮阳市高质量发展推介会顺利召开。

会议指出，测绘地理信息是基础性、战略性、先导性数字资源，是培育新质生产力、推进全域数字化转型、服务全市高质量发展的有力支撑。近年来，濮阳市持续夯实测绘基底，统筹推进实景三维濮阳、卫星遥感统筹、天地图应用、自然资源管理和国土空间规划“一张图”建设等，加快构建智能化高精度时空数据体系。

会议强调，在“十五五”开局起步的关键时期，要以精准时空数据赋能规划决策、精细治理、产业赋能、便民惠民，推动测绘地理信息数据从幕后走向台前、从资源变为资产、从成果化为效能。要着力推动测绘

地理信息数据资源下放、成果共享、合规应用，促进地理信息要素深度融入政府决策、产业发展、应急地灾、耕地保护及城市数字化管理等方面，为现代化濮阳建设注入强劲数字动能。

推介会上，河南省自然资源厅技术专家介绍了涉密基础测绘成果、卫星遥感影像统筹、北斗卫星导航定位基准、“天地图·河南”、国土空间基础信息平台、实景三维河南等领域的建设与应用情况，展示了省级测绘地理信息数据资源的战略价值与服务能力。

下一步，濮阳将深化省市联动与部门协作，推动测绘地理信息数据资源共享共用，加快在城市精细化治理、产业发展、民生服务等场景的融合应用，将数据资源转化为发展优势与治理效能，护航全市经济社会高质量发展。☑（作者单位：濮阳市自然资源和规划局）

河南省遥感院开展中国航天日科普进校园活动

◎ 李庆 孙萌

在中国航天日来临之际，为弘扬航天精神，普及航空航天与测绘知识，激发青少年的科学探索热情，4月23日，河南省遥感院组织科普志愿者，走进郑州市伏牛路第四小学，为120余名同学开展了一场别开生面的无人机科普公益活动。此次活动以无人机知识科普与实操体验为核心，通过理论讲解、模拟演示、实地操控相结合的形式，让孩子们近距离感受科技魅力。

活动伊始，志愿者围绕中国航天日主题，为同学们开启趣味十足的无人机知识课堂。他们用通俗易懂的语言，生动讲解了无人机的发展历程、基本构造，以及在遥感测绘、应急救援等领域的应用。互动问答环节，同学们踊跃举手，围绕无人机飞行原理、操控技巧、实际用途等积极提问，讲师逐一耐心解答，现场气氛热烈，充分调动了孩子们探索科学知识的积极性。

在无人机模拟演示环节，志愿者一对一指导同学们操作，让大家直观感受无人机飞行操控逻辑，掌握基础操作技巧；同时细致讲解飞行安全注意事项，培养孩子们规范操作、安全为先的科学意识。最受同学们期待的无人机实操环节在学校操场有序开展。志愿者拿出专业无人机，在确保安全的前提下，为同学们示范飞行，无人机腾空而起、平稳悬停、灵活转向，一系列流畅动作引得现场师生阵阵欢呼。随后，在志

愿者全程监护与指导下，学生代表分批上阵，亲手操控无人机完成基础飞行动作，感受科技带来的乐趣与震撼，体会航空科技的神奇魅力。

此次航天日科普进校园活动，不仅让同学们系统学习了无人机与航天相关知识，更通过沉浸式、互动式体验，打破了课堂与科技实践的壁垒，有效激发了大家爱科学、学科学、用科学的浓厚兴趣。下一步，河南省遥感院将持续开展科普公益活动，充分发挥专业技术优势，积极履行科普社会责任，把前沿遥感技术、航空航天知识送进校园，助力青少年提升科学素养，为培养新时代科技后备人才贡献力量。☑（作者单位：河南省遥感院）



西峡县开展“双随机、一公开”联合检查活动

◎ 薛梦 梁卓楠

为规范测绘行业及地图市场秩序、提升监管效能，近日，西峡县自然资源局联合县市场监督管理局开展“双随机、一公开”跨部门联合检查，同步开展信用宣传工作，推动监管与诚信建设双向发力、同频共振。

该局严格遵循“双随机、一公开”监管原则，通过监管平台随机抽取5家经营主体作为检查对象，重点围绕地图质量合规性、测绘单位资质达标情况、测绘成果管理规范性等12项关键内容开展细致检查，全程严格落实检查备案、入企扫码制度，规范行政执法行为，实现阳光监管、规范监管。检查期间，执法人员同步开展信用宣传，向经营主体细致讲解信用分级分类监管、守信激励、失信惩戒、信用修复等相关政策，

引导企业牢固树立诚信经营理念，主动规范经营行为，筑牢信用经营防线。

此次“监管+宣传”相结合的联合检查行动，既有效规范了当地测绘行业及地图市场经营秩序，又普及了信用建设相关知识，提升了经营主体的诚信经营意识和合规运营水平，营造出“守信光荣、失信受限”的浓厚行业氛围。

下一步，西峡县自然资源局将持续深化部门协同联动，常态化开展“双随机、一公开”监管工作，及时公示检查结果，健全长效监管机制，助力当地测绘及地图行业诚信、健康、高质量发展。☑（作者单位：西峡县自然资源局）

2025年河南省地理信息产业20强和最具活力中小企业系列报道

数智赋能千行百业 遥感护航绿水青山

——河南省遥感院创新发展工作扫描

◎ 本刊记者 栗荣晓 通讯员 裴珮

电脑屏幕前，工程师刘敬全神贯注，在河南省自然生态保护监管系统上观看每一处生态细微变化，将精准筛查的变化图斑快速推送，为生态保护部门执法核查提供精准数据，为中原大地绿水青山筑牢科技防护屏障。

近年来，河南省遥感院聚焦卫星遥感、实景三维、应急保障、科技创新等核心领域，深耕细作、提质增效，以高精度、专业化、常态化的测绘数据服务，全方位为中国式现代化建设河南实践高质量发展赋能。

卫星遥感：赋能行业精准治理

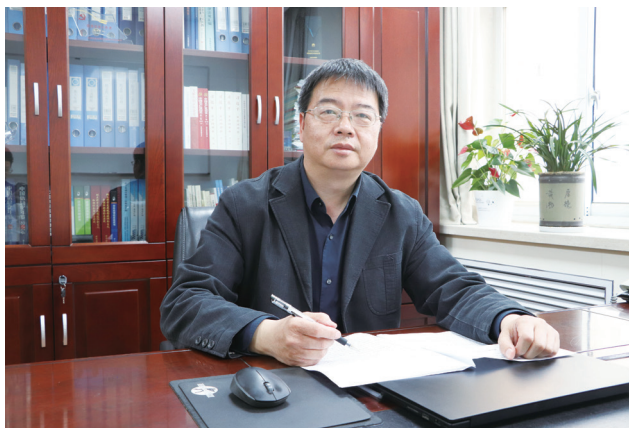
2025年，河南省遥感院牵头实施的全省亚米级卫星影像数据获取项目顺利推进，累计推送高质量卫星影像11737景，覆盖全省域的六期L1A级遥感数据均达到相关技术标准。

这一标志性成果的取得，得益于河南省遥感院持续夯实卫星遥感核心技术能力。近年来，该院坚持优化卫星数据生产体系，实现卫星影像高效接收、精准处理，按期完成全省域亚米级影像双月生成、历史单景影像精细化加工处理等关键任务。

“如今，依托我院成熟的卫星数据处理体系，实现亚米级遥感影像双月常态化更新，为全省各行业发展提供实时、精准的空间数据支撑。”河南省遥感院卫星遥感应用中心主任刘雪介绍。

依托“河南一号”卫星，河南省遥感院卫星应用云服务系统高效运行，2025年为十多家省直单位提供近百批次专业影像成果，在国土空间规划、生态监测、农作物长势精准识别、农业保险定损等方面，筑牢了坚实可靠的空间数据底座。

在耕地保护重点工作中，河南省遥感院创新搭建基于视频流影像的样本采集与审核管理系统，建成百万级超大容量遥感解译样本库，实现耕地“非农



● 河南省遥感院院长 张向军

化”“非粮化”变化图斑自动快速识别、精准提取，为永久基本农田保护、耕地占补平衡和耕地合法合理利用提供卫星遥感技术支撑。

随着遥感技术应用纵深拓展，该院打造的农业保险信息化管理平台应用，实现从单纯“数据供给”向深度“价值创造”的跨越。2025年，该院高效完成春秋两季4.5万个农作物样本处理、4轮高精度遥感解译，分析保单、赔案数据超20万条，推动农业保险由传统“经验核保”向现代化“数字核保”转型。

实景三维：构筑数字空间底座

“三维技术创新的最终价值在于应用落地，而稳定高效的系统则是技术落地的核心载体。”河南省遥感院院长张向军表示。

2025年4月，河南省遥感院聚焦空间场景还原的技术难关，在淮滨县城镇开发边界内构建0.03米超高分辨率的Mesh三维场景底座，真实复刻了地表建筑、地形地貌的细节，为权属划分提供精准的空间载体。

在系统研发中，项目团队整合二维与三维地籍数据资源，融合倾斜摄影、高分辨率卫星影像等多源数据，

完整呈现地表建筑形态、土地权属界线及空间分层分户信息，在此基础上成功开发淮滨县三维地籍信息系统，将实景三维模型与产权信息深度关联，实现不动产信息的精准化、立体化管理与展示。

“以前，处理地下车库权属争议，光比对图纸就得好几天。现在，打开三维系统，边界、面积、权属关系一目了然，效率提高了好几倍。”说起三维地籍应用建设成效，淮滨县自然资源局工作人员李阳说。

亮眼成绩的背后，是河南省遥感院在实景三维建设领域的持续创新与自主突破。2025年9月，第三届全国职业技能大赛在郑州航空港区举行。该院利用实景三维建设成果，研发上线覆盖“赛前布展—赛中引导—赛后撤场”的大赛场馆引导系统。

“32个竞赛场馆分布在2平方千米区域内，单日人流量达3.2万人次，场馆引导系统实现了群众扫码即可一键精准导航，解决了大型赛事场馆导引痛点。”大赛组委会场馆负责人表示。

此次引导系统的落地，是实景三维技术赋能重大场景的典型应用，为国家级大型赛事“数字引导”打造了可复用、可推广的实践范本。

应急保障：筑牢群众安全防线

“10分钟生成溃坝核心区域高清应急态势图，30倍变焦无人机实现堤坝隐患毫米级精细扫描，实景三维平台可精准预判淹没范围与受影响群众数量，为防汛决策提供关键支撑。”2025年7月，河南省自然资源领域应急测绘综合演练中，河南省遥感院“空天地”一体化应急保障体系展现出过硬的实战能力。

作为省应急航空巡察系统平台核心支撑单位，河南省遥感院聚焦技术痛点、破解研发难题，精准对接应急救援实战需求，为全省应急救援事业注入强劲科技动能。“要实现空地精准联动，筑牢技术根基是重要前提。”河南省遥感院首席工程师余海坤介绍，该院成立技术攻关小组，以实景三维为核心数字底座，融合“河南一号”卫星遥感数据，整合全省实景三维场景、路网水系、行政区域等多类专题数据，构建起全域覆盖、要素齐全的应急航空巡察平台，实现应急地理信息数据的一体化整合与可视化呈现。

同时，为切实提升全省应急救援智能化水平，河南省遥感院积极推动系统推广应用，有效解决了森林防火航空应急地理信息数据匮乏、机载北斗终端利用率不足等行业痛点。截至目前，该系统已成功辅助山

西省森林火灾救援、河南省林州市太行山林火处置及黄河防洪调度演练等多类应急任务，显著提升了航空救援的信息化决策能力与实战响应效率。

从森林火情早期监测预警，到地质灾害提前研判防控；从应急演练全方位技术支撑，到实战救援精准化保障服务，该院以技术创新打破传统应急响应工作局限，以专业高效的遥感测绘服务，为人民群众生命财产安全筑牢坚不可摧的科技安全防线。

科技创新：数智驱动技术赋能

惟改革者进，惟创新者强，惟改革创新者胜。测绘地理信息领域科技密集，加强科技创新能够催生新产业、新模式、新动能。河南省遥感院紧紧围绕数智化转型核心方向，推动人工智能与遥感测绘深度融合，构建起全链条数智创新体系。

在数据建设方面，该院依托重点科研课题，搭建支撑多场景行业应用的标准化数据资源库，为AI模型训练夯实数据基础。在算法研发方面，自主研发适配河南地域特点的遥感觉知大模型，大幅提升复杂地物识别精度与泛化能力。在平台建设方面，遥感智能解译、影像超分辨率重构等系统相继上线运行，实现从影像处理到专题信息产品生产全流程自动化。

与此同时，该院积极开展产学研协同联动，与郑州大学、河南城建学院共建研究生联合培养工作站，聚焦遥感AI关键技术研发，为技术创新持续注入动能。

2025年，河南省遥感院牵头完成的“主被动遥感粮食作物农保核查与估产关键技术及应用”获评中国地理信息科技进步奖一等奖，构建作物农保遥感核查体系，推动农业保险向“数字核保”转型，累计节约财政补贴约10亿元；“河南省天眼系统建设数字高清影像制作项目”创新整合国产高分系列卫星与商业亚米级卫星数据，建成覆盖全省的高分辨率影像库，实现TB级数据秒级响应，获评中国地理信息产业协会优质工程金奖；“全国产化国土空间规划‘一张图’关键技术与应用”获中国地理信息科技进步奖二等奖。

匠心凝聚成果，赋能行业高质量发展。一系列殊荣的获得，既是河南省遥感院深耕科技创新、聚焦实践应用的成效彰显，也是该院全体测绘工作者践行“精准测绘、服务发展”理念的匠心答卷。

面向“十五五”新征程，我们将进一步深化核心技术研发、拓展行业服务应用场景，奋力为河南经济社会高质量发展贡献遥感技术力量。”张向军表示。[Z]

产教融合提升供需适配度的路径研究 ——以测绘类专业“金课”建设为例

黎瑾慧 梁晓宇 刘龙辉

(河南水利与环境职业学院, 河南 郑州 450000)

摘要:为破解高职测绘地理信息专业人才培养存在课程与产业脱节、实践教学薄弱、供需适配度不高等现实困境,研究基于产教融合与国家数字化转型战略背景,以河南水利与环境职业学院测绘地理信息技术专业群“金课”建设为实践案例,系统探索提升人才供给与产业需求适配度的有效路径。通过构建“三对接、双反馈”课程开发机制与“四融合、六阶段”教学模式,形成“四方联动+金课赋能”的协同育人策略体系。实践表明,该路径显著提升了毕业生的岗位胜任力与就业质量,有效促进了教育链、人才链与产业链、创新链的有机衔接,为同类专业深化产教融合改革提供了可借鉴的实践范式。

关键词:产教融合;供需适配;金课;测绘地理信息;协同育人

1 引言

就业是最大的民生,高等教育作为人才供给的主渠道,其育人质量直接关乎产业升级活力与社会发展稳定^[1]。党的二十大报告明确将“推进职普融通、产教融合、科教融汇”作为优化职业教育类型定位、破解教育与产业“两张皮”问题的战略抓手^[2]。伴随实景三维中国建设、数字孪生、智慧城市等国家重大工程的推进,测绘地理信息行业正经历深刻的数字化转型,市场对掌握无人机测绘、地理信息系统开发、空间数据分析等数字技能的复合型、创新型技术技能人才需求迫切^[3]。

然而,当前高校传统教书育人模式仍然面临严峻挑战。多项毕业生就业质量报告以及行业调研结果显示,测绘地理信息领域的毕业生存在岗位适配率偏低、实践能力不足、技术跟进滞后等现象^[4]。企业反馈表明,新入职毕业生平均需要6~8个月的二次培训,方能胜任核心岗位,用人成本较高^[5]。究其原因,在于高校专业课程体系与产业前沿脱节,实践教学环节薄弱,教学内容更新缓慢,难以匹配无人机航测、激光雷达扫描、时空数据智能处理等新技术、新工艺的应用场景^[6]。

鉴于此,研究立足于高职院校与行业企业的实证调研,结合河南水利与环境职业学院测绘地理信息技术专业群“金课”建设的创新实践,以课程改革为突

破口,深入探索产教融合协同育人模式下提升人才供需适配度的实施路径与策略体系,旨在为深化职业教育改革、促进学生高质量充分就业提供理论参考与实践方案。

2 产教融合背景下供需适配的战略价值

2.1 产教融合政策演进与战略定位

我国产教融合政策体系历经战略确立、机制构建、深化实施的三阶段演进。2013年,党的十八届三中全会首次将“深化产教融合”上升为国家战略。2017年《国务院办公厅关于深化产教融合的若干意见》奠定了制度框架,明确了企业的重要育人主体地位^[1]。至2023年,《职业教育产教融合赋能提升行动实施方案(2023—2025年)》聚焦量化实施与精准赋能,明确提出建设产教融合型企业等具体目标,并将人才供需适配度作为衡量融合成效的核心指标,推动产教融合走向深入^[2]。

在测绘地理信息行业数字化、智能化发展浪潮下,产教融合战略定位进一步聚焦于“技术同步”与“能力复合”^[7]。政策积极倡导通过校企深度合作,共建“金专、金课、金师、金地、金教材”。其中,“金课”作为落实立德树人根本任务、保障人才培养质量的核心教学载体,是实现人才供给精准对接产业需求的关键环节^[8-9]。

基金项目:2025年河南省普通高校就业创业课题成果(JYB2025134)。

作者简介:黎瑾慧(1983—),女,汉族,硕士,副教授,主要从事摄影测量与遥感教学与研究。

2.2 供需适配的价值意蕴

2.2.1 赋能产业升级,培育新质生产力

人工智能、北斗导航、激光雷达等新技术与测绘地理信息产业的深度融合,对人才的“技术复合度”和“创新能力”提出了更高要求。通过供需适配,高校可动态调整课程内容,培养兼具传统测绘功底与数字技能的复合型人才;企业通过参与“金课”开发,将新技术、新工艺融入教学过程,缩短人才培养与产业需求的“技术时差”,为产业数字化转型提供人才支撑。

2.2.2 优化就业质量,实现高质量充分就业

供需适配是提升就业质量的核心路径。通过“金课”建设,将企业典型工作流程转化为教学项目,可以显著提升学生的实践能力,使毕业生岗位适应期缩短至3个月以内,平均起薪较普通专业提高20%。精准对接产业需求不仅能提高毕业生专业对口率与岗位适配度,还能增强就业稳定性,实现“高质量充分就业”目标。

2.2.3 驱动教育改革,构建应用型人才培养新生态

供需适配倒逼高校突破传统学科导向育人模式,推动专业设置、课程体系、教学模式的系统性改革。以“金课”开发为抓手,推行“岗课赛证”融通育人模式,将行业标准与职业技能等级证书要求融入课程体系,可使实践教学学时占比提升至50%以上,构建“以产促教、以教兴产”的良性生态。

3 高校产教融合供需适配问题研究

3.1 供需适配现状调研

基于对多所高校及行业企业的调研,结合本校教学实践,从结构、质量、时序三个维度分析当前供需适配现状。

(1) 结构适配:传统领域匹配尚可,新兴领域缺口显著。工程测量等传统岗位人才匹配度较高,约达75%。然而,智慧城市、数字孪生、低空经济等新兴交叉领域,高校专业布点与课程设置明显滞后,仅少数院校开设相关方向,人才培养规模与市场需求比例约为1:3,结构性矛盾突出。

(2) 质量适配:知识基础尚可,实践能力与职业素养不足。约80%的企业认为毕业生理论基础扎实,但仅45%左右能独立完成核心岗位任务。高校实训项目与企业真实生产需求脱节现象普遍,约60%的实训仍为“模拟仿真”,学生参与真实生产项目的不足

20%。企业对毕业生在安全意识、团队协作、工匠精神等职业素养方面的满意度仅为62%。

(3) 时序适配:课程更新滞后,存在显著“技术时差”。高校课程内容更新周期平均为2~3年,而测绘地理信息技术迭代周期已缩短至1.2年左右。时空人工智能、实景三维自动建模等前沿技术融入教学普遍滞后约2.5年。从企业提出新的人才需求到高校完成相应课程开发与实施,平均需1~2年,难以快速响应产业的动态变化与应急需求。

3.2 供需适配的核心问题

3.2.1 协同机制松散,“政行企校”四方联动乏力

当前校企合作多停留在浅层的“实习基地共建”,企业深度参与课程开发、教学实施与评价的比例偏低。政府激励政策申请流程复杂、覆盖面有限;行业协会在制定统一人才能力标准、发布行业需求预警等方面尚未充分发挥作用,导致高校专业设置与课程开发缺乏权威依据。

3.2.2 教育供给僵化,与产业动态需求错位

高校专业设置调整机制不灵活,课程体系偏重理论传授,实践教学环节占比不足、内容陈旧。“双师型”教师队伍建设存在短板,专任教师深入企业实践的时间与机会有限,自身前沿技术实践能力不足,影响教学内容的先进性与实用性。此外,部分院校实践教学设施设备更新缓慢,也难以支撑新技术、新工艺的教学需要。

3.2.3 评价反馈缺失,适配成效难以衡量与改进

尚未建立科学、统一的人才供需适配度评价指标体系,现有评价多依赖主观的满意度调研,缺乏量化依据。校企之间人才质量反馈渠道不畅通,企业对毕业生岗位表现的评价未能有效、系统地反馈至教学改进环节。供需双方信息共享平台缺位,存在信息壁垒,影响供需对接的精准性与前瞻性。

4 “金课”建设实践与适配成效

针对上述三大核心问题,河南水利与环境职业学院以测绘地理信息技术专业群为试点,以“金课”系统化建设为载体,开展了一系列改革实践,旨在构建一个闭环、动态、响应迅速的供需适配提升体系。

4.1 构建“三对接、双反馈”课程开发体系

4.1.1 精准对接产业需求

专业群对接产业链,围绕现代工程建设和运维管理全生命周期的测量需求,优化专业群布局。建立常

态化产业需求调研机制,组建团队深入安徽中铁、南方测绘、华测导航等龙头企业,系统分析精密工程测量、自动化变形监测、智慧工地测量管理等岗位的能力矩阵。依据调研成果,全面修订工程测量技术、测绘工程技术等专业的人才培养方案,确保课程内容与产业发展同频共振。

4.1.2 精准对接职业标准

课程内容对接岗位标准,系统梳理工程测量员、摄影测量员等国家职业技能等级标准,并将其核心技能要求分解、融入相关课程。与南方测绘等企业合作开发活页式、工作手册式新形态教材,联合出版《水利工程测量》等校企合作教材,推动课程内容与行业认证、岗位要求紧密衔接。

4.1.3 精准对接生产过程

教学资源精准对接真实项目,积极引入隧道工程测量、智慧水利巡检、轨道交通精密监测等企业真实项目,并将其转化为模块化教学案例。依托省级测绘工程技术专业教学资源库,建设涵盖各类典型工程施工与运维测量任务的“金课”资源库,联合企业开发工程测量虚拟仿真等软件3项,实现教学与生产过程同步。

4.1.4 建立“双反馈”动态优化机制

建立“内反馈+外反馈”双向闭环机制,其中,内反馈聚焦课堂教学效果与学生学习体验,通过课堂测评、学生访谈、教学反思等方式,实时调整教学内容与方法;外反馈依托河南水利与环境职业学院牵头成立的全国隧道及地下工程测量行业产教融合共同体,建立校企联合教研组,实施课程质量季度评估制度,定期收集企业技术更新、岗位需求变化及毕业生就业质量数据,每学年优化课程体系与教学内容,确保课程内容与产业需求同频同步。

4.2 创新“四融合、六阶段”教学实践模式

虚实融合:依托省级示范性虚拟仿真实训基地与河南省低空地理信息工程研究中心,开发覆盖复杂场景的虚拟仿真项目,与真实生产任务互补,破解实训条件局限。

学赛融合:将世界职业院校技能大赛、全国水利职业院校技能大赛等赛项内容转化为教学案例,以赛促学、以赛促教。近年来,河南水利与环境职业学院测绘地理信息专业群学生获得世界银奖1项、铜奖1项,国家级一等奖4项,技能水平显著提升。

课证融合:将“无人机操控员”等职业技能证书

培训内容系统融入课程,实施“课证融通”教学,毕业生职业技能等级证书通过率达98%。

工学融合:推行“校内项目实训+校外顶岗实习”双轨制,与上铁院、安徽中铁等企业开展现代学徒制培养,新建多个校外实践基地,确保学生积累足量真实岗位经验。

六阶段教学流程(P-A-R-I-S-E):系统实施“课前预习、课中精讲、实践操作、互动研讨、总结提升、拓展应用”六个阶段教学,努力打造高效课堂,实现知识、能力与素养的同步提升,具体教学模式如图1所示。图1展示了从“课前预习”到“拓展应用”六个阶段的循环流程,以及“虚实融合、学赛融合、课证融合、工学融合”四大支撑体系,有效形成闭环教学模式。

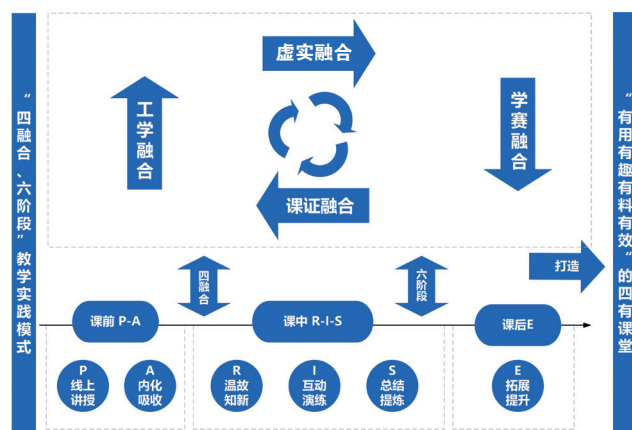


图1 “四融合、六阶段”教学模式

4.3 建立“双循环、多维度”教学评价体系

内循环深化“课堂—学期—学年—专业—课程”四级质量监控体系,将校级教改课题研究成果融入教学过程管理,保障教学各环节质量;外循环以技能竞赛成果、用人单位满意度调查为核心,同时结合现代学徒制培养企业评价、毕业生就业质量反馈,形成全方位的外部评价闭环,评价结果显示,2025年毕业生专业对口率与企业满意度持续保持高位。多维度评价指标全面覆盖,评价维度涵盖知识、技能、素质和发展四个方面,评价体系如图2所示。图2呈现了内循环(教学过程监控)与外循环(外部反馈评价)的双环结构,以及知识、技能、素质、发展四个维度的具体评价指标与方式。

4.4 培育“双导师、三能型”教学创新团队

在双导师队伍建设上,从校外聘请中铁隧道局、南方测绘等单位的技术专家担任学校产业导师;校内依托技能大师工作室、测绘技术攻关小组,强化专任

教师的工程实践能力。同时，河南水利与环境职业学院牵头成立全国隧道及地下工程测量行业产教融合共同体，建立校企人员双向流动的常态化机制。通过实施“教师企业实践计划”、承担横向技术攻关项目、组织技能培训认证等有效途径，全面提升教学团队“能教学、能实践、能研发”的复合型能力，为“金课”建设与实施提供核心人力支撑。



图2 “双循环、多维度”教学评价体系

4.5 实践成效

4.5.1 人才培养质量显著提升

2023~2025年，河南水利与环境职业学院测绘地理信息专业群毕业生就业率持续保持在97%以上，企业满意度达92%；学生职业技能等级证书通过率98%，独立完成岗位核心任务比例提升至75%以上，岗位适应期缩短至2个月以内。学生在各类技能竞赛中斩获佳绩，获世界职业院校技能大赛银奖1项、铜奖1项，全国水利职业院校技能大赛一等奖4项，省技能大赛金、银、铜奖各1项。

4.5.2 产教融合深度拓展

河南水利与环境职业学院成功牵头成立全国隧道及地下工程测量行业产教融合共同体，并建成河南省低空地理信息工程研究中心、省级示范性虚拟仿真实训基地等平台，其中，实训基地年均为水利行业培训技术人员500余人次，实现“教育—培训—产业”的双向赋能。

4.5.3 教学改革成果丰硕

河南水利与环境职业学院建成国家在线开放课程1门、省级课程思政示范课程2门，校企联合开发教材3部、虚拟仿真软件3项；教学团队获省级教学成果奖2项，28名教师获评省级“双师型”教师，1名为省职业院校省级名师，7名为省级骨干教师；2次获得河南省高等职业教育教学能力大赛一等奖。专业群

核心竞争力持续提升，为测绘地理信息行业数字化转型提供了坚实人才保障。

5 结语

研究以河南水利与环境职业学院测绘地理信息专业群“金课”建设为案例，系统探索了提升人才供给和产业需求适配度的实践路径。通过构建“三对接、双反馈”课程开发体系与“四融合、六阶段”教学模式，形成了“四方联动+金课赋能”的协同育人特色策略，有效破解了产教融合中协同机制松散、教育供给僵化、评价反馈缺失等难题。实践表明，坚持以产业需求为导向，深化校企协同、共建教学资源、完善动态评价，是实现教育链、人才链与产业链、创新链高效衔接的关键。

未来，可在以下方向进一步深化研究与实践：一是探索基于产权共享、成本共担的校企合作长效利益机制；二是构建基于大数据技术的区域性人才供需监测与专业预警平台，提升适配的前瞻性；三是开发适应快速技术迭代的模块化、颗粒化课程资源库，增强教育供给的柔性。产教融合是一项持续深化的系统工程，期待本研究的探索能为新时代职业教育高质量发展提供有益参考。

参考文献

- [1] 关于深化现代职业教育体系建设改革的意见[R].中共中央办公厅,国务院办公厅,2022.
- [2] 职业教育产教融合赋能提升行动实施方案(2023—2025年)[R].国务院办公厅,2023.
- [3] 中国地理信息产业协会. 2024中国地理信息产业发展报告[R].北京:中国地理信息产业协会,2024: 45-52.
- [4] 周光礼,吴健,周洪宇.供需适配:以教育之强支撑高质量发展[N].光明日报, 2025-05-13.
- [5] 黄铁兰,高照忠,朱腾. “双高计划”背景下产教融合、校企合作的路径研究与实践:以测绘地理信息技术专业为例[J].西部素质教育,2024,10(18):10-13.
- [6] 施贵刚,疏臻,郑润强.产教融合测绘地理信息类专业动态化课程体系研究[J].高教学刊,2025,11(17):115-118.
- [7] 刘剑锋,陈琳,郭宝宇.数智化赋能产教融合协同育人体系构建研究:以高职测绘地理信息技术专业群为例[J].黄河水利职业技术学院学报,2025,37(4):67-71.
- [8] 王启龙,李志刚.高职“金课”建设的价值意蕴、现实困境与突破路径[J].中国职业技术教育,2024(18):22-28.
- [9] 许朋朋,汤书琪,饶俊.产教融合视域下职业院校“五金”建设研究[J].现代职业教育,2025(32):73-76.

