

# 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 4 期

总第522期

## 走进“十五五” 实干开新局

——河南省测绘地理信息行业一季度“开门红”全景纪略

守牢测绘基准底线 赋能中原高质量发展

——河南省测绘院以创新之力筑牢时空基石

ISSN 1674-053X



9 771674 053074



中旬 定价: 10元

扫码关注微信

# 河南省测绘地理信息技术中心举行树立和践行正确政绩观学习教育集体学习研讨



本刊讯 4月17日，河南省测绘地理信息技术中心党委理论学习中心组召开专题学习会，聚焦深学细悟习近平总书记关于树立和践行正确政绩观的重要论述，牢牢把握“政绩为谁而树”根本问题，以正确政绩观引领测绘地理信息事业高质量发展。河南省自然资源厅党组成员、副厅长景志刚主持会议并作总结讲话，河南省测绘地理信息技术中心党委委员、副主任肖峰参加会议。

会议学习习近平总书记关于树立和践行正确政绩观的重要论述“为民造福是最大政绩”篇目及相关学习教育文件精神，推动理论学习入脑入心、走深走实。

景志刚在学习研讨中指出，本次专题学习重点突出、成效务实，要坚持把为人民造福作为最大政绩，推动测绘地理信息事业行稳致远。景志刚结合学习主题与当前工作提出三点要求：一要深刻理解“政绩为谁而树”核心要义，解决好思想认识的总开关。从党的性质宗旨看，必须坚决纠治统计造假、急功近利、盲目决策等偏差问题，坚守为民造福根本立场；从测绘地理信息工作属性看，要牢牢把握鲜明政治属性，确保政绩体现对党忠诚、对人民负责；从河南发展大局看，2026年作为“十五五”开局之年，要以正确政绩观护航事业转型发展，服务省委“1+2+4+N”目标任务体系落地。二要对照“政绩为谁而树”的要求，深入查摆和纠治存在的问题。坚决防止本位主义，破除

数据壁垒、推动共享共用；坚决防止形式主义，杜绝重建设轻应用、重数字轻实效、重留痕轻落实；坚决防止急功近利，多做打基础、利长远的潜功；坚决防止数据注水，严守数据质量生命线，杜绝假数据、注水数据。对查摆出的问题要建立台账、明确责任、限期整改，与审计整改、民主生活会整改、年度重点工作一体推进。三要以正确政绩观引领发展，奋力推动事业高质量发展。坚持政治引领，筑牢事业发展根基；坚持实干导向，在服务大局中彰显担当；坚持为民宗旨，让测绘地理信息成果更好惠及群众；坚持改革创新，激发数字化、智能化转型新动能；坚持严实作风，锻造过硬测绘地理信息队伍。

会议还组织观看中央电视台《焦点访谈》警示教育视频“‘码’出来的数据”，学习政绩观偏差典型案例，以案为鉴、以案明纪、以案促改。在研讨交流中，河南省测绘地理信息技术中心基础测绘处、河南省遥感院负责同志结合岗位职责与工作实践分别发言，谈思想认识、讲问题不足、明改进方向。大家紧扣专题主题，交流务实深入，达到统一思想、凝聚共识、促进工作的目的。

河南省测绘地理信息技术中心一级调研员、各处室负责同志、所属各单位党政主要负责同志、河南省测绘学会和河南省地理信息产业协会党组织负责同志参加会议。☑（周正 / 文 李华 / 图）

# 以测绘实绩践初心 以正确政绩观启新程

◎ 本刊评论员

测绘地理信息工作是经济社会发展的“先行官”，是生态文明建设的“生命线”，更是检验干部政绩观的“试金石”。近年来，河南省测绘地理信息系统凝心聚力、迎难而上，在实景三维建设、技术创新、服务赋能等方面交出亮眼答卷，用精准数据、务实成果，诠释了正确政绩观的深刻内涵。从实景三维河南建设提前超额完成任务，到北斗三号应用创新提升耕地监测效率；从构建自主可控软件基础体系，到测绘基准成果供给量大幅增长，这些成就的取得，根本在于河南测绘人始终坚守“功成不必在我、功成必定有我”的政绩观，始终把为民造福、实干兴业作为工作出发点和落脚点。

树立正确政绩观，首在坚守为民初心，把“群众所需”作为“政绩所向”。河南测绘人坚持以人民为中心的发展思想，把群众满意作为衡量政绩的根本标准，把解决群众急难愁盼问题作为工作重中之重，优化测绘基准成果供给，为群众生产生活、企业发展提供精准空间支撑；依托北斗三号技术提升耕地卫片执法监测效率，守护群众“粮袋子”安全；推进《河南省测绘条例》修订，规范测绘行为、保障广大人民群众合法权益。每一项工作都饱含对群众的深情，每一份成果都彰显为民担当，让每一项测绘成果都真正惠及民生。

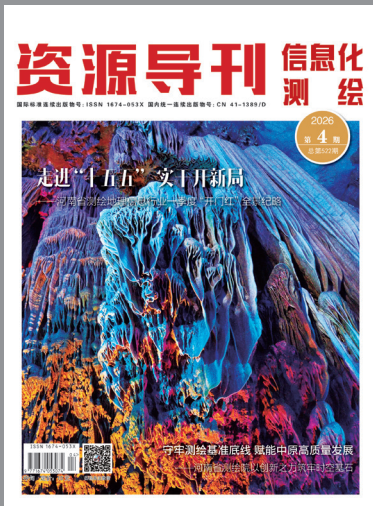
树立正确政绩观，要在坚持实干为要，把“务实笃行”作为“成事之基”。“业绩都是干出来的，真干才能真出业绩、出真业绩。”河南测绘系统干部职工扎根一线、真抓实干，用脚步丈量中原大地。实景三维河南建设提前超额完成任务，背后是测绘人不畏酷暑严寒、踏遍山川田野的坚守；自主研发成果丰硕，初步构建自主可控的实景三维软件基础体系，背后是科研人员潜心钻研、反复试验的执着；“三步走”战略稳步推进，背后是全体干部职工履职尽责、精益求精的担当。实践证明，正确的政绩观要靠实打实的行动干出来，唯有坚持实事求是，把干事热情和科学精神结合起来，才能创造出经得起实践、人民、历史检验的实绩。

树立正确政绩观，贵在强化创新引领，把“长远发展”作为“奋斗目标”。河南测绘系统干部职工正确处理眼前与长远、显绩与潜绩的关系，立足长远、勇于创新，推动测绘工作从传统向新型、从数据服务向智慧赋能转型。北斗三号应用创新突破，为自然资源管理、农业生产等提供精准服务；自主研发的实景三维软件体系，打破技术壁垒，支撑数字河南建设；对接新质生产力发展需求，优化业务布局，为产业升级注入测绘动能。这种着眼长远、久久为功的做法，正是正确政绩观的生动体现。

树立正确政绩观，重在坚守责任担当，把“忠诚履职”作为“根本准则”。多年来，河南测绘系统干部职工不断强化责任意识，把个人追求融入事业大局，以坚韧与决心履职尽责，为自然资源管理、高质量发展等提供全方位支撑，彰显新时代测绘人的担当。工作中，他们坚持底线思维，强化保密、数据、安全生产管理；坚持党建引领，打造忠诚干净担当的干部队伍；健全工作机制，完善考核评价体系，引导干部职工摒弃“形象工程”“虚假政绩”，在平凡岗位创造了不平凡业绩。

测绘兴则事业兴，政绩正则事业旺。河南测绘地理信息工作的辉煌成就，是实干担当的成果，更是正确政绩观引领的必然。当前，测绘地理信息事业处于关键跃升期，面临新机遇与挑战。新时代测绘人要进一步树牢正确政绩观，坚守为民初心、坚持实干为要、强化创新引领、坚守责任担当，以“功成不必在我”的境界和“功成必定有我”的担当，精准丈量中原大地、绘就发展蓝图，为数字河南建设、河南高质量发展提供有力测绘技术支撑，让正确政绩观在实践中落地生根，奋力书写新时代测绘地理信息事业崭新篇章。☑

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：赵慧芬  
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4期 总第522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  
姚宣斌 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 郭幸生  
副主任 肖 峰 武永斌 王军胜 陈政民  
成 员 赵海滨 赵立明 孙常建 李 辉 许翔云  
安玉琴 寿燕翻 王红闯 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 以测绘实绩践初心 以正确政绩观启新程

## 国内要闻

4 全国地表形变成果在线服务系统上线 等8则

## 时政传递

6 河南省测绘学会十届四次理事会暨2026年工作会议召开

7 河南省地理信息产业协会召开三届五次会议

河南粮食投资集团到省测绘地理信息技术中心调研交流

## 特别关注

8 走进“十五五”实干开新局

——河南省测绘地理信息行业一季度“开门红”全景纪略

## 测绘广角

13 河南土地二级市场迈入“云监管”时代

14 低空经济测绘遥感及时空大数据应用座谈会在郑州召开

桐柏县自然资源局开展地图市场与测绘行业专项排查

## 经天纬地

15 守牢测绘基准底线 赋能中原高质量发展

——河南省测绘院以创新之力筑牢时空基石

## 学术研究

18 问题驱动式教学在“遥感原理与应用”理论课程中的实践探索

## 技术应用

23 光伏建设背景下荒漠区植被覆盖变化遥感评估研究

27 基于多源遥感数据的露天煤矿边坡监测技术研究

31 基于PS-InSAR的机场时序形变监测

35 基于生态要素分析的景观格局生态风险模拟评估

——以攀枝花市为例

39 一种纯视觉驱动的端到端无人机定位导航新方法

44 基于全站仪自动监测和神经网络校正的深基坑变形监测研究

47 高分影像在乡镇级林地资源调查与边界确权中的实践

51 基于LiDAR数据与卫星影像多尺度特征融合的水域提取研究

55 无人机LiDAR技术在上曹河断面测量中的应用研究

59 基于优化卡尔曼滑动滤波算法的压差式静力水准数据处理

## 文苑撷英

62 近水楼台“不得月”

63 蓝花楹下的春城诗篇

## 封面

桂林阳朔银子岩 陈棉/摄



**关注** 全国地表形变成果在线服务系统上线

近日，中国测绘科学研究院研发的全国地表形变成果在线服务系统正式上线。该系统依托自主研发的2022版至2024版全国地表形变一张图，核心具备全国地表形变数据浏览、感兴趣区域查询、数据成果及监测服务在线申请等功能。

该系统支持用户注册登录后，查阅2022~2024版全国地表形变监测成果，直观掌握全国及重点区域地表形变空间分布特征。系统建立差异化服务机制，200米分辨率形变监测成果面向所有注册用户免费开放，超范围、更高分辨率成果可协商提供；同时支持用户定制高精度监测服务，自主指定监测时段、范围、数据源及成果分辨率，满足专业领域精细化需求。

用户可登录系统点击“成果与服务申请”提交需求，系统将依托核心技术与优质数据提供精准服务。该系统旨在推动地表形变数据在多行业的应用，助力测绘地理信息成果服务国家战略与行业高质量发展。

**《智能航运2030行动计划》印发 北斗发挥重要作用**

近日，交通运输部等四部门联合印发《智能航运2030行动计划》（以下简称《计划》），其中，北斗系统被明确列为核心支撑，在航海保障、通信导航等关键领域发挥重要作用。

在航海保障智能化攻关方面，《计划》明确提出，提升高精度卫星定位、高可信群体测绘、高动态水文气象导航、高可靠船岸通信和数据交换技术水平，加强水面目标辨识、星（地）基北斗导航增强、时空数据标准化、低轨卫星通信等相关装备的协同攻关。

在通信导航设施建设上，《计划》明确提出加强与甚小口径终端卫星通信系统、北斗短报文和5G等多信道连通，扩大船舶通信覆盖范围、提升通信服务质量。推进高精度、高可靠的陆海空天一体化北斗导航体系建设，完善北斗地基和星基增强设施建设布局，提高全航程可用率；加快多功能航标建设，提升助航基础设施与船舶通导设备协同水平。

**全球首创！我国成功研发全球性光学导航定位技术**

3月24日消息，清华大学智能微系统与纳卫星团队历时20年攻关，成功研发全球首创的光学导航定位

技术与系统。

该技术破解传统导航局限，针对无线电导航易受干扰、天文光学导航精度不足的问题，在卫星上创新搭载高亮度光学信标，原理类似古人通过北极星辨向，但精度大幅提升，地面设备接收光学信号并结合卫星轨道数据，可精准计算自身位置与朝向。

为保障精度，团队融合星敏感器、太阳敏感器及激光测量技术，将光学信号角度测量精度提升至0.005个像素，满足0.0003度角秒级要求，破解轨道高度信号传输误差难题；依托光波直线传播特性，具备天然抗干扰能力。目前已构建11颗卫星组成的光学导航星座，突破光学敏感器微型化瓶颈，未来计划在816千米近地轨道部署37颗卫星，覆盖全球重点区域，为低空经济、深空探测等领域提供解决方案。

**科技** 全球高精度长时序冻融数据集发布

近日，中国科学院空天信息创新研究院联合北京师范大学等多家科研机构，在冻土遥感监测领域取得重要技术进展，成功研制并发布全球高精度长时序冻融数据集，破解了长期以来全球及区域尺度冻融动态精细监测的技术瓶颈。

该数据集依托先进遥感监测技术与优化算法，突破观测技术和算法性能局限，实现对全球尤其是青藏高原地区冻融过程的连续、精细、长时序观测，精准捕捉土壤冻融“相变”过程及“记忆效应”。

数据集包含两部分核心技术成果：全球近地表土壤冻融数据集（FT-HiDFA），时间跨度2002年至2023年，空间分辨率约5千米，可清晰呈现全球陆地冻融动态。青藏高原近地表土壤冻融数据集（TP-DFA-STA），时



间跨度为1979年至2023年，空间分辨率约25千米，为高原近半个世纪冻融演变提供高一致性数据档案。目前该数据集已面向全球科研用户开放共享，助力应对气候变化、保障区域可持续发展。

月球特别是月球背面的地质演化历史、指导月球资源勘探和任务规划提供了新的科学依据。

## 数字

### 0.37米

### 我国成功发射微厘空间低轨星座系统02组卫星

3月22日23时49分，微厘空间低轨星座系统02组卫星搭乘捷龙三号遥十运载火箭，在山东海阳附近海域以“一箭十星”方式发射升空，卫星顺利进入预定轨道，发射任务取得圆满成功。

“微厘空间”是“微厘空间低轨卫星导航增强系统”的整体计划，旨在解决厘米级导航定位精度需求。该卫星具备空间环境数据采集、星间激光组网通信、掩星探测等多项功能，可与北斗、GPS等现有导航系统协同工作，为全球用户提供实时厘米级定位增强服务。

“微厘空间”的设计理念，是把“基准站”搬上天。与其在地面密集建站，不如在低轨道部署一批专门“播发误差修正信号”的卫星，实现全球覆盖、全天候在线，不依赖地面基础设施。这也是低轨增强系统的核心逻辑——并非替代北斗，而是为北斗配备一套全球覆盖的“误差修正播报员”。

近日，中国科学院空天信息创新研究院发布消息称，该院研发的无人机雷达干涉测量系统取得重要进展，其中单航过双天线雷达干涉测量（InSAR）获取DEM精度达0.37米，重复飞行差分雷达干涉测量（D-InSAR）地表变化精度优于3毫米。

该系统可实现X波段单航过双天线雷达干涉测量、多航过重复飞行雷达干涉测量的区域地表高程模型提取，以及多航过重复飞行差分雷达干涉测量的区域地表形变信息提取。研发过程中，科研团队攻克无人机平台稳定性差、运动误差补偿难等核心难题，创新性提出一体化时变基线误差估算与消除方法，可实现中小型无人机工程应用规模的多模态干涉测量。

该系统获国家重大科研仪器项目支持，后续将进一步优化仪器系统与算法，保障青藏高原飞行试验。其研制仪器及获取的飞行数据，将向国家科研项目开放共享，助力地表测量、生态监测等相关领域科研与应用发展。

### AI+测绘遥感，新一代月球化学版图研制成功

近日，我国科研团队联合多所高校及科研机构协同攻关，在月球化学测绘领域取得重要突破，成功研制出新一代月球化学版图，相关成果发表于国际期刊《自然-传感》，并入选该刊封面文章，为月球地质研究提供重要支撑。

研究团队深度融合人工智能与行星测绘遥感技术，利用嫦娥六号世界首个月球背面样品实测数据与月球正面样本数据，结合月球轨道器多波段光谱成像数据，创新构建残差卷积神经网络模型及微调策略，突破传统模型反演误差大、易过拟合等技术瓶颈，大幅提升月球化学成分反演精度。

此次研制的新一代月球化学版图，包含全月六类主要氧化物含量和镁指数分布图，清晰揭示了全月三大体（月海、高地、南极-艾肯盆地）的元素分布，以及南极-艾肯盆地深部物质暴露特征，修正了该区域地质单元认知。该成果是多学科交叉融合的典范，得到国家自然科学基金相关项目支持，将为深入解析

### 0.3米

近日，中国卫星导航系统管理办公室发布消息称，通过地面远程指令对50颗在轨卫星进行软件迭代、算法优化与状态校准，实现“用户无感”升级且服务不中断，标志着北斗从“能用”迈向“好用”。

此次升级核心突破显著，定位精度实现质的飞跃，精密单点定位水平精度优于0.3米、垂直精度优于0.6米，正式迈入亚米级时代，全球基础定位精度保持优于10米。同时，系统优化星载原子钟频率稳定度补偿算法，强化星间链路协同调度，抗干扰、防欺骗能力及服务稳定性大幅提升，有效保障远洋、极地等无地面测控区域服务连续性。