融合GIS空间分析与智能优化的风电场选址研究

蒋鸿飞¹ 崔鹏飞²

(1. 中国电力工程顾问集团新能源有限公司, 北京 100009; 2. 特变电工新疆新能源股份有限公司, 北京 100000)

摘要: 风电场选址是保障风能高效开发与利用的关键环节。研究提出了一种基于 GIS 的风电场智能选址方法, 构建了涵盖风速、风功率密度、坡度、距电网与道路距离、地表粗糙度及居民点缓冲等多维指标体系。通过层次分析法 (AHP) 确定权重, 并结合模糊加权叠加法实现适宜性分区, 将研究区划分为不适宜区、较适宜区、适宜区和最适宜区。在此基础上, 引入遗传算法 (GA) 与粒子群优化算法 (PSO) 对风机机位进行微观优化, 结果显示, 优化布局较规则布置年发电量提升 7.8%, 道路与电缆总长度减少 12%, 度电成本下降约 5.6%。研究表明, 该方法能够实现从宏观候选区筛选到微观机位优化的全过程支撑, 为复杂地形区的风电场规划与建设提供了科学、系统的决策依据。

关键词: GIS 风电场; 智能选址; 空间分析

随着全球气候变化问题的日益严重, 能源转型已成为各国发展的共同目标。风能作为一种清洁、可再生能源, 因低碳排放和可持续性而受到越来越多国家的重视。国际能源署 (IEA) 预测, 到 2050 年, 风电有望成为全球电力供应的主要来源之一。我国作为全球最大的风电市场之一, 风能资源分布广泛且潜力巨大, 特别是在西北、内蒙古以及云南等地区, 均具备大规模风能开发的天然优势^[1]。然而, 风电场的开发不仅仅是对风能资源的利用, 前提是科学合理的选址。选址作为风能开发的首要环节, 其合理性和科学性直接决定了项目的经济性、可靠性与环境可行性。

传统的风电场选址方法主要依赖专家经验和人工判断, 往往侧重于风速、风功率密度等单一因子, 对地形条件、交通可达性、电网接入难度以及生态环境与社会约束等因素考虑不足^[2]。这种方法存在选址效率低、准确性不高的问题, 易导致部分风电场建成后出现运行效率偏低或对环境与社会造成负面影响^[3]。例如, 若未充分考虑输电线路接入的便利性, 可能会造成并网成本过高; 若忽视生态红线或居民点分布, 可能带来环境和社会矛盾。这些问题凸显了传统经验选址模式的局限性, 也说明风电场选址需要更加系统化、定量化和科学化的支撑。

近年来, 随着地理信息系统 (GIS)、遥感 (RS) 技术以及多源数据融合的不断发展, 风电场选址的科学化和智能化逐渐成为研究热点。GIS 技术能够高效集成和处理风能、地形、土地利用、交通、电网及环境保护等多维空间数据, 并通过空间叠加、缓冲区分

析和适宜性评价, 为风电场选址提供精细化的空间分析工具。它不仅能够在宏观尺度识别潜在开发区域, 还能在微观尺度分析不同因子之间的空间关系, 从而实现科学的候选区筛选^[4]。与此同时, 多标准决策分析 (MCDM) 方法, 如层次分析法 (AHP)、模糊综合评价法等, 为综合处理多维、模糊和冲突性指标提供了有效途径, 能够实现对候选区域的定量化评价和分级。

此外, 智能优化算法的引入为风机机位的微观优化提供了新的可能。遗传算法 (GA)、粒子群优化算法 (PSO) 等群体智能方法, 能够在复杂的约束条件下进行迭代优化, 寻找接近全局最优的布局方案^[5]。在风电场规划中, 这些方法可以在满足风机间距、尾流效应抑制、施工条件和环境约束等要求的同时, 实现最大化年发电量与最小化建设成本的目标, 从而显著提升风电场的整体效益。

基于 GIS 的风电场智能选址方法通过宏观的空间筛选、定量化的适宜性分区与智能化的机位优化, 为风电场规划提供了科学的解决思路, 相比传统方法, 不仅能提高选址效率和准确性, 还能兼顾能源利用、工程经济性与环境保护, 符合当前绿色低碳发展的战略需求。因此, 探索应用基于 GIS 与优化算法的风电场智能选址技术, 不仅具有重要的理论意义, 也对我国风电产业可持续发展和能源结构转型具有现实价值。

1 研究区域与数据

研究选取了云南省楚雄—大理交界的山脊带作为风电场选址的研究区域。该地区位于中国西南部, 地

作者简介: 蒋鸿飞 (1982—), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 研究方向为光伏发电、风电项目建设。

形复杂,海拔范围在 1900m 至 2800m,是典型的高原山地地貌。区域内风能资源相对丰富,特别是在山脊和高原带,风速较为稳定,为风电开发提供了良好的自然条件。该地区的风能潜力与地形条件密切相关,山区地形与大气环流交汇,形成较为理想的风能开发环境,但复杂的地形和基础设施条件也带来了建设与接入的挑战。

1.1 数据收集

研究使用了多种数据源,支撑风电场选址分析和决策。数据来源包括遥感影像、气象站观测数据、地形数据、交通和电网分布、土地利用情况等,具体数据如下:

(1) 风能资源数据:包括来自气象站和数值模式的风速、风向和风功率密度(WPD),这些数据提供了区域风能资源的空间分布情况,帮助评估各区域的风能开发潜力。

(2) 地形数据:采用 30m 分辨率的数字高程模型(DEM)数据,获取了该区域的坡度、坡向、海拔高度等地形特征,为风电场选址中的地形可行性分析提供支持。

(3) 基础设施数据:包含交通(道路)和电网分布数据,通过 GIS 技术进行空间分析,评估风电场建设的可达性与电网接入的便利性。

(4) 环境与社会数据:包括生态保护区、自然保护区、居民区等信息,用于排除不符合风电场建设的区域。这些数据通过 GIS 进行空间叠加,确保选址方案符合环境保护要求。

1.2 数据的质量与代表性

为确保数据的质量与代表性,所有采集的数据都经过严格的质量控制。风能资源数据通过多年气象观测与数值模拟进行校验;地形数据则采用高精度 DEM,确保坡度、坡向等特征的准确性;基础设施数据通过遥感影像和政府公开数据获取,并经实地验证,确保数据的准确性和可操作性。

2 技术流程

研究提出基于 GIS 的风电场智能选址方法,构建“空间分析—适宜性评价—优化算法—结果验证”的技术流程,实现从宏观候选区筛选到微观机位优化的全过程。

(1) 利用 GIS 对研究区进行空间分析,综合评估风能资源、地形条件及基础设施分布,剔除不具备建

设条件的区域,筛选出具备风能开发潜力且工程可达的候选区。

(2) 引入多标准决策分析(MCDM)方法,采用层次分析法(AHP)确定风速、坡度、电网接入与交通可达性等指标的权重,并结合模糊加权叠加法计算综合适宜性指数,实现候选区的量化分级。

(3) 利用遗传算法(GA)与粒子群优化算法(PSO)对风机机位进行微观优化,在满足机组间距、尾流效应控制、居民点缓冲及环境红线避让等约束条件下,最大化年发电量并最小化道路与电缆工程量,得到兼顾能源效率与经济可行性的最优布局方案。

3 GIS 空间分析

在建立统一的空间数据库后,研究通过 GIS 的空间分析功能对风电场选址的宏观尺度进行筛选。该过程涉及对风能资源、地形条件、交通电网、环境约束等多个要素进行综合叠加分析,从而筛选出适合风电场建设的候选区域。整个过程可以分为两个层面:硬性约束剔除与综合因子分析。

3.1 硬性约束剔除

在初步筛选过程中,首先通过掩膜(mask)处理将不具备开发条件的区域从研究范围内剔除。这些区域包括:

(1) 自然保护区与生态红线。利用遥感影像和土地利用数据,通过空间叠加分析,剔除这些重要生态保护区域。

(2) 基本农田与水体湿地。基于土地利用/覆盖数据和遥感影像,识别出基本农田和水体湿地,并设定为禁建区域。

(3) 地质灾害高敏感带。利用地质灾害风险图(如滑坡、泥石流等),结合卫星遥感影像,排除高风险区域。

(4) 居民点区域,也被视为不可开发区。通过人口分布图与遥感影像,将距离居民区 1km 内的区域标记为禁建区。此外,还设置了地形条件的下限与上限,剔除海拔高于 3000m 或坡度超过 25° 的区域,其施工难度和成本较高,因此被排除在外。通过这一过程,研究区从“大范围潜在用地”缩小为“可利用候选区”,为后续的风能与地形分析打下基础。

3.2 风能与地形的适宜性筛选

在保留区域内,进一步对风能资源进行空间分析。结合风速与风功率密度数据,选取 100m 高度的风速(V_{100})与风功率密度(WPD)作为风能评估的主要指标。

通过遥感数据获取风速和风功率密度分布图，并设定阈值（ $V_{100} \geq 6.5\text{m/s}$ ， $WPD \geq 400\text{W/m}^2$ ），从中识别出风能条件较好的区域^[6]。利用这些数据，绘制出风能优势区的空间分布图，确保在资源丰富的区域进行风电场建设。

同时，结合数字高程模型（DEM）数据，分析坡度与坡向，识别适合风电机组建设的地形区域。坡度过大（大于 25° ）或地形过于复杂的区域被剔除。利用坡向数据，可以进一步识别迎风面和背风面的差异，为优化风机布局提供依据。最终，这一过程确保了风电场选址位于风能丰富、地形可行的区域。

3.3 交通与电网的可达性分析

交通与电网是影响风电场建设成本的关键因素。利用GIS空间分析功能，计算候选区域到最近主干道和变电站的距离，并进行可达性分析。设定合理的距离阈值：距离主干道 $\leq 10\text{km}$ ，距离变电站 $\leq 25\text{km}$ 。超出这些阈值的区域虽然风能条件较好，但由于并网和建设成本过高，通常被剔除。基于此，结合道路网络图和电网分布数据，进一步筛选出交通与电网接入较为便捷的区域。

4 多标准决策分析与优化

在宏观空间筛选的基础上，为进一步比较不同区域的优劣，研究引入多标准定量评价方法。通过构建涵盖风能、地形、交通、电网和环境等多维指标体系，采用AHP确定权重并结合模糊加权叠加法，实现综合适宜性分区。在此基础上，再利用遗传算法和粒子群优化算法对优选区域进行机位布局优化，实现发电效率、工程成本与环境约束的综合平衡。

4.1 多标准决策分析

在GIS空间分析的候选区域基础上，研究进一步采用多标准决策分析方法（MCDM），通过AHP与模糊加权叠加，将风能、地形、工程经济和环境社会约束等因子综合量化为适宜性指数，并据此划分等级。首先，在指标体系中，风速 V_{100} 权重最高，为0.35；其次，风功率密度、坡度、与距变电站距离权重都为0.15，与道路距离权重为0.10，地表粗糙度与居民点距离各0.05。通过AHP方法进行成对比较与一致性检验（ $CR=0.06$ ），确保权重分配科学合理。

随后，利用模糊隶属度函数将各指标标准化至0~1区间，如风速在 6.0m/s 以下适宜性为0，在 7.5m/s 及以上时，适宜性达到1；坡度从 0° 到 25° 呈线性下降，

陡坡区域逐渐被判定为不适宜；电网和道路距离则表现为随着距离增加适宜性逐渐降低。通过这一过程，所有指标被统一到同一评价尺度，并通过加权叠加公式计算综合适宜性指数，适宜性计算公式如下：

$$\text{Suitability} = \sum w_i \times \mu_i \quad (1)$$

其中， w_i 为各因素的权重，基于层次分析法（AHP）确定； μ_i 为各因素的标准化隶属度值，表示每个指标的适宜性程度。

根据综合适宜性指数值，研究区被划分为四类等级

（1）不适宜区（ $\text{Suitability} \leq 0.30$ ）：风能资源较低，地形复杂，或受生态与社会约束较多，无法进行风电场建设。（2）较适宜区（ $0.30 < \text{Suitability} \leq 0.50$ ）：这些区域风能资源有限或受某些建设条件制约，虽然风电场建设具有一定可行性，但工程成本较高，开发潜力较低。（3）适宜区（ $0.50 < \text{Suitability} \leq 0.70$ ）：风能资源较为丰富，地形适中，且交通、电网等基础设施较为便利，适合风电场建设，但还需进一步微观优化。（4）最适宜区（ $\text{Suitability} > 0.70$ ）：这些区域风能资源丰富，地形条件良好，且基础设施建设便利，最适合风电场开发与建设。

适宜性分区结果如图1所示。不同等级的空间分布呈现明显的带状特征：不适宜区主要集中在高山陡坡与生态红线区，较适宜区分布在风能条件有限或基础设施偏远区域，适宜区多位于坡度适中、交通接入尚可的山脊两侧，而最适宜区则集中在风能稳定、交通便利且远离敏感区的地带。

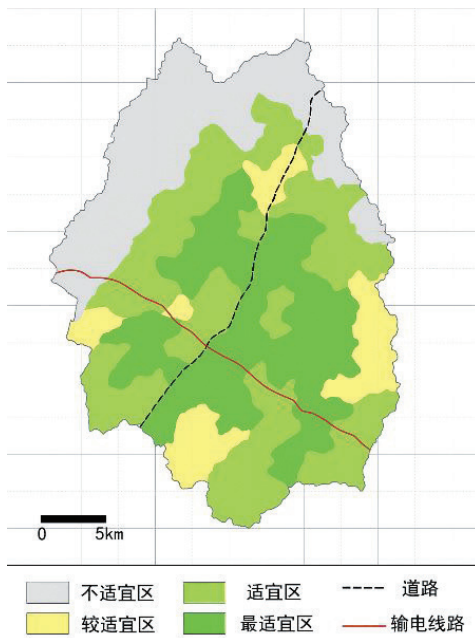


图1 适宜性分区

基于 30m 分辨率的像元统计，四类分区的面积与占比如表 1 所示。这一分布表明，虽然不适宜区面积占比较大，但最适宜区的面积仍具有足够的连续性，能够为风电场的规划建设提供优质选址单元。

表1 适宜性分区面积与占比

适宜性等级	综合指数范围	面积/km ²	占比/%	特征描述
不适宜区	≤0.30	1450	43.2	风能不足或约束严重，原则上不具开发价值
较适宜区	0.30~0.50	780	23.2	风能有限或基础设施偏远，开发难度较大
适宜区	0.50~0.70	720	21.5	风能与工程条件较好，可作为储备区
最适宜区	≥0.70	410	12.1	风能资源丰富、交通电网便利、环境约束少，为优先开发区

4.2 微观机位优化

在适宜性分区基础上，研究进一步利用遗传算法（GA）与粒子群优化（PSO）对风机机位进行微观优化。优化目标不仅包括最大化年发电量（AEP），还有最小化道路与集电线路的工程量，并通过综合目标函数实现能源效益与工程成本的平衡。目标函数形式表示为：

$$f=\alpha\cdot AEP-\beta\cdot(C_{road}+C_{cable})-\gamma\cdot E_{impact}\tag{2}$$

其中，AEP 为年发电量， C_{road} 与 C_{cable} 分别代表道路与集电线路建设成本， α 、 β 与 γ 为权重系数， E_{impact} 为环境影响系数。

在优化过程中设置了多重约束条件：（1）机组间距：主风向不小于 7 倍风机直径（7D），侧风向不小于 5D，以减轻尾流效应；（2）地形施工：道路布设坡度不超过 12%，机位不布设在坡度>25° 的区域；（3）噪声与安全：机位距居民点≥1.5km，确保夜间噪声和运行安全；（4）环境保护：机位避让生态红线、湿地与水体缓冲区；（5）电网接入：机位至升压站的接入线路不超过 25km，以保证经济性。

优化采用 GA 与 PSO 的混合策略：GA 负责全局搜索，并通过选择、交叉与变异维持解的多样性，PSO 用于加速收敛至全局最优解。经过 300 次迭代计算，最终在研究区自动选出 16 个风机布设点位，总装机容量 126MW，风机机位优化结果如图 2 所示。

优化结果显示：（1）年发电量（AEP）：约 460GWh，等效利用小时约 3650h，容量因子 41.6%；（2）工程量：道路总长约 14.2km，集电线路约 31.5km；（3）成本效益：与规则布置方案（规则网格布置，间距 6D×9D）相比，AEP 提升 7.8%，道路与电缆总长度减少 12%，度电成本（LCOE）下降约 5.6%。从机位分布特征看，优化后的机位多集中在最适宜区，但部分机

位分布在适宜区边缘位置，用以减弱尾流损失并缩短基础设施线路。结果表明，机位优化是多目标权衡过程：既保证风能利用效率，又兼顾建设成本与社会环境约束，最终形成能源—经济—环境的最优布局方案。

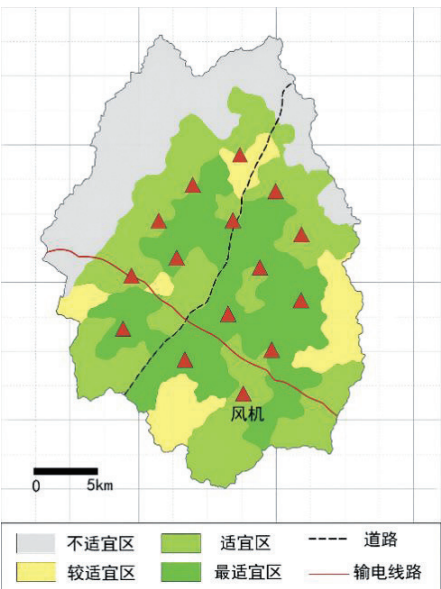


图2 风机机位优化

5 结论

研究提出基于 GIS 的风电场智能选址方法，能够综合考虑风能资源、地形、环境和经济社会等多重因素，通过空间分析和优化算法实现风电场选址的最优化。优化后的风电场布局能够最大限度地提高风能利用效率，降低建设成本，并满足环保和经济社会条件。与传统方法相比，该方法提高了选址精度，缩短了选址时间，并显著减少了选址成本。

参考文献

[1] 陈丹涌,王俞亮,吴承禧,等.基于聚类算法与图像处理技术的海上风电场选址优化研究[J].广州航海学院学报,2025,33(2):1-6.
[2] 朱哲蕾,韩斌,赵文超.海上风电场选址技术发展现状及趋势[J].船舶工程,2023,45(S1):7-11.
[3] 王雷,张彦彪,苗程广,等.基于GIS+BIM的风电场智能选址关键技术及应用研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(1):90-96,104.
[4] 汪怡然.基于多目标优化的海上风电场微观选址研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
[5] 赵琳,魏澈,王阳,等.海上风电场宏观选址与风能资源储量估算[J].太阳能学报,2024,45(5):1-8.
[6] 朱剑鸣.风电场选址与风力发电机的布局优化研究[D].南京:南京邮电大学,2023.

基于改进的PCA-SIFT算法在公路承灾体普查中的应用

刘德军¹ 左文娜² 赵志明³ 李治³

(1. 河南省遥感院, 河南 郑州 450003; 2. 河南测绘职业学院, 河南 郑州 451464; 3. 河南省中工设计研究院集团股份有限公司, 河南 郑州 451450)

摘要: 无人机航拍可以辅助提升自然灾害综合风险公路承灾体普查效率和精准度。为了解决自然灾害综合风险公路承灾体普查中存在的风险点范围大、无人机难以拍摄到全貌照片的问题, 在当前图像自动拼接研究的基础上, 提出了“PCA-SIFT+RANSAC”的无人机航拍图像自动拼接方法, 并选取某公路滑坡风险点无人机航拍图像作为研究对象, 通过实验证明了该方法的有效性和鲁棒性, 为自然灾害综合风险公路承灾体普查中无人机图像拼接提供了解决方法, 对无人机图像的自动化批量处理具有参考意义。

关键词: 无人机航拍; 公路承灾体; 图像拼接; PCA-SIFT 特征; RANSAC 算法

1 引言

2020年以来, 我国启动了首次自然灾害综合风险公路承灾体普查, 要求采集公路设施和自然灾害风险点的全貌照片, 满足对公路承灾体自然灾害风险隐患的综合调查, 作为政府决策和科学研究的重要依据, 为经济社会可持续发展提供准确可靠的灾害风险信息。无人机航拍图像具有成本低、损耗小、机动性强和起飞条件简易等特点, 可以低空作业, 减少云雾遮挡, 有助于生成高几何精度和高分辨率影像, 实现实时数据传输^[1-2]。近年来, 无人机航拍图像在基础测绘、国土监测、目标侦查、数字城市建设、灾害普查和应急处理等领域得到了广泛应用^[3]。由于相机视角和飞行高度的限制, 单幅航拍图像范围较小, 难以涵盖部分公路设施和自然灾害风险点全貌, 为全面了解整个区域的状况, 需对不同航带、不同视角的影像进行拼接处理, 以获取较大场景的影像, 因此, 快速进行图像自动拼接, 获取大场景图像, 是提高无人机应用水平和能力的关键^[4-5]。

图像自动拼接包括数据采集、图像预处理、图像配准和图像融合四个流程, 其中, 图像配准是图像拼接的关键流程^[6]。目前, 图像配准主要有两种解决方案, 即基于像素的图像配准方法和基于特征的图像配准方法^[7]。基于像素的图像配准方法利用图像像素信息计算图像之间的变化参数, 该方法处理的信息量大、设备要求高且鲁棒性差; 基于特征的图像配准

方法追踪待拼接图像之间的特征, 匹配图像中的特征点, 并获得转换参数, 该方法对噪声、畸变和灰度差异均有良好效果, 并且具有计算量小、速度快、鲁棒性强的特点^[8]。David G. Lowe 于 1999 年提出并于 2004 年完善了尺度不变特征变换 (Scale Invariant Feature Transform, SIFT) 算法, 该算法对于图像缩放、光照强度和旋转具备不变性和稳定性^[9]。但是, SIFT 算法使用的 128 维描述子产生了计算量过大问题, Yan Ke 等提出了 PCA-SIFT 算法^[10], 采用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 算法对 SIFT 描述子进行降维, 加快了特征提取和特征匹配的速度^[11-12]。魏丽芳等将 PCA-SIFT 算法引入眼底图像拼接, 解决了亮度和形变对拼接的影响^[13]。

基于当前图像拼接技术的研究, 提出了“PCA-SIFT+RANSAC”的图像自动拼接方法, 首先采用 SIFT 算法提取无人机图像特征点, 使用 PCA 算法降低图像特征维数; 然后采用 RANSAC 算法去除误匹配点, 实现图像特征点的自动选取; 最后采用“淡入淡出”思路对图像进行融合操作, 完成图像拼接, 通过实验结果的对比和分析, 证明了该方法的有效性和鲁棒性。

2 基本原理

2.1 SIFT 算法

SIFT 算法的理论基础为尺度空间理论, 是一种基于图像局部特征的描述子, SIFT 特征点对于缩放、旋

作者简介: 刘德军 (1971—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事测绘工程。

通信作者: 左文娜 (1988—), 女, 汉族, 硕士, 讲师, 主要从事地图学和地理信息系统专业工作。

转和光照强度保持稳定性和不变性^[14]。利用 SIFT 算法提取图像特征点包括以下 4 个步骤：（1）检测尺度空间极值点；（2）定位关键点；（3）分配关键点方向；（4）生成特征描述符。

2.1.1 检测尺度空间极值点

Lindeberg 等提出了高斯卷积核是实现图像尺度变换的线性核函数，使得图像具有尺度不变性^[15-16]。检测尺度空间极值点，使用一个尺度变化的高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 建立尺度空间，如公式（1）所示。

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (1)$$

其中， (x, y) 为图像空间坐标， σ 为高斯正态分布的方差。图像的尺度空间 $L(x, y, \sigma)$ 通过尺度变化的高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 和图像 $I(x, y)$ 卷积得到，如公式（2）所示。

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2)$$

其中， $*$ 表示卷积运算。为了在尺度空间检测出稳定的关键点，Lowe 提出可以在高斯差分尺度空间（Difference of Gaussian, DOG）检测尺度空间极值，高斯差分尺度空间由相邻的两个尺度空间差值得来，如公式（3）所示。

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (3)$$

其中， k 为常数，通常取值为 $\sqrt{2}$ 。得到高斯差分尺度空间后，将每一个像素点与其同层相邻的 8 个像素点以及上下两层相邻的 9 个像素点，共计 26 个像素点进行对比分析，如果该点大于或小于临近的 26 个点，则该点为一个局部极值点，所有的局部极值点构成初步的特征点集。

2.1.2 定位关键点

通过检测尺度空间极值点得到的初步特征点集在空间上是离散的，为了找到正确的极值点，需要采用三维二次拟合函数，剔除低对比度的特征点，如公式（4）所示，然后利用 Hessian 矩阵去除边缘响应点，从而得到稳定的关键点。

$$D(X) = D + \frac{\partial D^T}{\partial X} X + \frac{1}{2} X^T \frac{\partial^2 D}{\partial X^2} X \quad (4)$$

2.1.3 分配关键点方向

SIFT 算法因为主方向的存在，对图像旋转具有很强的忍耐度，主方向不随图像旋转而发生变化，关键点的主方向采用图像梯度方法得到^[17]。关键点像素梯度和方向计算如公式（5）和公式（6）所示。

$$m(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \quad (6)$$

其中， $L(x, y)$ 表示关键点所在的尺度空间值， $m(x, y)$ 表示关键点梯度， $\theta(x, y)$ 表示关键点方向（°）。在计算得到关键点邻域的梯度和方向后，采用梯度直方图统计邻域像素的梯度方向，直方图的峰值即为关键点的主方向。

2.1.4 生成特征描述符

通过上述步骤可以得到关键点的位置、尺度和方向三个信息，采用 SIFT 特征描述子对上述信息进行描述。SIFT 描述子的邻域大小为 4×4 ，在 4×4 邻域内统计 8 个方向的梯度直方图，得到 $4 \times 4 \times 8 = 128$ 维的 SIFT 特征描述子。

2.2 PCA-SIFT 特征描述符

主成分分析（PCA）在多元统计学上称为 KL 变换，是一种多维正交线性变换，实质上是对图像信息进行集中和压缩^[18]。对于 n 维向量 X ，采用 PCA 算法求得正交矩阵 P ，满足 $P^T P = I$ ， I 为单位矩阵，通过公式（7）得到变换后的向量 Y 。

$$Y = P^T X \quad (7)$$

其中，协方差矩阵 $\text{COV}(Y) = D$ ， D 为对角矩阵。按照变换后各主成分包含的信息量大小划分，信息量最大的主成分为第一主成分，其次为第二主成分，一般前三主成分包含原始图像 95% 以上的图像信息。

PCA-SIFT 算法采用主成分分析对 SIFT 算法实现从高维数据到低维数据的转换，改进优化 SIFT 算法生成特征描述符的步骤，利用图像特征点临近的 41×41 像素块计算特征矢量，使特征矢量维度降为 20 维。与 SIFT 算法相比，PCA-SIFT 算法保留了 SIFT 算法的不变性，降低了特征矢量维数，提高了特征点匹配速度。

2.3 RANSAC 算法

对于 PCA-SIFT 算法产生的错误匹配对问题，采用随机抽样一致性算法（Random Sample Consensus, RANSAC）。这是一种鲁棒性较好的变换估计算法^[19]，通过迭代和模型拟合方式构建函数模型，满足函数模型的为“内点”，不满足函数模型的为“外点”，利用全部内点对模型进行迭代和优化，得到精确的匹配结果，同时进行匹配特征点的粗差剔除^[20]。

2.4 图像融合

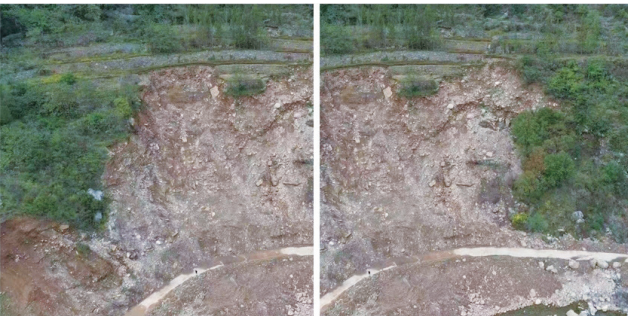
光照因素导致待拼接图像的重叠部分产生“鬼影”现象，使拼接后的图像有明显缝隙，影响图像的分析和应用。研究采用“淡入淡出”思想进行拼接图像的平滑过渡操作，假设 $f(x, y)$ 是融合后的图像， $f_1(x, y)$ 和 $f_2(x, y)$ 是两幅待拼接的图像，则由公式（8）所示。

$$f(x,y)=\begin{cases} f_1(x,y) \\ d_1f_1(x,y)+d_2f_2(x,y) \\ f_2(x,y) \end{cases} \quad (8)$$

其中, d_1 和 d_2 为权重, 满足 $d_1+d_2=1$, 且 $0 < d_1 < 1$, $0 < d_2 < 1$ 。在待拼接的两幅图像重叠部分, d_1 由 1 渐变为 0, d_2 由 0 渐变为 1, 从而实现图像的平滑过渡和无缝拼接。

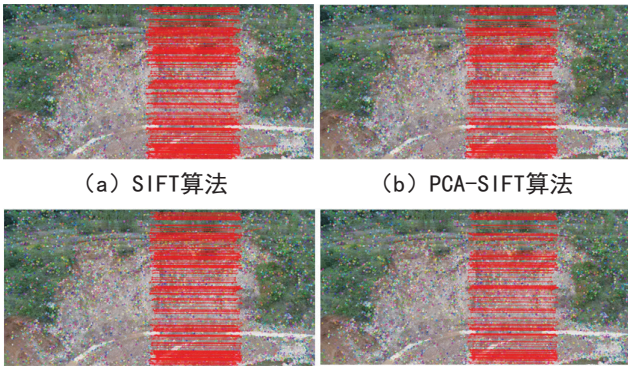
3 实验结果及分析

实验采用大疆 Phantom 4 RTK 无人机为航摄平台, 应用其搭载的 2048 万像素的影像传感器对某公路滑坡风险点进行无人机航拍, 选取质量较好的两幅相邻影像作为研究对象, 图 1 (a) 为该滑坡点的基准图像, 图 1 (b) 为该滑坡点的待匹配图像。实验环境为 64 位的 Windows 10 操作平台, 硬件配置为 Intel Core(TM) i5-9400F CPU 2.90GHz、16GB 内存的台式计算机, 算法运行环境为 VS2013, 编程语言通过 C++ 语言实现。



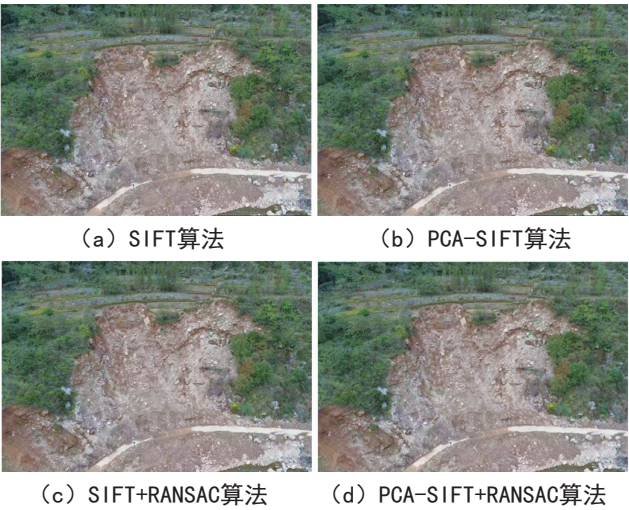
(a) 基准图像 (b) 待匹配图像
图1 实验的基准图像和待匹配图像

图 2 (a) 为 SIFT 算法特征点匹配结果, 匹配的特征点对为 304 个; 图 2 (b) 为 PCA-SIFT 算法特征点匹配结果, 匹配的特征点对为 223 个; 图 2 (c) 为 SIFT+RANSAC 算法特征点匹配结果, 匹配的特征点对为 236 个; 图 2 (d) 为 PCA-SIFT+RANSAC 算法特征点匹配结果, 匹配的特征点对为 168 个。



(a) SIFT算法 (b) PCA-SIFT算法
(c) SIFT+RANSAC算法 (d) PCA-SIFT+RANSAC算法
图2 不同算法的特征点匹配结果

不同算法的图像拼接结果如图 3 所示, 进一步对比分析实验中 SIFT、PCA-SIFT、SIFT+RANSAC 和 PCA-SIFT+RANSAC 算法的特征点匹配和图像拼接结果, 列出不同算法的匹配点对、错误匹配点对、匹配正确率和图像拼接耗时, 结果如表 1 所示。由表 1 可知, 与 SIFT 算法相比, 研究提出的 PCA-SIFT+RANSAC 算法, 降低了图像匹配点对数量, 提高了图像匹配点对正确率, 减少了图像拼接时间, 提升了图像拼接效率。