升级后，北斗应用场景进一步拓展，既改善普通用户手机导航等日常体验，也为智能网联汽车、无人农机、工程测量、应急救援等行业提供精准支撑。此次升级开创“软件定义卫星”新模式，打破卫星“发射即定型”局限。☑

# 河南省测绘学会十届四次理事会暨 2026年工作会议召开

◎ 本刊记者 栗荣晓 通讯员 张磊

4月17日，河南省测绘学会十届四次理事会暨2026年工作会议在郑州召开。会议全面总结2025年工作成效，科学分析当前行业发展形势，系统部署2026年重点任务，审议有关事项，表彰先进典型，进一步凝聚共识、鼓舞干劲，奋力推动全省测绘地理信息事业高质量发展再上新台阶。

中国工程院院士、河南省测绘学会名誉理事长王家耀，河南省自然资源厅二级巡视员张军，河南省测绘地理信息技术中心党委委员、副主任肖峰，河南省测绘学会理事长邹友峰以及常务副理事长杜清华，副理事长刘文锴、李广云等参加会议。

会议集中学习习近平总书记关于树立和践行正确政绩观的重要论述，引导全体理事坚守初心使命、勇于担当作为，坚持实事求是、求真务实，扎实做好打基础、利长远、惠民生、促发展的实事，坚决反对形式主义、官僚主义和“形象工程”“政绩工程”，以严实作风推动学会工作高质量发展。

肖峰表示，过去一年，河南省测绘学会在坚持政治引领、学术立会、服务兴会、规范办会等方面做了大量扎实有效的工作，为河南省测绘地理信息事业高质量发展提供了有力支撑。希望学会以建会60周年为契机，进一步发挥桥梁纽带作用，强化学术引领、凝聚行业合力、服务发展大局，为支撑自然资源管理、服务现代化河南建设作出更大贡献。

张军表示，测绘地理信息是数字经济的重要基石、自然资源管理的关键支撑、现代化治理的有力利器。希望学会提高政治站位，坚持党建引领，始终把准政治方向、站稳政治立场；坚持创新驱动，赋能新质生产力，推动测绘地理信息与人工智能、大数据、数字孪生、实景三维等领域深度融合；强化行业引领，凝聚发展合力，健全政产学研用协同创新机制，为测绘事业行稳致远保驾护航。

会上，中国工程院院士王家耀作《关于AI时代地球空间信息科学技术前沿思考》主旨报告，紧扣人工智能、时空大数据、数字孪生等前沿方向，为行业科



技创新和数字化转型指明方向。

邹友峰代表第十届理事会作河南省测绘学会2025年工作报告。报告指出，2025年，学会在党建引领、学术交流、科技创新、人才培养、科普宣传、自身建设、服务大局等方面取得显著成效，高质量完成年度各项任务，学会凝聚力、影响力、公信力持续提升。2026年是河南省测绘学会成立60周年，也是“十五五”规划开局之年。学会将以“党建领航、学术立会、服务兴会、规范办会”为工作主线，以建会60周年为重要契机，重点做好六方面工作：一是强化政治引领，筑牢思想根基；二是深化学术交流，打造品牌平台；三是聚力科技创新，赋能产业升级；四是抓实人才培育，建强骨干队伍；五是弘扬测绘精神，扩大行业影响力；六是夯实自身建设，提升治理效能，为服务经济社会高质量发展提供坚实测绘技术支撑。

河南省测绘学会秘书长周学军做2025年度财务工作报告，全面汇报年度、经费管理使用情况。会议审议通过《河南省测绘学会2025年工作报告》《2025年度财务工作报告》，以及新设分支机构、理事会人员调整等有关事项，并对2025年度先进集体、先进个人和先进典型进行表彰，激励测绘行业比学赶超、争先进位、再创佳绩。

河南省测绘学会第十届理事会理事、监事、各分支机构负责人、会员单位代表、秘书处同志160余人参加会议。☑

# 河南省地理信息产业协会召开三届五次次会议

◎ 本刊记者 栗荣晓

3月26日，河南省地理信息产业协会在郑州召开第三届五次常务理事会议。河南省自然资源厅测绘地理信息管理处处长王军胜，中国地理信息产业协会副会长、河南省测绘地理信息技术中心副主任肖峰，河南省测绘地理信息技术中心二级调研员、直属单位党委负责人、河南省地理信息产业协会第三届五次常务理事及秘书处负责同志参加会议。

肖峰对河南省地理信息产业协会过去一年的工作成绩给予肯定，对照中国地理信息产业协会2026年工作重点及河南省测绘地理信息技术中心2026年工作部署，对协会下一步工作提出建议：一要把强化党建引领作为根本保障，牢牢掌握正确政治方向，确保协会发展始终沿着规范、健康的轨道前进；二要把深化产业研究作为关键支撑，聚焦行业发展痛点、难点，为产业高质量发展提供前瞻性、针对性智力支持；三要把夯实自身建设作为立身之本，完善内部治理，提升协会规范化、专业化运营水平；四要把发挥品牌优势作为重要抓手，打造特色服务品牌，增强协会的行业号召力与社会影响力；五要把坚守为会员服务作为核心任务，倾听会员诉求、回应会员期盼，切实解决企业发展中的实际困难；六要加强与中国地理信息产业协会的联动协作，主动学习借鉴先进兄弟协会的经验

做法，形成全国行业同频共振的发展格局。肖峰强调，要以此次会议为新起点，进一步统一思想、凝聚共识，牢固树立“一张图、一盘棋、一股劲”发展理念，携手并肩、协同发力，推动河南省地理信息产业高质量发展。

王军胜传达了全国和河南省自然资源工作会议精神，解读了正在开展的自然资源管理和国土空间“一张图”建设工作的深刻内涵，分析了当前河南省测绘地理信息转型升级面临的形势机遇，通报了全省测绘地理信息管理工作取得的突出成效，介绍了2026年河南省自然资源厅测绘地理信息管理处重点工作安排。王军胜指出，过去一年，河南省地理信息产业协会在引导产业发展、服务会员企业、规范市场秩序、凝聚行业力量等方面成效显著，发挥了不可替代的桥梁纽带作用。新的一年，希望协会聚焦服务自然资源管理，发挥好协会平台优势，努力在支撑加快转型升级上展现新担当，在推动产业创新发展上实现新突破，在强化会员交流合作上开创新路径，在促进行业规范管理上迈出新步伐，在加强协会自身建设上得到新提升。

与会代表一致表示，将以此次会议为契机，进一步统一思想、凝聚合力，共同推动河南省地理信息产业迈向高质量发展新阶段，为服务全省经济社会发展大局作出新贡献。☑

---

## 河南粮食投资集团到省测绘地理信息技术中心调研交流

近日，河南粮食投资集团有限公司、郑州粮食批发市场有限公司党委书记、董事长王刚一行到访河南省测绘地理信息技术中心，就深化业务合作、推动地理信息技术赋能现代农业进行深入调研交流。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武永斌陪同调研。

王刚一行实地参观了应急保障中心、卫星应用中心及成果服务大厅，观看了河南省测绘地理信息技术中心宣传片，并介绍了河南粮食投资集团与郑州粮食批发市场的发展布局，以及小麦大数据中心、“豫农

优服”等重点项目建设工作。河南省测绘地理信息技术中心工作人员围绕卫星遥感影像统筹、北斗导航定位服务及“天地图·河南”等业务进行了系统讲解，并结合在自然资源管理、智慧农业、水利交通等领域的创新应用成果，介绍了地理信息技术深度融入现代农业发展，为粮食生产全链条提供精准、高效的时空数据支撑。

下一步，双方将建立深层次合作沟通机制，通过资源共享与优势互补，推动测绘地理信息技术突破行业壁垒，在融合共生中迈向高质量发展。☑(王雪莹/文)

# 走进“十五五” 实干开新局

## ——河南省测绘地理信息行业一季度“开门红”全景纪略

◎ 本刊特约记者 张永强

时序更替，华章日新。2026年是“十五五”规划的开局之年，也是河南省测绘地理信息行业转型升级、从“技术支撑”迈向“战略引领”的关键之年。

当“实景三维”从蓝图变为立体的数字底座，当“北斗应用”从精准定位走向万物互联，当测绘技术从数据生产转向智慧赋能，河南省测绘地理信息行业正以昂扬姿态，在新时代浪潮中破局突围、勇毅前行。

回望“十四五”，河南测绘人砥砺深耕、笃行不怠，用脚步丈量中原大地，用数据记录时代变迁，以精准时空数据支撑自然资源管理，以智能地理信息赋能数字经济发展，在黄河流域生态保护、国土空间规划、粮食安全保障等重大任务中，留下了浓墨重彩的奋斗印记。

国家“十五五”规划壮丽画卷徐徐铺展，站在承前启后的关键节点，全省测绘地理信息行业以“等不起”的紧迫感、“慢不得”的危机感、“坐不住”的责任感，秉持“起步即冲刺、开局即决战”的奋斗姿态，紧扣省委“1+2+4+N”目标任务体系与自然资源部工作部署，2026年围绕“四高四争先”战略，抢抓发展机遇，以“一张图”为统领，以数智赋能为引擎，全力奋战一季度，在服务全省自然资源管理、数字经济建设和现代化河南建设征程中实干开新局，为现代化河南建设注入强劲地理信息动能。



## 战略领航：擘画测绘地理信息发展新蓝图

国家“十五五”规划：确立战略性数据要素核心地位

2026年3月，十四届全国人大四次会议表决通过《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》，（以下简称《纲要》）将测绘地理信息工作置于数字中国建设、新质生产力培育的核心框架，赋予其前所未有的战略定位。《纲要》明确数据为新型生产要素，测绘地理信息从传统“基础支撑”跃升为国家战略性数据资源与时空信息核心底座，强调“构建统一的时空基准和地理信息底图，建设实景三维中国，完善国土空间基础信息平台”，从新型基础设施建设、技术深度变革、服务领域拓展、安全底线筑牢等方面，为行业发展指明根本方向。

### 自然资源部：引领测绘地理信息事业转型升级

自然资源部深入贯彻国家规划精神，聚焦“两支撑、一提升”核心定位，印发《关于加快测绘地理信息事业转型升级更好支撑高质量发展的意见》等文件，对全国测绘地理信息工作作出系统部署，明确“十五五”时期“三大转型”总要求：从传统测绘向新型基础测绘转型、从数据生产向数据要素赋能转型、从行业服务向全域综合支撑转型。围绕现代测绘基准、实景三维中国、时空大数据平台、测绘成果管理等标准体系建设，以及数据要素基础制度完善、科技创新强化、国家重大战略服务等重点任务全面发力，引领全行业高质量发展。

河南省“十五五”规划：赋予服务现代化河南建设新使命

2026年1月30日，河南省第十四届人民代表大会第四次会议审查批准的《河南省国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要（2026—2030年）》，（以下简称《规划》）全面擘画了未来五年发展蓝图，将测绘地理信息工作深度融入数字河南、智慧河南、美丽河南建设核心内容，明确其基础性、战略性支撑关键地位。《规划》强调构建统一的国土空间规划“一张图”，建设实景三维河南，完善时空大数据平台，为自然资源管理、智慧城市治理、生态保护修复、乡村振兴等提供精准时空信息支撑；提出加强数据要素供给，推动测绘地理信息与人工智能、低空经济、数字经济深度融合，列为培育新质生产力重要任务，明确服务自然资源管理、数字经济发展、智慧城市建设、生态保护治理、乡村全面振兴五大重点方向。



● 1月23日，河南省测绘地理信息技术中心所属单位与南阳市自然资源调查规划院签订合作框架协议

2026年2月1日，《河南省测绘成果管理办法》正式施行。新规直击数据“汇交乱、共享难”痛点，建立规范成果汇交制度，着力打破“数据孤岛”，推动测绘成果从“库房存储”走向应用“战场”、从“静态数据”转化为“发展红利”，为测绘地理信息价值释放提供坚实法治保障。

### 精准部署：锚定“十五五”开局测绘工作新坐标

河南省自然资源厅在2026年全省自然资源工作会议上，将测绘地理信息工作提升至“数智赋能”核心位置，紧扣“1+2+4+N”目标任务体系，锚定推动高质量发展首要任务，围绕自然资源领域高水平安全守护、高效能治理推进，强化数据要素供给，加快测绘地理信息与低空经济、人工智能等新技术新产业融合，推动产业向价值链高端延伸，将“加快‘一张图’建设，提升数智治理能力”列为年度十二项重点工作之一。

2026年3月，河南省自然资源厅印发2026年全省测绘地理信息工作要点，从“强化保障能力、推动产业发展、严守安全底线、深化多方融合、提高数智治理水平”五个维度持续发力，加快全省测绘地理信息事业转型升级与产业高质量发展。

3月5日，河南省自然资源厅“一张图”建设工作专班召开推进会，将“一张图”建设提升至“破解难题、保障发展”的政治任务高度，定下“高位谋划、加压提速”的全年工作基调。

1月20日，河南省自然资源厅在安阳组织召开了测绘地理信息赋能低空经济高质量发展研讨会，专题部署相关工作，明确“加强统筹规划、加大技术创新、强化协同合作、拓展应用场景”四大任务，推动测绘地理信息技术深度服务低空经济等新兴产业发展。



● 1月25日，河南进入2026年“两会”时间，两会用图也如期亮相

### 主力担当：测绘行业单位的实干与突破

政策东风劲吹，基层落实提速。2026年以来，河南省测绘地理信息技术中心及所属单位、骨干企业迅速进入“实战状态”，彰显行业主力军的担当作为。

河南省测绘地理信息技术中心：九大举措推进转型升级

2月5日，河南省测绘地理信息技术中心召开2026年工作会议，以“开局即冲刺”的姿态打响发令枪，提出“九个加快推进”的具体施工图：加快推进实景三维河南主体建设，打造低空经济示范场景；深化“河南一号”卫星与北斗应用，推动“北斗+”创新应用；强化科技自立自强，攻关“卡脖子”技术，探索地理信息数据交易新模式。

2026年一季度，各项重点工作全面提速：基础测绘高效推进，完成核心区域数据更新；实景三维河南建设全面提速，省市县协同推进，完成多个重点城市级实景三维模型建设与更新；省级地理信息公共服务平台数据更新效率显著提升，自主研发的“后土”空间跨模态AI大模型投入应用，极大提升了建模效率；时空数据底座持续完善，省级国土空间基础信息平台完成升级，“河南一号”卫星遥感智联网建成；科技创新平台获批多项省部级科技项目；数据服务保障有

力，为自然资源管理、耕地保护、重大项目建设提供了坚实支撑；成果汇交与共享服务效率大幅提升，有力保障了交通、水利、能源等重大项目建设；与安阳低空经济投资集团有限公司签署合作框架协议，共同推进实景三维、高精度地图等在低空航路规划、安全监管等场景落地应用。

河南省测绘院：科技创新驱动智能化转型

“十四五”期间，河南省测绘院实现从“平面”到“立体”、从“静态”到“动态”的跨越，“十五五”开局之年聚焦智能化转型。该院牵头或参与多项行业与地方标准制定，自主研发多款专业软件，完成河南卫星导航定位基准服务系统北斗三号升级改造，软硬件全面国产化并建成豫北分中心；全力推进全省实景三维建设，实现地形级三维全省覆盖；自主研发的“后土”自然资源行业大模型入选自然资源部首批试点，将矿山监管报告审查时间从半个月压缩至3天；在平顶山、济源部署露天矿山智能监管系统，实现越界开采实时告警。2026年3月，该院顺利通过质量、环境、职业健康安全管理体系的年度监督审核，标志着其规范化、标准化管理水平获得权威认可。当前，该院正聚焦人工智能与测绘技术深度融合，推动生产模式向智能化转型，并积极参与全省现代测绘基准体系、InSAR地表沉降监测“一张图”等重点项目的规划与建设。

河南省遥感院：技术赋能精准监管

河南省遥感院围绕全省发展大局，坚持创新驱动，深耕主责主业，实现服务能力从支撑管理到赋能治理的跨越。“十四五”期间，该院为全省提供了大量高质量测绘地信服务，全面支撑国土空间规划监督、建设用地监管、执法与生态监测等工作；建成以“河南一号”为核心的遥感数据资源池，实现亚米级影像年度覆盖，2025年处理数据近2万景；牵头编制实景三维省级技术方案与标准，在多地推进城市级建设，成果应用于三维地籍、产业招商等场景；科技创新动力增强，在遥感智能解译、实景三维等关键技术研发方面取得系列成果，荣获多项省部级奖励。2026年1月，该院承担的桐柏县多元自然资源统一确权登记项目通过省级验收，为全省首个同步涵盖探明储量矿产、森林、水流、自然保护地4类资源的确权项目，打造了可复制的“桐柏典范”。该院还持续利用遥感技术开展全省耕地、矿山、生态保护红线等常态化监测，为自然资源精细化管理提供了数据支撑。

**河南省地图院：从“地图服务”向“时空赋能”跨越**

河南省地图院作为测绘地理信息核心公益力量，锚定“三支撑、三服务”定位，以奋进姿态推进各项工作。“十四五”期间，该院高质量完成全省1:1万基础地理信息数据的持续更新，承担了多地实景三维项目的监理与实施工作，其运维的“天地图·河南”平台用户达6.4万个，连续多年获评自然资源部“五星级”省级节点，并打造了“土地预选云”“河南矿权管理系统”等典型应用。在成绩面前，该院没有止步，2026年一季度，积极向新领域探索，市场拓展成效显著，成功签订多项省内外服务合同，实现“开门红”，为“十五五”发展筑牢了根基。