(c) SIFT+RANSAC算法 (d) PCA-SIFT+RANSAC算法
图3 不同算法的图像拼接结果

表1 不同算法的匹配点情况和拼接耗时比较

实验组 编号	算法	匹配点 对/个	错误匹配点 对/个	匹配正确 率/%	拼接耗 时/s
1	SIFT	304	30	90.13	2.28
2	PCA-SIFT	223	27	87.89	2.24
3	SIFT+RANSAC	236	22	90.68	2.19
4	PCA-SIFT+RANSAC	168	13	92.26	2.14

4 结语

针对自然灾害综合风险公路承灾体普查中无人机难以拍摄到风险点全貌照片的问题, 在研究前人的图像自动拼接基础上, 提出“PCA-SIFT+RANSAC”图像自动拼接方法, 首先采用 SIFT 算法提取无人机图像特征点, 其次使用 PCA 算法降低图像特征维数, 采用 RANSAC 算法去除误匹配点, 实现图像特征点的自动选取, 最后采用“淡入淡出”思路对图像进行融合操作, 完成图像拼接。通过实验对比了 SIFT、PCA-SIFT、SIFT+RANSAC 和 PCA-SIFT+RANSAC 算法实现图像拼接的差异, 结果表明, “PCA-SIFT+RANSAC”图像自动拼接方法在匹配点对、错误匹配点对、匹配正确率和图像拼接耗时等方面均具备一定优势, 证明了该方法的

(下转第 31 页)

FME软件在地籍测绘成果质检中的应用探索

陈旭 吴昊 黄晓慧

(南京捷鹰数码测绘有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 地籍测绘是地籍调查的前置工作, 地籍测绘成果质量直接关系到地籍调查工作的总体质效。研究以地籍测绘成果质检为背景, 借助 FME 软件强大的语义转换和自定义转换器优势, 提出了对地籍测绘成果进行空间拓扑关系、图属一致性、属性正确性等质量检查思路, 探索得出了具体质检项的实现方法。通过具体地籍测绘成果的质检验证表明, FME 软件支撑下的质检方法不仅能有效解决复杂数据的剥离重构, 还能准确识别各类空间与属性错误, 为地籍测绘成果的准确入库提供了重要保障。

关键词: 地籍测绘; FME; CASS; 语义转换; 转换器

1 引言

地籍测绘成果是地籍调查的主要内容, 主要包含地籍测绘数据、权属调查信息表等成果, 为不动产登记、土地供应、用地管制提供了翔实准确的数据基础。目前, 主流地籍测绘图形编辑软件为广东南方数码科技股份有限公司研发的南方 CASS 软件, 其绘制的地籍测绘点、线、面、块等几何要素以数据集形式保存于 CAD 文件, 对应的属性信息被附着于几何要素上, 要素间几何关系相对简单, 图形表达简洁、图层丰富多样、编辑快捷高效。但 CASS 软件产出的 CAD 数据成果多为二维图形, 缺乏直观的空间特性和拓扑关系, 图形和属性的强粘性使得图属一致性判断较为困难, 需要额外的转换操作方可进行数据查看与分析。

鉴于地籍测绘数据图层要素多、组织结构复杂等特性, 导致成果质检工作难度大、效率低, 可以使用 FME (Feature Manipulate Engine, 这是 Safe Software 公司开发的空間数据转换系统) 软件开展相关数据处理操作。FME 软件具有“零代码”模块化编程、数据流直观、界面可视化操作等特性, 已广泛应用于测绘地理信息数据处理领域。研究基于 FME 软件在数据重构、提取、分析等方面的优势, 探索了 FME 框架下对 CAD 格式地籍测绘成果质检的流程与方法。

2 FME 软件简介

FME 软件是目前较为流行的空间数据 ETL (Extract-Transform-Load) 处理软件, 提供 500 多种转换器进行数据处理, 支持 400 多种数据格式, 具

备强大的多源异构数据转换、自动化数据流、空间数据治理能力。在 FME 布局空间内通过数据流连接转换器, 可将不同格式的空间数据重构后根据需要进行分离与重组、筛选与判断、导出与更新等, 亦可结合 Python、cmd 批处理代码调用相对路径下的数据, 实现批量自动化质检, 提升大批量、重复性数据处理效率。

FME 的核心是语义转换技术, 如图 1 所示, 是由 OpenGIS 组织按照开放式地理信息数据转换思想提出的数据转换理念^[1]。相较其他传统地理信息软件简单的格式转换, FME 的语义转换在于通过转换器对数据进行解构, 利用数据流映射不同图层、不同字段的属性, 最终根据需要再重新构造数据。FME 语义转换技术的另一个优势在于, 所有业务逻辑都可通过 Workbench 界面直接展示映射规则, 方便及时调整数据流。

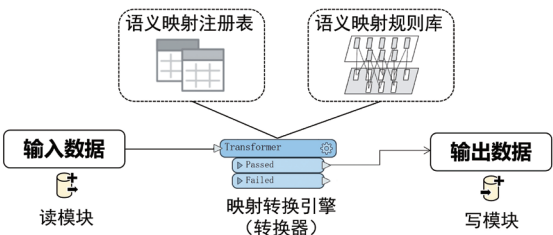


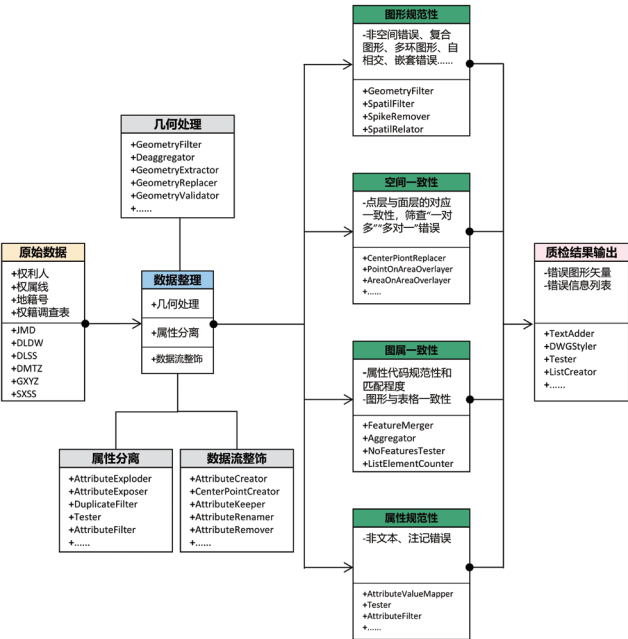
图1 语义转换技术

3 总体思路

利用 FME 的语义转换技术, 首先通过内置参数将隐藏属性进行剥离, 并分层提取 CAD 图纸中点、线、面、块等空间要素和文本、注记等非空间要素, 形成质检基础数据源。其次根据质检场景需要, 使用专门转换器链接各个数据流进行分离、连接、筛选、叠置等数

作者简介: 陈旭 (1993—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事测绘地理信息领域数据处理、分析与评价等工作。

据操作,实现空间图形、图属关系、属性等质量检查。然后将质检发现的错误要素,带位置、带属性输出为原格式数据,以便后续改错勘误。最后整合各质检模块,使用整饰转换器、连接节点、数据流线路、注释形成 FMW 质检模板文件,结合 .bat 批处理技术实现批量自动化质检。质检模板文件各模块组织结构如图 2 所示。



4 质检功能实现

4.1 属性暴露与空间分离

CAD 格式中地籍测绘数据的属性信息,一般作为隐藏属性附着于几何要素上,因此必须将隐藏属性明文显示,通过 AttributeExposer 转换器对其进行属性暴露,具体结果如图 3 所示。

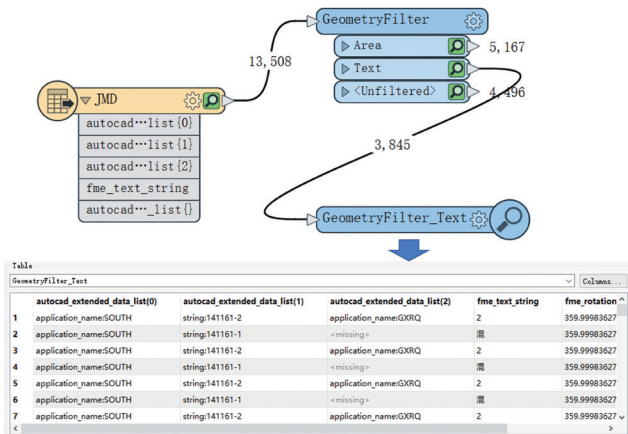


图3 CAD文件隐藏属性暴露

由图 3 可知, autocad_extended_data_list{} 是 CAD 格式数据的扩展属性列表,南方 CASS 编辑

形成的 CAD 图形中主要编码信息存储于 autocad_extended_data_list{1} 列表,文字注记存储于 fme_text_string,颜色、图层名称、软件信息等其他信息存储于 _list{2-10}。根据以上方法,将 CAD 成果中 JMD(居民地)、DLDW(地类地物)、DLSS(道路设施)、ZBTZ(植被特征)、SXSS(水系设施)等属性信息暴露提取。其中,JMD 图层结构和层数均存储于 autocad_extended_data_list{1} 列表,通过地物代码后缀“-1”“-2”区分。通过使用 GeometryFilter 转换器^[2],过滤各个图层点、线、面、文本、其他要素,作为下一步空间图形规范性检查数据要素。

4.2 空间图形规范性检查

(1) 图形要素规范性检查。针对 CAD 成果中各个图层的类型,通过 GeometryFilter 转换器过滤几何特征,实现几何分离并识别错误要素。如宗地面层过滤出来的非 AREA 要素,即为宗地面未闭合错误,各类型过滤规则与识别结果如表 1 所示。

表1 GeometryFilter过滤规则和识别结果

图层	过滤规则	错误识别结果
地籍号	Text	
权利人	<unfiltered>	Error_地籍号/权利人/JMD等文本要素非文本
宗地面	Area	
JMD	<unfiltered>	Error_宗地面未闭合(非面)
DLSS	Line	
	<unfiltered>	Error_道路设施非线
	Point	
ZBTZ	Collection	
	<unfiltered>	Error_植被特征非点/块参照
	Point	
DLDW	Line	
ZBTZ	Area	
SXSS	Text	根据实际情况过滤并识别错误
GCD	Arc	
.....	Collection	
	<unfiltered>	

另外,对 GeometryFilter 过滤后的面层要素,结合 GeometryValidator 进一步筛查图形自相交、嵌套空洞或重复环等错误^[3]。

(2) 空间一致性检查。规范的 CAD 成果应保持注记与面层一一对应、面层内与面层间不存在空间重叠,对于一个地籍号注记位于多个宗地面、一个宗地面包含多个权利人注记、宗地面间空间重叠、JMD 面跨越宗地面层等错误,可通过 PointOnAreaOverlayer 和 AreaOnAreaOverlayer 转换器判断 _overlaps 值精准识别。以 PointOnArea 为例,不同端口、不同 _overlaps 值下的点面关系如图 4 所示。

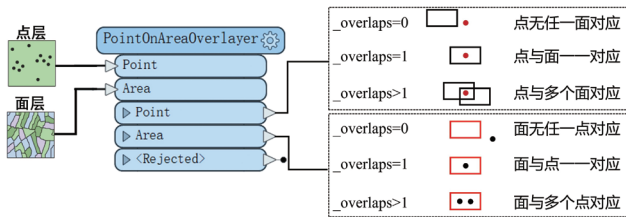


图4 PointOnAreaOverlay转换器_overlaps判定情况

通过使用以上两个转换器，判断地籍号、权利人、JMD 注记等点层与宗地面、JMD 等面层的空间一致性，以及宗地面、JMD、面状 SXSS、面状 DLDW 的空间重叠情况。当然，在面层间空间重叠检查时，不能完全依托 AreaOnAreaOverlay 转换器筛查出来的错误，如 JMD 层存在因为悬空阳台而超出宗地面范围的情况，需要人工介入进行二次判断，避免误判。空间一致性检查部分 FME 模板如图 5 所示。

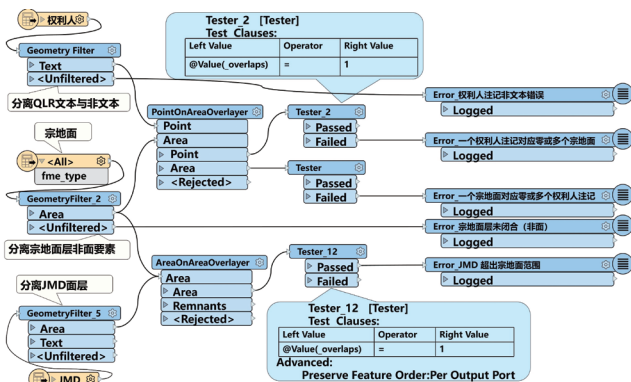


图5 空间一致性检查

4.3 图属关系一致性检查

图属关系一致性检查主要针对图形中地籍号、权利人与权属调查信息表的属性对应关系是否正确，以及自身属性重复情况。地籍号、权利人的重复判定依托 DuplicateRemover 转换器筛选，设定判断字段后即可在 Unique/Duplicate 两个输出端口查看唯一 / 重复要素。

图属对应关系的挂接检查通过 FeatureMerger 转换器判定，以地籍号图属关系一致性判定为例，Requestor（主数据流）端口设置为图形中的地籍号，Supplier（提供补充信息的参考数据流）端口设置为信息表的宗地代码，继而判定 @Value(DJH) 和 @Value(宗地代码) 是否一致，最终在 NoMerged 端口输出未匹配的 Requestor 要素（为“有图无表”，图上有此地籍号但信息表中无对应宗地代码），Unreferenced 端口输出未匹配的 Supplier 要素（为“有表无图”，信息表中有此宗地代码但图上无对应地籍号），具体实现方法如图 6 所示。

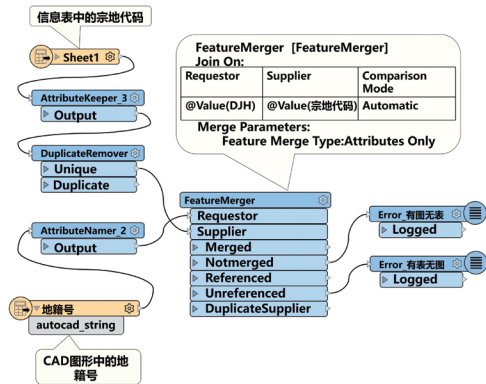


图6 图属关系一致性检查

4.4 属性正确性检查

(1) 图形代码正确性。南方 CASS 数据编辑软件在绘制地籍测绘图件时，按照 CASS 实体代码表，通过指令界面给定各个图形实体属性值并进行图面注记^[4]，如勾绘混凝土房屋时 JMD 图形的属性值为“141111”，并在图形上注记“砼”字样。但在实际作业过程中，有可能因为操作不规范而导致注记与实体代码不一致，此类错误将会导致地籍测绘数据入库时产生属性异常。

对此，采用 AttributeValueMapper 转换器按照实体代码表规则重新匹配注记代码，结合 Tester 转换器判定注记代码与 fme_text_string 属性是否一致，以此实现属性正确性检查的效果，AttributeValueMapper 转换器设置方法与配置项如图 7 所示。

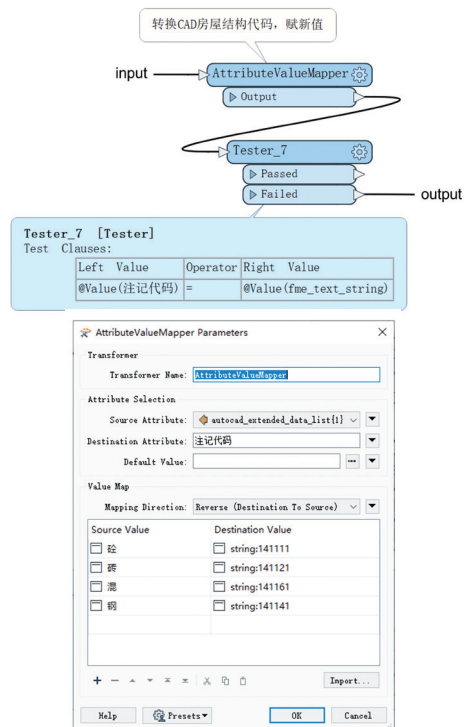


图7 AttributeValueMapper转换器示例

(2) 权属调查信息表规范性。对于权属调查信息

表中宗地代码、身份证号等字符串要素，可以通过 Tester、StringSearcher、AttributeSplitter 等转换器的正则表达式功能，筛查不符合位数、值域、编码规则要求的错误，如 `^[0-9]+$` 可以查询某字段是否以阿拉伯数字存储^[5]。表 2 列出几种地籍测绘权属信息检查常用的正则表达式案例。

表2 正则表达式案例

表达式	使用情形
<code>^\d+\$</code>	匹配正整数
<code>.*</code>	匹配空格字符
<code>\d{6}(19 20)\d{2}(0[1-9] 1[0-2])</code> <code>(0[1-9] 1[1-2])\d{3}[0-1]\d{3}[0-9Xx]</code>	匹配身份证号码
<code>^(?!0{6})\d{6}(\d{6}(JB JC)(?!0{5}))\d{5}\$</code>	匹配19位地籍号
<code>^[砖混砼]?(?:[2-9])?\$</code>	匹配房屋结构层数
<code>^[u4e00-u9fa5]+\$</code>	匹配权利人中文字符
<code>^(?:[1-9]\d* 0)\.\d+\$</code>	匹配大于0的数字

以匹配身份证号为例，释义正则表达式的匹配逻辑：`\d{6}(19|20)\d{2}(0[1-9]|1[0-2])(0[1-9]|1[1-2])\d{3}[0-1]\d{3}[0-9Xx]`

式中，`\d{6}` 匹配 6 位数字，表示身份证号前 6 位地址码；`(19|20)` 匹配年份前两位，限定为 19 或 20 世纪出生；`\d{2}` 匹配年份后两位数字；`(0[1-9]|1[0-2])` 匹配出生月份，值域为 01 到 12；`(0[1-9]|1[1-2])\d{3}[0-1]\d{3}` 匹配出生日期，值域为 01 到 31；`\d{3}` 匹配顺序码的前三位数字；`[0-9Xx]` 匹配校验码，可以是数字 0~9 或字母 X/x。

当被筛选字段不符合以上匹配规则时，通过 Tester 转换器判断并输出为错误记录。

4.5 质检结果生成

质检结果输出要确保空间定位准确、错误要素明晰。对于图属一致性、重复地籍号等非空间错误，利用 AttributeCreator 和 ListBuilder 创建包含错误索引值的数据流列表，例如“图上地籍号 @Value(DJH) 无对应权属表格记录！”，不同数据流赋值 Type 值，并根据重要顺序进行排序处理，直接写出文本格式的错误记录表。对于其他空间图形错误，根据各个质检模块输出的错误，采用 Bufferer、TextAdder、DWGStyler 等转换器创建标识圆形，并添加错误问题提示，写出同格式的 CAD 图形文件，返回至地籍测绘成果供作业人员修正错误。

4.6 自动质检的本地化实现

多数情况下 FME 质检模板以 .fmw 文件存储于本地，需手动打开 .fmw 文件后设置输入数据源、输出结果路径，点击运行后方可完成数据质检。这种重复性的手

动操作费时费力，无法满足大批量数据质检需求，可以通过 Windows 自带的 cmd 批处理命令行创建 .bat 文件，自动调用 FME 程序启动 .fmw 文件，读取同一路径下固定格式的待检数据，并输出检查结果，实现自动化检查^[6]。

批处理命令主要由三部分组成：其一，通过 echo 显示提示文本消息，提醒使用者关于数据组织、结果输出等方面的注意事项；其二，设置本机 FME 软件安装位置，必须设置到 .exe 执行程序位置；其三，运行 .fmw 模板的主体代码，包含调用的 .fmw 文件名称、源数据读取规则、目标结果导出规则等内容。

代码主体如下所示：

```
@echo off

echo                               质检说明

echo -----

echo 注意：首次使用时用记事本打开本文件修改 FME 安装路径为你的本机路径

echo 保证待检查地籍测绘成果 .dwg 文件与权属调查信息表 .xls，应与 .fmw 文件位于同一路径

echo 重复运行模板将会覆盖上一次生成的检查记录，请注意备份

echo -----

/* 设置提示消息文本 */
DEL %CD%\ 错误检查结果.txt/S
DEL %CD%\ 错误检查结果.dwg/S
/* 删除同路径下旧质检结果 */
set fmeapp="C:\Program Files\FME\fme.exe"
/* 设置 fme 软件在本计算机中的安装位置 */
for /f "delims=" %%i in ('dir *.xls/a-d /s/b ') do (
    echo 正在质检 %%i
    %fmeapp% "..\地籍测绘数据质量检查.fmw"
    --Source_ACAD "%~pi\*地籍测绘成果*.dwg"
    --Source_XLSXR "%~i"
    --DestDataset_ACAD "%~pi\%%~ni_错误检查结果.dwg"
    --DestDataset_TEXTLINE "%~pi\%%~ni_错误检查结果.txt"
)
/* 设置源数据 Source 读取规则、目标结果 DestDataset 输出规则 */
echo 质检完成
pause
```


5 结语

地籍是土地的“户籍”，新时代的地籍调查早已不再是简单的平面勘界。2023年以来，自然资源部多次发布相关通知，提出关于做好地籍调查工作、建设地籍“一张图”的工作指示，明确地籍调查作为土地审批供应的基础数据支撑、维护资产权益的基本权利保障、夯实不动产交易的产权基石主旨定位。因此，在未来的地籍调查领域，村庄地籍、城镇地籍、自然资源地籍、林权、土地承包经营权等多种异源异构、标准不一的地籍调查数据，必将要通过多种技术手段集聚融合、质量提升和集成应用，形成全域覆盖、权利齐全、现势有效的地籍“一张图”数据库。

研究以地籍测绘成果质检为背景，利用FME技术优势实现对多种主流格式成果的质检流程，通过不同转换器的组合探索了典型质检应用场景的实现思路，为地籍调查工作中同类地籍测绘成果质检提供了有益经验。当然，新时代背景下的地籍调查日益精细，对

地籍测绘成果质检的应用探索也不应停留于此，FME质检模块在Server云端发布与调用、与Python脚本联动、与GIS桌面平台软件集成等方向，将是后续研究探索的重点。

参考文献

(上接第26页)

有效性和鲁棒性，为自然灾害综合风险公路承灾体普查中无人机图像拼接提供了一种解决方法，可有效提升自然灾害综合风险公路承灾体普查效率和精准度。

参考文献

- [1] 乔保旭.狭窄重叠的无人机影像拼接方法研究[J].测绘与空间地理信息,2024,47(2):193-196.
- [2] 王震,刘健辰.基于图割法的无人机正射影像拼接研究[J].北京测绘,2020,34(9):1179-1183.
- [3] 胡育诚,芮挺,杨成松,等.基于改进SIFT的无人机航拍图像快速配准研究[J].计算机科学,2021,48(8):134-138.
- [4] 石耀榕,肖敬达.无人机影像拼接多分辨率自适应无缝融合方法[J].测绘通报,2024(6):36-40.
- [5] 葛继空,叶业辉,杨静,等.网格运动统计算法的电力走廊图像拼接[J].北京测绘,2022,36(4):524-530.
- [6] 王艳,祁萌.基于GA-SIFT算法的无人机航拍图像实时拼接[J].测绘通报,2021(8):28-32.
- [7] 覃江颖,明飞雄,李明.一种基于颜色域的低空无人机图像拼接算法[J].地理空间信息,2023,21(10):1-4.
- [8] Wang Z,Zhang D.Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images[J].IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing,1999,46(1):78-80.

- [9] David G.Lowe.Object recognition from local scale-invariant features[J].In International Conference on Computer Vision,Corfu,Greece,1999.
- [10] Yan Ke,R.Sukthankar.PCA-SIFT:A more distinctive representation for local image descriptors[C].Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2004:506-513.
- [11] 刘仲,邢彬朝,陈跃跃.一种面向多核处理器的高效并行PCA-SIFT算法[J].国防科技大学学报,2012,34(4):103-107.
- [12] 郭丽,焦红波,董少敏.基于SIFT+FSC算法的遥感图像自动匹配[J].海洋测绘,2021,41(2):49-53.
- [13] 魏丽芳,潘林,黄琳琳,等.基于PCA-SIFT特征检测的眼底图像拼接[J].微计算机信息,2010,26(8):11-13.
- [14] 肖健.SIFT特征匹配算法研究与改进[D].重庆:重庆大学,2012.
- [15] Lindeberg T.Scale-space theory: A basic tool for analysing structures at different scales[J].Journal of Applied Statistics,1994,21(2):224-270.
- [16] 张楠楠.基于PCA-SIFT算法的监控视频目标检索技术的研究与实现[D].西安:长安大学,2020.
- [17] 冯文斌.基于改进SIFT算法的图像匹配研究[D].秦皇岛:燕山大学,2017.
- [18] 路轩轩.植被覆盖区的遥感蚀变信息提取研究及应用[D].长沙:中南大学,2014.
- [19] 蒋波,翟旭平.基于PCA-SIFT特征匹配的图像拼接算法[J].计算机应用,2016,36(2):143-159.
- [20] 周杰,解现,付超,等.结合SIFT特征点和泊松融合的无人机遥感影像拼接技术[J].测绘通报,2021(1):94-98.

多种监测方法在高架桥沉降监测中的应用研究

郝广明

(济南铁路物资工业集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 针对传统几何水准测量方法存在高架桥沉降监测效率低、时效性差等弊端, 研究采用自动化程度较高的智能全站仪监测系统、静力水准监测系统、二维面阵监测系统、远程摄影测量监测系统等方法, 进行高架桥沉降监测作业, 详细论述了不同监测方法的作业原理及技术特征, 利用邻近铁路施工场地的高架桥监测项目对不同监测方法的部署实施情况、监测数据准确性、技术优劣势等进行对比分析。结果表明, 智能全站仪监测系统数据成果准确性高, 与二等水准测量数据偏差未超过 1.0 mm, 且抗干扰性强、部署复杂度相对较低; 静力水准监测系统、远程摄影测量监测系统数据成果容易受环境因素影响, 二维面阵监测系统在长距离、多站点监测项目中数据精度相对较低, 但数据时效性高, 成本投入相对较低。

关键词: 高架桥沉降监测; 智能全站仪; 静力水准; 二维面阵; 远程摄影测量监测系统

1 引言

随着城市化进程的加快, 高架桥作为城市交通的重要组成部分, 有效缓解了城市交通压力, 提高了城市居民出行便捷性。但城市高架桥在长期运营过程中, 受地质结构、车辆荷载、邻近工程施工等因素影响, 容易产生位移变形现象^[1], 从而影响高架桥结构安全。桥墩沉降变形是高架桥安全监测的重要内容, 一般多采用几何水准测量方法进行监测, 数据成果准确可靠, 但监测效率较低, 工作量相对较大, 监测频率多为 1 天 1 次, 难以实现高架桥沉降变形实时动态监测。新型测绘仪器的发展进步为高架桥沉降变形监测提供了新的技术方法, 利用集成伺服系统的智能全站仪, 基于三角高程测量原理, 构建自动化测量系统, 能够实现高架桥沉降变形的高频动态监测; 同时可基于静力水准、激光测距等传感器, 结合无线通信、边缘计算等技术, 构建高精度监测系统^[2], 实时获取高架桥沉降变形信息, 提高监测效率, 减少人工干预, 确保高架桥结构安全。

为提高运营期城市高架桥变形监测效率, 研究采用智能全站仪、静力水准传感器、二维面阵激光位移计、高分辨率工业相机等仪器设备, 对某高架桥桥墩进行监测作业, 对比分析不同监测方法的技术特征、监测效率及数据成果, 并利用几何水准测量方法获取高架桥沉降变形真值, 验证不同技术方法监测数据的准确性, 探索城市高架桥沉降变形最佳监测方案。

2 不同监测方法分析

2.1 智能全站仪监测系统

智能全站仪的出现有效提升了传统地形测绘、地籍测量以及变形监测效率, 在高架桥沉降变形监测过程中, 以单向三角高程测量原理为基础, 辅以控制解算单元、多方式组网、供电系统等, 实现高架桥沉降变形监测点的实时动态监测^[3], 并将监测数据远端发送至服务器, 由 PC 端及移动端系统平台进行可视化展示。

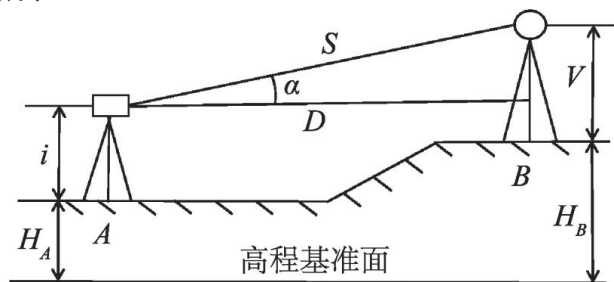


图1 单向三角高程测量基本原理

智能全站仪高架桥沉降变形监测基本原理如图 1 所示, 其中 A、B 分别为预先布设的全站仪设站点及高架桥监测点棱镜, H_A 、 H_B 为统一高程基准面下的两点高程, S 、 D 、 α 为全站仪测得的斜距、平距及竖直角, i 、 V 为量取的仪器高及棱镜高。基于单向三角高程原理, 可求得两点间高差 h 为:

$$h = S' \sin \alpha_v + (1 - k) \frac{S'^2}{2R} \cos^2 \alpha_v + i - V \quad (1)$$

式中, S' 为大气折光及地球曲率改正后的斜距值,

作者简介: 郝广明 (1989—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事铁路轨道测量、工程变形监测等工作。

α_r 为竖直角中数, k 、 R 分别为大气折光系数和地球曲率半径。

由于全站仪设站点较为稳定, 高程值不会发生改变, 因此可依据设站点高程及两点间高差, 动态计算监测点高程值, 并与初始高程作差, 即可获得高架桥监测点沉降变形数据。在实际监测项目中, 全站仪普遍采用混凝土观测墩进行强制对中, 监测点棱镜采用膨胀螺丝安装, 因此无需测量仪器高及棱镜高; 同时为保障全站仪高程信息的准确性, 利用多个稳定基准点对设站点高程进行检校及平差处理, 并采用多测回测量方式, 进一步提高高架桥沉降变形监测结果的准确性。

2.2 静力水准监测系统

静力水准是一种常用于长期、连续监测结构沉降变形的技术, 以连通器原理为基础, 将多个静力水准仪通过测量管路相互连接, 形成一个封闭的监测结构, 通过液位变化解算沉降变形情况^[4], 基本原理如图2所示, 其中 Y_0 、 Y_k 为初始状态、第 k 次测量时各传感器在同一高程基准下的高程值, h 为静力水准传感器液位高度, 因此可构建监测点与基准点关系模型, 如公式(2)所示。

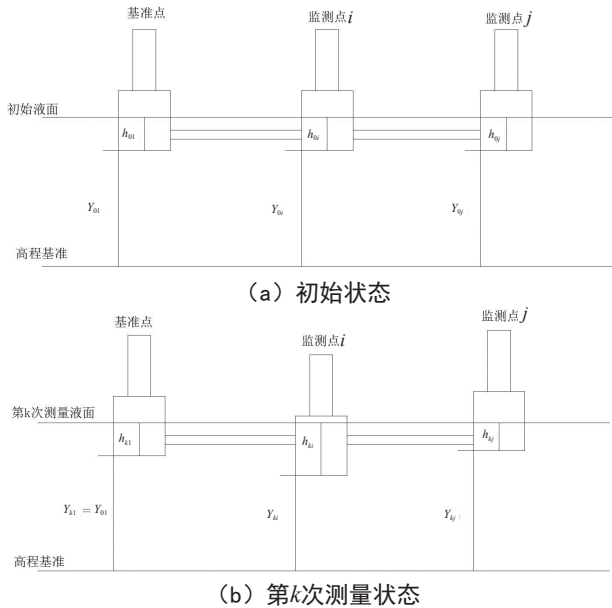


图2 静力水准监测原理

$$\begin{aligned} Y_{0i} + h_{0i} &= Y_{0i} + h_{0i} = Y_{0j} + h_{0j} \\ Y_{ki} + h_{ki} &= Y_{ki} + h_{ki} = Y_{kj} + h_{kj} \end{aligned} \quad (2)$$

静力水准基准点一般固定安装在稳定不变形区域, 即 $Y_{ki}=Y_{0i}$, 因此公式(2)可变换为:

$$\begin{aligned} Y_{ki} &= Y_{0i} + \Delta H_{ki} = Y_{0i} + h_{k1} - h_{ki} \\ Y_{kj} &= Y_{0j} + \Delta H_{kj} = Y_{0i} + h_{k1} - h_{kj} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, ΔH_{ki} 、 ΔH_{kj} 分别表示第 k 次测量时监测点 i 、 j 产生的沉降变形量, 因此可得监测点沉降变形量为:

$$\begin{aligned} \Delta H_{ki} &= Y_{0i} + h_{k1} - h_{ki} - Y_{0i} \\ \Delta H_{kj} &= Y_{0i} + h_{k1} - h_{kj} - Y_{0j} \end{aligned} \quad (4)$$

静力水准监测系统具有精度高、自动化程度高等优点, 特别适用于城市高架桥、综合管廊等大型结构物的沉降变形监测, 但系统部署相对较为复杂, 监测范围较大时往往需要布设较长连通管, 同时连通管液位变化受温度影响较大, 需结合温度传感器动态感知监测环境的温度变化情况, 对监测数据进行温度补偿, 提高监测结果的准确性。

2.3 二维面阵激光位移计

二维面阵激光位移计是以激光测距原理为基础, 由激光发射组件、二维面阵感知模块以及供电模块等构成, 其中激光发射组件负责发射激光束, 二维面阵感知模块则负责接收激光信号, 并将其转换为电信号进行处理, 通过感光耦合组件 (Charge-coupled Device, CCD) 动态解析激光束光斑在面阵中的位置变化, 从而实现面阵区域位移变形监测作业。

采用二维面阵激光位移计进行沉降监测时, 需将激光发射组件布设在稳定区域, 但实际高架桥沉降监测过程中, 考虑桥墩数量较多、监测距离较远、通讯条件较差等问题, 采用多组位移计构建基于高差传递的沉降监测系统, 逐个获取相邻监测桥墩间高差变化, 利用基准桥墩归算各监测桥墩实时高程值及沉降变形量, 二维面阵激光位移计监测系统如图3所示。

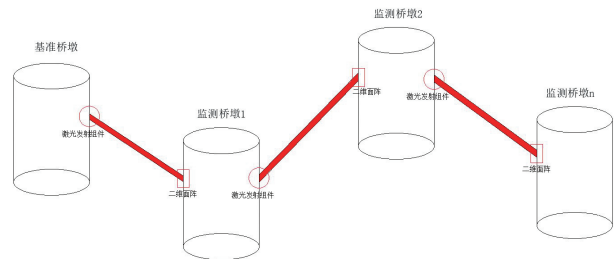


图3 二维面阵激光位移计监测系统

2.4 远程摄影测量监测系统

远程摄影测量监测系统是利用固定在基准桥墩上的高分辨率工业相机, 对监测桥墩测量标靶进行图像采集, 获取立体数字影像; 然后通过影像匹配、图像解译、动态校正等处理, 获取桥梁墩身测量标靶像素坐标^[5], 并转换为空间坐标, 从而实现高架桥沉降变形动态监测。

远程摄影测量监测系统是基于视觉测量原理, 为保障监测桥墩测量标靶图像清晰度, 利用光源补偿装

置对测量标靶进行补光处理，同时利用三轴微偏旋转平台对相机位置进行动态调整^[6]，确保测量标靶能够均匀填满整个图像，最大程度保障图像质量，为桥墩沉降解算提供准确可靠的数据支撑。

3 项目应用分析研究

3.1 项目概况

为分析不同监测方法在城市高架桥沉降监测中的适用性及准确性，以某城市铁路施工项目为研究对象，该项目采用明挖式施工工艺，基坑开挖深度近 20m，基坑边线距离高架桥直线距离约为 32m，处于 2 倍基坑开挖深度影响范围内，风险系数较高，需对高架桥变形情况进行动态安全监测，保障高架桥安全运营。

3.2 不同监测方法对比分析

3.2.1 监测实施对比

项目综合采用二等水准测量、智能全站仪、静力水准监测系统、二维面阵监测系统、远程摄影测量系统等方法，对临近基坑高架桥进行沉降变形监测，监测周期均为 6 个月，共计布设了 24 个监测点位。为对比分析不同监测方法的应用效果，每种方法均进行独立部署，各方法外业实施情况对比如表 1 所示。

表1 不同监测方法实施情况统计

监测方法	监测频率	人员投入	设备投入	部署耗时
二等水准测量	1次/天	4人	Trimble DiNi03数字水准仪*1 钢钢条码尺*2 尺垫*2	/
智能全站仪监测系统	12次/天	安装部署2人 监测运维2人	Leica TM50全站仪*1 后视圆棱镜*4 监测棱镜*24 数据采集传输终端*1 市电/太阳能供电系统*1 基准点静力水准仪*2 监测点静力水准仪*24 数据采集传输终端*2	2天
静力水准监测系统	24次/天	安装部署3人 监测运维2人	供电系统*2 温度感知传感器*8 防冻液及连接软管若干 二维面阵激光位移计*26 数据采集传输终端*2	4天
二维面阵监测系统	24次/天	安装部署3人 监测运维2人	供电系统*26 B6620M型工业相机*2 2900万像素尼康相机镜头*2	3天
远程摄影测量监测系统	24次/天	安装部署3人 监测运维2人	三轴微调平台*2 测量靶标*24 光源补偿装置*24 控制终端*2 供电系统*28	3天

分析表 1 可知，二等水准测量方法具有精度高、设备投入少等特征，但监测频率较低，且每次监测作

业均需要 4 人方可完成；而智能全站仪监测系统基本可实现实时监测，安装部署难易程度、人员投入、耗费时长均相对较低；静力水准、二维面阵及以远程摄影测量监测系统均能进行实时数据读取，监测数据具有较高的时效性，但部署较为复杂，需在每个监测点独立安装静力水准传感器、二维面阵、测量标靶等，同时需要部署供电系统，大幅度增加了系统部署复杂程度。

3.2.2 监测数据对比

不同监测系统部署安装完成后，即可进行高架桥沉降变形监测作业。项目监测周期为 2024 年 3 月 5 日至 2024 年 9 月 11 日，其中 3 月至 7 月为基坑开挖施工阶段，7 月至 9 月为项目内部结构施工阶段，整个监测周期内，高架桥沉降变形相对较小，最大累计沉降变形为 18.4mm，未超过设计预警阈值。项目采用的 5 种监测方法数据成果具有较为相似的变化规律，但由于监测设备自身精度及环境因素影响，在监测数值上具有一定差异。为分析不同监测方法监测数据的可靠性，以距离基坑较近的监测点 GJQ05 和较远的监测点 GJQ18 为研究对象，对比分析不同监测方法的长期监测结果，对比结果如图 4 所示。

分析图 4 可以发现：

（1）5 种监测方法数据成果的变化趋势存在相似性，在基坑开挖施工阶段，高架桥发生明显沉降变形；在项目内部结构施工阶段，高架桥沉降变形逐渐趋于稳定。

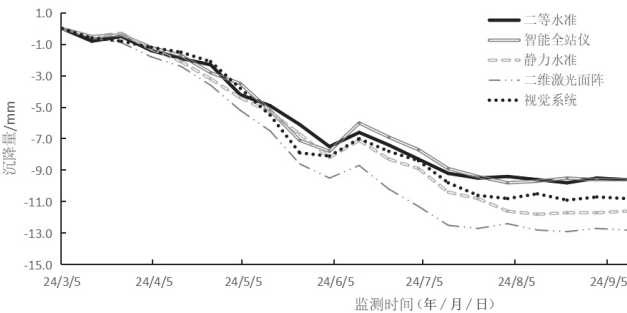
（2）对于距离较远的 GJQ18 监测点，二维面阵监测系统的结果随着监测周期的增加，与二等水准监测结果的偏差越来越大，究其原因因为二维面阵监测系统采用高差传递形式进行沉降变形监测，当距离基准点较远时，误差较大，这在一定程度上降低了监测成果的可靠性。

（3）在 3 月至 6 月的监测过程中，静力水准监测系统数据结果与二等水准成果基本一致，但在 6 月至 9 月，随着气温逐渐升高，昼夜温差变化较大，静力水准监测结果与二等水准结果偏差明显增大，这表明虽采用温度感知传感器及温补算法进行数据处理，但在气温变化较大时，静力水准监测系统数据成果的准确性依然会有所降低。

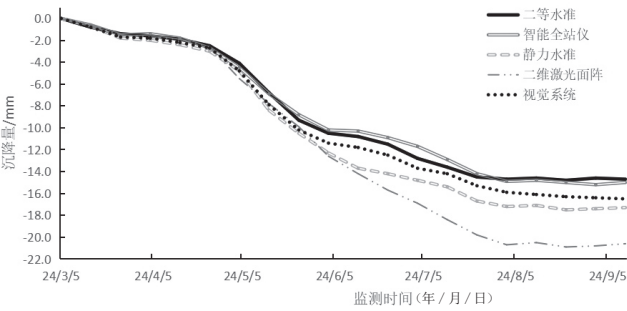
（4）基于工业相机的远程摄影测量监测系统监测数据与二等水准监测结果偏差相对较小，最大偏差未超过 2.0mm，监测精度略高于静力水准监测系统，数

据成果较为准确可靠，但在长期监测过程中，受施工粉尘、降雨等环境因素影响，相机拍摄的测量标靶影像质量不稳定，监测数据存在波动，在一定程度上会对高架桥安全态势分析产生影响。

(5) 智能全站仪监测系统数据成果与二等水准监测结果具有高度一致性，最大偏差未超过 1.0mm，监测精度较高，沉降观测曲线较为平滑，监测结果较为准确可靠；但由于需要对监测点进行逐点测量及平差解算，监测数据时效性略低于其他监测系统。



(a) GJQ05点监测结果



(b) GJQ18点监测结果

图4 不同监测方法监测数据对比

3.2.3 综合分析

项目共采用 5 种不同的监测方法对高架桥沉降变形进行为期 6 个月的跟踪监测，并结合不同方法的技术特征、部署实施情况、监测数据等对比分析情况，对不同监测方法的优劣势进行综合分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可知，二等水准测量监测数据成果准确可靠，但监测效率及数据时效性较低，难以实现高架桥高频次变形监测作业；智能全站仪监测系统数据成果准确可靠，具有较高的时效性，而且抗干扰性较强，尤其适用于区域面积较大、监测点较多的高架桥沉降变形监测项目，但智能全站仪费用较高，设备成本投入相对较大；而静力水准监测系统在温度适宜的室内环境具有较高的监测精度，但在温差较大的室外环境，数据可靠性相对较低，同时系统部署难度大、抗干扰

性相对较差；二维面阵监测系统在距离较短的小范围区域监测数据成果可靠性较高，但距离较长时，受误差积累影响，监测精度相对有所降低；基于工业相机的远程摄影测量监测系统，数据成果准确性较高、成本投入中等，但对监测环境依赖较大，抗干扰能力相对较差。

表2 不同监测方法优劣势综合分析

监测方法	成果准确性	数据时效性	监测效率	部署复杂程度	成本投入	抗干扰性
二等水准测量	高	低	低	低	人工成本高	强
智能全站仪监测系统	高	较高	高	中等	设备成本高	较强
静力水准监测系统	较高	高	高	高	中等	低
二维面阵监测系统	中等	高	高	高	中等	较强
远程摄影测量监测系统	较高	高	高	较高	中等	低

4 结语

高架桥作为城市交通设施的重要组成部分，需要具备较高的安全性和稳定性，为提高城市高架桥变形监测效率，研究详细论述了智能全站仪监测系统、静力水准监测系统、二维面阵监测系统、远程摄影测量监测系统等不同监测方法的作业原理及技术优势，并以邻近铁路施工场地的高架桥变形监测项目为研究对象，对不同技术方法的部署实施情况、监测数据准确性等进行对比分析，获得了有益结论，可为相关工程应用提供参考。在实际项目中，需结合变形监测精度要求、监测环境、监测成本等多方面因素，灵活选用较为合适的监测方法，在保障监测成果精度的同时，降低监测成本，提高监测效率。

参考文献

- [1] 史晟恺.基于物联网传感器的大型桥梁形变监测系统研究[J].地矿测绘,2024,40(1):41-44.
- [2] 周海榕.地铁基坑开挖对周边高架桥梁的影响及优化控制措施[J].福建交通科技,2024(12):111-117.
- [3] 赵伟,韦永斌,周明明.自动化监测技术在地铁盾构下穿高架桥中的应用[J].工程建设与设计,2016(5):93-95,98.
- [4] 解光路,许雄飞,周海生.远岸大跨径桥墩超长线路静力水准自动化监测试验浅析[J].港口航道与近海工程,2024,61(5):77-82,100.
- [5] 栾翔.基于机器视觉的桥梁变形监测技术研究[J].中国高新科技,2024(6):40-42.
- [6] 罗贤民,黄勇,陆剑明,等.明挖异形基坑下穿高架桥及近接航站楼施工的影响与控制[J].城市轨道交通研究,2023,26(5):113-118.

基于DEM的区域独立坐标系长度变形分析系统

李月华¹ 杨保² 马雷¹

(1. 河南省测绘院, 河南 郑州 450003; 2. 河南超维地理信息有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 在某些城市不能满足长度变形要求, 通常需采用多种方案选择多种椭球参数, 建立城市独立坐标系, 并计算区域内投影长度变形量及符合长度变形要求的面积, 以选出最优方案。针对城市独立坐标系建立过程中投影长度变形计算烦琐、难以全面覆盖区域的问题, 提出一种基于数字高程模型 (DEM) 的区域长度变形快速分析方法。利用 DEM 格网数据逐点计算每千米投影长度变形值, 通过分层设色直观展示超限区域, 并统计超限面积。研究开发了相应的分析系统, 并以某县为例进行验证。结果表明, 该方法能快速准确地评估不同投影方案下的长度变形分布, 为独立坐标系建设审批和方案优化提供可视化依据。与传统选点法相比, 效率与区域覆盖度显著提升。

关键词: 独立坐标系; 数字高程模型; 长度变形; 格网点变形值

1 引言

根据《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011) 规定, “城市测量中应采用该城市统一的平面坐标系”^[1], 《城市坐标系统建设规范》(GB/T 28584—2012)^[2] 规定, 如果采用 CGCS2000 坐标椭球, 在国家标准的 3° 带高斯投影下, 城市区域内长度变形值不大于 25mm/km 时, 应直接采用国家统一 3° 带高斯投影的平面直角坐标系; 如果城市区域内长度变形值大于 25mm/km 时, 需要建立以 CGCS2000 参考椭球为基础的城市坐标系统, 以满足投影长度变形值小于 25mm/km 的要求。无论选择哪种坐标系统, 都需要验算在该坐标系统下的长度变形值是否满足规范要求。

传统检验方法是选择若干已知点, 通过高程归化改正和高斯投影改正计算这些点的长度变形量, 这种方法过于烦琐且难以覆盖整个区域^[3-4]。随着具有高分辨率、均匀覆盖以及精细地貌特征的 DEM 数据在城市精准规划中的广泛应用^[5], 基于 DEM 的投影变形分析逐渐被提出^[6-7], 如高昭良提出一种基于 DEM 的 CGCS2000 城市平面坐标系统确定方法^[8], 尚金光等提出基于 DEM 实现城市高斯投影变形可视化分析等^[9]。虽然这些方法在特定地形条件下表现出色, 但在处理复杂地形或需要全面评估不同投影方案时, 局限性便显露无遗。为了提升规划的科学性和准确性, 有必要引入更先进的 GIS 技术和统计分析方法, 对各种投影方案进行全面而细致的可视化展示与量化评估, 建立一套适合各个区域的快速、高效、真实、全覆盖的投

影长度变形分析系统迫在眉睫。研究提出了基于数字高程模型 (DEM) 的长度变形快速分析方法, 开发了区域相对独立的平面坐标系统建设分析系统。

2 长度变形计算及独立坐标系建设

2.1 长度变形计算与分析

长度变形主要包括高程归化改正和高斯投影变形, 即实地测量的边长长度换算到椭球面上产生的变形和椭球面上的长度投影至高斯平面上的变形, 每千米综合变形值 θ 计算公式^[10] 为:

$$\theta = \Delta S / S = \frac{y_m^2}{2R^2} \frac{H_m}{R_A}$$

式中, R_A 为长度所在方向的椭球曲率半径, H_m 为长度所在高程面对于椭球面的平均高程, S 为实地测量的水平距离, R 为测区的平均曲率半径, y_m 为投影边长两端点横坐标平均值。不同 y_m 和 H_m 组合下的变形值如表 1 所示。

表1 高程归化和高斯投影变形改正值的综合影响/(mm/km)

变形 H _m /m \ y _m /km	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80	90	100
0	0	+1	+5	+11	+20	+25	+31	+44	+60	+79	+100	+123
50	-8	-7	-3	+3	+12	17	23	+36	+52	+71	+92	+115
100	-16	-15	-11	-5	+4	+9	15	+28	+44	+63	+84	+107
150	-24	-23	-19	-13	-4	+1	+7	+20	+36	+55	+76	+99
200	-31	-30	-26	-20	-11	-6	0	+13	+29	+49	+69	+92
300	-47	-46	-42	-36	-27	-22	-16	-3	+13	+32	+53	+76
400	-63	-65	-58	-52	-43	-38	-32	-19	-3	+16	+37	+60
500	-79	-78	-74	-68	-59	-54	-48	-35	-19	0	+21	+44

注: 表 1 中 $|\theta| > 25$ 表示超限。

作者简介: 李月华 (1988—), 女, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事测绘地理信息工作。

表1显示了在距离中央子午线0km到100km时,对应高程0m到500m的每千米长度变形值。可以看出,对于不同高程,都有一个满足长度变形要求的距离区域;对于一定距离范围内,都有一个满足长度变形要求的高程区域,在这个区域每千米的两项投影变形值小于25mm。当测区正好位于参考椭球面时,离中央子午线垂距在45km内,能保证两项改正的综合影响值小于每千米25mm,随着测区高程的提高,满足这一条件的区域逐渐远离中央子午线,且该区域宽度逐渐变窄。

2.2 传统检验区域长度变形的局限

依据《城市坐标系统建设规范》,采用CGCS2000参考椭球,传统检验投影长度变形是否超限的方法是在区域内选择若干已知点,由公式(1)计算变形值,若大于25mm/km,则需建立相对独立的平面坐标系,并再次验证变形值是否超限,直至符合规范要求。这种方法不仅烦琐,难以统计出满足长度变形要求的面积,不能可视化显示变形超限区域,不便检测区域高程最高、最低等特征点,难以覆盖全区域。研究利用DEM格网实现全区域变形分析,可快速评估不同方案。

3 基于DEM的区域投影长度变形分析方法

DEM数据存储了平面坐标、格网行列号,并按照分辨率以矩阵的形式存储高程数据。它描述了区域地貌形态的空间分布,尤其是山顶、山脊、洼地等一些特征点、线的分布和属性信息,对分析区域投影变形具有重要作用。在投影变形值为25mm/km的交界处,即为变形超限与不超限的分界线,但只靠人眼观察离散的数据是难以分辨的。

利用DEM,调用GDAL开源库,基于C#语言编写程序计算出各格网点投影长度变形值;将每千米变形值,写入新DEM文件。然后对长度变形值进行重分类,即分层设色,制作谱色文件(*.lv1),以不同颜色表示区域内各格网点是否超限。

根据上述思路,首先读取DEM规则格网文本数据,遍历行列号 (m,n) 和高程值 h ,通过区域左上角坐标 (x_0, y_0) 及分辨率 δ 得到各格网点三维坐标 (x, y, h) 。

然后计算格网点到中央子午线的距离 y_m 及格网点相对椭球面的高程 H_m ,若在国家统一3°带高斯投影的平面直角坐标系下,则 $y_m=y-50000$, $H_m=h$;若区域独立坐标系下,假设区域平均纬度为 B ,移动中央子午线至 L ,抵偿高程面为 H ,通过高斯投影正算公式计算出独立坐标系原点平面坐标 (x', y') ,则

$$y_m=y-y', H_m=h-H。$$

由2.1节长度变形计算与分析公式(1),计算各格网点每千米长度变形值,并将该变形值写入“新DEM”文件。统计区域内长度变形超限面积,只需统计变形值绝对值大于25mm/km的格网个数 K ,每个格网面积 δ^2 ,则超限面积为 $K \times \delta^2$ 。然后对“新DEM”重分类的同时进行分层设色,制作谱色文件(*.lv1),符合要求 $(|\theta| \leq 25)$ 赋绿色系, $\theta > 25$ 赋紫色系, $\theta < -25$ 赋黄色系。色带间隔5mm/km,超过35mm/km用最深色。分析流程如图1所示。

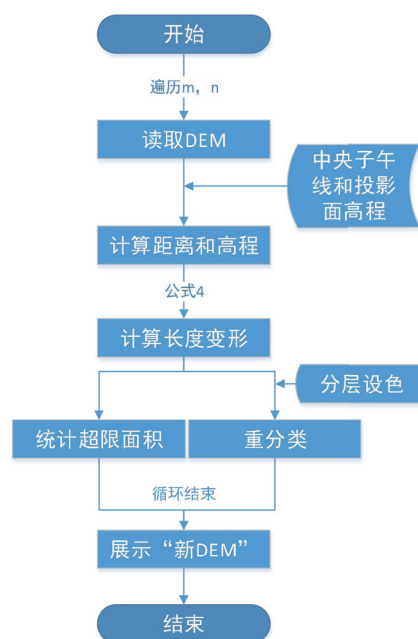


图1 区域长度变形分析流程

4 实验分析

4.1 测区概况及已有资料分析

测区位于东经112°59′~113°48′,平均纬度32°30′,全境东西长76.1km,南北宽49.3km,土地总面积1913.8km²。境内以浅山、丘陵为主,斜贯县境的某山构成地貌骨架,由西向东,蜿蜒于县境南侧。最低处海拔约110m,最高处海拔约1140m,相对高差约1030m,各乡镇主要居民区平均高程约为160m,高程异常约20m。已知该县DEM数据,分辨率为10m×10m。

4.2 长度变形计算

由测区概况,首先在国家标准3°带投影下,采用CGCS2000椭球,中央子午线114°(3°带第38带),计算该县各乡镇长度变形是否超限。利用系统导入DEM,计算得出超限面积为600.09km²,占总面积

31%，需建立独立坐标系。变形分布如图 2 所示。

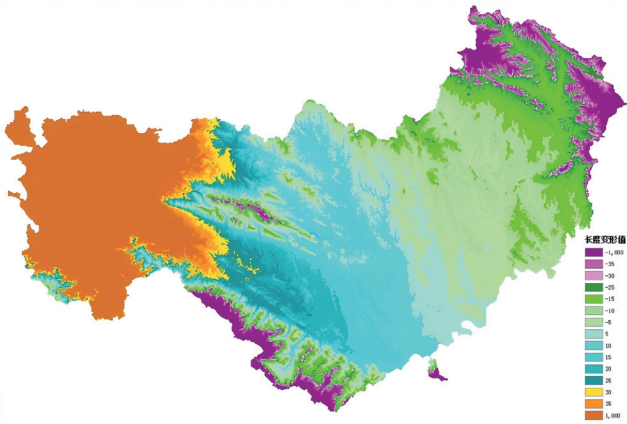


图2 CGCS2000国家平面坐标系下某县高斯投影长度变形分析

4.3 独立坐标系下长度变形计算

根据 4.2 节分析可知，为有效控制该县域内的长度投影变形，满足大比例尺测图和工程测量的精度要求，需建立相对独立的平面坐标系。为此，综合考虑县域地理分布与地形特征，研究选择将中央子线移动至该县几何中心附近（113° 25'），并将投影面抬高至区域平均高程面（160m），以最大限度地减小全域范围内的综合长度变形。

经计算，采用该方案后县域变形超限（> 25mm/km）的面积约为 177.45km²。通过遥感影像观察发现，紫红色区域（变形较大）主要分布在无人居住的高山区，而黄色区域（变形次之）则分布在农村田地。考虑到实际工程需求，这些区域的变形限制可适当放宽。具体变形分布情况如图 3 所示。

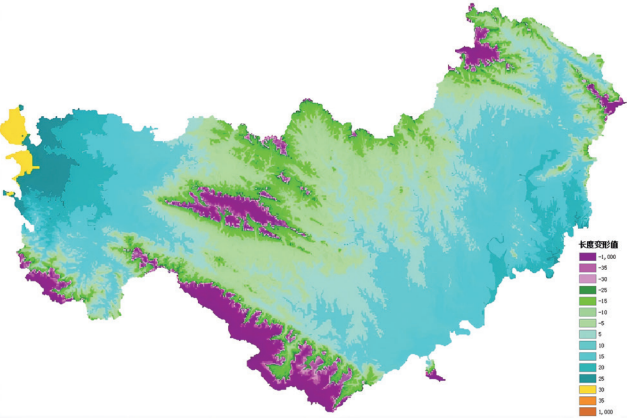


图3 独立坐标系长度变形分析

4.4 检核对比分析

通过外业测量搜集选取以下特征点（含各乡镇居民点）大地坐标，在国家标准 3° 带投影坐标系和拟建独立坐标系下分别计算长度变形，与系统生成的可视化图叠加，进行检核对比分析。按照 4.2 节标准坐

标系和 4.3 节独立坐标系依次计算各点每千米长度变形值，结果如表 2 所示。

表2 居民点每千米长度变形计算

序 号	重要 居民点	纬度	经度	高程/ m	标准坐标系	独立坐标系
					长度变 形计算/ 备注 (cm/km)	长度变 形计算/ 备注 (cm/km)
1	城关镇	32.*****247	113.*****216	140	1.97	0.32
2	特征点1	32.*****073	113.*****567	245	0.99	-1.29
3	月河镇	32.*****200	113.*****788	126	0.72	0.68
4	吴城镇	32.*****376	113.*****348	136	0.94	0.45
5	特征点2	32.*****805	113.*****616	179	0.01	-0.18
6	固集镇	32.*****792	113.*****276	118	-0.05	1.16
7	特征点3	32.*****751	113.*****320	164	-0.96	0.55
8	毛集镇	32.*****520	113.*****629	153	-1.03	0.91
9	特征点4	32.*****620	113.*****590	301	-3.61	超限
10	特征点5	32.*****525	113.*****525	188	-1.91	0.7
11	大河镇	32.*****853	113.*****515	217	1.17	-0.88
12	埠江镇	32.*****465	113.*****164	137	8.16	超限
13	特征点6	32.*****536	113.*****705	111	9.42	超限
14	平氏镇	32.*****306	113.*****406	130	7.48	超限
15	特征点7	32.*****194	113.*****957	154	8.32	超限
16	淮源镇	32.*****270	113.*****725	218	2.34	-0.74
17	黄岗镇	32.*****812	113.*****700	176	-0.75	0.13
18	安棚镇	32.*****507	113.*****183	151	5.55	超限
19	特征点8	32.*****050	113.*****972	197	3.55	超限
20	朱庄镇	32.*****677	113.*****382	183	0.56	-0.34
21	程湾镇	32.*****723	113.*****640	162	6.38	超限
22	特征点9	32.*****421	113.*****045	359	4.22	超限
23	城郊乡	32.*****299	113.*****341	148	1.95	0.19
24	特征点10	32.*****130	113.*****543	337	-0.30	-2.72
25	回龙乡	32.*****704	113.*****236	172	-1.54	0.82
26	特征点11	32.*****369	113.*****150	236	-1.94	-0.68
27	新集乡	32.*****941	113.*****240	141	5.79	超限
28	最东端	32.*****576	113.*****302	216	-10.75	超限
29	最西端	32.*****411	113.*****624	115	9.37	超限

利用 ArcGIS 软件，将所选取特征点与上节得到的两种坐标系下区域长度变形分析图叠加，图 4 为标准坐标系，图 5 为独立坐标系。将图 4、图 5 与表 2 进行对比分析，可见表 2 中的各点长度变形值与图 4 中以颜色代表的长度变形值完全吻合。



图4 特征点与区域长度变形叠加（标准坐标系）

（下转第 42 页）

多源数据协同的城市LOD1.3级三维模型快速构建方法

孙波

(贵州省地质矿产勘查开发局测绘院, 贵州 贵阳 550000)

摘 要: 针对城市 LOD1.3 级三维模型快速规模化构建需求, 提出一种基于高分立体卫星数据、大比例尺地形图、LiDAR 数据等多源异构数据的模型快速构建方案; 综合利用各数据源优势快速提取建筑物基底面轮廓、高程等重要参数并建模。实践结果表明: 成果平面中误差达 0.87m, 高程中误差 0.39m, 表明该方法可高效构建城市 LOD1.3 级三维模型, 为大规模实现实景三维城市建设提供参考。

关键词: 多源数据协同; LOD1.3; 三维模型; 精度检测

1 引言

实景三维中国建设是对传统基础测绘业务的转型升级, 并纳入“十四五”自然资源保护与利用规划。现阶段实景三维中国已步入规模化建设阶段, 城市三维模型更是核心基础产品, 可应用于城市规划、应急测绘以及智慧城市建设等领域^[1]。LOD1.3 级三维模型多以标准棱柱几何体组建, 是城市级建(构)筑物三维模型批量生产的优选形式。传统的 LOD1.3 级三维模型构建多依赖单一数据源, 如立体卫星、LiDAR 数据以及倾斜摄影成果等存在遮挡、缺乏纹理、效率低下等问题, 难以支撑大范围快速更新^[2-3]。多源异构数据协同可整合不同数据优势, 实现建筑物基底面轮廓、高程、纹理属性等信息获取, 是提升 LOD1.3 级三维模型构建质量与效率的关键技术方向。

研究围绕城市 LOD1.3 级三维模型生产技术指标, 以多源异构数据为基础, 构建数据处理、基底面轮廓提取、高程解算、模型构建的技术体系。通过多源协同及高程联合计算, 实现自动化 LOD1.3 三维模型构建, 严格遵循精度指标要求, 确保成果符合技术要求, 为城市三维模型高效、高精度、标准化生产提供技术方案。

2 技术路线

国家级《城市三维模型 LOD1.3 级快速构建实施方案》明确提出, 城市三维模型 LOD1.3 级可通过五种主流技术路径开展建设, 分别依托高分辨率卫星立体影像、大比例尺地形图、倾斜摄影数据、高精度模型(LOD2+)、激光雷达点云等数据完成三维建模作业^[3-5]。

现阶段我国地形级实景三维建设已基本成型, 区域内已具备丰富的基础地理数据存量成果。基于大比例尺地形图、激光 LiDAR 点云、高分立体卫星影像及倾斜摄影 Mesh 模型四类核心数据源, 均可单独用于提取建筑物基底面轮廓、顶部高程与底部高程等关键建模参数。单一数据源建模往往存在精度短板、现势性不足或作业效率偏低等问题, 而在具备多源测绘数据存量成果的前提下, 对各类数据进行融合协同使用, 能够充分发挥不同数据的精度优势与现势性优势, 互补短板、减少人工修正工作量, 显著提升 LOD1.3 级建筑物三维模型整体生产作业效率与建模成果质量。结合研究区现有已收集的完备基础测绘资料, 确定适配的建筑三维建模技术方案, 基于高分七号高分辨率立体卫星影像、大比例尺地形图、LiDAR 数据等成果, 采用多源数据协同思路, 开展城市级三维模型 LOD1.3 级构建技术研究, 整体技术流程如图 1 所示。