**河南省地理信息院：以“数”赋能擘画数字强省新篇章**

“十四五”以来，河南省地理信息院以信息化建设为核心，持续推进国土空间基础信息平台建设，构建了“一张图”一站式审批监管体系，成功上线并运行了河南省矿业权综合监管审批、土地二级市场交易、补充耕地占补平衡动态监管等关键业务系统，实现从审批、监管到服务的全流程数字化闭环，并以“长牙齿”硬措施严守耕地红线。该院率先在省内地理信息领域开展数据资产化探索，2025年11月成功完成省内首单测绘地理信息数据资产交易，激活数据要素价值。2026年，该院立足公益属性，继续深化信息化建设与数据治理，于1月6日，成功举办首期“数聚中原 赋能百企——中原数据交易联盟进百企”专项活动，搭建数据交易对接平台，推动地理信息成果市场化应用。该院还持续推进重点项目建设，信阳市实景三维项目完成外业数据采集、内业模型构建，精度与完整性达标；3月19日，河南省土地二级市场交易监管系统顺利通过验收，规范交易行为、提升监管效能，助力土地要素市场化改革。同时，该院开展“春季大练兵”活动，先后组织标准制修订工作交流培训、自然资源统计监测分析系统培训、数据安全技术、基础测绘更新项目技术、耕地占补平衡动态监管平台业务、保密教育等6个专题培训，培训技术骨干200多人次，有效提升了队伍专业能力。

### 地市实践：百花齐放赋能区域发展

全省各省辖市、济源示范区及县（市、区）测绘地理信息单位紧扣地方发展需求，扎实推进各项工作，

形成了特色鲜明、竞相发展的生动局面。

作为国家中心城市，郑州市在智慧城市时空信息平台建设上走在前列，积极探索构建“城市时空操作系统”，推进对城市运行的全方位、立体化感知，为城市精细治理、应急管理、交通出行等提供更智能的三维实景与时空智能服务。

洛阳市依托丰富的历史文化遗产，打造“数字龙门”三维数字化保护平台，采用倾斜摄影、三维激光扫描等技术，对龙门石窟进行毫米级精度数字化采集，建立了全球首个大型石窟寺全要素数字档案。

开封市结合宋都古城保护更新，开展古城高精度测绘与三维建模，为古城风貌保护与城市更新提供精准数据支撑。

南阳市将实景三维南阳建设作为省域副中心城市三维空间底座，目前已完成主城区实景三维建模，有力支撑了国土空间规划、城市更新等场景应用。同时，南阳在南水北调中线工程水源地保护中创新应用测绘地理信息技术，建成“丹江口水库水质安全智慧监测系统”，集成遥感、无人机、水下机器人等多种技术，实现对水源地的全天候、立体化监测。

安阳市积极抢抓低空经济新赛道，承办了全省测绘地理信息赋能低空经济研讨会，启动豫北低空经济测绘保障示范区建设，并完成首批低空航路规划测绘，为低空经济发展提供空间数据支撑。

### 产业勃兴：创新发展激活产业动能

目前，全省测绘资质单位达1100余家，地理信息产业呈现蓬勃发展态势，形成“国家队引领、民企赋能、



●河南省测绘院上海分院圆满完成上海桃浦污水厂地下隧道贯通精密测量



● 1月6日上午，首期“数聚中原 赋能百企——中原数据交易联盟进百企专项活动”在河南省地理信息院顺利举办

大中小企业协同”的多元发展格局。

2026年一季度，河南省测绘地理信息市场活力迸发，企业主动融入“十五五”发展大局，强化技术创新、拓展服务领域，多家企业通过资质升级和项目中标，展现出强劲的市场竞争力。

2026年以来，河南省自然资源厅审批通过多家企业的资质变更申请。河南中原公路勘察设计有限公司获批增加测绘航空摄影、界线与不动产测绘等乙级资质；河南华地土地房地产评估咨询有限公司、河南信大测绘科技有限公司等19家机构被纳入省高院“一张网”委托鉴定信息平台，标志着行业公信力与应用场景的进一步拓宽。

河南省中纬测绘规划信息工程有限公司以专业技术深耕测绘服务，用技术创新书写发展答卷，2025年成功斩获28项荣誉，完成3项研究课题科技评价，高质量超额完成年度创优目标。2026年伊始，河南中纬再传捷报：成功中标2026年修武县5.4万亩高标准农田（提升改造）建设项目-勘察设计项目；成功中标卫辉市地籍成果入库项目；自主研发的“多维城市信息平台V1.0”成功通过麒麟操作系统适配认证；朱江海劳模工匠创新工作室获批2025年焦作市级创新工作室，使公司市级创新工作室的数量达到3个；成功中标鄢陵县农村集体“三资”（资产、资源、资金）清查核实项目……他们用专业与坚守、敬业与担当，在创先争优之路上续写着崭新篇章。

东网空间地理信息有限公司长期深耕铁路工程测量与安全监测领域，将水下地形测量、北斗高精度定位等技术深度应用于铁路安全运营，参与编制的《地方铁路无人看守道口自动安全防护系统技术条件》等

团体标准，填补了行业空白，推动了铁路测绘规范化进程。2026年一季度，该公司以“起步即冲刺”的姿态，高效推进郑州局、武汉局等多个铁路局的普速铁路大修测量与干线复测等重点项目，从严从细抓好质量验收与安全生产，同步强化了应急备勤与专项培训，以“快速响应、现场驻勤”的服务机制，有力保障了铁路运营单位的紧急需求，为实现全年目标奠定了坚实基础。


河南省第一地质勘查院有限公司测绘地理信息分院凭借专业技术与优质服务，连续两年中标郑州市自然资源督察执法勘测鉴定项目；河南省第二地质勘查院有限公司凭借过硬的技术实力与良好的市场口碑，一季度连续中标广清永铁路勘察、工民建测绘等项目十余个，累计中标金额达1400余万元，以实绩实效实现全年工作“开门红”。

开封市联华数字科技有限公司中标禹州市国家储备林建设测绘项目，推动测绘技术深度融合林业资源监测与生态保护。

一季度，全省测绘行业广大干部职工展现出奋发有为、担当实干的昂扬精神风貌。许多技术人员放弃春节假期，坚守在生产一线；外业队员不畏严寒，奔波于山川田野；研发人员聚力攻关技术难题。全行业形成了“拧成一股绳，合力开新局”的浓厚氛围，在服务重大基础设施规划、建设、安全运维等方面提供了全周期、高精度的测绘保障。

开局关乎全局，起步决定后势。站在2026年的春天、“十五五”规划起跑线上，河南测绘地理信息行业的蓝图已经绘就，路径愈发清晰。

全省测绘地理信息系统将继续坚持以科技创新为引领，持续深耕新型基础测绘，全力攻坚实景三维河南建设，不断完善现代测绘基准体系，深化“天地图·河南”平台应用，筑牢地理信息安全防线。同时，将主动推进测绘地理信息与人工智能、低空经济、数字经济等深度融合，不断拓展应用场景，释放数据要素价值，培育行业发展新动能。

进而有为，笃行致远。2026年的春天，从省级中心的战略部署到一线测绘企业的项目落地，一个数据驱动、智能高效、融合开放的河南测绘地理信息新格局正在加速形成。河南测绘人正以“只争朝夕”的干劲，将宏伟的“规划图”细化为精准的“施工图”，最终变为可感可知的“实景图”，用精准的经纬线，奋力编织出中原更加出彩的宏伟画卷！

# 河南土地二级市场迈入“云监管”时代



3月19日，由河南省地理信息院承建的“河南省土地二级市场交易监管系统”建设项目，顺利通过河南省自然资源厅组织的专家组验收。这标志着河南省在深化土地要素市场化配置改革、规范土地二级市场秩序方面迈出关键一步，全省存量土地资源正式迈入数字化、全流程监管新阶段。

验收会上，专家组经质询、讨论后一致认为，项目成果资料齐全规范，技术路线先进，功能设计贴合实际需求，全面完成既定建设内容，且系统实现部、省、市、县四级数据互通，移动服务端的应用让交易服务突破了时间和空间限制，同意通过验收。

据了解，土地二级市场是建设用地使用权转让、出租、抵押的重要流通平台，对盘活存量低效用地、促进土地节约集约利用具有重要作用。为深入贯彻落实国务院办公厅《关于完善建设用地使用权转让、出租、抵押二级市场的指导意见》精神，落实省政府相关实施意见要求，河南省自然资源厅依据《河南省建设用地使用权转让、出租、抵

押交易实施细则》，于2024年初正式启动系统建设工作。

据介绍，项目组于2024年3~10月集中攻关，完成系统功能开发，以及与自然资源部土地二级市场线上服务平台、河南省不动产登记系统、全省一体化信用监管系统、郑州银行及统一身份认证平台等多个外部系统的接口对接与调试。随后，系统在平顶山市、原阳县开展试运行，对各项功能进行验证优化。2025年5月1日，系统正式上线运行，历史数据补录工作同步启动。截至验收当日，系统已稳定运行十一个多月，各项功能指标均达到设计预期。

从功能设计来看，该系统并非简单的信息发布窗口，而是集供需信息发布、网上交易、合同网签赋码、资金监管、监测预警于一体的综合性数字化平台。系统构建“信息发布—达成意向—签订合同—交易监管”的全流程闭环管理模式，实行统一合同赋码制度，无论线上交易还是线下交易，最终签订的转让、出租、抵押合同均需在系统内完成赋码归档，确保每一笔交易全

程留痕、可追溯、可监管。

在信息共享方面，该系统与省不动产登记平台、省一体化政务服务平台统一身份认证系统、信用管理系统深度对接，打破了长期以来部门间的数据壁垒。交易双方和相关管理机构可实时查询交易宗地登记信息、交易主体信用状况，有效提升交易透明度，保障各方合法权益。同时，系统同步开发移动服务端，企业和群众通过手机即可查询供需信息、通知公告、办事指南等内容，让交易服务在时间和空间上得到进一步延伸。

在监管效能方面，系统后台可基于实时数据生成市场活跃度指数、区域价格热力图，对土地流转效率、存量盘活情况开展多维度分析，将原始交易数据转化为可视化决策参考，为管理部门精准监管和科学决策提供技术支撑。

在存量资产盘活方面，项目团队同步开展了历史数据清洗与补录工作，确保市场信息完整归集。截至验收当日，全省已完成84宗历史交易合同补录归集，涉及土地面积2277.88亩，合同金额达25.61亿元。同时，系统建立动态监测预警机制，通过实时监测交易价格异常波动，结合资金监管专户与信用评价体系，可及时发现并处置潜在市场异常情况，防控市场运行风险。

下一步，河南省地理信息院将持续做好技术服务与运维保障工作，发挥系统在存量土地盘活、闲置土地治理中的重要作用，为全省土地二级市场规范有序运行提供坚实支撑。□（本刊记者 陈庆贺 通讯员 王渊博）

## 低空经济测绘遥感及时空大数据应用座谈会在郑州召开

为服务低空经济发展战略，强化测绘地理信息、遥感与时空大数据的基础支撑作用，搭建政产学研用合作平台，3月26日，河南省测绘学会在郑州组织召开低空经济测绘遥感及时空大数据应用座谈会。来自河南省美邦通用航空有限公司、河南工业职业技术大学、河南省中工设计研究院、河南省地理信息院、河南通用航空有限公司、北京飞渡科技等20余家企事业单位、高校及科研院所的代表参加了会议。

会议聚焦测绘地理信息、遥感、时空大数据在低空经济发展中的基础支撑作用，围绕政策导向、技术

应用、场景拓展、标准体系、产业协同等关键议题开展深入研讨。河南省中工设计研究院有关代表围绕国家及河南省低空经济发展政策、行业趋势、重大科研专项与地方规划实践等内容作了专题解读。

在交流研讨环节，各单位代表分享了无人机航测、三维建模、时空大数据平台、电力巡检、航空应急、农林作业、低空文旅等领域的应用案例与实践经验，并针对空域管理、标准建设、数据互通、校企合作、人才培养、场景落地等行业重难点问题进行了深入研讨，并提出多项意见建议。与会代表普遍认为，测绘地理信息、遥感时空大数

据以及无人机北斗导航精准位置服务是保障低空经济安全运行、科学规划与高效作业的关键基础，北斗导航在航线规划、空域避让、精准作业等方面具有重要支撑作用，加快技术融合、完善标准规范、强化协同联动是推动低空经济规范化发展的重要方向。

会议就进一步强化测绘地理信息技术对低空经济的支撑作用、搭建常态化交流合作平台、推动成立相关分支机构、深化核心技术攻关与场景应用等内容达成广泛共识，为河南省低空经济规范化、规模化、产业化发展明确了技术路径与合作方向。☑（河南省测绘学会 张磊）

## 桐柏县自然资源局开展地图市场与测绘行业专项排查

为规范地图市场秩序，强化测绘行业全流程监管，切实维护国家地理信息安全，近日，桐柏县自然资源局组建排查工作组，对县域内书店、图书经营网点等重点场所，开展地图市场与测绘行业专项排查整治行动。

此次专项排查紧扣地图编制、出版、销售全链条，聚焦“问题地图”排查、无资质测绘成果流通、测绘活动合规性等核心重点，采取“现场核查+实物比对+台账查阅”的立体化排查方式，对龙飞书社、新华书店等重点经营单位进行排查。排查过程中，工作人员重点核对在售地图的内容完整性、标注规范性，仔细检查是否存在错绘、漏绘国家领土、边界线等问题，是否有涉密地理信息泄露情况；对排查发现的不规范问题，现场提出整改意见、下达整改通知，明确整改时限和具



体要求，督促经营主体严格履行主体责任，规范经营行为，坚决杜绝违规地图流入市场。

长期以来，桐柏县自然资源局始终将测绘地理信息监管工作摆在重要位置，坚持“常态化排查+专项整治”相结合，不断完善监管机制，构建起“事前预防、事中监管、

事后追溯”的全链条、全方位监管体系，持续加大行业监管力度。此次专项排查进一步压实了经营主体和监管部门的双重责任，有效净化了县域地图市场环境，为维护国家地理信息安全、助力地方经济社会高质量发展奠定了坚实基础。☑（桐柏县自然资源局 秦超峰）

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

# 守牢测绘基准底线 赋能中原高质量发展

——河南省测绘院以创新之力筑牢时空基石

◎ 本刊记者 王敏 通讯员 张键

测量标志遍布山川田野，北斗数据日夜不息传输——在河南经济社会高质量发展的背后，一张看不见的“时空信息网”正在加速织就。

这张网的核心，是测绘基准。它看不见、摸不着，却像空气和水一样，渗透在经济社会运行的每一个角落。从精准农业到智慧交通，从重大工程选址到生态环境保护，都离不开这个“看不见的坐标原点”。

在河南，有这样一支队伍——河南省测绘院。他们始终以“精耕细作”的态度，推动全省测绘基准体系从“可用”迈向“高精度、自主可控”，并以北斗导航、人工智能等前沿科技为画笔，在中原大地描绘出一幅以精准时空信息赋能高质量发展的生动画卷。

## 为“时空坐标”筑牢物理根基

如果说测绘基准是提供精准时空信息的基石，那么遍布山川田野的测量标志就是这块基石的“物理化身”，也是获取一切空间数据的源头。这些看似沉默的点位，其完好与否，直接关系到每一条测绘数据的准确性和可靠性。

为守护好这些“基石”，2021年以来，按照自然资源部统一部署和河南省自然资源厅工作要求，一场全省规模最大、覆盖最广、体系最完整的测量标志普查保护攻坚战全面打响，河南省测绘院主动扛起技术支撑重任，以标准化、智能化手段，为这场“守护行动”注入科技力量。

以往，测量标志普查靠的是纸笔记录、人工寻点，效率低，数据也容易出错。为破解这一难题，河南省测绘院技术团队自主研发了一套集移动端普查App与PC端数据后处理系统于一体的测量标志普查辅助软件。从外业导航定位、现场数据采集，到内业整理分析、成果建库归档，全流程实现智能化，让普查人员告别“纸笔记录、手动录入”的传统模式，大幅提升



●河南省测绘院党委书记、院长 付治河

了普查效率与数据规范性。

这套“内外兼修”的普查辅助软件在南阳、周口、信阳等地得到广泛应用，并展现出强大的科技活力。管理者坐在办公室，就能清晰掌握当地各类测量标志的“健康状况”——分布在哪、保存完好还是已遭损坏，一目了然。在此基础上，一个“属地化保护为主、分级负责、分类保护”的长效管理机制逐渐形成，测绘基准的载体管理从此迈入科学化、规范化的新阶段。

放眼数字（智）河南建设大局，现代测绘基准体系建设至关重要。中国工程院院士王家耀明确指出，从河南数字经济、人工智能、低空经济等新质生产力发展需求出发，加快推进河南省现代测绘基准体系建设非常必要且迫在眉睫。2023年，河南省测绘院正式启动现代测绘基准体系建设的相关谋划工作，开展了可行性研究，目前已进入立项阶段，并得到相关部门及有关领导的大力支持。

目前，河南省现代测绘基准体系建设正在着力完善全省大地、高程、重力基准，构建区域高精度重力场模型和似大地水准面模型，最终将形成多源数据融合、空间基准支撑、技术平台搭建、应用服务拓展、

运维体系保障为核心的现代测绘基准体系。由此，河南省现代测绘基准体系建设将正式迈入规范化、系统化发展的快车道，为数字河南、智慧河南建设铺就一条高精度、全覆盖的时空基准支撑之路。

### 打造中原大地的“北斗精准引擎”

走进河南省测绘院省级数据中心，屏幕上实时跳动着全省246座基准站的运行数据，这便是河南省卫星导航定位基准服务系统的“中枢神经”。

“该系统不仅是我国目前建站技术标准最高、站点数量最多、密度最大、完全自主可控的省级系统，更是河南推动数智化转型、实现跨越式发展的关键支撑。”河南省测绘院党委书记、院长付治河的一席话，道出这个系统沉甸甸的分量。

河南省卫星导航定位基准服务系统，由遍布全省的246座基准站和1个省级数据中心构成，是河南省现代测绘基准体系的重要组成部分。2024年，该系统完成一次历史性变革——北斗三号升级改造全面完成，实现从基准站设备到数据中心软件、从服务器到操作系统的全国产化。这意味着，河南卫星导航定位基准服务，正式进入自主可控的“北斗三号新时代”。

更令人振奋的是，作为“全国卫星导航定位基准站一张网”的重要组成部分，北斗卫星导航定位基准服务河南分中心已落户河南省测绘院。目前全省有132座基准站成功接入国家“一张网”，标志着河南时空信息基础设施正式纳入国家主框架，可直接共享国家级基准服务资源，服务能力与定位精度实现质的飞跃。

系统建好，更要用好、管好。为确保基准服务系统时刻保持最佳状态，河南省测绘院组建了一支专业运维队伍，依据国家标准和文件要求，对每一座基准站、数据中心、网络和坐标框架等进行全方位的常态化“体检”，同时做好系统实时监测和应急保障工作，做到故障早发现、早排查、早解决。2025年，这份“体检报告”相当亮眼：全省基准站运行有效率超过90%，省级数据中心运行有效率更是高达99.5%以上，坐标框架更新1次，全年累计排查解决各类故障563次，确保了服务的稳定可靠。

如今，这一基准服务系统正像水和电一样，向全省用户提供着实时分米级、厘米级，甚至毫米级的高精度位置服务，并广泛应用于自然资源调查、测绘地理信息、交通建设、农业农村、应急救援等多个领域，

日均实时服务响应已超过30万次，成为各行各业高质量发展不可或缺的技术支撑。

在安阳市烟草物流中心，配送员老张每天出发前，都会打开手机上的智能调度App，自动规划出当天最优配送路线，精准避开拥堵路段。这套依托北斗高精度定位服务的系统，让他每天能多送3到5个点位。

在安阳市烟草公司，45套北斗高精度定位终端安装于烟草配送车辆。依托系统实时差分服务获取高精度定位，河南省测绘院研发了安阳烟草物流配送线路规划智能管理系统，实现物流配送线路分钟级全局性自动规划。重新规划的172条物流配送线路，比原来减少53条，每条线路平均配送商户增加27户，平均装载率提高15.03%，大幅降低了物流成本。

“北斗应用正从行业领域走向大众生活。”付治河介绍，从“北斗+电力”实现无人机自动巡线，到“北斗+农业”服务精准作业，再到“5G+北斗”智慧物流……截至2025年年底，河南自然资源领域卫星导航产品保有量达7147台(套)，基于“北斗+”或“+北斗”的创新应用如雨后春笋般涌现。

辛勤耕耘换来硕果累累。2025年，河南省测绘院牵头完成的“全国产高精度卫星导航定位基准服务体系关键技术及应用”项目，一举斩获中国地理信息科技进步奖一等奖。“这是我们首次以第一完成单位获此殊荣。”付治河的言语中充满自豪。这个项目成功解决了自主可控高精度时空基准建立、海量数据并发等一系列技术难题，为全国省级基准服务系统的北斗三号升级改造，提供了可复制、可推广的“河南经验”，也让河南走在了全国基准服务系统国产化建设的前列。

### 以科创之笔绘就地理信息新图景

北斗技术的突破，只是河南省测绘院科创攻坚的一个生动缩影，在更广阔的地理信息领域，他们的创新脚步从未停歇。乘数字中国之风，启科创赋能之程，河南省测绘院正以科技为笔、创新为墨，在数字孪生、实景三维、AI大模型等前沿领域持续攻坚，推动测绘地理信息工作从“数字化”向“智能化”迭代跨越。

在古都安阳，一座“数字孪生城市”正在崛起。河南省测绘院牵头研发的安阳市数字孪生平台，深度融合多源时空数据，打破了部门间的数据壁垒，织就一张“数据同源、政企共享”的智慧治理网络。在这个平台上，应急防汛、人居环境整治、企业监管等多元应用场景得以精准模拟和高效管理。2025年夏季，



安阳遭遇极端强降雨，该平台通过模拟内涝演进过程，提前4小时发出预警，协助转移群众2300余人，效率较传统预警模式提升3倍。相关技术成果“面向数字孪生城市的地理空间信息平台构建关键技术及应用”荣获河南省测绘学会2024测绘科学技术奖一等奖。

实景三维建设是测绘智能化升级的重要方向。河南省测绘院聚焦行业痛点，精心雕琢出一套“河南版”地表附属物模型符号库，解决了模型简化繁杂、可视化效率偏低等“老大难”问题，构建起地貌、地表、地表附属物三位一体的高精度实景三维模型，为自然资源监管、生态修复等工作筑牢高精度的空间底座。其“机载点云实景三维测绘关键技术与应用”项目，斩获河南省测绘学会2025年测绘科学技术奖特等奖。

而更令人惊叹的变革，正在云端发生。2025年9月，河南省测绘院研发的自然资源行业大模型“后土”，成功入选自然资源部首批试点。

“‘后土’，请分析泌阳县矿山开采变化情况，并输出统计结果。”河南省测绘院项目负责人贾宝在“智能问答窗口”输入指令。仅仅几分钟，系统就自动完成了比对和标识，清晰地分析出矿山的开采回采率、选矿回收率、综合利用率等关键指标。

放在过去，这样一份报告，需要好几位工程师埋头工作半个月。而现在，审查数百份报告的时间已缩短至三天。“‘后土’就像一位熟知国土领域的AI专家，已在河南耕地保护、矿山治理、生态修复等工作中展现出强大的智能化能力。”贾宝介绍说。

人才是创新的根基。河南省测绘院广聚多学科技术骨干，组建专业创新团队，深耕测绘地理信息前沿领域，攻坚克难、锐意进取，用实干与坚守推动科研成果高效转化、落地见效。实验室里，研发团队为攻克技术难题通宵达旦、反复试验：北斗三号升级改造项目团队，为解决多厂商设备兼容问题，查阅上千篇文献、开展上百次试验，最终形成成熟技术方案；“后土”大模型研发团队放弃节假日，加班加点优化模型，只为早日实现技术突破。正是这种精益求精、攻坚克难的精神，推动河南测绘技术不断迈上新台阶。

从精准守护每一座测量标志，到北斗三号全面升级，从数字孪生平台到“后土”大模型试点，河南省测绘院的每一步探索，都在为中原大地的蓬勃发展夯实不可替代的时空基石。

当前，河南正处于数字化转型的关键时期。从行业赋能到民生普惠，从“北斗+”到“+北斗”，时空信息的应用场景正在加速拓展。“下一步，我们将继续坚守公益初心，以科技创新为核心引领，深耕数字孪生、实景三维、AI大模型等前沿技术，推动现代测绘基准体系与数字河南建设深度融合，让精准的时空信息如同阳光、空气和水一样，深度融入中原发展的每一个细胞。”付治河表示。

作为国家空间信息基础设施的核心，测绘基准的牢固与否，关系长远。河南测绘人正以扎实的行动，在中原大地筑牢这道看不见的防线，为高质量发展提供坚实、稳定、高效的时空支撑。☑

# 问题驱动式教学在“遥感原理与应用”理论课程中的实践探索

张志敏 鲁春阳 孙亚飞

(河南城建学院 时空信息工程学院, 河南 平顶山 467036)

**摘要:** 问题驱动式教学 (Problem-Based Learning, PBL) 可有效培养学生的自主学习能力。研究阐述了 PBL 方法在“遥感原理与应用”课程中的设计原则和实施步骤, 并以“大气散射”知识点为例, 详细描述了该方法在理论授课中的实施过程。通过两个学期的教学实践发现, 在授课过程中引入 PBL 方法能够有效提升教学质量, 教学目标达成度和学生评教满意度均有不同程度提升。本课程的应用实践经验可为遥感科学与技术专业的同类课程改革提供一定借鉴和参考。

**关键词:** 问题驱动式教学; PBL; 遥感原理与应用; 理论授课; 应用实践

党的二十大报告提出教育教学改革要求, 明确指出要“深化教育领域综合改革”“完善学校管理和教育评价体系”<sup>[1]</sup>。大学工科教育肩负着培养高素质工程技术人才的使命, 以提高学生的工程实践能力、创新思维和自主学习意识为主要任务。因此, 紧扣新时代工科教育发展要求, 积极响应党的号召, 以创新驱动发展为引领, 深入推进教育教学改革, 构建适应新时代需求的人才培养体系是应用型本科高校教育教学改革的重要方向。

“遥感原理与应用”是遥感科学与技术专业一门综合性和技术性较强的核心课程, 授课人数广泛。以河南城建学院为例, 目前该校已开办 55 个本科专业, 其中, 已开设“遥感原理与应用”理论课程的专业有遥感科学与技术、测绘工程、地理信息科学、土地资源管理、城市管理等多个专业, 每年授课人数超过 300 人。作为一门交叉学科<sup>[2]</sup>, “遥感原理与应用”理论课程的授课内容不仅包含遥感科学与技术的基本原理, 还覆盖数学、光学、物理学、地学、电磁学、计算机科学等多学科理论知识, 这种跨学科的特点使得课程学习内容涉及大量专业术语和基础概念。传统教学中, 为了尽快厘清知识之间的脉络关系, 授课教师往往依照教材或 PPT 逐章讲解遥感的基本概念、数据获取原理、图像处理方法、遥感技术应用等基础知识。这种授课模式虽然可以在短时间内提高课堂授课效率, 但固有的单向传输特性并不能有效培养学生的自主学习

能力和探究意识, 也难以满足应用型本科教育的人才培养要求<sup>[3]</sup>。

问题驱动式教学 (Problem-Based Learning, PBL) 作为一种创新性教育方法, 可利用专业领域的真实问题来引出教学内容, 其核心是通过创设问题情境引导学生主动发现问题、分析问题并解决问题, 进而促进知识和能力的全面提升<sup>[4]</sup>, 该方法也为应用型本科教育提供了重要的实践思路。不同于传统教学中教师为主体的单一授课形式, PBL 教学模式以真实问题或复杂工程案例为驱动, 通过团队协作、自主探究和讨论反思来构建知识体系, 强调学生在学习过程中的主体性和参与性, 能有效激发学生的批判思维和创新潜能。与此同时, 教师角色发生改变, 不再是教学过程中的知识传授者, 而是学生学习的引导者和推动者, 需要密切关注学生的学习过程, 并及时给予指导和帮助, 确保学生掌握知识、解决问题和培养核心能力<sup>[5]</sup>。然而, 由于教学目标和实施条件的差异, 问题驱动式教学多见于实验或实践课程环节<sup>[6-7]</sup>, 而在理论授课中的应用相对较少。为此, 基于“遥感原理与应用”课程基础概念繁多、理论知识抽象和技术更新快速等特点, 研究以“大气散射”知识点为例, 在理论授课中实施问题驱动式教学实践, 通过“创设情境→提出问题→知识讲解→解决问题”四个步骤重构课堂教学内容, 以提高学生的自主学习能力、知识建构能力和工程实践素养。

**基金项目:** 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (研究生教育类) (2025SJGLX099Y); 河南省高校实验室工作研究会 2026-2027 年研究项目 (ULAHN202605); 河南城建学院高等教育教学改革研究与实践项目 (2026JG066、2024JG156、2024JG163)。

**作者简介:** 张志敏 (1989—), 女, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向为生态环境遥感。

# 1 问题驱动式教学模式的设计思路

## 1.1 设计原则

针对“遥感原理与应用”课程基础概念繁多、理论知识抽象和技术更新快速等特点，在已有研究<sup>[8]</sup>基础上，构建了问题驱动式教学模式的四条核心设计原则，具体如下。

### 1.1.1 案例真实性

问题驱动式教学需要以问题或案例来引出授课内容，为激发学生的学习兴趣和思维，所选用问题或案例必须是真实存在的，比如学生亲身感知的自然现象、发生在身边的区域工程案例、能接触到的科研项目，或公众关注的社会热点问题等。这种基于真实情境设计的问题，既能保证专业知识的科学性和严谨性，又有助于创设生活化和近体化的案例情境，有效提升学生的专业素养和课程参与度。

### 1.1.2 形式多样性

为避免问题驱动式教学容易出现的模式僵化问题，除常用的个体探究、小组讨论、专题分享、案例仿真等形式外，还须及时拓展新的课堂教学形式，以提高学生的学习兴趣。例如，以“不同空间分辨率遥感数据的适用范围和关键考量”为主题，利用角色扮演或课题辩论丰富教学过程，让学生在查询资料、整理思路、辩论交流的过程中学习和理解知识。此外，多种教学策略的穿插和交替使用，能更好地提高学生的认知深度。

### 1.1.3 难度渐进性

所设计的问题难度要科学分阶、循序渐进、符合认知规律，满足从简单到复杂、从部分到整体、从具体到抽象等要求，既尊重学生的个性化发展需求，又要避免因问题难度跳跃过大而导致的学习挫败感。在问题驱动式教学的实施初期，可以为学生提供解决问题的指导模板或步骤提示，培养学生的自主探索能力；经过一定时间训练后，逐步调整支持力度直至撤除引导，帮助学生突破认知边界，在挑战中自主构建可行的问题解决方案。

### 1.1.4 效果可评估

教学评价是问题驱动式教学实践的重要一环，旨在通过科学的方法系统评估学生在学习过程中的知识掌握、能力发展、创新培养和思维提升等多维成效。在评价过程中要同时关注“过程”与“结果”，既通过课堂测试、期末考试、课后作业等形式定量考察知识掌握程度和问题解决方案的质量，又要通过课堂表

现、小组互评、调查问卷等方式定性评估学生在问题分析、知识理解、讨论沟通、结果表达过程中的表现。定量与定性评价结果也可为课程的优化和改革提供决策依据。

## 1.2 实施步骤

利用“线上+线下”混合教学模式，将问题驱动式教学法融入课前、课中和课后三个阶段，来激发学生主动学习知识、培养创新思维和解决实际问题的能力。该方法在“遥感原理与应用”课程中的具体实施过程如图1所示。

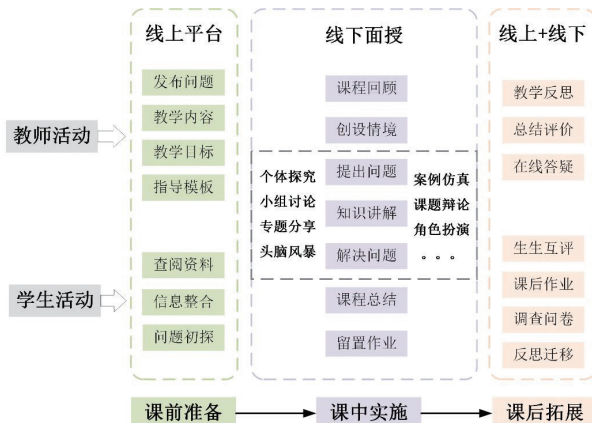


图1 问题驱动式教学在“遥感原理与应用”课程中的实施过程

在课前准备阶段，任课教师依托“学在城建”教学平台发布课程任务和知识图谱，包括要剖析的问题、教学内容、教学目标和指导提示等内容，明确学习目标和课程教学方向；学生则根据课程要求和学习导航，通过图书馆数据库、政府公开数据平台或智能化AI辅助工具等途径查阅资料、收集信息、整合知识，对要剖析的问题进行初步探索，绘制“问题—原因—结果”的关联图来形成预习思路。

课中，任课教师采用“回顾—建构—应用—升华”四个阶段开展课堂教学，即首先带领学生回顾上节课的核心内容来巩固所学知识，然后利用实际案例和认知冲突创设问题情境来引出本节内容；在知识讲解过程中利用个体探究、小组讨论、专题分享、头脑风暴、案例仿真、课题辩论、角色扮演等形式引导学生理解重点、难点知识，并提升个人素养；最后，由任课教师总结课程内容，并布置具有差异化的课后作业来加深知识理解。

授课结束后，任课教师通过线下或线上平台（如课程微信群、“学在城建”平台）及时响应学生疑惑，针对共性问题制作短时“微解答”视频上传课程资源

库,结合学生讨论、课堂测试、AI学情分析报告等综合评定平时成绩并进行教学反思;学生需要绘制思维导图来总结课堂学习成果,利用课后实践作业提升专业素养,并通过调查问卷和座谈交流等反馈学习感受(包括教学满意度、方式适用度、个人收获度),从而为课程改进提供合理化建议。

## 2 问题驱动式教学的典型实践案例

### 2.1 教学内容

大气散射是《遥感原理与应用(第三版)》(孙家柄主编)教材第二章“电磁波与遥感物理基础”的重要知识点,是指电磁波穿过地球大气层时,与大气中的气体分子、气溶胶等粒子发生相互作用,使电磁波传播方向发生改变的现象,对于理解自然现象的物理机制、掌握遥感信号的传输过程、提高遥感数据的处理分析能力等具有重要意义。本内容计划授课45分钟,教学实施过程和时间安排详见2.3节。在实际理论授课环节,通过问题驱动式教学法,采用小组研讨形式,引导学生掌握大气散射的基本概念、类型、所引起的自然现象等基础知识,并能将所学理论与实际遥感应用联系起来,理解大气散射对遥感的影响,解决因大气散射引发的遥感数据解析和应用难题。此前,学生已经学习了电磁波谱、大气成分和大气垂直结构等基本知识,可为本节内容的学习奠定基础。

### 2.2 教学目标

(1)掌握大气散射的基本概念,以及大气散射的三种不同类型——瑞利散射、米氏散射和无选择性散射的定义、发生条件和相应特点。

(2)理解大气散射造成的自然界光学现象(如蓝天、白云、晚霞等)成因,重点理解自然现象背后的物理机制并增进对自然界的认识。

(3)通过分组讨论和分享交流激发学生的创新思维与合作精神,鼓励学生在遥感技术领域不断尝试新的方法和解决思路。

### 2.3 案例实践

#### 2.3.1 课前准备(时间不限)

任课教师通过“学在城建”平台发布教学大纲和教学执行大纲,明确下节课的教学内容、教学目标、教学流程和对学生的要求。另外,教师还可为学生提供课程预习思路:预习“大气散射”的概念→学习大气散射造成的自然现象→查阅资料,整理大气散射对遥感成像的影响→查阅资料,学习遥感影像大气校正

的校正思想和操作方法。

设计意图:

(1)制定学习任务、明确学习目标、构建高效教学框架,有助于扩展课堂互动深度。

(2)学生可以提前接触和熟悉所学知识,减少信息筛选时间,提高课前预习效率。

(3)培养自主学习和竞争意识,促进自由探索和创新思考效果。

#### 2.3.2 课中实施(45分钟)

(1)课程回顾(3分钟)

利用板书或PPT等教学工具,通过提问、讨论或线上抢答等方式,带领学生复习上节课学习的电磁波谱、大气成分和大气垂直结构等要点知识;将所学知识与本节课教学目标串联起来,形成一个完整的知识体系,帮助学生更好地理解知识之间的内在联系。

设计意图:帮助学生巩固已学内容,并为本节课的新概念和原理学习奠定基础。

(2)创设情境(6分钟)

教师活动:课程一开始,通过图片、视频和实例引出所学内容:2021年3月19日,中国天气网发布一篇《我国遭遇近10年来最强沙尘天气过程 影响范围超380万平方公里》文章。文章提到,我国北方地区3月份遭遇了近十年来最强沙尘暴,很多人发现当地出现了“蓝太阳”现象,如图2所示。根据图2展示内容提出问题1:你认为我们在沙尘天气看到的“蓝太阳”是如何形成的?“蓝太阳”的产生与哪些因素有关?