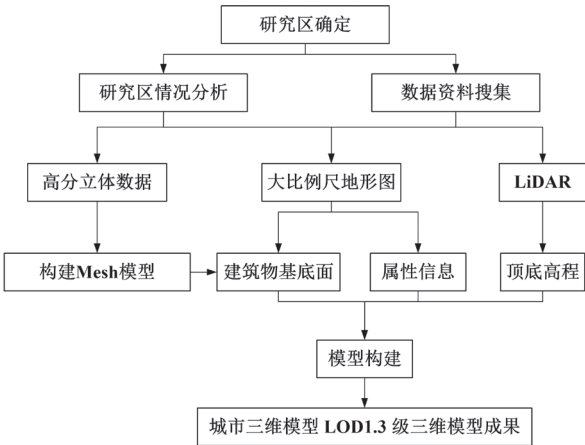


图1 技术流程

作者简介: 孙波 (1991—), 男, 苗族, 本科, 工程师, 主要从事工程测量、摄影测量与遥感生产与研究工作。

2.1 建筑物基底面提取

为提升建筑物基底面提取质量,采用大比例尺地形图与高分立体卫星数据,协同开展建筑物基底面轮廓提取作业。首先对研究区 1:2000 大比例尺地形图开展预处理,通过拓扑检查与修复工具整改面相交、边界缝隙、伪节点等问题,确保建筑物基底面闭合完整、拓扑关系合规统一。针对建筑密集区域,采用聚合分割处理方式合并相邻细碎建筑面,去除冗余边界,提升基底面整体规整效果。然后基于高分七号卫星立体数据构建三维 Mesh 模型,获取建筑物顶面结构形态与高程变化特征,为建筑物基底面现状校核提供实景立体参照。建筑物基底面统一从大比例尺地形图中规范提取,仅保留房屋、棚房等核心建筑主体,剔除雨罩、檐廊等附属构筑物,提取完成后再次复核修正拓扑缺陷。受数据更新滞后影响,部分大比例尺地形图现势性较差,需将提取的建筑物基底面与 Mesh 模型叠加套合比对,对套合偏差较大区域,依托 Mesh 模型还原的建筑顶面及立体结构特征,重新精细化修正建筑物基底面,确保成果符合建模技术标准。低矮建筑密集区连片采集如图 2 所示。

实践表明,研究区 80% 以上大比例尺地形图建筑物基底面现势性良好,可直接沿用,剩余 20% 现势性不足的数据均结合 Mesh 模型完成优化修正。该协同提取方式充分结合大比例尺地形图平面精度高、基底面规整的优势,减少重复采集与人工修正工作量,为后续建筑体块三维模型规范化构建夯实数据基础。

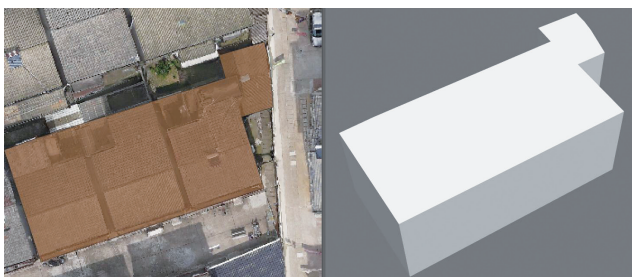


图2 低矮建筑密集区连片采集

2.2 多源异构数据协同建筑物高度信息采集

2.2.1 建筑物底部高程提取

地面高程获取采用 LiDAR 点云数据,滤波获取地面点,对于高程点稀疏区域通过反距离加权 (IDW) 内插获取高程值,IDW 算法适用于城区道路、广场等地形平缓、高程变化小且连续区域,可有效避免高程过度拟合、虚假高程突变问题,可高效稳定还原真实地面形态^[4]。基于此,构建研究区 DEM 成果数据,统计

建筑物基底面范围内高程最小值,并将其作为基底面高程;对赋予高程后的基底面套合 LiDAR 数据进行人工检查,若高程赋值错误,则人工拾取高程值修正。

IDW 内插公式如下:

$$H_g(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{H_{gi}}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

式中, $H_g(x,y)$ 为待求点地面高程, H_{gi} 为第 i 个 LiDAR 地面点高程; d_i 为待求点到地面点的平面欧氏距离, $d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$; k 为参与内插的邻近点数量,取 4~8 个; P 为幂指数,设置为 $P=2$ 。内插范围限定于建筑物基底面外侧 1~2m 范围,排除其他如建筑、植被遮挡点,保证地面高程不受地物干扰,选取基底面轮廓范围内的高程最小值 H_g 作为建筑物底部高程。

2.2.2 基于 LiDAR 建筑物顶部高程提取

建筑物顶部高程基于机载激光雷达 (LiDAR) 点云数据获取,在完成点云去噪、地物分类等基础预处理工作后,初步提取建筑物基底面轮廓范围内的高程最大值,并将其作为建筑物顶部高程初始数值^[5]。实际作业过程中,建筑物顶部高程容易受到屋顶附属设施及周边高大树木遮挡等因素干扰,导致高程取值不准确。为有效剔除各类附属结构对顶部高程计算造成的不利影响,研究采用 LiDAR 屋顶点云均值统计方式开展计算处理,采用中位数绝对偏差法剔除异常高点、噪声点及附属构筑物带来的数据干扰,还原建筑物屋顶真实主体高程,具体高程计算公式如下:

$$H_r = \text{Median}(H_{ri}) + 3\sigma_m \quad (2)$$

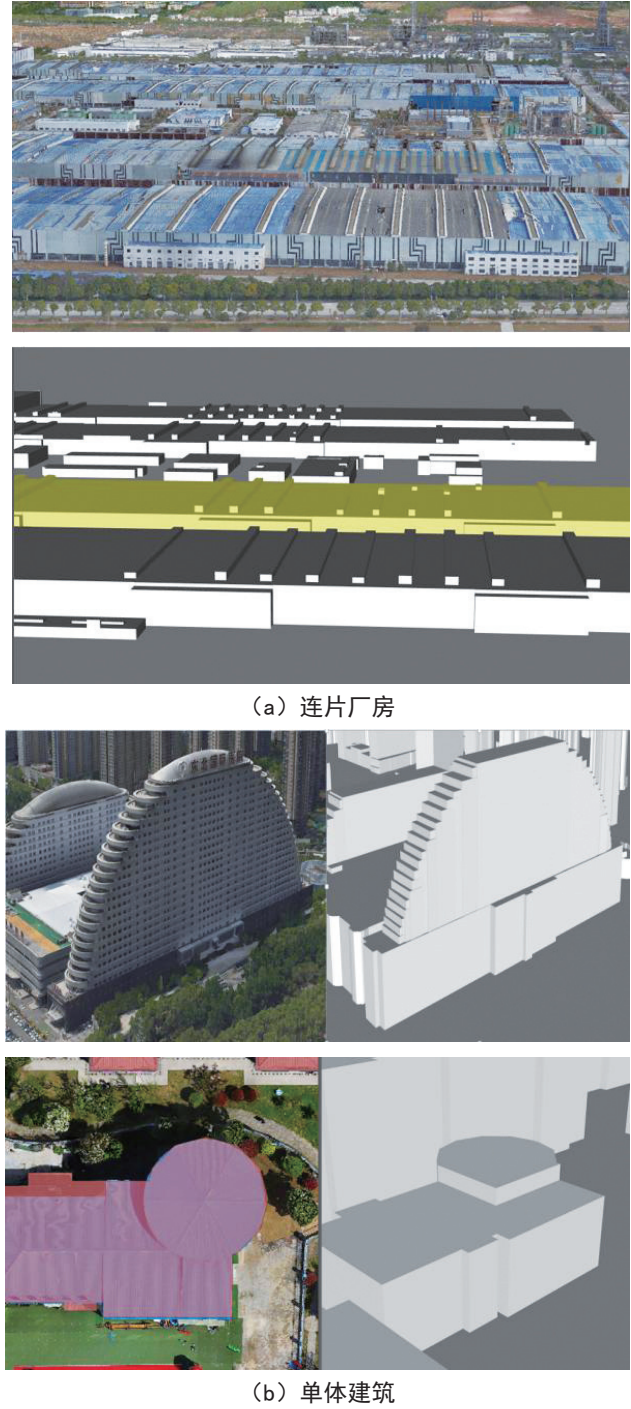
$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (H_{ri} - \hat{H}_r)^2}{m-1}} \quad (3)$$

式中, H_r 为屋顶高程值, $\text{Median}(H_{ri})$ 为屋顶点云高程中位数, σ_m 为高程样本标准差, m 为屋顶有效点云数量。对单栋建筑屋顶点云进行分层筛选,剔除烟囱、水箱、空调等小型附属物点位,仅保留屋顶主体平面点,保证高程代表建筑主体高度。建筑物顶底高程获取后,建筑高度可表示为 $H=H_r-H_g$,并作为模型拉伸高度。

2.3 LOD1.3 体块模型构建

LOD1.3 级建筑物三维模型基于超图 iDeskTop 软件平台,以高精度建筑物矢量面数据为基底,采用实体拉伸建模方法完成标准化批量构建。建模作业阶段将测算完成的底部高程与拉伸高度参数关联映射至软

件三维建模模块，对已规整优化后的建筑物轮廓数据开展批量自动化三维拉伸运算，快速生成形体规范、边界贴合实测轮廓的 LOD1.3 级建筑体块三维模型。模型实体构建完成后，将建筑物矢量数据内置的各项基础属性字段与对应三维模型逐一关联挂接，实现空间三维实体与语义属性信息一体化融合。LOD1.3 级建筑物三维模型建设效果如图 3 所示。



该建模方式生成的成果整体场景还原度高、立面

形态整齐统一，视觉展示效果良好，且模型具备完整结构化语义信息，可支持建筑物基础属性快速查询、统计管理及后续实景三维业务应用。

3 精度评定与实验分析

以典型城市区域为实验区，协同高分立体卫星影像、大比例尺地形图、LiDAR 数据、DEM 实现研究区建筑物三维信息提取，并联合超图 iDeskTop 软件实现城市 LOD1.3 级三维模型批量构建。为检验模型精度，均匀选取野外实测检查点、高分辨率基准数据作为检测真值，统计模型成果平面坐标、地面高程及屋顶高程，与真值逐点对比，计算平面点中误差、高程中误差^[5]，定量分析成果几何偏差分布，严格按照规范指标判定精度符合性，确保评定结果客观、严谨，全面反映模型整体几何质量。结果显示：平面中误差 0.87m，高程中误差 0.39m，精细度、拓扑一致性、纹理表达均满足要求。与传统单一数据源方法相比，建模效率得到提升，人工编辑量减少 60% 以上，具备明显工程优势。多源数据多体系 LOD1.3 级三维模型构建效率对比和精度统计分析结果分别如表 1 和表 2 所示。

表1 多源数据多体系LOD1.3级三维模型构建效率对比

任务分区	建筑总量（栋）	核心构建技术路线	作业组织形式
任务区1	2736	依托大比例尺地形图、高分立体数据提取建筑物基底面，结合LiDAR、DEM数据解算高程及建筑高度	3人，作业时长3天
任务区2	4296	基于高分立体数据提取建筑物基底面和屋顶高程，利用DEM获取建筑底部高程	8人，作业时长3天
任务区3	3375	基于LiDAR点云提取建筑物基底面及顶底高度	11人，作业时长4天

表2 精度统计分析

点号	实测点坐标			模型成果坐标			平面误差		高程误差
	X	Y	Z	X	Y	Z	Δx	Δy	Δz
Z01	*234.364	*345.231	115.216	*233.712	*345.540	115.55	0.652	-0.309	-0.334
Z02	*180.694	*179.456	122.473	*180.157	*178.922	122.12	0.537	0.534	0.353
Z03	*421.582	*518.327	118.325	*422.346	*518.715	118.68	-0.764	-0.388	-0.355
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Z44	*762.459	*337.253	133.682	*763.021	*337.114	133.31	-0.562	0.139	0.372
Z45	*542.445	*189.281	141.129	*541.903	*189.726	141.49	0.542	-0.445	-0.361
统计	平面中误差：0.87m			高程中误差：0.39m					

4 结论

针对城市 LOD1.3 级建筑物三维模型规模化快速构建的实际工程需求，研究提出一种 LOD1.3 级城市建筑物三维模型标准化快速构建技术方案，该方法协同高

分立体数据、大比例尺地形图、LiDAR 数据及 DEM 等多源异构数据,有效规避了单一数据源建模存在的轮廓精度不足、现势性滞后与高程获取困难等问题,充分发挥各数据优势,融合已有数据源成果提升建模效率与精度,形成从建筑物基底面、顶底高程提取到体块模型自动拉伸的完整技术流程。

通过大比例尺地形图拓扑修复与 Mesh 模型现状修正相结合,实现建筑物基底面高效精准更新,大幅降低人工重复采集与修改工作量。依托 LiDAR 点云构建 DEM 成果,提取建筑物底部高程,并通过粗差剔除、均值计算方法获取建筑物顶部主体高程,为模型竖向拉伸提供可靠的高程参数支撑。基于超图 iDeskTop 软件完成批量建筑体块拉伸建模与属性关联挂接,生成形态规整、语义完整的 LOD1.3 级三维模型。精度检测结果表明,模型平面中误差为 0.87m,高程中误差为 0.39m,各项指标均满足实景三维建设规范要求。相较

于传统单一建模方式,该方案人工编辑工作量显著减少,建模生产效率大幅提升,可为城市级实景三维规模化建设及后续城市规划、智慧城市管理等相关应用提供可靠的技术参考与经验借鉴。

参考文献

[1] 彭江帆.基于多源数据的城市三维模型(LOD1.3级)快速构建技术路线设计与实践[J].经纬天地, 2024(6):1-6.

[2] 梁文彪,鲍秀武,宁玉科.一种基于多源数据的建筑物LOD1.3级三维模型快速构建方法[J].城市勘测, 2024(4):43-48.

[3] 陈文典,李骁.基于地形图数据的LOD1.3城市三维模型自动构建方法研究[J].测绘,2025, 48(5):329-333.

[4] 张育育,冉花,张剑华.基于北京三号卫星影像的城市三维模型(LOD1.3级)快速构建方法[J].测绘标准化, 2025, 41(1):76-80.

[5] 林浩嘉,郭仁忠,贺彪,等.视觉感知导向的实景三维建筑场景LOD自适应可视化[J].测绘学报,2025,54(6):1054-1070.

(上接第 38 页)

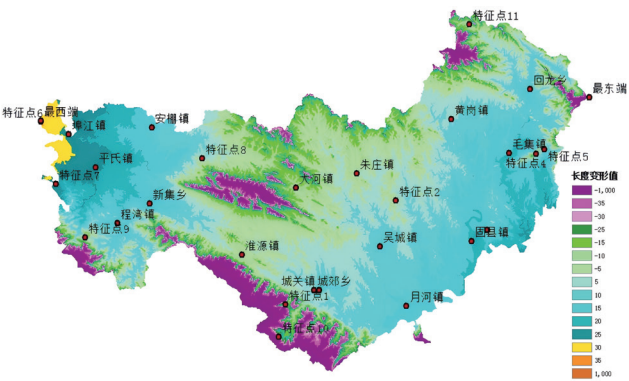


图5 特征点与区域长度变形叠加(独立坐标系)

5 结语

无论是综合分析城市是否应该建立独立坐标系,还是采用任意带法、抵偿面法或具有高程抵偿面的任意带法建立独立坐标系,都需要对区域任意位置投影变形进行分析。针对以上情况,研究以解决城市坐标系中投影长度变形计算烦琐等实际问题为出发点,提出了一种基于 DEM 的区域投影长度变形分析方法,建立了区域独立坐标系建设方案分析系统,并在典型实例中通过选取特征点进行了检核。实验证明,该方法不仅可有效解决选点、计算较为烦琐的问题,还能快速统计区域超限面积、形象展示超限区域位置。该方法可应用于各地城市独立坐标系建设,对独立坐

标系统建设的审批、规范化管理和应用推广具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市测量规范:CJJ/T 8—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.城市坐标系建设规范:GB/T 28584—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.

[3] 马宣佑.城市独立坐标系的投影变形检核技术研究与实践:以贵阳2000坐标系建立为例[J].测绘通报2016(S2):40-44.

[4] 熊德峰.基于2000国家大地坐标系和重庆市独立坐标系的投影变形研究[J].测绘通报, 2021(S2):103-108.

[5] 刘敏,王磊.“多规合一”背景下坐标系统的一体化方案研究[J].工程勘察,2017,45(4): 44-48.

[6] 李晓华,安艳辉.基于DEM的CGCS2000城市平面坐标系建立关键技术研究[J].测绘地理信息,2020,45(5):150-152.

[7] 王友昆,谢正明,张君华,等.一种基于DEM的城市平面坐标系建立方法[J].测绘工程,2021,30(3):45-50.

[8] 高昭良.一种基于DEM的CGCS2000城市平面坐标系确定方法[J].城市勘测,2014(3):124-127.

[9] 尚金光,张小波,陈军胜,等.基于DEM实现城市高斯投影变形可视化分析[J].城市勘测,2018(5):94-98.

[10] 刘继光,房大为,张凤录.区域独立坐标系建立方法及变形分析[J].北京测绘,2013(5):50-53.

基于改进遥感生态指数的海浸盐渍地区生态质量遥感监测

郭凯文 孔令鹏

(中核勘察设计研究有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 针对沿海生态脆弱保护区存在海浸盐渍化日益严重的问题, 研究融合归一化土壤盐分指数用于构建改进遥感生态指数 (Indicator of Modified Remote Sensing Ecological Index, I_{MRSEI}), 基于 2016 ~ 2024 年哨兵二号卫星数据分析浙江东部宁海县海浸盐渍区生态环境质量变化情况。研究表明: I_{MRSEI} 对评估海浸盐渍区域地表边界和纹理等指标适用性更好, 2016 ~ 2024 年, 研究区生态环境质量总体呈现“先降后升”特征, 前四年 I_{MRSEI} 均值从 0.516 降至 0.408, 变化速率为 $-0.0216/a$, 后四年升至 0.473, 呈触底回升状态, 变化速率为 $0.013/a$, 具有显著的空间异质性; 研究区生态环境质量优秀等级面积从 356.14km^2 降至 313.02km^2 , 同比减少 12.10%, 良好和中等等级面积变化较小, 良好等级仅减少 2.34%, 实施滩涂盐渍化治理和排污限制后, 生态环境质量差的区域恢复增速为 $0.026/a$, 超出均值 44.7%。研究结果可为海浸盐渍区生态环境保护修复工作提供依据。

关键词: 改进遥感生态指数; 生态环境质量; 海浸盐渍区; 归一化土壤盐分指数

1 引言

海浸盐渍区是海水入侵致使土壤与地下水盐分不断累积的区域, 主要分布于沿海平原和地下水流末端, 受海平面上升、潮汐作用等自然因素, 以及过度抽取地下水等人为活动的影响, 咸淡水界面下移, 进而造成土壤和地下水中盐分富集。这些区域普遍具有较高的电导率, 离子组成以氯化物-钠型为主, 对生态系统、农业生产及淡水资源的可持续利用构成持续威胁^[1-3]。近年来, 浙江东部海域受海水倒灌、潮汐作用以及盐田废弃转型等因素影响, 出现大面积土壤盐渍化问题, 因此开展海浸盐渍区地表生态环境的遥感评价分析, 对于推进海浸盐渍区生态环境保护修复工作意义重大。

目前, 在土壤盐渍化区域生态环境评估领域, 卫星监测技术凭借全面性、科学客观性以及可追溯性等优势发挥着关键作用^[4]。土壤盐渍区域生态环境质量遥感评估的相关研究, 主要从自然生态地物数量变化^[5]、生态系统协调度^[6]以及生态环境质量综合评估^[7]等方面来评价。邓文彬等针对煤炭开发引发的生态问题, 利用改进型遥感生态指数等工具, 揭示 2000 ~ 2023 年准东地区生态环境质量“先降后升”: 2000 年达峰值 0.368, 2018 年降至谷底 0.225, 2023 年回升至 0.289^[8]。王晓蕾等用改进型遥感生态指数

监测评估青海省 1992 ~ 2022 年生态环境质量, 提升沙漠盐渍化区域纹理特征与内部生态过渡带界限识别能力, 73.36% 的生态环境质量保持稳定, 20.83% 轻微改善且集中在东部, 6% 的退化区域集中于西部边境^[9]。杨亮彦等构建改进后的土壤盐渍化生态指数, 发现卤泊滩盐渍化区域生态指数 MRSEI 在 1994 ~ 2003 年的均值由 0.607 降至 0.572, 2003 ~ 2015 年的均值从 0.572 升至 0.673^[10]。

基于 2016 ~ 2024 年期间共计 5 期 Sentinel-2A 数据, 研究构建融合归一化土壤盐分指数 (Normalized Soil Salinity Index, I_{NSS}) 的改进型遥感生态指数, 通过主成分分析、散点密度相关性法等方法, 综合验证 I_{MRSEI} 的适用性, 并揭示 2016 ~ 2024 年期间研究区生态质量变化特征。

2 研究区域和数据源

2.1 研究区域

研究区宁海县地处浙江省宁波市东部海滨区域, 空间位置位于北纬 $35^{\circ} 21'$ 至 $35^{\circ} 32'$ 、东经 $116^{\circ} 30'$ 至 $117^{\circ} 44'$, 总面积约为 1382km^2 。近年来, 由于浙江东部沿海地区地下水位持续上升, 特别是海浸盐渍区的深层地下水位导致土壤盐渍化问题日益严重。研究区范围如图 1 所示。

作者简介: 郭凯文 (1992—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事摄影测量与遥感、海洋测绘、工程测量等工作。

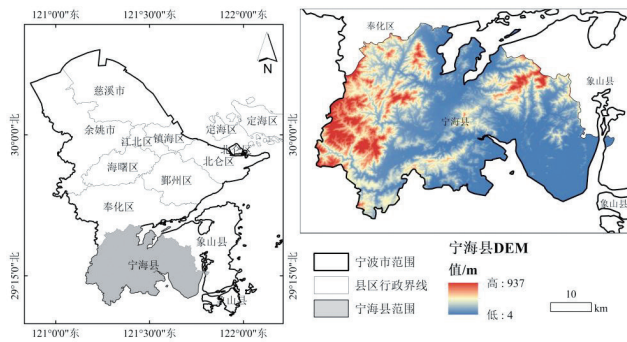


图1 研究区范围

2.2 数据来源和预处理

研究从哥白尼数据中心 (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) 获取 2016 年至 2024 年期间 5 期总计 12 景哨兵二号 (Sentinel-2A, S2A) 卫星数据, 包含 B2、B3、B4、B8、B11、B12 等波段, 其中 B2、B3、B4、B8 波段的空间精度为 10m, B11、B12 波段的空间精度为 20m, 上述波段数据用于计算遥感生态指数。获取原始数据后利用 PIE-ortho 工具和 SNAP 软件对原始影像进行预处理, 包括校正、平差和影像融合等步骤。

3 改进型遥感生态指数

3.1 遥感生态指数

徐涵秋依托遥感技术计算卫星图像中的绿色、湿度、干度和热度等指标, 进而提出一种完全基于自然因子的遥感生态指数, 用于区域生态状况的快速监测与全面评估^[11]。借助归一化植被指数 (I_{ndv}) 呈现植被生长状态; 运用缨帽变换获取湿度分量 (I_{wet}); 融合建筑物指数 (I_{BI}) 与裸土指数 (I_{SI}) 构建干度 (I_{nds}), 体现地表干燥情况; 通过反演地表温度 (I_{LST}) 展示地表温湿状况, 具体计算方法如表 1 所示。

表1 遥感生态指数计算方法

指标	公式	含义
绿色	$I_{ndv} = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$	值越大, 地表植被生长越好, 生态环境质量越好。
湿度	$I_{wet} = 0.1511\rho_{blue} + 0.1973\rho_{green} + 0.3283\rho_{red} + 0.3407\rho_{nir} - 0.717\rho_{swir1} - 0.4559\rho_{swir2}$	值越大, 地表湿度越高, 生态环境质量越好。
干度	$I_{nds} = \frac{(I_{SI} + I_{BI})}{2}$ $I_{SI} = \frac{[(\rho_{swir1} + \rho_{red}) - (\rho_{nir} + \rho_{blue})]}{[(\rho_{swir1} + \rho_{red}) + (\rho_{nir} + \rho_{blue})]}$ $I_{BI} = \frac{\{2\rho_{swir1}/(\rho_{swir1} + \rho_{nir}) - [\rho_{nir}/(\rho_{nir} + \rho_{red}) + \rho_{green}/(\rho_{swir1} + \rho_{red})]\}}{\{2\rho_{swir1}/(\rho_{swir1} + \rho_{nir}) + [\rho_{nir}/(\rho_{nir} + \rho_{red}) + \rho_{green}/(\rho_{swir1} + \rho_{red})]\}}$	值越大, 地表干化特征越显著, 生态环境质量越差。
热度	$I_{LST} = \frac{T}{1 + \ln(\frac{\rho}{\rho_0})}$	值越大, 地表温度越大, 生态环境质量越差

表 1 里, 绿色、湿度、干度和热度分别用 I_{ndv} 、 I_{wet} 、 I_{nds} 及 I_{LST} 表示, ρ_{nir} 与 ρ_{red} 为卫星影像近红外波段

和红光波段的反射率; ρ_{blue} 、 ρ_{green} 、 ρ_{swir1} 、 ρ_{swir2} 代表卫星影像可见光区间的蓝光、绿光、中红外波段 1 及中红外波段 2 的反射率; I_{LST} 表示地表实际温度, $T = K_2 / \ln(K_1 / L + 1)$, $L = gain \times DN + bias$, K_1 、 K_2 是定标参数常量, γ 为中心波长, ρ 是常数 ($14380.0 \mu m \cdot K$), ϵ 为地表比辐射率常量, $gain$ 、 $bias$ 为热红外波段的增益值与偏置值。

3.2 归一化土壤盐分指数

土壤盐渍化通常是指由于自然因素或人为活动的影响, 导致土壤中可溶性盐类 (如钠盐、钙盐、镁盐等) 在表层或根系层逐渐积累, 超过作物正常生长的耐受范围, 从而造成土壤理化性质恶化、肥力下降以及生态环境退化的过程。研究将归一化土壤盐分指数作为衡量土壤盐渍化的指标^[12-14], 具体计算公式如下:

$$I_{NSS} = \frac{\rho_{red} - \rho_{swir1}}{\rho_{red} + \rho_{swir1}} \quad (1)$$

式中, ρ_{red} 、 ρ_{swir1} 为可见光中红光、短波红外波段反射率。

3.3 主成分分析

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 是一种可降低数据维度、同时保留原始数据最大变异信息的统计算法。通过主成分分析将多维特征空间的数据集中在少数几个特征分量上, 既保留了大部分信息, 又实现相关性降维与数据压缩, 得到的载荷值能相对客观量化各指标权重, 避免主观赋权问题。分析步骤如下:

(1) 标准化处理输入变量 (核归一化植被指数 I_{kndv} , 以及 I_{wet} , I_{nds} , I_{LST} , I_{NSS}), 令变量均值为 0, 方差为 1。(2) 基于标准化数据计算协方差矩阵或相关系数矩阵。(3) 求解上述矩阵的特征值和特征向量。(4) 按特征值大小排序特征向量, 选取较大的特征向量作为主成分。(5) 利用选定的主成分来生成综合指数, 具体计算方法如下:

$$N_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

式中, N_i 为第 i 个生态因子指标归一化后的像元值, I_i 为第 i 个生态因子指标原始像元值, $I_{\min}$ 是第 i 个生态因子指标的全局最小值, $I_{\max}$ 是第 i 个生态因子指标的全局最大值。在 (I_{kndv} , I_{wet} , I_{nds} , I_{LST}) 基础上, 加入土壤盐渍化指标归一化土壤盐分指数 I_{NSS} , 通过主成分分析方法构建 I_{MRSEI} , 具体公式如下:

$$I_{MRSEI} = f(I_{ndv}, I_{wet}, I_{nds}, I_{LST}, I_{NSS}) \quad (3)$$

式中, I_{ndv} , I_{wet} , I_{nds} , I_{LST} , I_{NSS} 分别代表遥感生态

指数中的绿色、湿度、干度、热度以及土壤盐渍化指标。根据等间距分级标准,将归一化后的 I_{MRSEI} 按照0.2的间隔基准分级,分为5个等级:差(0, 0.2]、较差(0.2, 0.4]、中等(0.4, 0.6]、良好(0.6, 0.8]、优秀(0.8, 1]。

4 结果和分析

4.1 适用性评价

在研究区宁海县海浸盐渍区域里,选取河口低洼区、盐田、滩涂、山地等不同生态系统的典型地点,通过 I_{MRSEI} 、 I_{RSEI} 对比其与表征局部地物细节和地表纹理效果的差异,展现二者在关键区域表征上的区别,进而验证 I_{MRSEI} 相较于 I_{RSEI} 的优势。局部地物细节和地表纹理表征对比如图2所示,选取滨海滩涂区、青溪入海口、梁皇山、港头盐场和下洋涂高滩地等诸多典型区域,在梁皇山植被茂密区,相较于 I_{RSEI} , I_{MRSEI} 在表征过饱和植被边界形态与生长状态差异化的成效更为突出,而 I_{RSEI} 则呈现数值过饱和,难以显示差异;滨海滩涂区、青溪入海口、港头盐场和下洋涂高滩地属于明显盐渍化区域, I_{MRSEI} 对地表盐渍化边界与空间分布的敏感度更高,这归功于归一化盐分指数 I_{NSS} 的引入,弥补了遥感生态指数在土壤盐渍化表征能力方面的欠缺。总体而言,与 I_{RSEI} 相比, I_{MRSEI} 在表征局部地物细节和地表纹理效果上更加精细,能有效缓解茂密植被覆盖地表的过饱和状况,全面体现沿海土壤盐渍化区域的生态质量。

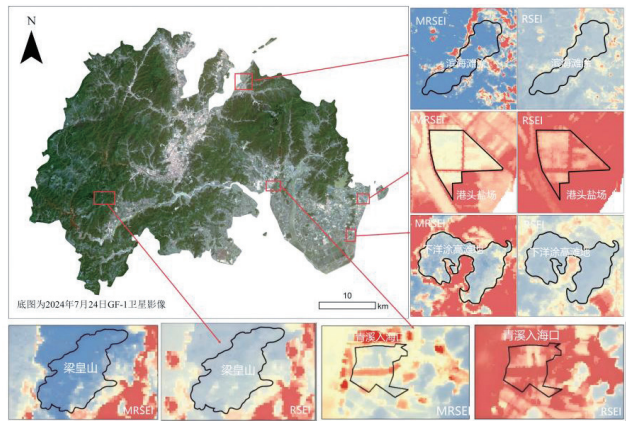


图2 局部地物细节和地表纹理表征对比

4.2 主成分分析结果

从表2主成分分析情况来看,第一主成分 PC_1 的特征值贡献率居于首位,各年份的贡献率皆超出82%,且载荷的正负性保持不变,说明其融合了5个指标的主要特性。其中 PC_1 展现了各指标对 I_{MRSEI} 影

响的正负相关性,表征植被生长状态的 I_{ndv} 、表征湿润度的 I_{wet} 特征向量为正数,说明其对生态质量具有正反馈作用;而表征温度、干旱度以及土壤盐分 I_{LST} 、 I_{nds} 、 I_{NSS} 的指标特征向量均为负数,说明其对生态质量具有负反馈作用,符合实际。

表2 主成分分析情况

PC_1	2016	2018	2020	2022	2024	均值
I_{ndv}	0.503	0.468	0.541	0.484	0.548	0.506
I_{wet}	0.663	0.592	0.606	0.641	-0.649	0.369
I_{nds}	-0.489	-0.413	-0.389	-0.514	-0.512	-0.496
I_{LST}	-0.541	-0.318	-0.472	-0.432	-0.329	-0.418
I_{NSS}	-0.319	-0.334	-0.552	-0.459	-0.454	-0.424
特征值	0.164	0.191	0.187	0.179	0.188	0.157
贡献率/%	82.41	87.14	83.87	85.44	87.02	86.54