图2 在沙尘天气拍摄到的“蓝太阳”

学生活动:根据情境内容,学生思考提出的问题1,并总结可能的原因。

活动总结：①大部分学生的讨论结果是，“蓝太阳”的产生可能与沙尘天气和空气中的沙尘颗粒有关，但无法解释具体的产生原因。

②学生普遍对该话题产生了浓厚兴趣。

设计意图：①通过发生在身边的具体生活事件来激发学生的好奇心和探索欲，提高他们的学习兴趣和参与度。

②情境内容与学生生活息息相关，使他们更容易投入其中，加深对情景的理解和专业知识的记忆。

(3) 提出问题（10分钟）

教师活动：通过PPT、视频等多媒体手段展示“蓝天、白云、夕阳、朝阳”等不同自然条件下的照片或视频，让学生直观感受大气散射带来的各种自然现象。随即，针对展示内容提出一系列问题：

问题2：为什么晴朗的天空是蔚蓝色的，而阴沉的天空是灰白色的？

问题3：我们都知道云是小水滴聚集而成的，小水滴本身是无色的，那么，为什么聚集而成的云朵是白色的？

问题4：为什么朝阳和夕阳看起来是红橙色的？而中午的太阳看起来是白色的？这些都是什么原因导致的？

学生活动：学生分组讨论（每组4~5人为宜），任意抽调三组对问题2~4进行总结性发言。

活动总结：①大多数学生能积极投入讨论，并根据课前收集的资料及时总结个人结论。

②学生的回答仅能解释一部分原因，无法得出明确结论。例如对于问题2，学生的回答仅停留在天空颜色很可能与天空状态和大气组成成分相关，但无法进行深入解释。

③学生在产生认知冲突的基础上，普遍对后续内容学习兴趣浓厚。

设计意图：①鼓励学生根据已有知识对提出的问题进行假设或回答，这样能迅速引起学生的好奇心。

②任课教师不随意否认学生得到的任何一个结论，营造一个开放、包容的课堂氛围，以提高学生的探索欲和体验感。

③由于课前已经做了充分准备，大多数学生的参与度和积极性较高，能在分组讨论中进行初步探究，有助于培养他们的团队协作、沟通交流和自主学习等能力。

(4) 知识讲解（8分钟）

任课教师结合PPT、动画、视频等多媒体教学工具，讲解大气散射的相关概念和重点、难点知识。

大气散射：电磁辐射在传播过程中遇到大气中的小微粒（包括大气分子、气溶胶、小水滴等）而使传播方向发生改变的现象。

瑞利散射：当大气粒子直径远远小于入射电磁波波长时，会产生瑞利散射。瑞利散射主要由大气中粒径很小的大气分子造成，其散射特点是前向和后向散射强度几乎相当。

米氏散射：是大气粒子直径与入射电磁波波长相当时产生的大气散射，主要由大气中粒径较大的气溶胶造成。米氏散射的前向散射强度大于后向散射。

无选择性散射：当大气粒子直径远远大于入射电磁波波长时，会产生无选择性散射，这主要由大气中的小水滴造成。无选择性散射的特点是散射强度和方向与电磁波波长无关。

设计意图：①明确本节课教学目标，将教学内容和知识点进行梳理，帮助学生直观理解复杂概念。

②将重点和难点知识分解成若干个小问题，厘清思路、化繁为简、逐一讲解，有效促进学生的知识理解。

(5) 解决问题（15分钟）

教师活动：专业知识讲授之后，任课教师引导学生抽丝剥茧、进行分析，逐一解释前述提出的问题1~4，例如问题1：在沙尘天气，大气中会含有一些粒径比较大的沙尘、烟雾等颗粒，使电磁波发生米氏散射。引起米氏散射的沙尘颗粒通常都大于可见光电磁波波长，因此，对可见光中波长最长的红橙光散射十分明显，而对波长较短的蓝光散射强度较小。当人们抬头看太阳时，波长较长的红橙光被散射到其他方向，只剩下波长较短的蓝光进入眼睛，此时，人们在地面上看到的太阳就是蓝色的。

学生活动：学生分组讨论（每组4~5人为宜），尽量保证每组同学都能得到回答问题的机会。

活动总结：①学生急于展示自己的学习成果，因此，在此环节讨论十分热烈，回答问题的积极性很高。

②基本上所有小组在教师的引导下都能正确回答问题，对于一些不太完善的地方，任课教师要及时纠正和解释。

设计意图：①理论知识与生活实际相联系，能让学生真正感受到所学知识的实用性，增强专业认知和专业自信。

②以问题为驱动，引导学生主动寻找答案，培养

他们的学习积极性。

③通过教师的引导和鼓励,学生主动探索出问题1~4的答案,在此过程中有助于建立良好的师生关系,增强师生之间的信任和互动。

(6) 作业留置(3分钟)

教师活动:总结当天的学习内容,帮助学生巩固课堂上学习到的知识,引导学生通过思维导图的形式整理笔记、梳理知识,并要求学生结合所学内容,课下查阅资料,完成相应的课后作业。

作业1:大气散射对遥感数据获取或遥感应用会产生什么样的影响?(必做)

作业2:利用遥感影像进行地物信息提取,如何才能有效削弱大气散射的影响?(必做)

作业3:学习“6S”(Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)辐射传输模型中,用来削弱大气散射的核心算法原理。(可选)

如若时间充裕,可针对作业1~2组织学生在课上简单讨论,以便为大家提供借鉴和思路。将作业3设置为选做内容,留给学有余力或感兴趣的同学课下进行探索,不做强制要求。

设计意图:①通过内容总结,加深理解和记忆,确保知识掌握得更加牢固。

②留置作业有助于学生提前预习新知识,为学习后续内容做好充分准备。

③通过设置与查阅资料相关的作业,培养学生自主学习能力,提升学生的信息素养和探索精神。

④为不同层次的学生制定个性化学习方案,满足差异化教学要求。

### 2.3.3 教学反思(60~100分钟)

(1)教师要记录整个教学过程的学生反应、讨论效果、师生互动及各环节所用时间,客观分析本节课的授课效果。

(2)通过匿名问卷调查和个别访谈等方式了解学生的学习感受和建议,针对学生普遍反映的问题进行分析总结,并制定具体的改进措施。

(3)教师将课堂反思结果和改进方案与同事进行交流,以促进教学经验共享和教师之间的相互学习。

## 3 教学实践成效

### 3.1 教学目标达成度

教学目标达成度是衡量实际教学效果与预先设定的教学目标之间吻合程度的指标,能准确反映学生对

所学知识的掌握程度,也是促进课程持续改进和个性化教学的重要依据。为此,教学团队在课程教学结束后,通过定量评价(70%)和定性评价(30%)综合评定学生对“遥感原理与应用”教学目标的达成情况。其中,定量评价内容包含学生的期末考试成绩、课堂测试成绩、课后作业成绩和课堂表现(讨论和回答问题)等分项。定性评价则是学生对每个教学目标达成情况的自我评价,包含若干个与教学目标相关的题目,每个题目又分未达成(0.45)、基本达成(0.7)、达成(0.85)和完全达成(0.95)四个选项,在学生匿名选择后,分别统计四个选项选择人数与相应选项系数的乘积,来计算最终的定性评价结果。

2023年以前,本课程主要使用“教师单向传递、学生被动接受”的讲授法进行教学,自2023年起,对本课程教学方式进行了改革,在理论授课过程中采用问题驱动式教学实践。2022~2024年相应教学目标的实际达成度统计如图3所示,由图3可知,问题驱动式教学方法的引入能显著提升教学目标达成度,尤其对于侧重理论知识理解的教学目标1和教学目标2达成度明显提升。这表明实施问题驱动式教学策略后,学生在知识理解深度、实践技能水平和价值观念塑造等多个维度均有明显进步。

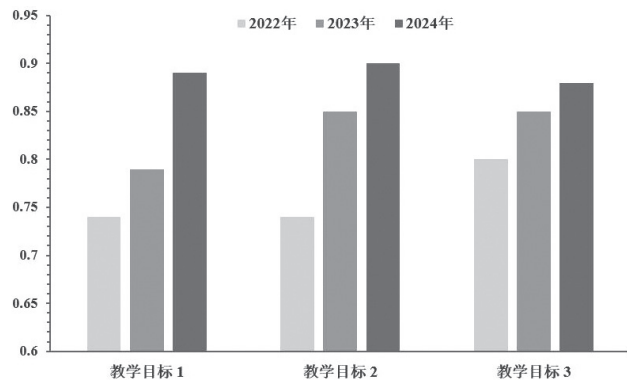


图3 2022~2024年教学目标达成度统计

### 3.2 教学满意度

教学满意度不仅能准确衡量学生对课程的教学过程、教学内容和教学效果的满意程度,还能真实反映教师在授课方式和授课内容方面的不足,从而为课程体系优化和课程改革创新提供借鉴依据。本课程学习结束后,教学团队会通过座谈交流、调查问卷和线上评价等多种方式收集学生对课程学习的意见和建议。在座谈交流中,学生普遍反映引入问题驱动式教学方法后,学习内容变得更加生动有趣、易于理

(下转第26页)

# 光伏建设背景下荒漠区植被覆盖变化遥感评估研究

蒋鸿飞

(中国电力工程顾问集团新能源有限公司, 北京 100009)

**摘要:** 针对荒漠区光伏建设背景下现有遥感植被变化评价研究多侧重于传统植被指数、忽略土壤背景效应与组件阴影干扰、难以准确反映植被丰度的问题, 以内蒙古阿拉善光伏园区(指光伏电站及其周边影响缓冲区)为研究对象, 以2013年(建设前)和2025年(建设后)为代表时点, 提出基于相对植被丰度(Relative Vegetation Fraction, RVF)指标的遥感评估方法。首先提取集中式光伏电站的空间范围, 并在此基础上构建RVF指标, 通过对植被指数进行区间归一化映射, 有效减弱干旱区土壤背景差异及光伏组件阴影对植被监测结果的干扰, 提高像元尺度植被覆盖水平的表征精度, 然后进一步对建设前后园区植被丰度等级结构与空间分布特征进行对比分析。结果表明, 在研究期内整体植被丰度呈上升趋势, 植被覆盖结构明显优化。研究表明, 基于RVF的遥感方法能够有效捕捉荒漠区光伏建设背景下的植被响应特征, 为类似生态影响评价提供了更具鲁棒性和解释力的定量分析框架。

**关键词:** 光伏建设; 荒漠区; 植被覆盖变化; 遥感评估

## 1 引言

近年来, 随着我国新能源产业的快速发展, 集中式光伏电站在西北干旱与荒漠地区持续推进, 逐渐形成大规模、连片化的工程景观<sup>[1]</sup>。阿拉善地区地处干旱荒漠区, 太阳辐射条件优越, 是光伏资源开发的重要区域之一。与此同时, 该区域生态系统结构相对简单、植被覆盖度低, 对外部扰动较为敏感, 在能源开发背景下, 其生态环境变化受到广泛关注。

从生态环境角度看, 光伏工程建设改变了地表利用方式和局地下垫面结构。大面积光伏组件及其配套设施不仅占据原有地表空间, 还通过遮阴、削弱地表蒸发、改变风沙过程等方式影响近地表环境条件。在干旱区, 这类变化可能对植被生长环境产生双重效应: 一方面, 工程扰动可能压缩原有自然地表; 另一方面, 遮阴和水分条件改善也可为局地植被生长创造有利条件。因此, 光伏建设与植被覆盖变化之间的关系具有一定复杂性, 有必要在区域尺度上加以系统认识<sup>[2]</sup>。

遥感技术为大尺度生态环境变化监测提供了重要手段, 其长期连续观测能力使得植被覆盖变化分析成为可能。然而, 在荒漠区条件下, 植被稀疏、土壤背景复杂以及人工设施阴影等因素, 使得植被变化信号的提取和解释面临一定困难。如何在复杂背景下客观刻画植被覆盖变化特征, 避免过度依赖单一指标或局部现象, 是当前荒漠区生态评估需要关注的问题<sup>[3]</sup>。面向荒漠区的复杂地表条件, 研究构建了鲁棒性更强

的植被覆盖变化评估方法, 通过提出并应用RVF指标, 提高植被监测精度与可比性, 从时序角度揭示光伏建设前后的植被响应机制, 为同类生态环境评估提供通用思路。

## 2 研究区与数据

### 2.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区阿拉善地区, 地处我国西北干旱荒漠区腹地, 地貌以高原、戈壁和沙地为主, 气候具有典型的温带大陆性干旱特征, 降水稀少、蒸发强烈, 水热条件年际波动明显。受自然条件制约, 区域植被以荒漠植被和稀疏草本为主, 覆盖度整体较低, 生态系统结构相对简单, 对地表扰动较为敏感。阿拉善地区太阳辐射资源丰富、地表开阔, 是近年来集中式光伏电站布局的重要区域, 电站多分布于戈壁、沙地及低植被覆盖区域, 工程规模大、空间集聚性强。随着光伏工程持续建设, 区域地表利用方式和景观格局发生变化。在长期干旱背景下, 工程活动对近地表水分与能量条件的潜在影响, 使得在区域尺度上识别植被覆盖变化具有重要意义。

### 2.2 数据

研究综合采用多源光学遥感数据开展分析, 数据主要包括GF-2(2025年)、Landsat(2013年和2025年)和Sentinel-2(2013年和2025年)影像。GF-2影像空间分辨率高(全色约1m, 多光谱约4m), 可清晰识

**作者简介:** 蒋鸿飞(1982—), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力工程测量、遥感技术研究工作。

别光伏组件阵列及场内道路等细节，主要用于 2025 年光伏电站范围判读与边界校核。

Landsat 系列影像 (Landsat 8/9 OLI) 具有时间连续、历史跨度长的优势，空间分辨率为 30m，适用于开展跨年度植被覆盖变化分析。Sentinel-2 MSI 影像空间分辨率为 10~20m、重访周期短，可有效补充 Landsat 在时间和空间上的不足，用于提高植被空间格局刻画的精细程度。研究选取 2013 年作为光伏建设前的代表时相，2025 年作为光伏电站建成并稳定运行后的代表时相，优先选取生长季且云量较低的影像数据，以减弱季节差异对植被判识的影响。

为保证多期、多源影像的可比性，所有遥感数据统一进行数据预处理，包括辐射定标、大气校正、云与云阴影剔除、几何校正、统一投影、空间裁剪及质量筛选等；其中，进一步对不同传感器影像进行空间分辨率协调与波段对应关系统一，以降低多源数据差异带来的影响。在此基础上，结合基础地理资料与高分辨率影像对关键区域进行辅助校核，以提高数据的一致性与分析结果的可靠性。

### 3 研究方法

以光伏建设前后植被覆盖变化识别为目标，技术流程如图 1 所示。通过统一数据来源、分析尺度与统计口径，对不同阶段植被覆盖变化进行定量对比，从而评估光伏建设背景下荒漠区植被覆盖变化特征。