4.3 海浸盐渍区生态环境质量变化分析

2016~2024年宁海县海浸盐渍区域 I_{MRSEI} 变化总体趋势如图3所示。在时间维度上,2016~2024年,宁海县海浸盐渍区域 I_{MRSEI} 整体表现出“先减少后增加”的阶段性的特点,最低点出现在2020年,2016~2020年研究区 I_{MRSEI} 均值由0.516降至0.408,变化速率为-0.0216/a;2020~2024年又回升至0.473,呈触底回升状态,变化速率为0.013/a。从空间布局来看:宁海县海浸盐渍区域生态环境质量总体呈现“西北高、东南低”的空间分布,西北梁皇山区一中部县城建成区一东南滨海滩涂生态环境质量逐渐降低的特征十分明显。

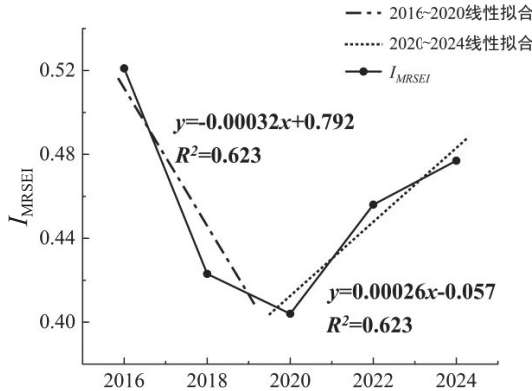


图3 2016~2024年宁海县海浸盐渍区 I_{MRSEI} 变化总体趋势

从研究区生态环境质量等级及相应面积统计数据来看,2016~2024年宁海县海浸盐渍区生态环境质量等级变化显著,不同等级变化差异较大。其中,优秀等级面积从356.14km²降至313.02km²,同比减少12.10%。良好和中等等级面积变化幅度较小,良好等级8年仅减少2.34%,面积占比从27.31%降至24.97%,主要分布在宁海县西北部梁皇山地区林区和雁

苍山麓区域,是重要的水土保持与水源涵养区,为山地林草地貌,人类活动弱、植被覆盖率高。中等面积最大,但年度平均变化振幅最小(为4.34%,远低于其他四种等级振幅均值14.47%),主要分布在农业区和林区,土地利用多为耕地和山林地,地势平坦、土层深厚,农业活动发达,因耕地占补平衡和生态修复机制,生态环境变化平缓。较差和差等级面积比重由12.74%升为17.81%,主要分布在水源中下游地区,土地利用以荒漠盐碱地和工业制造业区为主,植被覆盖率低,生态环境质量差。2016~2020年因地下水超采、海水倒灌和工业排污限制不足,生态环境质量下降快,2020年后实行滩涂盐渍化治理和排污限制等措施,生态环境质量逐步恢复, I_{MRSEI} 增速为0.026/a,相较于增速均值超出44.7%。具体变化情况如图4所示。

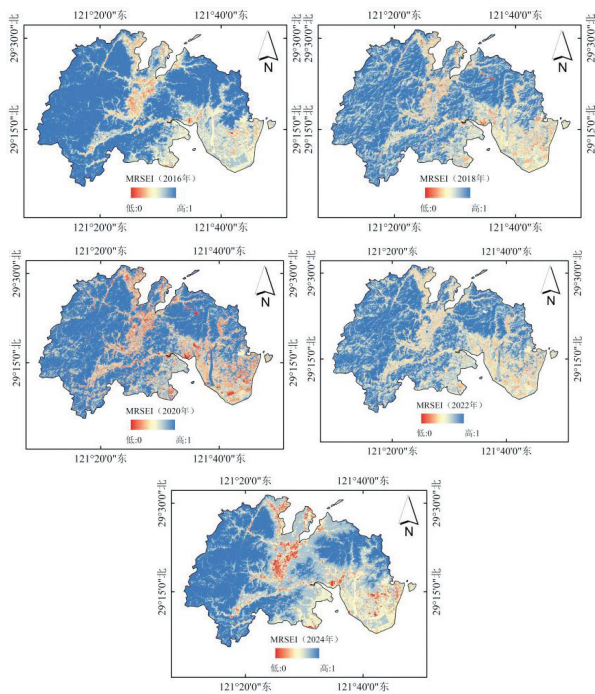


图4 2016~2024年研究区 I_{MRSEI} 变化情况

5 结论

传统遥感生态指数在监测浙江东部沿海植被密集地带时难以准确反映大范围土壤盐渍化现象,针对此难题,研究提出一种结合归一化土壤盐分指数的改进型遥感生态指数,利用2016~2024年的Sentinel-2A数据,分析了浙江东部宁海县沿海盐渍化区域的生态环境变化,并得出以下结论:

(1)通过 I_{MRSEI} 与 I_{RSEI} 及其所有二级指标的相关性分析结果,以及不同生态系统的典型地点局部地物细节和地表纹理表征效果来看, I_{MRSEI} 在浙江东部沿海

海浸盐渍区适用性更佳;

(2)2016~2024年宁海县海浸盐渍区域 I_{MRSEI} 整体表现出“先减少后增加”的阶段性特点,最低点在2020年出现,2016~2020年研究区 I_{MRSEI} 均值由0.516降至0.408,变化速率为-0.0216/a;2020~2024年又回升至0.473,呈现触底回升状态,变化速率为0.013/a;

(3)研究区生态环境质量等级变化显著,优秀等级面积从356.14km²降至313.02km²,同比减少12.10%。良好和中等等级面积变化幅度较小,良好等级8年仅减少2.34%,2020年后实行滩涂盐渍化治理和排污限制等措施,后续4年生态环境质量逐步恢复, I_{MRSEI} 增速为0.026/a,相较于增速均值超出44.7%。

参考文献

- [1] 赵作章,陈劲松,彭尔瑞,等.土壤盐渍化及治理研究进展[J].中国农村水利水电,2023(6):202-208.
- [2] 王敬哲,丁建丽,葛翔宇,等.基于星地传感技术的土壤盐渍化监测进展与展望[J].遥感学报,2024,28(9):2187-2208.
- [3] 骆振海,张超,冯绍元,等.土壤盐渍化光学遥感监测方法研究进展[J].自然资源遥感,2024,36(4):9-22.
- [4] 李星佑,张飞,王箐.土壤盐渍化遥感监测模型构建方法现状与发展趋势[J].自然资源遥感,2022,34(4):11-21.
- [5] 代云豪,管瑶,张钦凯,等.阿拉尔垦区土壤盐渍化遥感监测及时空特征分析[J].干旱区地理,2022,45(4):1176-1185.
- [6] 强欣欢,高文文,王博,等.基于遥感的土壤盐渍化风险评估及其演变规律[J].干旱区研究,2025,42(3):431-444.
- [7] 徐涵秋,邓文慧.MRSEI指数的合理性分析及其与RSEI指数的区别[J].遥感技术与应用,2022,37(1):1-7.
- [8] 邓文彬,宋森,易红梅.基于改进遥感生态指数的准东地区生态环境质量时空变化分析[J].干旱区地理,2025,48(12):2073-2086.
- [9] 王晓蕾,黄亦龙.基于Google Earth Engine和干旱改进型遥感生态指数的青海省生态环境质量评价[J].生态学报,2025,45(20):10008-10020.
- [10] 杨亮彦,程杰.陕西卤泊滩盐渍地生态环境遥感监测研究[J].西部大开发(土地开发工程研究),2019,4(12):1-5.
- [11] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [12] 刘英,党超亚,岳辉,等.改进型遥感生态指数与RSEI的对比分析[J].遥感学报,2022,26(4):683-697.
- [13] 吴霞,王长军,樊丽琴,等.基于多光谱遥感的盐渍化评价指数对宁夏银北灌区土壤盐度预测的适用性分析[J].国土资源遥感,2021,33(2):124-133.
- [14] 韩勇,于翔宇,姜凯升,等.红沙泉露天煤矿土壤盐渍化遥感监测[J].煤炭学报,2023,48(S2):704-712.

以反光强度为权的平面标靶中心点坐标提取

张键^{1,2,3} 胡启立^{1,2,3} 张梦茹^{1,2,3}

(1. 河南省测绘院, 河南 郑州 450003; 2. 河南理工大学 自然资源部矿山时空信息与生态修复重点实验室, 河南 焦作 454003;
3. 河南省自然资源科技创新中心(北斗高精度定位与应用关键技术研究), 河南 郑州 450003)

摘要: 平面标靶在三维激光扫描仪进行数据采集、仪器检校等环节扮演着重要角色, 如何快速、高精度提取标靶中心点坐标是工程应用面临的一个重要问题。在分析数据结构的基础上, 提出一种以反光强度为权的平面标靶中心点坐标提取方法。具体步骤为: 根据反光强度分区域拟合平面, 求取各区域点到平面的垂直距离, 当该距离大于某一设定的阈值时, 视为噪声数据予以剔除, 最后将剔除后得到的点运用加权平均法求取标靶中心点坐标。实验表明, 该方法提取的点位最高精度达到 mm 级, 能够满足工程测量的需求。

关键词: 三维激光扫描; 反光强度; 平面标靶; 加权平均

1 引言

三维激光扫描技术作为近些年迅速发展的一项主动式、非接触激光测量技术, 具有测量速度快、精度高、数字化程度高等特点。其应用范围从最初的文物保护、逆向工程逐步扩展到工程测量、变形监测、地形扫描等领域^[1-4]。

三维激光扫描仪在获取研究对象的点云数据时, 通常与标靶配合使用。标靶经常用于多测站数据拼接、仪器单点精度检校以及目标物特征点提取等。常用的标靶有球形标靶和平面标靶, 平面标靶因设计简单、携带方便等优点, 在实际工程中得到广泛应用。

对于平面标靶, Lichti 等提出通过求取标靶平均反射强度中心, 进而确定平面标靶几何中心^[5]。这种方法是在激光扫描线严格垂直于平面标靶的基础上提出的, 然而实际扫描中并不是严格垂直的, 并且当扫描方向与标靶垂直方向大于 60° 时, 将产生无法识别标靶的情况^[6]。王力等提出一种基于回光强度的平面标靶自动识别方法, 首先对回光强度进行阈值分割, 然后根据扫描线进行聚类分析, 最后进行形状监测和中心点计算^[7]。但这种方法没有考虑到激光点散射造成的影响。苏晓蓓等对一些算法进行优化改进, 最终求取标靶中心点坐标^[8], 然而却忽略了每个激光点的反射率信息。

在实际应用中, 由于激光入射角度的不同, 获取数据的反射强度也不尽相同, 反射强度越高点位精度越高, 因而提取标靶中心点坐标时将每个点的反射强度作为权值。基于加权平均思想, 研究提出一种以反

光强度为权的平面标靶中心点坐标提取方法。

2 标靶中心点坐标提取的基本原理

不同地物对激光点云的反射强度存在显著差异, 其反射强度值与材质、表面特性及入射角度密切相关。结合实验所用标靶的特点, 其有效激光反射强度值 P_i 主要分布在 $1500 \sim 2048$ 区间, 其中 2048 为实验标靶可达到的最高反射强度值。反射强度越高, 表明激光反射能量越大, 数据质量越高; 反之则数据质量相对较差。实验表明, 反射强度值 $P_i < 2048$ 的点数与反射强度值 $P_i = 2048$ 的点数之比大约为 $1:20$ 。因此, 将标靶数据 A 按照反射强度 P_i 划分为 $\{A_1 | 1500 \leq P_i < 2048\}$ 和 $\{A_2 | P_i = 2048\}$ 两个子集。再按照平面拟合公式 $ax+by+cz+d=0$ 分别拟合 A_1 、 A_2 的平面 S_1 、 S_2 , 然后分别求取各子集内的点到相应平面的垂直距离 d_i , 当 d_i 大于某一阈值时, 视其对应的点为噪声点, 给予剔除。重复上述过程, 直到所有点的垂直距离 d_i 在限定阈值内为止。最后将剔除噪声点后的数据 A'_1 、 A'_2 组成新靶数据 A' , 分别按照重心法和加权平均法进行中心点坐标提取。技术路线如图 1 所示。

3 平面标靶中心点坐标计算方法

三维激光扫描仪在实际扫描时, 由于受到各种因素(如仪器抖动、激光点散射等)的影响, 所采集的标靶点云数据并非光滑平整, 为了准确获取标靶的中心点坐标, 必须对数据进行平面拟合、噪声剔除、提取中心点坐标等预处理工作^[9-10]。

作者简介: 张键(1987—), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事LiDAR数据处理等方面的应用研究工作。

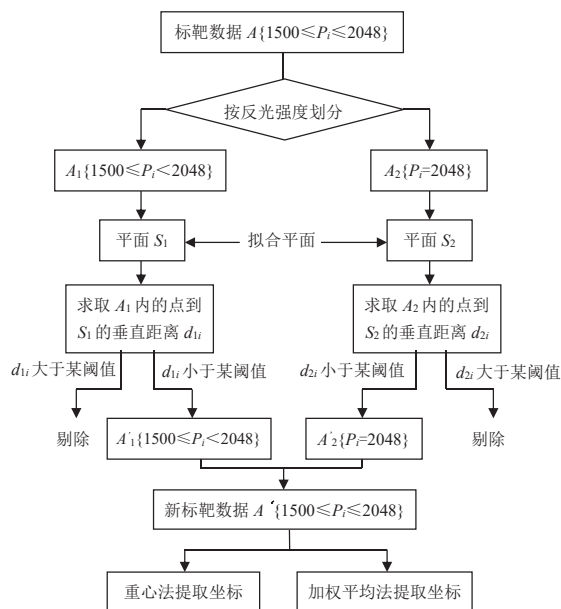


图1 标靶中心点提取技术路线

3.1 平面拟合

在三维空间中, 平面方程的标准表达式为:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

其中, $\vec{n}(a, b, c)$ 是该平面的单位向量, 且满足 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 。在拟合平面过程中, 把公式 (1) 改写为:

$$z = a_1x + a_2y + a_3 \quad (2)$$

其中, $a_1 = -\frac{a}{c}$ 、 $a_2 = -\frac{b}{c}$ 、 $a_3 = -\frac{d}{c}$ 。

设标靶点为 $\{(x_1, y_1, z_1)\}, \{(x_2, y_2, z_2)\} \dots \{(x_n, y_n, z_n)\}$, 任意点 (x_i, y_i, z_i) 到该平面的距离 d_i 可表示为:

$$d_i = |a_1x_i + a_2y_i + a_3 - z_i| \quad (3)$$

根据最小二乘原理, 使得

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (a_1x_i + a_2y_i + a_3 - z_i)^2 = \min \quad (4)$$

当满足 $\frac{\partial \sum_{i=1}^n d_i^2}{\partial a_k} = 0$ ($k=1, 2, 3$) 时, 方程 (4) 成立, 即可得到以下方程组:

$$\begin{cases} 2(a_1x_i + a_2y_i + a_3 - z_i) \cdot x_i = 0 \\ 2(a_1x_i + a_2y_i + a_3 - z_i) \cdot y_i = 0 \\ 2(a_1x_i + a_2y_i + a_3 - z_i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将标靶点 $\{(x_1, y_1, z_1)\}, \{(x_2, y_2, z_2)\} \dots \{(x_n, y_n, z_n)\}$ 代入方程组 (5), 得到非齐次线性方程组:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

求解上述方程组, 求取平面参数 (a_1, a_2, a_3) , 确定拟合平面 S_1 或 S_2 的方程表达式。

3.2 剔除噪声

研究根据拟合平面分别求取各区域的点到该平面的垂直距离 d_i 和平均距离 $\bar{d}$, 当 $|d_i - \bar{d}|$ 大于某一阈值时, 则认为该垂直距离对应的点为噪声点, 将其予以剔除。

在测量规范中, 通常将 2σ 作为极限误差^[11], σ 的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n}} \quad (7)$$

如果 $|d_i - \bar{d}| > 2\sigma$, 则所对应的点 (x_i, y_i, z_i) 应予以剔除。重复上述过程, 直到所有 d_i 都在允许范围之内, 即可得到平滑处理后的平面标靶数据。

3.3 提取中心点坐标

(1) 重心法

基于平滑处理过的标靶数据, 分别按照重心法和加权平均法对中心点进行提取。重心法即简单平均法, 当点云数据分布均匀、反射强度基本一致时, 可认为是等精度观测, 此时可认为标靶中心为数据的几何中心, 即:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \\ Y = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \\ Z = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n z_i \end{cases} \quad (8)$$

(2) 加权平均法

在实际扫描过程中, 标靶平面与扫描方向通常会有一定夹角, 并且随着扫描距离逐渐增加, 反射信号也随之减弱, 标靶中每个点的反射强度也不尽相同, 不同的反射率表明每个点是不等精度观测, 不能简单取算术平均值作为中心点坐标。这时, 需要引入“权”处理这一问题。按照加权平均原理, 每个观测点的“权值”既是相对应的反射率, 则标靶中心点坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot p_i) \\ Y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot p_i) \\ Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \cdot \sum_{i=1}^n (z_i \cdot p_i) \end{cases} \quad (9)$$

4 实验与分析

实验采用莱卡 ScanStation 2 三维激光扫描仪及其配套平面标靶, 该仪器最小采样密度为 1mm, 50m 处光斑大小为 4~6mm, 标靶为配套的方形标靶, 尺寸为 3 英寸×3 英寸。在 50m 范围内对 5 个标靶进行扫描。以标靶 1 为例, 扫描后共有 3754 个点, 将标靶 1 按照反射强度 P_i 划分为 $\{A_1|1500 \leq P_i < 2048\}$ 和 $\{A_2|P_i=2048\}$ 两个区域, 表 1、表 2 是划分后的平面标靶数据。表中 (X、Y、Z) 为每个点假定的三维坐标, P_i 为反射强度值。

表1 平面标靶数据 ($1500 \leq P_i < 2048$)

点数	X	Y	Z	P_i
1	4.72224	-1.34581	-1.15898	1875
2	4.72505	-1.34428	-1.15962	1951
3	4.72767	-1.33103	-1.15940	1873
...	...	...	...	...
173	4.74333	-1.27824	-1.08256	2034

表2 平面标靶数据 ($P_i=2048$)

点数	X	Y	Z	P_i
1	4.72190	-1.34776	-1.15699	2048
2	4.72395	-1.33812	-1.15898	2048
3	4.72334	-1.34205	-1.15907	2048
...	...	...	...	...
3581	4.74482	-1.27659	-1.08488	2048

将划分后的标靶数据按照公式 (6) 组成方程组, 然后编写求参程序, 求取每个标靶相应的平面参数 (a_1 、 a_2 、 a_3), 即可得到平面方程表达式 S_1 、 S_2 以及各区域内点到平面的平均距离 $\bar{d}$ 和中误差 σ 。标靶 1~标靶 5 的平面方程表达式以及相应参数如表 3 所示。

表3 平面方程表达式及相应参数

标靶	反射率 (P_i)	平面方程 (S_1 、 S_2)	平均距离	中误差 σ
1	$1500 \leq P_i < 2048$	$2926x + 1896y + 10000z - 1 = 0$	0.02004	0.01019
	$P_i = 2048$	$2167x - 745y + 10000z - 35 = 0$	0.02021	0.01040
2	$1500 \leq P_i < 2048$	$5344x - 7742y + 10000z + 133198 = 0$	0.02934	0.01778
	$P_i = 2048$	$1688x - 2818y + 10000z + 60799 = 0$	0.03276	0.01790
3	$1500 \leq P_i < 2048$	$1842x - 2350y + 10000z - 1 = 0$	0.02095	0.01530
	$P_i = 2048$	$2100x + 95y + 10000z - 26 = 0$	0.02006	0.01040
4	$1500 \leq P_i < 2048$	$2027x + 2193y + 10000z - 4859 = 0$	0.01553	0.01020
	$P_i = 2048$	$219x + 2923y + 10000z + 1 = 0$	0.01893	0.01059
5	$1500 \leq P_i < 2048$	$1691x + 1329y + 10000z - 3961 = 0$	0.01998	0.01154
	$P_i = 2048$	$1279x - 3689y - 10000z + 8816 = 0$	0.02119	0.01125

根据表 3 平均距离 $\bar{d}$ 和中误差 σ , 当 $|d_i - \bar{d}| > 2\sigma$ 时视其为噪声点, 予以剔除。重复上述过程, 直到所有 d_i 都在阈值范围内为止。以标靶 1 为例, 经过三次循环实验, 共剔除 87 个点, 噪声点剔除前后对比如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在剔除噪声前, 标靶左下角红

色区域及标靶边缘有明显的噪声点干扰, 经过滤波处理后, 边缘数据得到较好的平滑。将剔除前后的数据, 分别按公式 (8) 和 (9) 求取中心点坐标, 计算结果如表 4 所示。

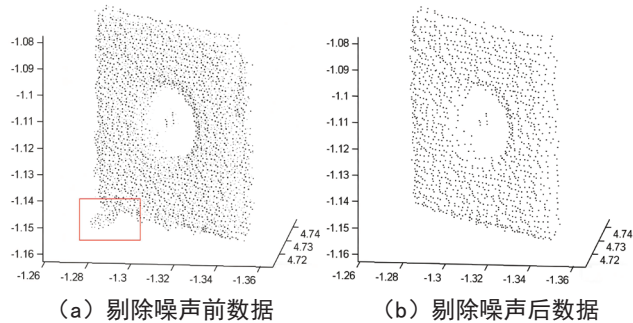


图2 噪声剔除前后对比

表4 重心法和加权平均法提取标靶中心点坐标

标 靶	重心法提取坐标			加权平均法提取坐标			软件提取坐标数据			
	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m	X/m	Y/m	Z/m	
1	剔除噪声前	4.726	-1.310	-1.118	4.726	-1.311	-1.118	4.733	-1.312	-1.119
	剔除噪声后	4.726	-1.311	-1.119	4.726	-1.311	-1.119			
	剔除噪声前	-6.906	9.548	-2.224	-6.906	9.548	-2.224			
2	剔除噪声后	-6.906	9.548	-2.225	-6.906	9.548	-2.224	-6.907	9.547	-2.224
	剔除噪声前	7.408	11.17	-3.435	7.41	11.171	-3.434			
	剔除噪声后	7.412	11.171	-3.432	7.412	11.171	-3.428			
3	剔除噪声前	5.797	-4.658	-1.17	5.7972	-4.659	-1.171	5.801	-4.661	-1.171
	剔除噪声后	5.797	-4.659	-1.171	5.797	-4.659	-1.171			
	剔除噪声前	11.085	16.058	-3.626	11.085	16.058	-3.626			
5	剔除噪声后	11.085	16.058	-3.626	11.088	16.059	-3.627	11.092	16.061	-3.631

根据表 4 计算结果, 分别将两种方法 (重心法和加权平均法) 提取的中心点坐标与软件提取的坐标进行对比, 得出剔除噪声数据前后的坐标差, 如表 5 所示。 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为两种方法与软件提取的坐标对比的差值, δ 为相对于软件提取的绝对误差。

根据表 5 得出, 在剔除噪声点之前, 运用重心法进行坐标提取的点位精度最大偏差为 16.5mm, 剔除噪声点后, 最大偏差减小到 12.2mm。在使用加权平均法对标靶进行坐标提取时, 剔除噪声点之前, 坐标提取的点位精度最大偏差为 15.1mm, 剔除噪声点后, 最大偏差减小到 11.1mm。

结果表明, 当平面标靶正对于扫描方向时, 运用重心法和加权平均法提取标靶中心点坐标均具有较高的精度。

(下转第 54 页)

黄河流域植被时空变化及其对气候因子的响应

李亚琼 周俊利 王意鹏

(河南省遥感院, 河南 郑州 450003)

摘要: 植被覆盖动态能够表征区域生态环境变化, 也会在水热条件产生反馈。基于 1982~2015 年 GIMMS NDVI 第三代长时间序列数据及黄河流域 76 个气象站点的气温、降水资料, 采用趋势分析、变异系数分析及 Pearson 相关分析等方法, 研究黄河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应规律。结果表明: (1) 1982~2015 年黄河流域生长季 NDVI 整体呈波动上升趋势, 植被覆盖状况总体改善明显, 其中中游无定河、窟野河及北洛河等流域增幅较高; (2) NDVI 变化存在显著空间异质性, 中游区域波动幅度较大, 而黄河源区及渭河、泾河等区域变化相对稳定; (3) NDVI 与降水、气温总体以正相关为主, 高相关区域主要分布于黄河源区及中北部地区; (4) 植被对气候因子的响应存在明显滞后效应, 其中降水响应以滞后 1~2 个月为主, 气温响应以滞后 3 个月为主。研究结果可为黄河流域生态恢复评价及植被变化驱动机制研究提供参考。

关键词: NDVI; 气温; 降水; 时空变化; 响应滞后

1 引言

植被连接大气、土壤和水分循环, 是评价陆地生态系统状态的重要对象。气候变化和人类活动共同改变区域植被覆盖, 归一化植被指数 (NDVI) 因可连续表征地表绿度, 被广泛用于植被动态及生态环境变化监测。已有研究表明, 降水和气温对干旱、半干旱区植被生长的影响较为突出, 但不同地貌单元、植被类型和季节背景下的响应程度并不一致^[1-4]。黄河流域兼具高寒草地、黄土丘陵沟壑区、平原农田等多类生态景观, 水热条件沿东西、南北方向差异显著, 因而适合开展长时间序列的植被变化及气候响应研究。已有工作从光学与微波遥感角度分析了黄河流域植被变化及影响因素^[5], 研究进一步围绕生长季 NDVI 与气温、降水的时空耦合关系展开讨论。

研究选取 1982~2015 年第三代 GIMMS NDVI 数据和黄河流域 76 个国家气象站点的气象资料, 构建生长季 NDVI 及不同时段气温、降水序列。通过趋势分析、变异系数和相关系数计算, 识别流域植被变化的空间分异, 并比较同期及前期气候因子对植被生长的影响, 为区域生态修复与气候适应性评估提供参考。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

黄河流域西起巴颜喀拉山、东临渤海, 南北分别受秦岭、阴山等山系影响, 流域面积约为

75.2 万 km², 地理范围为 95° 53' E~119° 14' E、32° 09' N~41° 51' N。黄河流域范围涵盖青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东等九个省 (区), 地形跨越我国地势三级阶梯, 整体呈西高东低格局。黄河流域上游源区海拔多在 4000m 以上, 以高原和冰川、冻土环境为主; 中游主要分布有黄土高原地貌, 沟壑发育, 水土流失敏感; 下游则以黄淮海平原和黄河冲积平原为主。气候上, 黄河流域从东南部半湿润区逐渐过渡到中部半干旱区和西北部干旱区, 多年平均气温约为 6.4℃, 多年平均降水量约为 466mm。受地形、水热条件和土地利用差异影响, 黄河流域植被类型较为复杂, 源区以高寒草地为主, 在汾河、渭河等区域耕地和林地分布较多, 黄河流域高程如图 1 所示。

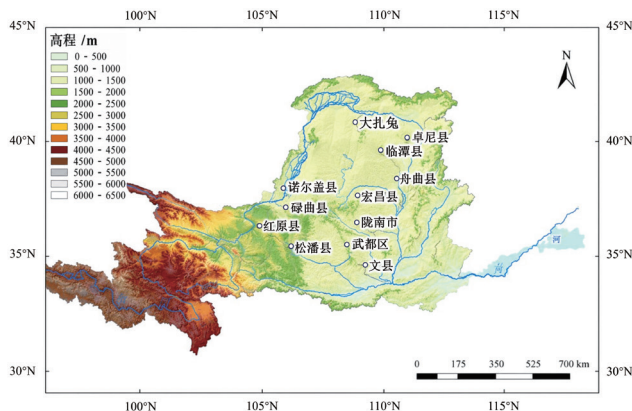


图1 黄河流域高程

作者简介: 李亚琼 (1990—), 女, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事GIS数据加工、应用工作。

2.2 数据来源与处理

2.2.1 数据来源

采用 AVHRR GIMMS NDVI 第三代数据集作为植被指数数据源。该数据集空间分辨率为 $8\text{km} \times 8\text{km}$ ，时间分辨率为 15d，数据格式为 NetCDF4，覆盖 1982 年以来的长时间序列，并在传感器差异、太阳高度角、火山气溶胶等方面进行了校正处理，适合开展区域尺度植被动态研究。气象数据来源于中国气象数据网的地面气候资料日值数据，经过站点完整性筛选后，选取黄河流域 76 个国家气象站点，提取 1982~2015 年逐日气温和降水数据，用于与 NDVI 序列进行对比分析。

2.2.2 数据处理

利用 IDL 对 GIMMS NDVI 的 NetCDF4 文件进行读取和格式转换，并依次完成镶嵌、投影统一、研究区裁剪等预处理。为减弱短期天气和月内物候波动对 NDVI 序列的影响，按月对半月数据进行合成，并提取 5~9 月作为植被生长季，计算生长季 NDVI 均值。随后在 ArcGIS 中进行栅格裁剪、分区统计和图件制作，为趋势分析、变异系数计算及相关分析提供基础数据。

气象资料以站点为单位进行质量检查和时间序列整理，先由逐日数据汇总为逐月降水量和逐月平均气温，再根据研究需要合成 2~6 月、3~7 月、4~8 月和 5~9 月等序列。随后对站点气象数据进行空间插值，生成与 NDVI 数据空间范围一致的栅格数据，并开展逐像元及分区统计分析。

3 研究方法

研究从趋势变化、年际波动和气候响应三个方面开展分析。首先利用线性趋势斜率判断 1982~2015 年黄河流域生长季 NDVI 的变化方向和变化速率；其次采用变异系数量化不同区域 NDVI 序列的相对波动程度；最后通过 Pearson 相关系数计算 NDVI 与降水、气温的关系。滞后响应分析以 5~9 月 NDVI 为被解释变量，2~6 月、3~7 月、4~8 月和 5~9 月气候序列分别代表前 3 个月、前 2 个月、前 1 个月和同期气候条件，以比较不同时间组合下的相关性大小，并据此识别主要滞后时段。

斜率分析用于识别 NDVI 变化方向，表达式为：

$$\text{Slope} = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2} \quad (1)$$

式中， n 为年份数， i 为年份序号， x_i 为第 i 年生

长季 NDVI 均值； $\bar{i}$ 和 $\bar{x}$ 分别表示年份序号和 NDVI 的多年平均值。 $\text{Slope} > 0$ 表示 NDVI 随时间增加， $\text{Slope} < 0$ 表示 NDVI 下降；绝对值越大，说明趋势变化越明显。

变异系数反映 NDVI 相对波动幅度，表达式为：

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

式中， σ 为 NDVI 序列标准差， μ 为 NDVI 序列均值。 C_v 值越大，表示同一像元或区域在研究期内的相对波动越强； C_v 值越小，表示变化更稳定。

Pearson 相关系数用于刻画 NDVI 与气候因子在时间序列上的一致性，表达式为：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中， x_i 为第 i 期 NDVI 值， y_i 为对应气候因子值， $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两组序列均值， n 为样本数。 R 取值范围为 $[-1, 1]$ ，正值表示同向变化，负值表示反向变化，绝对值越接近 1，相关程度越强。

4 结果与分析

4.1 黄河流域植被时空变化分析

黄河流域长时间序列植被指数年均值散点如图 2 所示，1982~2015 年黄河流域生长季 NDVI 整体呈波动上升趋势，说明研究期内流域植被覆盖状况总体得到改善。1982~1992 年 NDVI 年均值波动较为明显，局部年份存在短时下降现象，1988 年前后出现阶段性回升；1993~2005 年 NDVI 变化相对平稳，年均值主要维持在 0.505~0.526 之间；2006 年以后植被指数增长趋势进一步增强，并于 2012~2013 年达到研究期内较高水平，随后虽略有下降，但整体仍高于研究初期。这说明黄河流域植被生态状况在长期尺度上持续改善，但不同阶段仍受到区域气候波动及生态治理工程实施等因素共同影响。