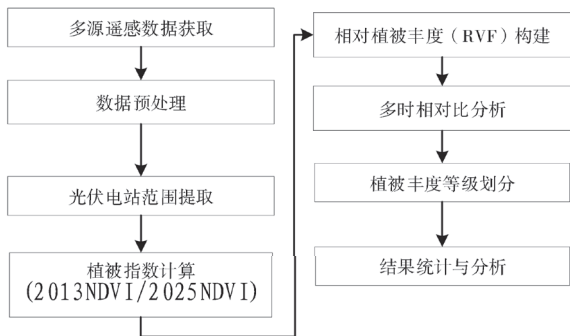


图1 技术流程

#### 3.1 光伏电站范围识别

光伏电站范围采用“规则特征辅助提取—人工校核修正”的半自动方法完成。首先基于 Landsat 系列影像和 Sentinel-2 MSI 影像，利用光伏组件在可见光与近红外波段中反射率偏低、空间排列规则的光谱与几何特征，基于 ENVI 软件对潜在光伏区域进行初步筛选，形成候选光伏掩膜。随后将筛选结果导入 ArcGIS 平台，通过连通域分析和面对象生成，并结合最小面

积与形态规则性约束，剔除零散噪声斑块和非光伏地物，进而获得光伏电站初始提取结果<sup>[4]</sup>。在此基础上，利用 GF-2 高分辨率影像及多时相影像进行人工校核与边界修正，对误判和遗漏区域进行调整，最终形成光伏电站矢量边界。该方法在保证提取精度的同时具有良好的可操作性，可适用于荒漠区集中式光伏电站范围识别，并为后续植被覆盖变化分析提供统一的空间基础<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 植被指数计算

采用归一化植被指数 (NDVI) 作为基础植被信息指标，计算公式为：

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

其中， $\rho_{NIR}$  与  $\rho_{RED}$  分别为近红外与红光波段反射率。NDVI 计算基于 Landsat 与 Sentinel-2 地表反射率产品完成。为降低季节差异和短期气候波动影响，优先选取生长季且云量较低的影像，并在条件允许时采用多景合成方式获取代表性 NDVI 数据<sup>[6]</sup>。

#### 3.3 相对植被丰度 (RVF) 构建

考虑到荒漠区植被稀疏、土壤背景复杂，直接对比不同年份 NDVI 易引入背景差异。通过对 NDVI 进行区间归一化处理，构建相对植被丰度 (RVF) 指标，以增强不同阶段植被覆盖状况的可比性，计算公式为：

$$RVF = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

其中， $NDVI_{min}$  与  $NDVI_{max}$  分别表示研究区 NDVI 的下限值与上限值，采用分位数方式代替极值，以降低异常像元影响。RVF 取值范围为 0~1，数值越大表示植被相对覆盖水平越高。

#### 3.4 植被丰度分级与变化统计

为表达植被覆盖结构变化，对 RVF 进行分级处理，形成五级植被丰度等级，分级阈值如表 1 所示。该分级标准用于建设前后植被覆盖等级变化统计。

表1 相对植被丰度 (RVF) 分级标准

等级	含义	RVF 范围
L	低丰度	0.00~0.20
ML	中低丰度	0.20~0.35
M	中丰度	0.35~0.50
MH	中高丰度	0.50~0.65
H	高丰度	0.65~1.00

基于建设前与建设后 RVF 数据，统计各丰度等级的面积与占比变化，并计算相对植被丰度变化量：

$$\Delta RVF = RVF_{post} - RVF_{pre} \quad (3)$$

其中， $\Delta RVF$  为建设后与建设前相对植被丰度的差

值。 $\Delta RVF > 0$  表明植被覆盖呈增加趋势，反映生态状况改善； $\Delta RVF < 0$  表明植被覆盖呈降低趋势，反映生态状况退化； $\Delta RVF = 0$  表明植被覆盖总体保持稳定。基于  $\Delta RVF$  的空间分布，可进一步识别植被恢复与退化的空间异质性特征。

## 4 结果与分析

### 4.1 光伏电站提取结果与空间分布特征

光伏电站提取结果如图 2 所示，研究区光伏电站整体呈现集中连片分布特征，电站边界形态规整，组件阵列纹理清晰，与周边戈壁、沙地等自然地表边界区分明显。

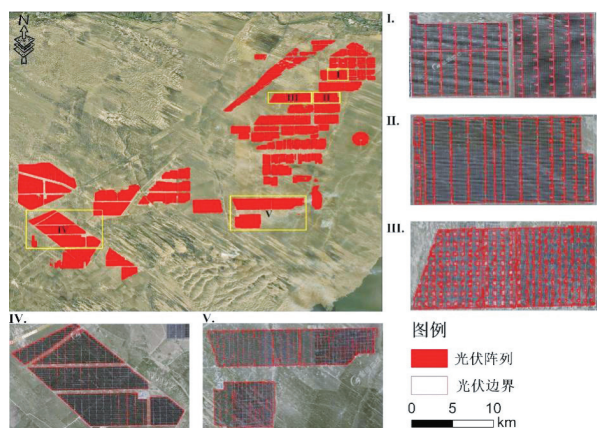


图2 光伏电站提取结果

定量统计结果表明，研究区共识别集中式光伏电站片区 5 处（图 2 中 I、II、III、IV、V），光伏电站占地总面积约为  $350.18 \text{ km}^2$ ，单体规模以中大型电站为主，整体具有明显的规模化特征。光伏电站多布局于地形相对平坦、地表覆盖度较低区域，符合荒漠区光伏工程选址的一般规律。

提取的电站边界与 GF-2 高分辨率影像判读结果具有良好一致性，边界位置与组件阵列及场内道路匹配较好，少量误差主要集中在电站边缘过渡区域，对整体面积统计影响有限。总体而言，所获得的光伏电站提取结果能够较准确地反映研究区内光伏工程的空间分布状况，为后续植被覆盖变化分析提供可靠的空间基础。

### 4.2 相对植被丰度整体变化特征

光伏园区建设前后植被变化如图 3 所示，研究期内，植被覆盖水平整体呈明显提升趋势。统计结果表明，研究区相对植被丰度 (RVF) 平均值由建设前约 0.14 提高至建设后约 0.23，植被覆盖水平由低丰度等级整体转变为中低丰度等级，反映出区域生态状况的持续

改善。

从空间分布特征看，建设前研究区植被以低丰度等级为主，低覆盖区域分布连续；建设后，低丰度区域明显收缩，中低及中等丰度等级区域分布范围扩大，表明植被覆盖水平在区域尺度上实现整体提升。

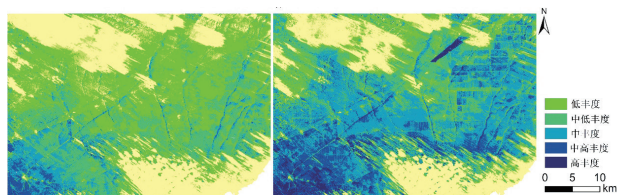


图3 光伏园区建设前后植被变化

### 4.3 植被覆盖等级结构变化特征

基于植被丰度分级标准，研究期内植被覆盖等级结构发生显著调整，统计结果如表 2 所示。结果显示，中丰度以下 ( $RVF < 0.35$ ) 区域面积由建设前约  $500 \text{ km}^2$  减少至建设后约  $390 \text{ km}^2$ ，整体降幅约为 20%~25%，其中低丰度等级区域变化最为明显，面积由建设前约  $235 \text{ km}^2$  缩减至建设后约  $160 \text{ km}^2$ 。中低丰度等级区域面积亦呈现下降趋势，由建设前约  $265 \text{ km}^2$  减少至建设后约  $230 \text{ km}^2$ 。

表2 建设前后植被丰度等级面积变化/ $\text{km}^2$

丰度等级	建设前	建设后
L	235	160
ML	265	230
M	100	420
MH	35	185
H	≈0	37
合计	635	1032

与此同时，中丰度及以上 ( $RVF \geq 0.35$ ) 等级区域面积显著扩张，由建设前约  $100 \text{ km}^2$  增长至建设后约  $420 \text{ km}^2$ ，成为研究区内占比最大的植被丰度等级。中高丰度等级区域面积由建设前约  $35 \text{ km}^2$  增加至建设后约  $185 \text{ km}^2$ 。高丰度等级区域在建设前几乎缺失，建设后其面积增加至约  $37 \text{ km}^2$ （占分析范围总面积的 3% 左右）。这一变化趋势与光伏建设引起的地表条件变化以及周边水分、微环境改善有关。一方面，光伏组件的遮阴效应与背后空间的能量平衡调节可能减弱地表蒸发强度，为部分植被群落提供更稳定的水分与微气候条件；另一方面，建设期间的地表平整和泄水设施建设可能改变了局部地表径流过程，使得部分原本低植被覆盖区域获得了更有利的生长条件。

总体来看，研究区植被覆盖结构表现为低等级持续缩减、中等级快速扩张、高等级逐步出现并缓慢增加的变化特征，植被覆盖质量在整体上得到明显提升，

而植被空间格局的基本形态保持相对稳定。

#### 4.4 植被变化的空间格局特征

从空间格局角度看,研究期内不同植被丰度等级的主体分布位置基本保持稳定,未发生明显迁移,表明研究区植被空间格局整体保持相对稳定,变化主要体现在各丰度等级面积占比的调整上。

部分裸地和沙地边缘区域由低丰度等级逐步向中低或中等丰度等级转变,使植被斑块连续性增强,区域绿化趋势清晰。整体而言,研究区植被变化以覆盖等级提升和结构优化为主要特征,而非空间格局的剧烈重组。

## 5 结语

以内蒙古阿拉善典型光伏园区为研究对象,基于建设前后两期遥感影像构建相对植被丰度(RVF)指标,评估了光伏建设背景下荒漠区植被覆盖变化特征。研究对于客观认识荒漠光伏开发的生态环境影响、优化光伏基地规划布局、推进沙戈荒地区新能源开发与生

态保护协同具有一定的理论意义和实践价值。但研究仅基于两个时点影像进行对比,未充分揭示动态变化,且RVF对极低覆盖区的敏感性有待检验。未来可基于更长时间序列与多源数据验证RVF指标,并引入气候与土地利用变量开展驱动机制分析。

#### 参考文献

- [1] 谢卓洋,鲍学英,李亚娟,等.荒漠化地区集中式光伏电站遥感提取与碳效益核算方法[J].地球信息科学学报,2025,27(12):2951-2965.
- [2] 陈斌.基于深度学习的Landsat遥感影像的光伏电站提取方法研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2024.
- [3] 王彦龙,李雪峰,李东敬,等.基于卫星遥感技术的光伏面板识别研究[J].电力设备管理,2025,(13):194-196.
- [4] 刘文清.基于高分遥感影像的光伏板分割方法研究[D].北京:中国人民公安大学,2025.
- [5] 陈雨艳,张军,张俊,等.自适应多源遥感影像的地面光伏提取方法[J].遥感信息,2024,39(3):136-143.
- [6] 马永,王俊,张子健,等.基于遥感核AI图像的建筑物顶光伏资源潜在容量估计[J].自动化技术与应用,2025,44(2):140-144.

(上接第22页)

解,虽然学习过程充满挑战,但对理论知识的理解程度有所提高。此外,课程团队还通过“学在城建”平台给每位学生发放了匿名调查问卷,调查结果显示,2022~2024年学生对本课程的评价分数分别为95.59、99.24和99.50,这表明大多数学生对问题驱动式教学实践的接受程度较高。

## 4 结语

问题驱动式教学是一种以真实问题为引入点,通过学生自主探究或团队协作来学习知识、培养能力的教学方法,为应用型本科的课程改革提供了重要的实践思路。为解决传统授课固有的教学模式单一、教授内容滞后、理论与实践脱节等问题,课程团队采用问题驱动式教学方法对“遥感原理与应用”理论课程进行改革实践,构建了问题驱动式教学模式下的课程设计思路,并以本课程“大气散射”知识点为例详细阐释了课堂教学过程,通过“创设情境→提出问题→知识讲解→解决问题”四个步骤完成课堂教学。经过两年的教学实践,教学目标达成度和学生评价满意度均有稳步提升,表明该方法有助于激发学生的学习兴趣和创新探索精神。未来,课程团队将继续秉承“以学

生为中心”的教学理念,不断发掘更多的典型教学案例,为培养更多高素质、复合型的遥感专业人才贡献力量。

#### 参考文献

- [1] 习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗:在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[J].前线,2022(11):4-28.
- [2] 张志敏,周颖杰,孙亚飞,等.“双创”背景下应用型本科高校非遥感专业遥感类课程教学改革探索[J].资源导刊,2023(10):32-34,39.
- [3] 刘玉安,谭晓波,刘珍.新工科背景下遥感类课程“专思创”融合的教学改革与实践:以“环境信息与遥感应用”课程为例[J].教育观察,2025,14(7):53-56,70.
- [4] 李峰,刘小阳,孙广通,等.OBE理念结合PBL方法的遥感实验课程教学模式设计[J].测绘与空间地理信息,2022,45(2):10-12.
- [5] 孙婕,尹国友,李文建.以问题为导向的探究式教学模式改革研究与实践:以“食品科学导论”课程为例[J].河南城建学院学报,2023,32(5):125-128.
- [6] 魏明,史红霞,全文婷,等.问题驱动教学法在电分析化学实验教学中的应用[J].化学教育(中英文),2024,45(24):30-37.
- [7] 朱波,王源秀,刘慧君,等.PBL教学模式在生物化学实验教学中的设计与实践[J].高教学刊,2024,10(1):123-127.
- [8] 赵玮,孙艳玲,钱永贵.基于PBL的高校“市场营销学”课程教学改革探究[J].西部素质教育,2024,10(8):154-157.

# 基于多源遥感数据的露天煤矿边坡监测技术研究

崔鑫

(内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司锡林郭勒盟蒙东矿业有限责任公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

**摘要:** 研究以内蒙古某露天煤矿为例, 集成地基合成孔径雷达(GB-SAR)、全球导航卫星系统(GNSS)与视频监测, 通过时间同步与坐标统一实现多源数据融合, 生成高精度数字地形模型(DTM), 并基于此开展InSAR时序形变反演。利用GNSS校正相位基线, 视频监测验证热点区形变, 实现边坡形变的高精度识别与多维验证。结果显示南缘边坡为主要变形区, 其形变速率受采动扰动与降雨双重影响显著。高精度DTM显著提升了InSAR分析精度, 为实时监测与早期风险识别提供了技术支持。

**关键词:** 多源遥感监测; 露天煤矿边坡; InSAR时序形变; 多源数据融合

## 1 引言

露天煤矿边坡监测是矿山安全生产与灾害防治的核心环节。随着煤炭资源开采强度的持续增加, 矿坑规模不断扩大、开采深度不断加深, 边坡的地质结构与应力场分布越发复杂, 滑坡、坍塌等地质灾害的风险显著上升。近年来, 国内外多起露天矿边坡失稳事故表明, 单纯依靠经验分析或静态力学模型, 难以有效捕捉边坡在动态采动与环境扰动下的实时变形特征。如何实现边坡稳定状态的动态监测、精准识别与预警分析, 成为露天煤矿安全管理的关键科学问题。

传统边坡监测方法主要依赖人工巡检、全站仪测量及少量单点监测, 虽然可获得一定的几何信息, 但数据稀疏、时效性差, 难以支撑现代化矿山的安全需求。近年来, 遥感与空间信息技术推动了多源监测在边坡动态监测中的应用。全球导航卫星系统(GNSS)可实现毫米级位移测量, 适用于关键点的高精度趋势跟踪, 但本质仍属于离散点监测, 难以刻画边坡面状变形分布, 且在露天矿深大采坑中易受遮挡、反射、多路径效应影响, 导致数据稳定性下降; GB-SAR能实现广域、全天候面状监测, 识别整体变形热点区, 但在露天矿复杂地形条件常受到几何畸变(叠掩、阴影)与相干性下降(植被、粉尘、降雨湿度变化)影响, 同时GB-SAR仅提供视线方向位移, 难以直接反映真实三维位移分量; 视频与机器视觉技术可捕捉裂缝扩展、落石、滑移等表现征兆, 具备直观性与实时性优势, 但其有效性依赖光照条件与视场覆盖, 且对微小变形的定量能力不足, 易受雾霾、夜间、遮挡与视角变

化影响<sup>[1]</sup>。

基于此, 以内蒙古某大型露天煤矿为研究对象, 构建了一种多源遥感监测的边坡监测体系。该体系综合利用GB-SAR、GNSS和视频监测数据, 建立三维数字地形模型(DTM), 并通过数据融合算法实现边坡动态变形的量化分析与敏感区识别。研究旨在探索一种高效、可扩展的露天煤矿边坡监测方法, 为矿区安全生产提供技术支撑与科学依据。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区概况

选取内蒙古某大型露天煤矿为研究区, 该矿区位于鄂尔多斯盆地北缘, 地处干旱半干旱地区, 地形总体为低山丘陵与台地交错分布。区内地貌起伏明显, 地势总体呈西北高、东南低的倾斜趋势, 地表切割强烈, 沟谷发育, 地形起伏高度一般为60~150m。矿区以侏罗系煤系地层为主, 岩性主要由砂岩、粉砂岩、泥岩及煤层互层组成, 局部夹有薄层砾岩。煤层赋存稳定, 厚度较大, 但受断层和节理影响, 岩体结构较为破碎。表层覆盖第四系松散层, 厚度变化较大, 局部可达20m。矿区多年开采活动形成多个台阶式采坑, 部分边坡坡角较大, 存在崩塌、剥落和滑移等地质风险。

研究区露天煤矿边坡具有地形起伏大、台阶结构复杂、地层破碎且受采动扰动强烈等典型特征, 同时受季节性集中降雨与冬季冻融循环影响显著, 边坡稳定性呈明显的时空动态变化<sup>[2]</sup>。尤其在暴雨或采动扰动条件下, 边坡变形可能从缓慢发展转向加速变形,

**作者简介:** 崔鑫(2000—), 男, 汉族, 本科, 助理工程师, 主要从事露天煤矿基于边坡雷达与独立北斗卫星导航系统数据融合处理与可靠性分析工作。

而传统的人工巡检与间歇式测量方式难以及时捕捉这种突变趋势。此外,采坑内部高陡边坡易出现遮挡与视线受限,单一的点位监测难以反映整体变形分布与局部差异。因此,需要构建一种兼顾广域覆盖、全天候连续观测与局部高精度验证的监测体系,通过多源遥感手段对边坡形变进行综合识别与交叉验证,提升复杂地形条件下边坡动态监测的可靠性与预警能力。

## 2.2 遥感监测体系与数据来源

### 2.2.1 GNSS 监测系统

在采场主要边坡布设若干 GNSS 监测点,覆盖上、中、下不同台阶。设备采用双频高精度接收机,水平精度优于  $\pm 2.5\text{mm}$ ,垂直精度优于  $\pm 5\text{mm}$ ,采样间隔 30min。监测数据通过无线网络实时传输至数据中心,用于识别边坡整体及局部位移趋势<sup>[3]</sup>。GNSS 监测点分布如图 1 所示,标记为“BW-”,其中 BW 表示 Bench Wall(台阶边坡),后缀编号表示具体监测点序号。

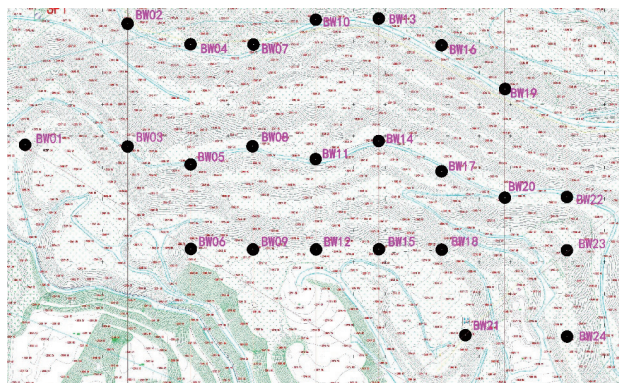


图1 GNSS监测点分布

### 2.2.2 SAR 监测系统

利用 GB-SAR 对矿区边坡进行定期扫描,监测范围覆盖主要采场及排土场边坡。SAR 数据空间分辨率约 0.1m,可实现厘米级形变监测。通过 InSAR 时序处理技术(SBAS 法),提取地表形变速率与累积位移信息,为边坡变形分析提供连续时空分布。

SBAS 法是一种典型的 InSAR 时序形变反演方法,其基本思想是在多时相 SAR 影像中,优先选择时间基线与空间基线均较小的影像对构建干涉图集,以降低去相关效应和几何误差对相位稳定性的影响。对于每幅干涉图,干涉相位通常由地形相位、形变相位、大气延迟相位及噪声项共同组成;SBAS 通过构建多时相干涉相位观测方程,并采用最小二乘或奇异值分解(SVD)等方式求解,获取像元级的累积形变量时间序列,进一步计算得到区域平均形变速率场。该方法对相干性要求相对较低、能够提取连续时空形变信息,适用

于矿区边坡等具有缓慢蠕动特征的地表形变监测<sup>[4]</sup>。

研究基于 GB-SAR 获取的多时相雷达影像,按照“小基线”原则构建干涉图对,对相位进行滤波与解缠处理后,采用 SBAS-InSAR 反演获得研究区视线方向(LOS)累积位移序列及形变速率分布。同时,为提高反演结果的绝对精度与时间一致性,利用 GNSS 点位位移序列对 InSAR 解算结果进行相位基线与零点偏差校正,结合高精度 DTM 对地形相位进行补偿,实现对复杂地形露天煤矿边坡的高精度时序形变反演与敏感区识别。

### 2.2.3 视频与机器视觉系统

在边坡重点区域布设高清摄像设备,通过图像识别算法检测裂缝扩展、落石及滑移迹象。系统具备夜视与自动对焦功能,可实现 24 小时不间断监测。经语义分割与边缘检测算法处理后,视频数据用于验证 GNSS 与 GB-SAR 监测结果。

## 2.3 数据预处理与融合

各类监测数据经过时间同步、坐标统一与异常值剔除后,整合至统一的地理参考框架。研究以 GNSS 监测点为基准,实现 GB-SAR 形变场与视频影像的几何校正<sup>[5]</sup>。随后采用 TIN 插值与加权融合方法构建矿区三维数字地形模型(DTM),空间分辨率为 0.5m,精度达  $\pm 0.1\text{m}$ 。

融合后的多源数据形成时序位移数据集,用于分析边坡表面形变过程与空间分布特征。初步结果表明,位移主要集中于采场西南缘及排土场接合部,变形速率一般为 0.5~1.5mm/d,呈缓慢蠕动特征,与采动活动和降雨时段密切相关。

## 3 研究方法

### 3.1 技术路线

研究构建了一个以 GB-SAR 形变分析为核心、GNSS 与视频监控为辅助的综合监测框架,重点在于利用多源数据建立高精度数字地形模型(DTM),并基于 InSAR 时序分析实现边坡形变的动态识别与验证。

(1) 数据获取。通过 GNSS、GB-SAR 和视频监控系统获取不同时间、空间分辨率的地表形变数据。主要包括:① GNSS 提供高精度点位位移数据;② GB-SAR 系统采集大范围的面状形变影像;③ 视频系统获取地表裂缝、滑移与落石等视觉特征数据。

(2) 数据预处理。各监测数据经过时间同步、坐标统一及异常值剔除后,基于 GNSS 控制点对 GB-SAR 数据进行几何配准与基线误差校正,提高干涉解算精

度；视频影像经仿射变换配准至 GB-SAR 坐标框架，用于辅助地表形态校核。融合后的数据用于生成高精度 DTM 模型，作为形变反演的空间参考基准。

(3) InSAR 时序形变分析。在已校正的 GB-SAR 影像基础上，采用小基线集 (SBAS-InSAR) 算法提取地表形变量与形变速率场<sup>[6]</sup>。GNSS 数据作为外部约束参数用于相位基线校正，确保形变量的绝对精度与时间连续性。

(4) 结果验证与动态展示。将视频识别的裂缝变化与局部活动区域用于验证 GB-SAR 形变热点区的真实性与空间位置；同时，将 GNSS 位移时间序列与 InSAR 分析结果进行对比，评估监测系统的可靠性。最终在三维地形模型上实现形变云图与时序曲线的可视化展示，形成边坡风险识别与早期预警的技术支撑体系。

### 3.2 GNSS 监测与位移计算

GNSS 监测用于捕捉边坡表面关键点的三维位移变化。任意测点在时间  $t_i$  与  $t_{i-1}$  的空间位移计算公式为：

$$\Delta d_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (1)$$

公式 (1) 中， $\Delta d_i$  为第  $i$  个时刻相对于第  $i-1$  个时刻的三维位移增量 (单位：mm 或 m)； $x_i$ 、 $y_i$ 、 $z_i$  为 GNSS 测点在第  $i$  个时刻的三维坐标分量 (单位：m)，分别对应东向 (E)、北向 (N)、高程 (U) 或其等效坐标系。时间序列形变速率为：

$$v_i = \frac{\Delta d_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

公式 (2) 中， $v$  为形变速率， $\Delta d_i$  为某时间段内累计位移或位移增量。GNSS 数据通过卡尔曼滤波模型进行平滑处理，以减少环境误差影响。

### 3.3 SAR 监测与 InSAR 时序分析

GB-SAR 系统用于大范围面状形变监测。视线方向位移  $d_{LOS}$  与相位变化量  $\Delta\phi$  的关系为：

$$d_{LOS} = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi} \quad (3)$$

公式 (3) 中， $\lambda$  为雷达波长。通过小基线集 (SBAS) 算法对多时相干涉图进行处理，得到地表形变的时间序列模型：

$$D(t) = D_0 + \sum_{i=1}^{n-1} v_i (t_i - t_{i-1}) \quad (4)$$

公式 (4)， $D_0$  为初始形变基准量， $v_i$  为第  $t_i$  和  $t_{i-1}$  两个时刻之间的平均形变速率。

GNSS 监测点提供绝对位移基准，通过外部约束修正 SAR 解算偏差，实现时间序列的绝对定标，最终得到的形变速率场用于识别边坡潜在活动区和变形加速

趋势。

### 3.4 视频监测与视觉识别

视频监测系统利用机器视觉算法识别裂缝扩展、剥落及落石等表观变形活动。针对裂缝演化监测，采用 SIFT 特征提取与匹配，结合 RANSAC 外点剔除实现裂缝端点与边缘特征点的稳定跟踪。首先在裂缝区域提取尺度与旋转不变的 SIFT 特征点，并在相邻时刻图像中进行特征匹配；随后利用 RANSAC 估计单应性模型并剔除误匹配点，获得裂缝两端特征点的可靠对应关系。裂缝两端在像平面中的位置为  $(x_1, y_1)$   $(x_2, y_2)$ ，其相对位移为：

$$d_v = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (5)$$

通过 SIFT 特征匹配和光流法，计算裂缝动态演化速率：

$$V_v = \frac{d_v(t_i) - d_v(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad (6)$$

视频监测识别的热点区与 SAR 形变结果叠加，用于验证热点区的空间准确性和辅助判断形变性质。

### 3.5 数据融合与数字地形模型构建

为保证 InSAR 解算精度，GNSS、SAR 及视频数据需统一到同一坐标参考框架。采用仿射变换模型进行空间配准：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (7)$$

公式 (7) 中， $\mathbf{R}$  为旋转矩阵， $\mathbf{T}$  为平移向量， $(x, y, z)$  为传感器本地坐标下的原始三维点坐标， $(x', y', z')$  为转换为统一地理坐标系的三维点坐标。经过配准与插值后，结合高程数据生成高精度 DTM，为 InSAR 形变反演提供空间基准。

### 3.6 时序变化识别与动态可视化

通过 InSAR 时序分析得到的形变结果，结合 GNSS 验证与视频识别，形成多维动态可视化成果。设时间窗口为  $\Delta T$ ，形变量变化率可表示为：

$$R(t) = \frac{D(t+\Delta T) - D(t)}{\Delta T} \quad (8)$$

当  $R(t)$  超过经验阈值  $R_c$  时，系统触发形变加速预警。结果以形变云图、时序曲线和热点区动画形式展示，实现矿区边坡变形过程的动态可视化与风险识别。

## 4 结果分析

### 4.1 GNSS 监测结果

GNSS 系统共布设 15 个测点，覆盖采场南缘、东坡及排土场交界处等关键区域，连续监测周期 30 天，

获得超过3万组有效数据。测点空间分布合理,能够反映边坡整体与局部变形特征。监测结果显示,不同区域的位移速率存在明显差异:

(1) 南缘主采区(G1~G5): 平均位移速率为0.9~1.2 mm/d,最大累计位移约34mm,方向指向坡脚,表现为缓慢蠕变特征;

(2) 东坡区域(G6~G9): 位移速率较低,平均为0.3~0.5mm/d,曲线平稳;

(3) 排土场结合区(G10~G15): 受堆载影响显著,位移速率达1.5mm/d,其中G13、G14点在连续降雨期间出现加速变形。GNSS位移时间序列整体呈“三阶段”特征: 缓慢增长—加速变形—趋于稳定。第18~22天,降雨导致G13点速率增加约1.8倍,表明气候因素对表层岩土体变形具有重要影响。

#### 4.2 SAR 时序形变反演结果

研究基于GNSS修正后的GB-SAR影像,采用SBAS-InSAR方法反演获得研究区LOS方向累计形变量时间序列,并通过线性拟合得到形变速率场。GB-SAR影像覆盖范围约1.8km<sup>2</sup>,空间分辨率0.1m,时间间隔7d。研究区SBAS-InSAR反演获得的累积位移如图2所示,主要结果如下:(1) 整体形变特征: 南缘边坡形变量最大,沿视线方向累计形变量约52mm;(2) 空间分布特征: 形变量呈条带状,集中分布于中部台阶坡面,与地层层理一致,显示沿层滑动特征明显;(3) 时序演化趋势: 形变随时间线性增长,个别区段在降雨期表现出阶段性加速。

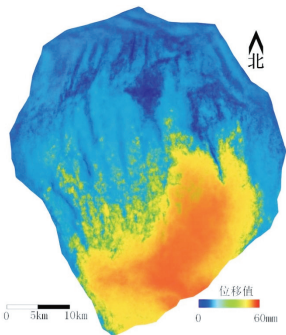


图2 研究区SBAS-InSAR反演获得的累积位移

#### 4.3 视频监测验证结果

视频监测系统在南缘台阶与排土场边坡布设5个摄像点位,连续运行30d。经机器视觉算法处理,共识别到23次裂缝变化事件,其中7次与InSAR形变加速时段对应。裂缝扩展速率为0.2~0.6mm/d,局部最高1.1mm/d,多集中于坡面上部松散堆积层。部分裂缝演化位置与InSAR热点区高度一致。此外,系统还

捕获3起落石事件,均与同期GNSS位移突增相对应,验证了视频监测对局部失稳现象的快速响应能力。

#### 4.4 DTM与InSAR分析精度评估

在数据预处理中,GNSS与视频数据用于修正SAR几何畸变与验证地表特征。融合后生成的高精度DTM为InSAR分析提供了可靠的空间参考框架。经对比分析,校正前后InSAR形变量的平均误差由±6.2mm降至±2.1mm,表明融合处理显著提升了解算精度。典型监测点InSAR解算与GNSS实测对比结果如表1所示,两者偏差控制在±1mm,符合精度要求,验证了GNSS基线校正正在提升InSAR时序解算精度中的作用。

表1 典型监测点InSAR与GNSS位移对比结果

监测点	GNSS累计位移/mm	InSAR累计位移/mm	误差/mm
G1	28.5	27.9	-0.6
G5	33.8	34.1	+0.3
G10	46.2	45.7	-0.5
G13	50.5	51.3	+0.8

## 5 结论与展望

以内蒙古某大型露天煤矿为研究对象,构建了多源遥感监测的边坡动态监测体系。研究采用GNSS、InSAR及视频监测技术,实现了边坡形变的高精度反演与多源验证。结果表明,南缘采场边坡为主要变形活动区,形变速率受采动扰动与降雨影响显著。通过多源数据融合生成的DTM显著提高了InSAR几何校正与形变解算精度,验证了该方法在复杂地形条件下的有效性。该技术体系可实现露天煤矿边坡的连续监测与快速预警,为矿山安全管理与风险防控提供了可靠的技术路径。未来研究将进一步考虑气象与地应力等多场耦合效应,实现更全面的动态稳定性评估。

#### 参考文献

- [1] 秦建民,郭英杰,张秋园,等.基于激光雷达扫描点云滤波的露天煤矿边坡变形监测[J].能源与环保,2025,47(9):104-108,113.
- [2] 靖泽强.雷达监测系统在塔山煤矿排矸场边坡形变监测中的应用研究[J].晋控科学技术,2025(5):18-21.
- [3] 张强,何大成,陈宝剑,等.五彩湾一号露天煤矿顺倾边坡破坏机理与位移监测研究[J].露天采矿技术,2025,40(5):1-5.
- [4] 孟国威.基于非连续GB-SAR的边坡监测方法研究[D].廊坊:防灾科技学院,2025.
- [5] 高显.基于时序InSAR技术的山区高速公路沿线区域地表形变特征分析[D].重庆:重庆交通大学,2025.
- [6] 毕自航.水电站库区边坡InSAR形变监测与预测研究[D].昆明:昆明理工大学,2024.