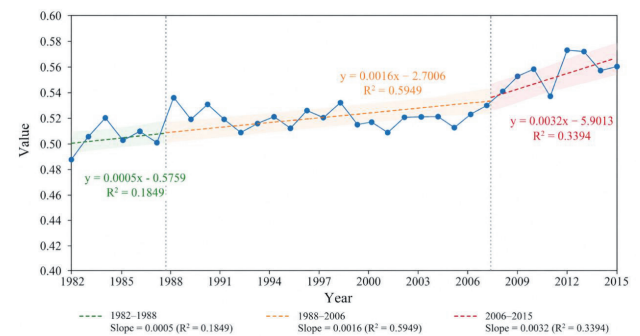


图2 黄河流域长时间序列植被指数年均值散点

黄河流域植被变化斜率如图3所示,由图3可知,黄河流域NDVI变化趋势在空间上具有明显分异特征。黄河源区、河套平原局部以及渭河中下游、泾河上游等区域Slope值较小或呈负值,表明这些区域植被变化相对稳定,局部区域存在一定退化趋势。相比之下,中游部分支流区域Slope值明显偏高,尤其是十大孔兑、窟野河、秃尾河、无定河以及北洛河等流域植被改善较为显著,其中无定河流域增幅最为明显,这说明黄河中游地区植被恢复速度较快,生态治理成效较为突出。

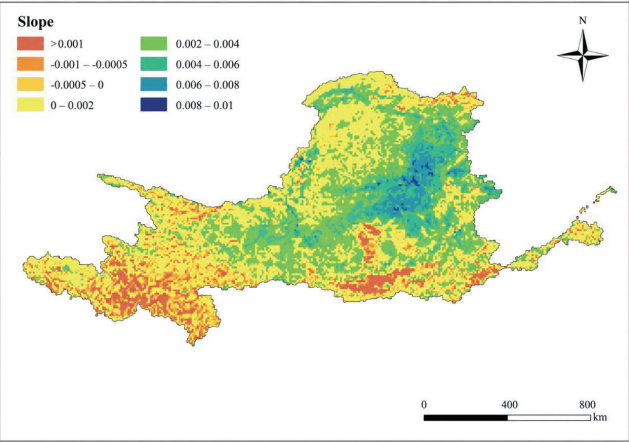


图3 黄河流域植被变化斜率

黄河流域NDVI变异系数的空间分布特征如图4所示,由图4可知, C_v 高值区主要分布于河口镇—潼关区间的十大孔兑、窟野河、秃尾河、无定河和北洛河等流域,与图3中的Slope高值区分布基本一致,这说明上述区域虽然植被覆盖总体呈改善趋势,但年际波动较强,对气候变化较为敏感。相比之下,黄河源区以及渭河、泾河等区域, C_v 值较低且分布较为均匀,这说明植被变化过程整体较为稳定,波动幅度相对较小。

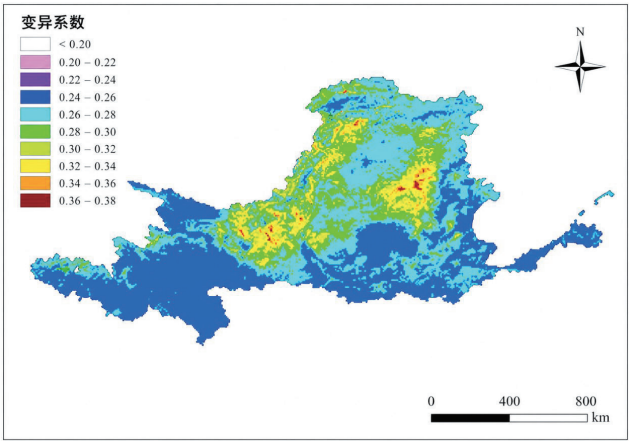


图4 黄河流域植被变异系数

4.2 植被对气候因子的响应

4.2.1 NDVI与降水相关性空间格局

NDVI与降水相关系数空间分布如图5所示,由图5可知,黄河流域生长季NDVI与降水总体呈正相关关系,但相关性空间差异较为明显。高相关区域主要分布于黄河源区及河口镇—潼关区间中北部地区,说明这些区域植被生长对降水变化较为敏感。上述区域多位于半干旱生态环境,土壤水分条件对植被生长具有较强限制作用,因此降水变化能够直接影响植被生长状况。渭河、泾河、北洛河及汾河等南部部分区域相关性相对较低,局部区域甚至呈负相关,可能与灌溉农业、人类活动干扰及土地利用方式差异有关。

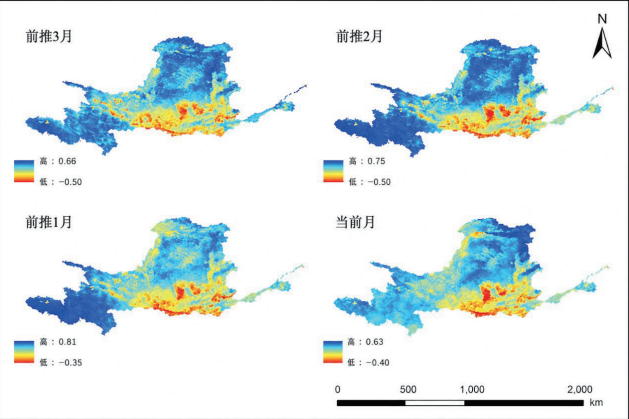


图5 NDVI与降水相关系数空间分布

NDVI与降水相关系数像元统计如表1所示,各时段NDVI与降水均以正相关关系为主,正相关区域面积占比均超过85%。其中,4~8月降水序列的较强正相关区域面积占比最高,达到59.96%,说明前期降水对植被生长具有较明显的累积效应;而5~9月降水序列中,中等正相关区域面积占比达到54.92%,表明同期降水对植被生长具有较为广泛的影响,但相关强度相对减弱。此外,负相关区域面积占比较小,主要集中于南部部分流域及局部灌溉农业区,说明在人类活动影响较强区域,植被变化对自然降水的响应程度有所降低。

表1 NDVI与降水相关系数像元统计

降水时段	负相关区域/%	弱正相关区域/%	中等正相关区域/%	较强正相关区域/%	正相关总面积/%
2~6月	13.63	14.27	36.19	35.92	86.37
3~7月	12.88	12.93	22.97	51.22	87.12
4~8月	7.77	10.64	21.64	59.96	92.23
5~9月	11.01	19.63	54.92	14.42	88.99

注:表中负相关区域: $R < 0$,弱正相关区域: $0 \leq R < 0.2$,中等正相关区域: $0.2 \leq R < 0.4$,较强正相关区域: $R \geq 0.4$ (下表同)

4.2.2 NDVI 与气温相关性空间格局

NDVI 与气温相关系数空间分布如图 6 所示。由图 6 可知，黄河流域 NDVI 与气温整体表现为正相关关系，其空间分布特征与降水响应具有一定一致性。黄河源区及河口镇—潼关区间中北部相关系数较高，说明适度升温有利于促进这些区域的植被生长。由于高寒地区长期受热量条件限制，气温升高能够有效延长植被生长期，提高植被光合作用强度，从而促进植被覆盖改善。

渭河、泾河及汾河等南部流域相关性相对较弱，局部区域呈负相关特征，说明在部分水分条件受限区域，气温升高可能增强蒸散发作用，进而加剧土壤水分亏缺，对植被生长产生一定抑制作用。

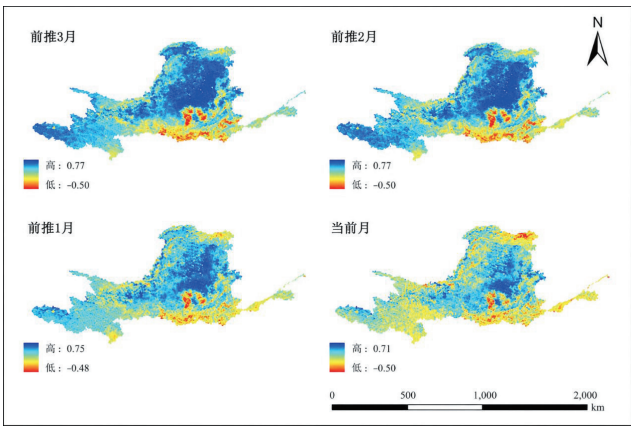


图6 NDVI与气温相关系数空间分布

NDVI 与气温相关系数像元统计结果如表 2 所示，黄河流域 NDVI 与气温整体以正相关关系为主，各时段正相关面积占比均超过 90%。其中，2~6 月气温序列的较强正相关区域面积占比最高，达到 57.94%，明显高于其他时段。随着气温统计时段逐渐接近生长季同期，较强正相关区域面积占比逐渐减小，5~9 月仅为 16.90%，说明前期气温条件对后续植被生长具有明显的累积影响，尤其在高寒及温度限制较强区域更为突出。

表2 NDVI与气温相关系数像元统计

降水时段	负相关区域/%	弱正相关区域/%	中等正相关区域/%	较强正相关区域/%	正相关总面积/%
2~6月	8.71	10.51	22.84	57.94	91.29
3~7月	7.06	13.93	28.90	50.11	92.94
4~8月	6.81	21.13	38.38	33.68	93.19
5~9月	8.20	37.13	37.78	16.90	91.80

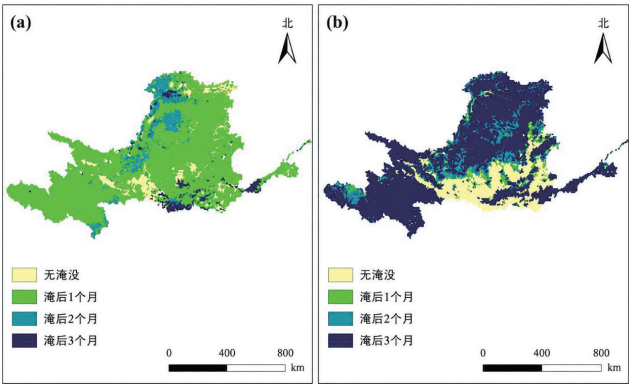
4.3 植被对降水和气温响应的滞后效应

为识别黄河流域植被对气候因子的主导滞后时间，研究分别提取不同时间组合下的最大相关系数，并将

对应月份作为植被主要响应时段。图 7 (a) 表示 NDVI 对降水的滞后响应空间分布，图 7 (b) 表示 NDVI 对气温的滞后响应空间分布。

由图 7 (a) 可知，黄河流域植被对降水响应以滞后 1 个月为主，主要集中于黄河源区及河口镇—龙门区间，且源区空间连续性较好。清水河—苦水河片区、河套平原中后套地区以及毛乌素沙地周边区域多表现为 2 个月滞后响应，局部区域可达 3 个月。渭河上中游植被变化主要表现为滞后 3 个月，而洮河上游东部部分区域则以同期响应为主。这说明降水通过影响土壤含水量及地表水热条件，对植被生长产生持续影响，不同区域受气候背景及地表条件差异影响，滞后时间存在明显空间差异。

由图 7 (b) 可知，黄河流域植被对气温响应整体以滞后 3 个月为主，黄河源区及河口镇—潼关区间中北部地区表现尤为明显。扎陵湖、鄂陵湖周边局部区域以滞后 1~2 个月为主，无定河流域部分区域主要表现为 2 个月滞后。相比之下，渭河、泾河、北洛河以及汾河等南部流域多表现为同期响应或弱滞后响应，仅渭河干流周边仍存在部分 3 个月滞后区域。这说明前期热量条件对黄河流域植被萌发、生长及积温累积具有重要作用，尤其在高寒及半干旱地区影响更加明显。



(a) 降水响应滞后时段 (b) 气温响应滞后时段

图7 NDVI对降水和气温响应滞后时间空间分布

5 结论与展望

研究基于 1982~2015 年 GIMMS NDVI 和气象站点资料，分析了黄河流域生长季植被变化及其对降水、气温的响应，主要结论如下：

(1) 黄河流域生长季 NDVI 整体呈波动上升趋势，中游部分支流区增幅较为明显，河口镇—潼关区间的十大孔兑、窟野河、秃尾河、无定河和北洛河等区域

既有较高趋势斜率，也具有较强年际波动；黄河源区及渭河、泾河等区域变化相对平稳。

(2) NDVI 与降水、气温总体以正相关为主，但空间差异显著，源区和中北部地区相关性较高，南部部分流域存在低相关或负相关。

(3) 植被对气候因子的响应具有滞后性，降水响应在不同区域多表现为同期至 3 个月滞后，气温响应则以 3 个月滞后为主，说明前期水热条件对生长季植被活动具有重要影响。

受数据分辨率和方法设置限制，研究仍存在有待完善之处。一方面，GIMMS NDVI 的 8km 空间分辨率难以细致刻画四级支流、小流域和破碎化地表的植被差异；另一方面，将逐日气象资料汇总为月尺度序列后，滞后期只能按月识别，难以反映旬尺度或更短时间尺度上的响应过程。后续研究可引入 MODIS、Sentinel 等更高时空分辨率数据，并结合土地利用、生态工程、

灌溉和土壤水分等因素，进一步区分气候变化与人类活动对植被变化的贡献。

参考文献

[1] Tucker C J,Pinzon J E,Brown M E,et al.An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. International Journal of Remote Sensing,2005,26(20):4485-4498.

[2] 莫瑶.黄淮海流域植被覆盖变化及其与气候因子关系的研究[D].南京:南京信息工程大学,2007.

[3] 史天艺,张萌萌,蒲阳,等.毛乌素沙地植被NDVI动态及对降水的多时空响应[J].干旱区研究,2024,41(8):1395-1404.

[4] Shilong P, Jingyun F, Zhou L M,et al.Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J].Global change biology,2006,12(4):672-685.

[5] 周俊利.基于光学与微波遥感的黄河流域植被变化及影响因素分析[D].焦作:河南理工大学,2018.

(上接第 49 页)

表5 剔除噪声前后坐标差

标 靶	剔除噪声前坐标差				剔除噪声后坐标差				
	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	δ/mm	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	$\Delta Z/m$	δ/mm	
重 心 法	1	0.0074	-0.002	-0.0010	7.73	0.0074	-0.0009	-0.0003	7.46
	2	-0.0011	-0.0005	0.0005	1.31	-0.0009	-0.0007	0.0005	1.24
	3	0.0111	0.0086	0.0087	16.52	0.0073	0.0080	0.0056	12.2
	4	0.0044	0.0026	-0.0007	5.16	0.0039	-0.0024	-0.0005	4.61
	5	0.0074	0.0029	-0.0052	9.50	0.0067	0.0029	-0.0052	8.96
加 权 平 均 法	1	0.0073	-0.0010	-0.0007	7.40	0.0073	-0.0010	0.0004	7.38
	2	-0.0011	-0.0007	-0.0002	1.32	-0.0009	-0.0005	0.0003	1.07
	3	0.0095	0.0086	0.0080	15.11	0.0075	0.0079	0.0024	11.1
	4	0.0040	-0.0025	-0.0005	4.74	0.0043	-0.0018	-0.0002	4.67
	5	0.0069	0.0031	-0.005	9.07	0.0038	-0.0023	-0.0044	6.25

5 结论

(1) 在提取坐标时，考虑到仪器抖动、激光散射等因素造成的噪声数据，利用最小二乘原理拟合平面，剔除噪声数据，使数据质量得到较大提高。

(2) 使用重心法可以获得较高的平面标靶中心坐标精度。在考虑工作量的前提下，可优先考虑使用简单重心法。

(3) 考虑到每个激光点并非等精度观测，将每个激光点的反射强度作为权值，把剔除噪声后的标靶数据采用加权平均法提取中心点坐标，结果表明，利用加权平均法提取结果优于重心法，且点位精度最小偏

差仅为 1.07mm。

参考文献

[1] 李靖,孟若轶,马振江,等.基于三维激光扫描技术的钢筋骨架非接触测量方法研究[J].测绘与空间地理信息,2026,46(1):77-82.

[2] 谢荣华,唐建华,周谦,等.SLAM三维激光扫描仪在古建筑文物普查中的应用[J].测绘通报,2025(S1):196-199.

[3] 闵启中,罗成鹏.三维激光扫描技术在规划竣工测绘中的应用[J].测绘通报,2023(S2):27-30.

[4] 张序,李兆堃,罗小华,等.应用三维激光扫描测量进行文物逆向工程恢复[J].测绘科,2013,38(6):169-171.

[5] Lichti D, et al.Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system [J]. Geomatics Research Australasia,2000,72:1-24.

[6] 朱凌.地面三维激光扫描标靶研究[J].激光杂志,2008(1): 33-35.

[7] 王力,李广云,张洪新.基于回光强度的平面标靶自动识别方法[J].红外与激光工程,2011,40(10):1910-1913.

[8] 苏晓蓓,郝刚.地面三维激光扫描标靶中心识别算法研究[J].城市勘测,2010,6(3):68-70.

[9] 曾齐红,毛建华,李先华,等.锋激光雷达点云平面拟合过滤算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(1):25-28.

[10] 蔡来良,吴侃,张舒,等.点云平面拟合在三维激光扫描仪变形监测中的应用[J].2010,33(5):231-232.

[11] 葛永慧,夏春林,魏峰远,等.测量平差[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

LiDAR激光点云分层切片构建LOD1.3城市三维模型方法研究

钱方¹ 刘梦琪¹ 路毅² 谷需代³

(1. 河南省遥感院, 河南 郑州 450000; 2. 济南泰乐信息技术有限公司, 山东 济南 250000;

3. 郑州市国土空间规划和土地利用研究院, 河南 郑州 450000)

摘要: 在实景三维建设 LOD1.3 技术方案的激光点云技术流程中, 为实现自动获取建筑物轮廓和高度, 研究以分类后的 LiDAR 激光点云为数据源, 通过计算点云法向量, 分层切片获取建筑物轮廓和高度构建模型, 实现模型的自动化、批量化生产。经抽样检验, 模型的平面和高度精度满足 LOD1.3 级城市三维模型构建要求, 充分证明了该方法的可行性与可靠性, 为规模化实现 LOD1.3 级城市三维模型构建提供技术支撑与实践参考。

关键词: LiDAR 激光点云; 点云分层切片; LOD1.3 级城市三维模型

1 引言

城市三维模型作为现实世界的数字孪生体, 在城市规划、应急管理、数字安防等领域发挥着不可或缺的作用。根据 CityGML 标准, 三维模型的细节层次被定义为 LOD0 至 LOD4。其中, LOD1 模型将建筑抽象为垂直拉伸的体块 (通常为平顶), 而 LOD2 则要求具有详细的屋顶结构和纹理。LOD1.3 作为 LOD1 级中最精细的级别, 能够表达建筑物外形结构、组成部分等信息, 在模型复杂度和地理空间分析实用性之间取得了良好平衡, 可以最大化满足应用^[1]。

机载 LiDAR 扫描技术是一种集成多子系统的主动式遥感成像方式, 能够主动、快速地获取高精度、高密度的三维点云, 反映地表及地物表面的几何信息, 为三维建模提供了理想的数据源。当前, 基于 LiDAR 激光点云构建 LOD1.3 级城市三维模型已成为实景三维建设的主流技术路径之一, 但仍存在诸多亟待解决的问题。一方面, 现有方法依赖多源数据融合 (如结合倾斜摄影、建筑矢量边界数据), 数据获取成本高、流程烦琐、多源数据配准难度大等问题, 难以适应大规模城市建模的降本增效需求^[2-4]。另一方面, 依赖 LiDAR 点云的建模方法普遍存在轮廓提取精度不足、建筑分层不合理、顶部高程计算偏差较大等问题, 尤其是在裙楼交错分布的高密度建筑区, 易出现模型拓扑异常、高度提取失真等情况, 且多数方法自动化程度低, 部分工作仍需要人工参与^[5]。

研究旨在探索一种以 LiDAR 激光点云数据为核心,

兼顾建模精度与效率, 流程化、自动化、可批量化生产的 LOD1.3 级城市三维模型构建方法, 为城市三维模型大规模建设提供可参考的技术方案。

2 研究区域概况和数据源

2.1 研究区域

研究以郑州市主城区部分区域为研究范围。该区域地势平坦, 建筑类型丰富、密度差异显著、高度层次分明, 既为 LOD1.3 级城市三维模型构建提供了典型的城市形态样本, 也对模型的几何简化、特征保持与尺度适配提出了技术挑战。

2.2 LiDAR 激光点云数据

研究采用分类后的 LiDAR 激光点云作为源数据, 保留了建筑物层和地面层, 数据采用 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 与 1985 国家高程基准, 平均点密度高于 40 个点/ m^2 , 可有效支撑 LOD1.3 级模型“轮廓精准、高度真实”的构建要求。

3 LOD1.3 构建方法

3.1 技术流程

研究采用基于 LiDAR 激光点云的分层堆叠建模方法, 三维体块的几何高度由点云高程差值与分层切片间距共同决定, 结合轮廓线的优化处理和点云的高度精准性, 避免了人工建模误差大、效率低、建筑物轮廓失真以及层间错位等问题, 实现了 LOD1.3 级城市三维模型高效、精准的自动化构建。总体技术流程如图 1 所示, 具体为: 对 LiDAR 激光点云数据进行分类,

作者简介: 钱方 (1985—), 女, 回族, 本科, 工程师, 主要从事摄影测量与卫星遥感工作。

获取地面层和建筑物层点云数据；根据建筑物层点云计算法向量后，设定高度对点云进行切片，基于切片点云的法向量对点云自动分层，获取分层高度；提取每层点云的水平轮廓线，根据该层高度信息，构造该层主体；根据点云轮廓线和设定外扩宽度，计算外扩轮廓缓冲区，获取缓冲区内最低值，并将其作为建筑物底部高程；对所有层构造的柱体进行堆叠融并，完成属性赋值。

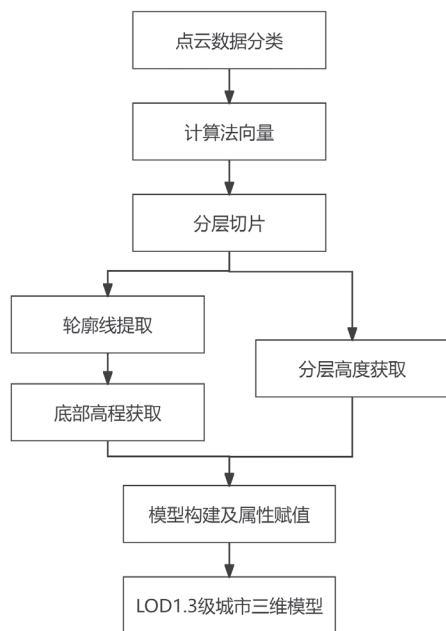


图1 LOD1.3级城市三维模型构建技术流程

3.2 计算点云的法向量

利用点云法向量分析捕捉建筑几何特征^[6]，主要计算方法如下：

(1) 点云法向量计算（PCA 主成分分析）

对目标点 P 的邻近点集 $P_{\text{set}} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ，计算点集质心：

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (1)$$

构建协方差矩阵 C ：

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - \bar{p})(p_i - \bar{p})^T \quad (2)$$

对 C 进行特征值分解 $C_v = \lambda_v$ ，特征值最小对应的特征向量即为点 P 的法向量 $\vec{n} = (n_x, n_y, n_z)$ ，归一化后满足 $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1$ 。

(2) 法向量与水平面夹角计算

法向量 $\vec{n}$ 与水平面 (XOY 平面) 夹角 α 满足：

$$\sin \alpha = n_z \quad (3)$$

将法向量 $\vec{n}$ 与水平面 (XOY 平面) 夹角 α 和设定阈值 β (如 45°) 进行比较， $\alpha > \beta$ 的点的占比为判别点云分层的重要指标之一。

3.3 点云自动分层

(1) 计算切片内水平面夹角超阈值的占比

统计切片内点的数量 M 、点和水平面夹角 $\alpha > \beta$ (夹角阈值) 的点的数量 m ，计算出切片内 $\alpha > \beta$ (夹角阈值) 的点的占比 R ：

$$R = \frac{m}{M} \quad (4)$$

(2) 判定建筑分层

对所有切片从下往上进行遍历，如果切片同时满足以下要求，则该切片处为建筑分层处。

① 该切片的点和水平面夹角超阈值占比 R 超过设定占比阈值 $R_{\text{threshold}}$ 。

② 该切片的点数量 M 超过设定阈值 $M_{\text{threshold}}$ 。

③ 该切片的夹角平均值 a_{aver} 和上一个切片的夹角平均值 pre_{aver} 差值的绝对值超过阈值 $a_{\text{threshold}}$ ，即 $|a_{\text{aver}} - pre_{\text{aver}}| > a_{\text{threshold}}$ 。

(3) 分层高度获取

统计所有满足分层条件的切片，将切片中所有点的高程平均值作为房屋分层的高度，加入分层高度集合，得到 H_{set} 。

3.4 点云分层切割

基于分层高度集合 H_{set} ，对点云建筑进行分层切割，具体方法如下：

设建筑原始点云数据集为 $C = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ ，其中任意点 $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ ， x_i, y_i 为平面坐标， z_i 为该点高程值 (高度值)，所有点的高程构成点云整体高程范围 $[z_{\min}, z_{\max}]$ 。给定分层高度集合 $H_{\text{set}} = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ ，其中 m 为分层切割次数，分层高度需满足严格升序约束，且位于整体高程范围内部，即：

$$z_{\min} < h_1 < h_2 < \dots < h_m < z_{\max} \quad (5)$$

基于高程分界，对点云 C 进行切层分割，第 k 层点云子集 C_k ($k=0, 1, \dots, m$) 满足：

$$C_k = \{p \in C | h_k \leq z_p < h_{k+1}\} \quad (6)$$

即第 k 层点云子集由所有高程值 z_p 满足“大于等于第 k 个高程、小于第 $k+1$ 个高程”的点构成，其中 k 的取值范围为 0 到 m ，对应分层数量为 $m+1$ (切割次数为 m ，得到 $m+1$ 个分层)。经 m 次分层切割后，所有点云子集构成多层点云集合 C_{sets} ，实现原始点云数据的分层切割，如图 2 所示。

3.5 轮廓线提取

(1) 点云簇划分

依据高程范围确定单层点云数据的中间区域，截取厚度为 5cm 的水平切片；对切片点云进行欧式聚类

分割，利用欧式聚类算法对切片进行簇划分，将空间邻近的点聚合为独立的点云簇，如图3所示。

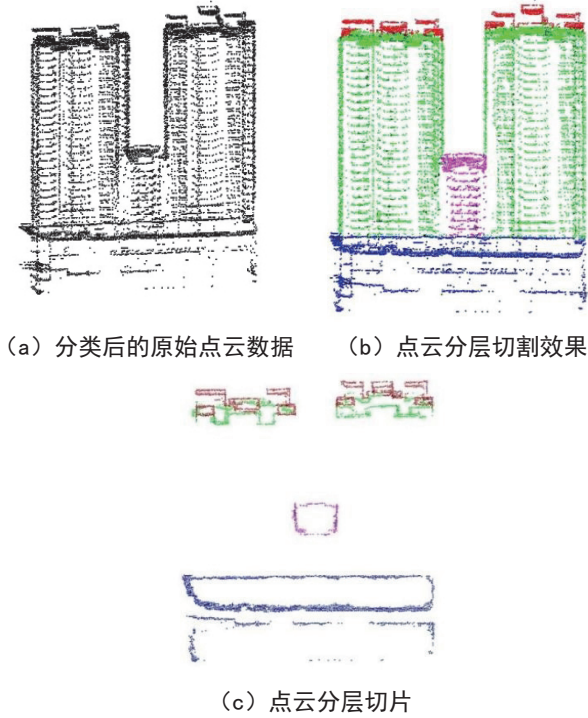


图2 LiDAR激光点云数据分层切割

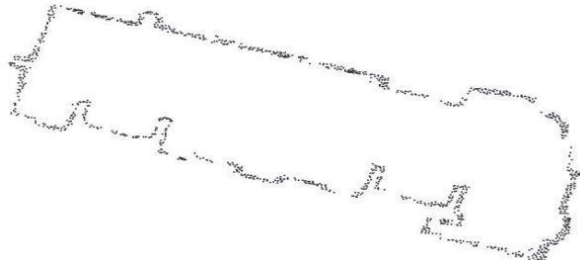


图3 建筑物单层切片点云簇

(2) 二值图像投影

将点云簇投影至 XOY 平面，生成二值投影图像，核心步骤如下：

①三维点云的二维投影：将单个点云簇点投影到 XOY 平面，丢弃 Z 坐标，只保留水平坐标；

②计算包围盒：获取点云簇最小/最大坐标，确定二维物理边界与尺寸；

③图像像素坐标转换：按设定分辨率将物理坐标转换为图像像素坐标；

④生成二值图像：有点云投影区域赋值255（前景），无投影区域赋值0（背景）。

(3) 轮廓提取

基于OpenCV算法，通过定位图像中连通的边界像素，提取建筑物轮廓线。

①单个点云簇轮廓提取

对转化后的二值图像进行轮廓点判别，并提取单个点云簇轮廓。其中，满足该点是前景点、8邻域/4邻域内至少存在一个背景点，并且按顺时针/逆时针顺序追踪，形成闭合曲线（首尾点重合）的点即为轮廓点。

②单层轮廓汇总

首先合并所有局部轮廓，完成同层点云的全局轮廓重构。然后将所有局部边界（单个点云簇轮廓）进行合并，形成覆盖全层的全局轮廓集合，即为该层的水平轮廓线。

(4) 轮廓直角化

针对轮廓边角不规则问题，研究通过夹角判定、边线规整和顶点校正，优化为标准直角轮廓，核心公式如下：

①夹角计算：设轮廓顶点 $P_i=(x_i, y_i)$ ，相邻边向量 $\vec{a}_i=P_i-P_{i-1}$ 、 $\vec{b}_i=P_{i+1}-P_i$ 。夹角计算公式如下：

$$\cos \theta_i = \frac{\vec{a}_i \cdot \vec{b}_i}{|\vec{a}_i| \cdot |\vec{b}_i|} \quad (7)$$

②直角判定：设定角度阈值 ε （通常取 $2^\circ \sim 5^\circ$ ），若满足 $|\theta_i - 90^\circ| < \varepsilon$ ，则需规整为标准直角，满足正交约束：

$$(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i) + (y_i - y_{i-1})(y_{i+1} - y_i) = 0 \quad (8)$$

③顶点校正：按最小二乘约束将不规则顶点投影至正交边线，得到校正顶点 $P'_i=(x'_i, y'_i)$ ，实现效果如图4所示。

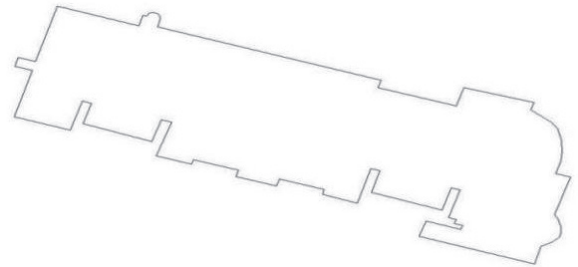


图4 建筑物单层水平轮廓线

3.6 模型构建及属性赋值

获取每层的水平轮廓线，并结合该层的高度值，构造该层的主体。比如，对于高度在 h_1-h_2 的层，轮廓线为 $(x_1, y_1) (x_2, y_2) (x_3, y_3) \cdots (x_n, y_n)$ ，可以构造：

$$(x_1, y_1, h_1) (x_2, y_2, h_1) (x_3, y_3, h_1) \cdots (x_n, y_n, h_1) ;$$

$$(x_1, y_1, h_2) (x_2, y_2, h_2) (x_3, y_3, h_2) \cdots (x_n, y_n, h_2)$$

对所有层构造的柱体进行堆叠融并，形成完整的建筑物模型，并根据《实景三维中国建设城市三维模型（LOD1.3级）快速构建技术规定》技术文件要求，

对城市三维模型的属性项进行赋值后，即可得到最终的 LOD1.3 级城市三维模型数据。

4 精度检测及结果分析

4.1 精度检测

选取 32 个典型样本点进行平面位置精度检测，对比外业实测坐标值与模型解算坐标值，计算平面差值 dx 、 dy 及平面总误差 ds ，检测结果如表 1 所示。

表1 平面位置精度检测记录

点号	检测坐标值/m		模型坐标值/m		差值/m		
	X_1	Y_1	X_2	Y_2	dx	dy	ds
1	****431.82	***416.27	****431.90	***415.95	-0.08	0.32	0.33
2	****393.20	***558.92	****393.22	***558.46	-0.02	0.46	0.46
3	****391.64	***698.35	****391.81	***698.51	-0.17	-0.16	0.23
4	****391.38	***603.22	****391.83	***603.58	-0.45	-0.36	0.58
5	****380.09	***706.27	****380.47	***706.27	-0.38	-0.01	0.38
6	****370.45	***554.68	****370.62	***554.01	-0.17	0.67	0.69
7	****387.89	***846.89	****388.16	***846.90	-0.27	-0.01	0.27
8	****426.65	***537.19	****427.30	***536.90	-0.65	0.29	0.71
...	...	...	...	...	...	...	...
32	****444.04	***392.16	****444.06	***392.66	-0.02	-0.50	0.50
中误差						0.57	

选取 28 个典型建（构）筑物样本进行高度精度检测，通过外业实地测量获取检测高度值与模型解算的模型高度值，计算二者差值并验证精度符合性，检测结果如表 2 所示。

表2 建（构）筑物高度精度检测记录

点号	基底坐标值/m		检测高度值/m	模型高度值/m	差值/m	精度符合性
	X	Y	H_1	H_2	dh	
1	****426.66	***537.19	5.75	5.26	0.49	符合
2	****544.11	***490.75	5.68	5.23	0.45	符合
3	****544.53	***491.89	5.69	5.27	0.42	符合
4	****536.64	***524.98	5.74	5.33	0.41	符合
5	****553.02	***469.32	5.77	5.31	0.46	符合
6	****555.96	***456.66	5.76	5.28	0.48	符合
7	****559.78	***436.64	5.73	5.62	0.11	符合
8	****467.08	***394.70	8.47	8.05	0.42	符合
9	****444.04	***392.16	3.66	3.54	0.12	符合
...	...	...	...	...	...	...
28	****410.76	***729.63	5.72	5.61	0.11	符合
中误差					0.29	

4.2 结果分析

通过研究提出的技术方法，成功完成 LOD1.3 级城市三维模型的快速构建，平面精度检测结果显示，所有样本点的平面中误差为 0.57m，高度精度检测中误差为 0.29m，满足 LOD1.3 级城市三维模型的精度要求。数据成果可清晰呈现模型整体形态，细节还原度较好，部分区域数据成果如图 5 所示。

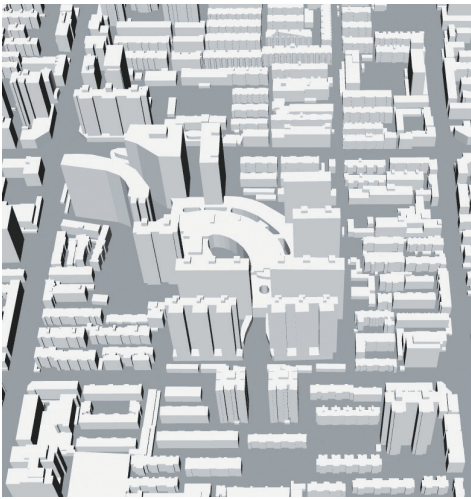


图5 LOD1.3级城市三维模型数据成果

5 结语

研究围绕 LOD1.3 级城市三维模型的自动化、批量化构建需求，以分类后的 LiDAR 激光点云为唯一数据源，构建了一套“法向量计算一点云分层切片—轮廓线提取—模型构建及属性赋值”的完整技术流程，实现 LOD1.3 级城市三维模型的流程化、自动化生产。通过计算点云法向量，结合分层切片与夹角阈值判定实现建筑精准分层，采用欧式聚类、二值化投影及轮廓直角化优化等方法，提升了模型构建精度与效率，实现“轮廓精准、高度真实”的建模目标，经过在郑州市中心城区开展试验，得到较好的应用效果，可满足实景三维城市、数字规划及应急管理实际应用需求。

受研究范围与数据条件限制，未来将进一步优化复杂建筑顶部附属设施的精准识别与剔除技术，以及农村区域点云分类与轮廓提取算法，提高复杂区域 LOD1.3 级城市三维模型自动化构建的精准度。

参考文献

[1] 张元杰,李雪梅,姜慧伟.城市三维模型（LOD1.3级）构建技术设计与工程应用[J].测绘通报,2025(S2):135-140.
[2] 李伟.基于多源数据融合的三维实景重建及研究[J].测绘与空间地理信息,2022,45(10):91-93,96.
[3] 焦元元,孙昌瑜,王腾.基于Mesh模型的LOD1.3城市三维模型构建方法[J].测绘与空间地理信息,2025,48(S1):141-142.
[4] 张育育,冉花,张剑华.基于北京三号卫星影像的城市三维模型（LOD1.3级）快速构建方法[J].测绘标准化,2025,41(1):76-80.
[5] 彭江帆.基于多源数据的城市三维模型（LOD1.3级）快速构建技术路线设计与实践[J].经纬天地,2024(6):1-6.
[6] 李玉娇.点云法向量估计研究[D].大连:大连理工大学,2019.

地理信息啥“东东”

◎ 马银杰

地理信息是隐形的“基础设施”，大到国防安全、国家主权、社会经济，小到个人生活服务、旅游休闲、安全出行，已得到广泛应用。国家在加大地理信息服务的同时，强化了行政（自然资源部门）监督与民事、刑事追责。为此，科普地理信息具有一定的现实意义。

一、地理信息一词来源

地理信息是由中文词源与现代词合成词。中文“地理”，最早出自《易经·系辞上》“仰以观于天文，俯以察于地理”，“地”指大地，“理”指纹理、条理、规律，即大地的条理与规律。现代词意来源，1963年加拿大测量学家罗杰·汤姆林森，把地理信息作为现代术语使用。20世纪70年代后，随着GIS普及，“地理信息”成为通用固定术语。

二、地理信息概念

地理信息，是指与地理环境要素相关的空间位置、属性特征及时序变化的数字、文字、图像等信息的总称。其中，地理环境是指一定区域内，自然条件与人类活动形成的社会条件的总和，是地球表层（岩石圈、水圈、大气圈、生物圈、人类圈）相互作用的界面层；空间位置是指经纬度、坐标、地址、区域范围；属性特征是指该位置上的内容，如人口、海拔、土地类型、建筑名称；时序变化是指采集的有效时间、动态变化。

简单地说，地理信息就是“在哪里、是什么、什么时候”。

三、测绘、地图、地理信息的关联

测绘、地图、地理信息三者紧密相连，构成数据采集、处理、可视化表达的完整链条。测绘是指对自然地理要素或地表人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等进行测定、采集、表述，以及对获取的数据、信息、成果进行的活动，为地理信息提供原始、精准的定位数据。没有测绘，地理信息是天米之饮、无源之水。地图是指按照数学法则，用符号、颜色、注记、绘制综合在载体上，呈现地球（或星体）表面空间分布、联系与变化的图形图像，是空间信息的载体，是地理信息的可视化表达。地理信息是对测绘原始数据进行加工、整合、建模，生产地图平台，输出地图（可视化界面）的内容和数据源。

简单地讲，测绘是采集原始空间数据，地理信息是处理数据，地图是输出可视化成果。

四、测绘、地图的法律法规

地理信息中的测绘活动和地图管理有相应法律法规，分别是《中华人民共和国测绘法》《中华人民共和国个人信息保护法》《中华人民共和国测绘成果管理条例》《基础测绘条例》《中华人民共和国测量标志保护条例》《地图管理条例》。规范的主要事项是：

①不得擅自建立相对独立的平面坐标系统；②不得擅自从事测绘活动；③不得擅自发布重要的地理信息；④不汇交测绘成果；⑤不经审核，编制、出版、展示、登载相关地图；⑥不可侵占、损毁、拆除或者擅自移动基础测绘设施；⑦不可在测量标志占地范围内烧荒、耕作、取土；⑧不可在测量标志上架设通信设施、设置观望台、搭帐篷、拴牲畜、设置其他有可能损毁测量标志的附着物。违反上述事项轻则责罚，重则判刑。

五、常见注意事项

地理信息不容小觑，生活工作中不经意的习惯以及地图常见的错误也应注意防范。其中，生活工作主要是：①手机过度定位；②分享照片发原图；③使用无人机拍照；④用微信、QQ等公网软件发送涉密地形图、坐标数据；⑤将涉密测绘成果存入公有云盘或联网电脑；⑥随意用U盘、个人电脑拷贝、存储敏感地理数据；⑦打印涉密图纸、草稿纸未粉碎即丢弃；⑧学术论文采用敏感信息。以上情景可能导致敏感区域位置、设施、参数被追踪，出现泄密隐患。

地图常见错误有：①公开出版、展示、登载、销售、进口、出口的地图（含地图产品）错绘我国国界线；②漏绘属于我国领土的台湾岛、南海诸岛、钓鱼岛、赤尾屿等重要岛屿；③随意标注涉密地理信息。上述事项可能威胁国家安全、社会公共利益，引起外交纠纷，损害国家主权。

一句话总结：地理信息，是看不见的国防线、经济线、生命线，事关经济建设、国防建设、社会发展，必须严防死守。真可谓，“地理信息藏机密，生活工作需注意。测绘地图两重点，制作使用依法律。”（作者单位：平顶山市自然资源和规划局）

他问、自问、天问

◎ 陈鲁民

人生在世，要想活得清醒而有价值，豁达而有理性，当常有三问：他问、自问、天问。

1935年，日寇疯狂侵华，狼烟四起，兵荒马乱，水深火热，民不聊生。值此中华民族危急存亡之际，时任南开大学校长张伯苓提出振聋发聩的三问：“你是中国人吗？你爱中国吗？你愿意中国好吗？”这就是著名的“他问”，问每个中国人，激励国人团结起来，万众一心，赴汤蹈火，共御外侮。张伯苓的“爱国三问”，被誉为历史之问、时代之问、未来之问，我们要一代一代问下去、答下去，让爱国情怀永驻人间。

1942年7月20日，在育才学校三周年纪念会上，教育家陶行知在讲话中要求学校的师生员工每天问自己四个问题：“我的身体有没有进步？我的学问有没有进步？我的工作有没有进步？我的道德有没有进步？”坚持这样的自问，要求自己每天进步、每月进步、每年进步，成绩和优点就会聚少成多，积沙成塔，使自己日臻完善，不断提升，成为一个“大写”的人。

两千多年前，屈原写出了《天问》哲理长诗，以170余问贯穿全篇，核心是对宇宙、自然、历史、天命的大胆质疑与理性叩问。开篇追问宇宙本源，质疑天地未形、混沌初开的成因，探究日月星辰、昼夜晦明、天体结构与山川地理的规律。继而叩问鲧禹治水、后羿射日



等上古神话，质疑传统叙事的合理性，并聚焦夏商周兴衰，追问天命与人事的关系，提倡“天命无常”，反对“赏罚无据”，展现出强烈的怀疑精神与朴素的唯物思想，是中国文学史上极具思想深度的奇作。

这三问各有其用，缺一不可，运用得当，可相得益彰。“他问”是为了唤醒民众，激励世人，具有很强的社会意义，是推动历史前进不可或缺的动力。杂文家鲁迅发问问到“中国人失掉自信力了吗”？驳斥“中国人失掉自信力”的悲观论调。散文家龙应台发声“中国人你为什么生气”？批评了懦弱、自私、怕事、沉默、麻木的国民心态。作家斯宾塞·约翰逊著书：“谁动了我的奶酪？”告诫人们不要害怕失去，与其怨天尤人，不如及时调整自己，主动适应变化，在改变中寻找新机会。他们都从不同侧面来激发精神、教化民众、启蒙知识、传播文明，因而成为文坛名篇，传诵一时。

“自问”是为了自我反省，净化灵魂，是修身养性的重要手段。思想家卢梭自问：“在充满虚伪

的社会中，我是否还能保持自然人的本真？我的过失与美德究竟如何？”哲学家尼采自问：“人是应当被超越的，你将如何超越自己？”诺贝尔和平奖得主阿尔伯特·施韦泽自问：“我作为一个享有特权的欧洲学者，我的生命应该如何服务于世界？”因为坚持不断自问反省，不甘平庸，他们后来都成了博学多识、建树不凡的一代名流，深刻影响着后人。

“天问”是为了探寻世界，上下求索，溯源既往，面向未来。宇宙的来源与发展，地球的形成与命运，人从哪里来，到哪里去，外星文明是何面目等等，至今为止，我们还有许多这样悬而未决的疑问。所以，这个社会，既需要一些人忙着发家致富、建功立业，也需要有一些人仰望“头顶星空”，始终关心和探讨这些问题，不断地提问，又不断地回答。从屈原时代到现代化的今天，“天问”二字跨越时空，始终代表着求真、勇敢与超越，成为人类探索精神的文化符号。

天有四季，春夏秋冬；人有三问，他问、自问、天问。他问能净化社会，激励世人，矫正风气，催人向上，营造健康空间；自问能使人自尊、自爱、自强、自重，站稳道德高地；天问能让我们活得明明白白，踏踏实实，理性而清醒，睿智而达观，诗意地栖息。（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）

沙棘与挂篮的交响

◎ 孙东勋



“春风里万物生，花萼绿衣山海梦，桥隧相连，墩柱擎天，春来耕耘且行安！”

沙棘明黄小花在和煦的春风里摇曳生姿，枝头报春鸟叽叽喳喳，唱响春天的歌谣。

罗航就像他的名字一样，在万峰沟壑穿行中笃定前进的航向，直抵沙棘呼唤的春天。他深懂，那些高空舞者正用始终如一的初心，雕琢出独一无二的匠品，最难忘一次又一次挂篮悬浇的坚守斗志与奔跑身姿。

当他爬上墩顶，俯视脚下的一切，“一览众山小”的胸臆酣畅淋漓，让这位饱经风餐露宿的书生仿佛猛然变成英雄。在他的英雄梦里，有直插云霄的桥墩，有风雨袭来的奋斗，有跨山越峰的彩虹，更有那一次次刻骨铭心的战斗往事……

当他把一方方藏着科技温度的混凝土，用坚韧与匠心浇筑进坚如磐石的桥墩，就像被岁月收纳和珍藏的一段段光阴，渐渐散发出春天的芬芳，挺起的脊梁堪比长城的坚固和雄伟。他不会忘记，星空夜晚的璀璨斑斓，每一次混凝土浇筑时缓缓流淌出的美妙音符，更不会忘记那一朵朵绽放在山谷之巅的挂篮稳稳向前移动的从容步履。

“请正确穿戴反光衣、安全帽，严禁酒后作业！”一句温馨提示在谷底悠悠回响，汨汨流淌的蒲河早

已将一举一动牢记心间。安全，字眼充斥着智慧、哲思与人文，载着千家万户的团圆归期，也刻着走南闯北圆梦人铿锵前行的坚实足迹。一句平安承诺，足以让“郭安全”成了“小陀螺”，奔波的身影牵起平安与乡愁，让他在任何时候都比别人更懂得“谨慎”二字的真正含义。站在挂篮底模旁，他的凝思里绽放着自信与坚定的光芒，还有大桥成长岁月里的期盼与梦想。平平安安地安装、走行、吊挂、锚固，安全帽里藏着细节，安全带上镌刻着功勋，在平凡的日子里闪闪发光。

147米高，何惧哉？塔吊比它还要高，攀登到山顶，超越了山峰，向彩云送去缕缕问候。心比天高，比风野，比山岳沧海更辽阔。那位业务娴熟、操作规范的年轻人说，塔吊是他的伙伴，是他的灵魂，是他的一切，他更懂他。

220米的主跨、空腹式的混凝土刚构桥、铁路建设史上首次、上下同时悬浇的挂篮，让这座承载着历史厚重的革命老区——庆阳焕发出别样光彩。菱形挂篮的几何线条，三角挂篮的智慧斜爬，无不闪耀着建设者无与伦比的智慧与创造。在架起的全站仪里，魏高工窥见日月星辰，瞄准一微一毫，眼镜上的太阳花铭记着他付出汗水的奇迹，握在手里的纸和笔记录着山河的分量，那扬在脸上的自豪和微笑与天地同在、与日月同辉。

每一步、每一个循环都如履薄冰、如临深渊，三级风刚刚好，恰到好处地熨帖着春日美景与实干创效的和谐画卷。谷底一览无余，山梁变成矮个，安质、物资、机械及工区驻点、劳务现场负责人、工班长各就各位，细看、严查、深探，不放过任何一个微小环节。后锚扁担梁上的型钢、钢板焊接点，与主桁连接的垫座、螺栓、销轴，都似一部精密仪器的零件，各司其职，牵起这台“大力神”的神经末梢，协同发力，拧紧牢不可破的一个个“安全阀”，日夜守护着一道道关键工序的“质”与“安”。

带班、跟班、盯班、班前讲话、安全条件确认，一一验证着“穿透”手段的狠、实、韧与效，也让倾涛这位“大管家”的内心波澜化为春日丽景，挑起他每月计划超亿的野心与斗志。正如沙棘点燃的金黄一样，焕发出不可战胜的勇气和前所未有的坚韧，用激情、实干和智慧鸣锣开道，注定会书写出攻坚拔寨、期到必成的优异答卷。

崎岖山道上星星点点的沙棘，在春日暖阳下吮吸、抽芽、开花、向上。那一刻，我似乎明白了，原来人生光阴里的故事并非一气呵成，前进的每一步都是时代回响与未来展望的交响。春光明媚，未来可期，三四月做的事，在八九月自有答案。☑（作者单位：中铁大桥局集团一公司）

风梳林海醉故道

◎ 欧阳华

三代深耕六秩长，敢教沙海换绿妆。

狂龙缚住千重碧，故道铺开万里苍。

风止步，鸟安房，青纱浩荡护康庄。

今朝漫步层林下，犹带黄河旧日霜。

北纬 32 度至 36 度，这条被造物主偏爱的纬度线，在黄河奔流的中原腹地，铺展着一片绿色汪洋——河南省商丘市民权林场申甘林带。76 载寒来暑往，青丝染霜；三代人薪火相传，以骨为薪，以心播绿，硬是在这“风沙口”上，托举出一道绵延 25 千米的绿色长城——申甘林带。

这里，曾经黄沙吞田、飞鸟绝迹；如今，层林涌翠，碧浪接天。三代造林人与沙斗，从荒芜走向葱茏，从绝望生出希望，书写了一部人与自然博弈的生命史诗。

林带深处，耄耋之年的护林员老张佝偻着身子，如一株苍劲的老泡桐。他粗糙的手掌缓缓抚过斑驳的树干，纹路里仿佛还嵌着半个多世纪前洗不净的沙粒。那是岁月的刻痕，更是奋斗的勋章。作为林场第一代建设者，老张的一生，就是

申甘林带从黄沙漫舞到苍翠婆娑的缩影。

“那会儿啊，满眼都是沙丘，风一吹，天地昏黄，混沌不开，沙粒子打在脸上生疼，走一步陷半步，连喘气都带着沙腥味。”老张的声音沙哑，像被风沙磨过的树干，他刚来的那个春天，在他的记忆里依旧清晰如昨。刚刚从北林大毕业，18 岁的青年，背着简单的行囊，来到申集村，迎接他的是“一碗水半碗沙”的绝境，是狂风卷沙、寸草不生的荒原。

树苗栽下去，一夜风沙起，便被埋得无影无踪；再栽，再被吞噬，往复循环，希望一次次被风沙吞噬，又一次次被刨出。这群年轻人，没有一个退缩。他们白天在沙地里挖坑、栽苗、培土，夜里围着篝火，摸索造林诀窍，终于创造出“前挡后拉，四面围攻”的土办法——以灌木为盾，以乔木为锚，步步为营，层层设防。硬生生让柔弱的幼苗，在狂暴流沙里扎下第一批倔强的根须。

谁能想到，如今这片浓荫蔽日、鸟语花香的林海，脚下曾是被风沙掩埋的农田与村庄？翻开历史，疮痍触目惊心。泛黄的《归德府志》

记载：“黄河决堤，飞沙蔽日，田庐淹没，饿殍载道。”字字泣血，诉说着 600 多年黄河夺淮留下的生态创伤。1855 年黄河北徙，留下的不是沃野千里，而是横亘数千米的故道、连绵起伏的沙丘，以及无尽的苦难。

“一年一场风，从春刮到冬；从春种到夏，到秋一场空。”“大风起，飞沙舞，一年四季都喝土；狂风掀起茅屋顶，沙湮田垄禾苗枯。”民权的老辈人记忆里，那是被风沙锁喉的岁月，是 20 世纪五六十年代的真实写照。风沙最大的时候，天地昏黄一片，伸手不见五指。“村里村外堆满沙，大风一场不见家。”孩子们最怕春天的沙尘暴，狂风卷着黄沙呼啸而来，躲在屋里，也能听见风沙拍打门窗的嘶吼，仿佛要将整个村庄吞噬。天亮起床，棉被上落了一层厚厚的黄沙。大风一起，刮到犁底；大风一停，沟满壕平。村庄在沙逼人退中挣扎，“外村姑娘们都不愿意往我们这边嫁，谁愿意一辈子守着一片沙窝子啊。”八九十岁的王奶奶坐在炕头，望着窗外郁郁葱葱的果园，眉眼间满是感慨，“现在好了，林子起来了，风沙没了，日子甜了，



外地的姑娘都抢着来。”

民权林场办公室主任高振标的电脑里，一组卫星影像对比图令人震撼。“庄稼一年种几茬，十年九年被沙压。”20世纪60年代，这里只是零星分布的斑驳绿色，像荒原上绝望的叹息；如今，深绿色的林带蜿蜒数十里，横亘在黄河故道上，西起申集村，东至甘庄村，东西长25千米，最宽处达4千米，连绵不绝，气势磅礴。“申甘林带就是一道生态屏障，”高振标指着地图，语气庄重，“它锁住了风沙，护住了豫东平原的粮食安全，让曾经的‘风沙口’，变成了如今的‘米粮仓’。”

坚韧终将改写命运。如今，卫星影像图上的申甘林带，已从零星绿斑化作一条深绿色的巨龙，巍然横卧。一组组数据，见证着这片土地的蝶变：林带内风速降低30%，空气湿度提高15%，月扬沙日从过去的20多天，减少到不足3天。更令人惊喜的是，这片人工林逐渐形成了独立的生态系统，成为野生动物的乐园。科研人员在这里观测到180多种陆生动物，其中包括金雕、大鸨等十多种国家保护动物，曾经绝迹的飞鸟，如今在林间筑巢、

栖息，叽叽喳喳的鸟鸣，成为林海最美的乐章。

绿色，在此生生不息。夕阳西下，余晖洒向林海，镀上一层金色的光晕。站在瞭望塔上，目光所及，皆是无边无际的绿色，风吹过，林海翻涌，发出沙沙的声响，仿佛在诉说着76载的风雨沧桑。“你看这些树，就像我的孩子，”老张的目光温柔，眼角的皱纹里满是欣慰，“刚栽下时，它们还是手指粗的幼苗，现在都长成了参天大树。我的孙子去年也考进了林场，成了第三代护林人，这林子，有人守了。”

林畔的民权县城，灯火次第亮起，星星点点，映照在这片林海。这座曾经被风沙困扰的小城，如今在绿色的怀抱中安然入睡；林场旁的农田里，小麦绿油油地铺陈开来，随风起伏，充满了生机与希望。“绿水青山就是金山银山，”老张轻声念叨着这句话，脸上的皱纹舒展开来。这片林海，不仅改变了生态环境，更成为当地群众脱贫致富的“绿色银行”，林下经济、生态旅游、碳汇交易……绿色的效益，正在持续释放，滋养着这片曾经贫瘠的土地和人民。

夜幕降临，林海隐入黑暗，却

并未沉寂。每一棵树，都在默默生长；每一寸土壤，都在孕育希望。这片绵延在黄河故道上的绿色奇迹，见证着人与自然从对抗到和谐共生的历程，彰显着中国人的坚韧与坚守，昭示着生态文明建设的中国智慧。

76载风雨兼程，三代人初心不改。他们以青春为墨，以汗水为笔，以坚守为纸，在黄河故道上，书写了一曲可歌可泣的绿色赞歌。那些曾经在风沙中挣扎的幼苗，如今已蔚然成林，锁住了狂龙，铺就了绿洲；那些扎根荒原的造林人，用一生的坚守，深刻诠释了“功成不必在我，功成必定有我”的责任与担当。

今朝漫步层林下，犹带黄河旧日霜。黄河故道的风沙，早已被绿色固牢；曾经的苦难，早已化作前行的力量。这片林海，是三代造林人用青春与热血铸就的生态丰碑，是人与自然共生共赢的典范，更是中华民族自强不息、坚韧不拔的精神象征。它将永远扎根在黄河故道，生生不息，向着更辽阔的明天，续写属于中国的绿色传奇。（作者单位：河南大学文化传承与创新研究中心）

《资源导刊·信息化测绘》 征稿启事

《资源导刊·信息化测绘》(ISSN1674-053X/CN41-1389/D)是经国家新闻出版管理部门批准,由河南省自然资源厅主管、河南省测绘地理信息技术中心承办的国内外公开发行的科技类综合期刊。本刊所发论文可作为河南省测绘地理信息专业中高级职称申报评审材料,是测绘地理信息从业者职称评审的重要学术支撑。为进一步汇聚行业智慧、推动测绘科技成果转化,现面向广大测绘地理信息领域科研工作者、工程技术人员、高校师生及相关行业从业者公开征稿,有关事宜如下:

一、征稿栏目

本刊常设两大核心栏目,精准覆盖测绘地理信息领域研究与应用方向,贴合职称评审学术成果要求:

1. 学术研究:刊载测绘地理信息领域前沿理论研究、基础学科探索、新技术研发等具有创新性和学术价值的论文;
2. 技术应用:收录测绘工程实践、技术推广应用、行业解决方案、实际案例分析等具有实用价值的技术成果类论文。

二、来稿规范要求

来稿务求论点明确、论据充分、数据可靠、逻辑严密、层次分明、文字精练,同时需严格遵循以下格式规范:

1. 文章题目:要简洁、准确概括研究核心,一般不超过 20 字。
2. 正文标题:文内各级标题题号一律顶格书写,标题题号分级采用 1;1.1;1.1.1 等标注形式,结构层次以二级或三级为宜,避免层级过多。
3. 论文摘要:以提供文献内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切记述文章重要内容;避免使用“本文”“作者”等作为主语,字数不超过 250 字。
4. 关键词:选取 3~5 个意义明确的专业术语,准确反映研究方向、领域及研究地点,词与词之间用分号“;”分隔。
5. 首页注脚:在首页脚注处注明:①基金资助项目需注明基金名称及编号;②第一作者简介,包含姓名、出生年份、性别、民族、学历、职称、从事的主要工作。
6. 正文要求:含摘要、图、表、参考文献在内,总篇幅以 4000~6000 字为宜,内容需完整包含研究背景、方法、结果、结论或讨论等核心部分;文中量和单位使用中华人民共和国法定计量单位最新标准,地质符号、公式字母及符号需准确标示大/小写、正/斜体,上下角标字符位置高低区分明显,标点符号使用规范准确。
7. 图表规范:文中仅附必要图表,图件为 JPG 格式并单独拷贝原图另发;文稿中需明确标注图表位置,图框下注明图号、图题和图注,表格统一使用三线表,表名置于表格上方;图表文字需清晰、字体规范,若存在文字不清、字体过小问题,需重新制作,确保印刷清晰。
8. 参考文献:引用他人资料和结论需按《著作权法》规范著录,采用顺序编码制(按文中出现先后次序编码),仅列出与本文相关的公开发行文獻;多次引用同一著者文献仅编一个号,正文中标注首次引用的文献序号。

三、注意事项

1. 投稿需将论文电子文档+查重报告(万方、知网检测均可)发送至编辑部邮箱,论文重复率须控制在 15% 以内,严禁一稿多投;
2. 论文文末请单独附上作者的通信地址、联系电话等有效联系方式,便于编辑部沟通对接;
3. 稿件文责自负,编辑部有权对来稿进行文字和技术性删改,对稿件实质性内容的修改,将提前征求作者同意;
4. 编辑部在收到来稿后 2 个月内答复录用结果,若 2 个月未接到本刊采用通知,作者可自行处理稿件;
5. 本刊拥有印刷版、光盘版、网络版等电子版本,稿件一经采用,所有版本的版权即由作者转让给本刊,论文发表后将作为作者赠送 2 本样刊。

四、投稿方式

欢迎广大测绘地理信息领域从业者踊跃投稿,本刊将以专业的编审标准、高效的处理流程,为广大作者搭建优质的学术交流平台。

投稿邮箱:xxhch2015@163.com

联系电话:0371-65941858

肖峰到固始县茶棚村调研乡村振兴工作



本刊讯 日前，河南省测绘地理信息技术中心党委委员、副主任肖峰带领中心基础测绘处、办公室、直属单位党委及河南省测绘院相关人员，赴固始县茶棚村开展乡村振兴帮扶调研。固始县委统战部副部长、县工商联党组书记张永祥，黎集镇人大主席汪进军等陪同调研。

座谈会上，驻村第一书记扶彦代表驻村工作队，就驻村以来巩固拓展脱贫攻坚成果、特色产业发展、民生保障改善、基层党建推进等工作进行全面汇报。2026年，茶棚村新增落户企业7家，稻虾综合种养扩面200余亩，为乡村发展注入强劲动力。

肖峰认真听取汇报，对茶棚村驻村工作队的辛勤付出和各项工作取得的阶段性成效给予高度肯定。针对茶棚村下一步发展，肖峰提出要求：一要持续巩固工作成效，立足当前工作成果，全面总结提炼好经验好做法，以务实作风推动帮扶工作走深走实；二要牢牢守住返贫底线，健全动态监测帮扶机制，精准落实帮扶措施，坚决筑牢防返贫坚固屏障；三要大力发展特色产业，立足板材加工、虾稻种养等资源禀赋，坚持集思广益、拓宽思路，锚定产业发展切入点，打造特色增收品牌，持续激活乡村发展内生动力；四要依托自然资源优势，充分发挥测绘专业技术赋能作用，坚持“一村一品”定位，科学规划村庄布局，助力宜

居宜业和美乡村建设；五要强化基层党组织建设，夯实基层战斗堡垒，以争创“五星党支部”为抓手，推动基层治理从“要我振兴”向“我要振兴”转变，凝聚乡村发展强大合力；六要扎实推进树立和践行正确政绩观学习教育，牢固树立以人民为中心的发展思想，把为民办事、为民造福作为工作出发点，切实提升群众获得感、幸福感、安全感；七要绷紧安全生产之弦，聚焦农村生产生活、住房交通、国道沿线等重点领域，加快完善防护网、减速带等安全设施，全面排查整治各类风险隐患，全力守护群众生命财产安全；八要严守廉洁自律底线，恪守纪律规矩，以清正廉洁作风保障各项帮扶工作规范有序开展。

调研期间，肖峰为茶棚村党支部和驻村工作队赠送《习近平关于树立和践行正确政绩观论述摘编》等学习资料及工作笔记本，助力基层党员强化理论武装、提升履职能力。同时，随行爱心企业积极践行社会责任，现场向茶棚村捐赠2万元，并为村民带来鸡苗、挂面等实用物资，把帮扶举措落到群众生产生活实处，以实际行动助力村民增收致富，为茶棚村乡村产业发展注入暖心力量。

固始县茶棚村驻村工作队将以此次调研为契机，严格落实各项工作要求，锚定目标、真抓实干，全力推动乡村振兴各项工作再上新台阶。☐（周正/文、图）