# 基于PS-InSAR的机场时序形变监测

王帅磊

(城乡院(广州)有限公司, 广东 广州 511300)

**摘要:** 针对如何长时序、大范围监测机场地质安全问题, 结合永久散射体合成孔径雷达干涉测量(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR)和 Sentinel-1A 影像, 对鄂州花湖机场及其周边进行时序形变监测和时空分析。结果表明: 鄂州花湖机场绝大多数区域形变速率位于  $-10\text{mm/a} \sim 10\text{mm/a}$  区间, 平均沉降速率为  $-1.3\text{mm/a}$ , 最大沉降速率为  $-50\text{mm/a}$ , 最大抬升速率为  $41.074\text{mm/a}$ 。航站楼和跑道没有显著形变, 距离航站楼和跑道较远区域存在三个较为显著沉降, 表明形变目前不会对机场正常运行产生干扰。三个形变显著区域中机场东北外侧和东南侧裸地区域地表沉降更为显著, 可能受降雨影响, 因此有必要针对机场及其周边显著沉降区域进行长期形变监测, 以评估鄂州花湖机场的安全性。

**关键词:** PS-InSAR; 机场沉降; 时序形变监测

## 1 引言

自 2000 年到 2019 年, 中国大陆的运输机场数量增长了 72.5%, 已建成运营的机场数量为 238 个; 通过机场运输游客的人次由约 1.5 亿人次增加到 13.52 亿人次, 提升约 9 倍; 通过货运飞机运输货物的吞吐量增长了 51%, 2019 年机场货邮吞吐量达到 1710.01 万吨<sup>[1]</sup>。机场是保证飞机安全起降的重要基础设施之一, 其安全性和稳定性对于机场安全运营起着重要作用, 当地表出现较大形变时, 可能会导致机场跑道出现裂缝等地质灾害, 影响机场安全。因此, 针对机场开展时序形变监测, 分析机场地表沉降危险性, 对监测机场安全具有重要意义。

合成孔径雷达干涉技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)具有全天时、全天候、大范围形变监测等特点<sup>[2-3]</sup>, 已被广泛应用于机场形变监测。侯祖行等利用 StaMPS 技术对北京首都国际机场及其周边进行地面沉降监测和地裂缝稳定性研究, 并对机场形变原因进行研究分析<sup>[4]</sup>。梅慧慧等采用时序 InSAR 技术对云南文山砚山机场跑道进行时序形变监测, 分析机场跑道形变的时空变化特征, 探究跑道形变原因<sup>[5]</sup>。尹勇等联合升降轨数据和小基线集干涉合成孔径雷达(Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar, SBAS-InSAR)技术, 对攀枝花机场形变进行二维形变监测, 并结合降雨数据对形变进行分析<sup>[6]</sup>。这些研究大多针对建成时间较长的机场进行形变分析, 缺少对新建机

场的形变监测分析, 而新建机场往往会出现轻微沉降, 随着机场正式高强度运营, 大量货物运输和频繁起降造成地表压力增强, 可能会进一步加剧机场地表沉降, 导致地裂缝等地质灾害发生。

鄂州花湖机场位于湖北省鄂州市, 定位为 4E 级国际机场、航空物流国际口岸, 是亚洲首个货运枢纽机场。鄂州机场于 2021 年 11 月 15 日建成完工, 2022 年 7 月正式通航。鄂州机场建成之后, 货运发展迅速, 依据民航局公布的《全国民用运输机场生产统计公报》显示, 自 2022 年 11 月开通货运航线后, 鄂州机场初始试运营, 不到 2 个月就完成货邮吞吐量 46.8t、起降飞机 769 架次, 分别位列全国运输机场第 188 位和第 223 位; 而 2023 年全年完成货邮吞吐量 245281.9t、起降飞机 16670 架次, 排名骤升至全国第 16 位和第 109 位<sup>[7]</sup>。大量货物运输和频繁的飞机起降, 会对机场跑道尤其是新建机场产生较大的地表压力, 可能导致机场附近产生较大沉降, 进而引发地质灾害, 威胁机场安全。因此, 针对新建花湖机场开展时序形变监测十分必要。

研究以鄂州花湖机场为例, 选取 2022 年 1 月 11 日至 2023 年 12 月 20 日两个轨道各 55 景 Sentinel-1A 影像数据, 然后利用永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR), 对鄂州花湖机场及其周边区域进行时序形变监测, 并通过对机场形变空间分布规律和时间变化规律进行分析, 探究

**作者简介:** 王帅磊(1991—), 男, 汉族, 硕士, 测绘工程师, 主要从事数据分析、智慧城市建设等工作。

机场及其周边区域可能导致地表形变的显著原因，进而判断是否会影响机场安全，为机场安全运行提供参考意见。

## 2 PS-InSAR 技术原理

PS-InSAR 技术选取在长时间、空间基线下保持高相干性的 PS 点目标，基于大气信号时间低相关、空间高相关，形变信号时间高相关、空间低相关，利用滤波方法将二者分离，获取时序地表形变，具体步骤和原理如下<sup>[8]</sup>：

(1) 主影像选择及干涉图生成：从覆盖研究区的  $N$  景影像中选取 1 景影像作为主影像，其余作为从影像组合，结合 DEM 数据及精密轨道数据，消除相位中的参考椭球相位、地平效应和地形相位，生成  $N-1$  幅差分干涉图。

(2) PS 点选取：依据合适方法或规则选取 PS 点，常见方法有振幅离差法、相干系数法等。其中，振幅离差法表达式如下：

$$S = \frac{\sigma}{\theta} \leq \delta \quad (1)$$

公式(1)中， $S$  是振幅离差值， $\delta$  是选取振幅离差指数的阈值， $\theta$ 、 $\sigma$  分别是振幅的均值和标准差， $S$  越大时，所选取的 PS 点越不可靠。

(3) 相位解缠：基于 PS 点建立的不规则网络进行相位解缠，对于重建和补偿大气效应贡献值而言，PS 点空间密度  $\geq 3 \sim 4$  点 /  $\text{km}^2$  即可。

(4) 第一次形变反演：目的是通过获取地形参数和形变参数，有效实现 PS 点的高程误差和线性形变分离。该方法是利用相关系数法处理相邻 PS 点，求解 PS 点的高程残差和形变速率，相关系数  $\mu$  的计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) \quad (2)$$

公式(2)中， $N$  为干涉影像对数， $\varphi_i$  是第  $i$  幅干涉对中相邻 PS 点的干涉相位差值。当  $\mu$  取值符合要求(0~1)时，再对参考点进行积分，从而获取 PS 点的高程误差和线性形变速率。

(5) 第二次形变反演：去除大气相位。由于第一次形变反演结果依然包含大气相位噪声，而大气相位与时间低相关、与空间高相关，因此将第一次形变反演结果在时间域进行高通滤波，在空间域进行低通滤波，即可将大气相位有效分离，最终得到研究区地表形变速率。

(6) 地理编码：将经过第二次形变反演生成的形

变速率等结果由 SAR 影像坐标系转换为常用的地理坐标系。PS-InSAR 技术原理如图 1 所示。

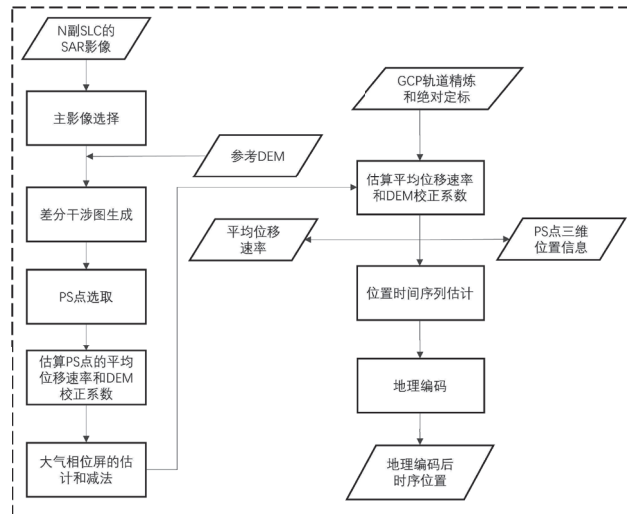


图1 PS-InSAR技术原理

## 3 数据处理

选择 2022 年 1 月 11 日到 2023 年 12 月 20 日覆盖研究区两个轨道各 55 景的 C 波段 Sentinel-1A 数据，极化方式均为 VV，轨道均为升轨，成像为干涉宽幅模式，幅宽为 250km。采用 STRM 30M 的 DEM 去除平地效应，Sentinel-1A 数据参数如表 1 所示。选用软件 Sarscape5.6 进行 InSAR 数据处理，一共 110 景 Sentinel-1A 数据，时空基线如图 2 所示。

表1 Sentinel-1A数据参数

	Path40Frame97	Path40Frame92
数量	55	55
时间	2022. 01. 11~2023. 12. 20	2022. 01. 11~2023. 12. 20
模式	IW	IW
极化	VV	VV

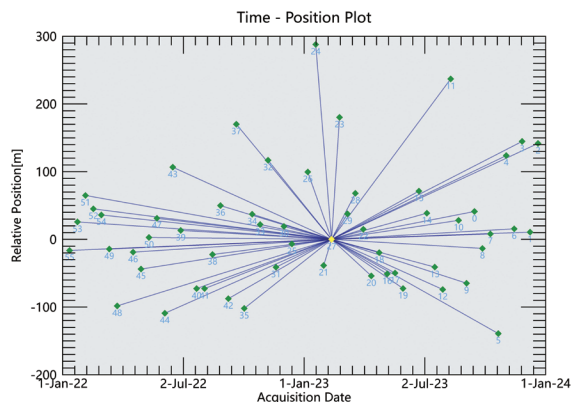


图2 PS-InSAR时空基线

由图 2 可知，研究将 2023 年 2 月 11 日作为主影像，最大空间基线长度为 275.9m，最长时间基线为 396 天，

符合干涉要求。然后依次进行干涉图生成、PS 第一次反演、PS 第二次反演、地理编码,保持相干系数大于 0.7 的 PS 结果,生成最后的时序形变结果。

## 4 结果与分析

### 4.1 鄂州花湖机场形变速率空间分布及统计分析

鄂州花湖机场及其周边区域 PS-InSAR 形变速率统计分布结果如图 3 所示。由图 3 可知,机场绝大多数区域沉降速率位于  $-10\text{mm/a} \sim 10\text{mm/a}$  区间,最大沉降速率为  $-50\text{mm/a}$ ,最大抬升速率为  $41.074\text{mm/a}$ ,平均沉降速率为  $-1.3\text{mm/a}$ 。这表明机场及其周边区域整体形变不明显,但仍然存在部分区域(图 4 中的 A、B、C 区域)沉降较为严重,沉降原因将在 4.2 节详细讨论。同时,研究对比地表沉降与地表抬升的像元数量发现,鄂州花湖机场及其周边地表沉降区域占比比地表抬升区域高,表明该区域地表形变以地表沉降为主。机场及其周边区域整体呈现较为轻微的地表沉降,这可能是由于机场施工建成时间与研究监测开始时间间隔较短(不到 2 个月),地表受到较大压力,在短时间内缓慢沉降。

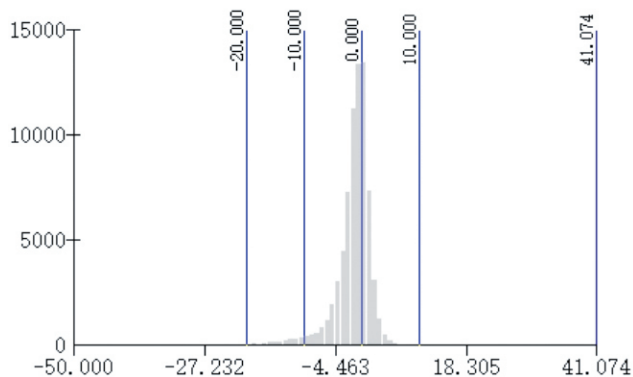


图3 机场PS-InSAR形变速率统计分布

为进一步评估地表沉降对于鄂州花湖机场运行的影响,研究对机场及其周边区域的 PS-InSAR 形变速率空间分布进行相应分析,分析结果如图 4 所示。由图 4 可知,机场跑道和航站楼附近区域并无显著形变,这表明目前机场日常运行的主要区域没有存在明显形变,该区域地表形变不会对机场安全运行产生干扰。鄂州花湖机场及其周边区域存在三个较为明显的沉降区域,分别为机场东北外侧边缘的荒山(A点,距离机场跑道约 540m)、机场正南外侧(B点,距离机场跑道约 410m)、机场内部荒地附近(C点,距离机场跑道约 290m),因这三个区域距离机场跑道和航站楼等重要建筑设施较远,其较大地表形变不会对机场跑

道产生危险。

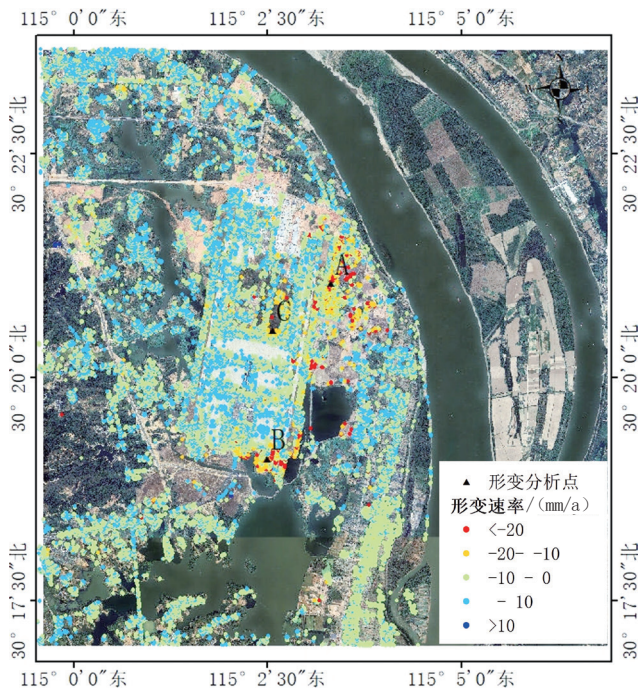


图4 机场PS-InSAR形变速率

### 4.2 鄂州花湖机场形变时序变化分析

由 4.1 节可知,鄂州花湖机场及其周边区域存在三处较为明显沉降,研究选择三个形变分析点进行时序分析,时序变化如图 5 所示。由图 5 可知,2022 年 1 月 11 日到 2023 年 12 月 20 日,C 点累计形变量为  $-25.9\text{mm}$ ,每年累积沉降量约为  $-10\text{mm}$ ,沉降量相对较小,这表明 C 点所在区域沉降危险性较小。A 点与 B 点累积形变量分别为  $-60.4\text{mm}$ 、 $-53.5\text{mm}$ ,沉降量明显较大,表明这两点所在区域沉降危险性较高,需进一步展开分析。

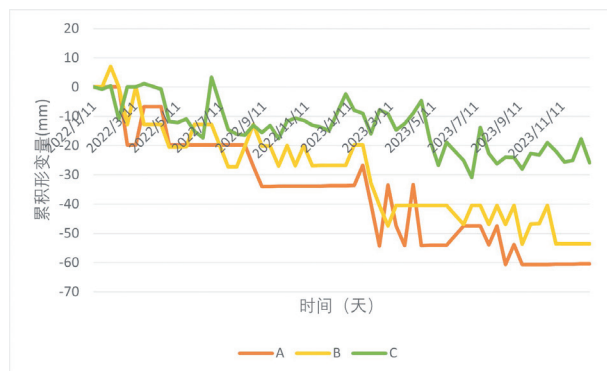


图5 A、B、C三点累积形变量时序变化

由图 5 可知,A 点与 B 点的累积形变量变化趋势较为一致,其形变显著变化时间段均为 2023 年 1 月 30 日到 2023 年 2 月 20 日。A 点与 B 点的光学影像如图 6 所示,图 6 (a) 为 A 点附近区域,图 6 (b) 为 B

点附近区域。由图6可知，A点与B点所在区域均存在较大面积裸地，缺少植被覆盖。依据鄂州历史天气记录，2023年1月30日到2023年2月20日，鄂州小雨天数为12天，考虑A、B两点位置不同，但形变趋势较为一致，两地均存在较大面积的裸地，因此研究认为这两点区域受降雨影响，导致部分土壤流失，进而地表出现较大沉降。

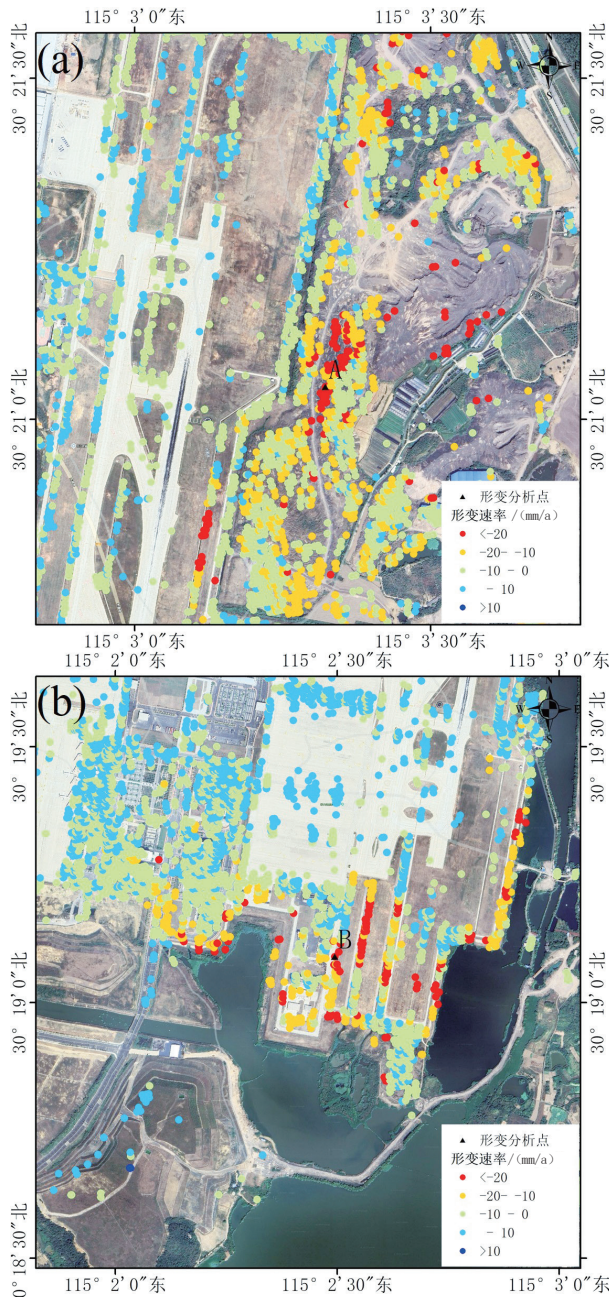


图6 光学影像

## 5 结语

研究利用2022年1月11日到2023年12月20日两个轨道一共110景Sentinel-1A影像数据，结合

PS-InSAR技术对鄂州花湖机场及其周边进行时序形变监测，并对形变结果进行空间分布和时序变化分析，关于机场安全的主要结论如下：

鄂州花湖机场绝大多数区域的地表形变速率为 $-10\text{mm/a} \sim 10\text{mm/a}$ ，平均沉降速率为 $-1.3\text{mm/a}$ ，但整体呈现轻微沉降趋势，这可能是由于机场建成时间较短，地表受到压力自然沉降导致。研究发现机场东北外侧边缘(A点)、机场正南外侧(B点)、机场内部荒地附近(C点)三处形变显著区域，但这三处区域距离机场跑道和航站楼较远，地表沉降不会对机场安全产生影响。

针对A、B、C三点的时序形变分析可知，C点地表形变较为平缓，影响较小；A、B两点所在区域地表形变较为显著，趋势相近，可能是两点所在裸地区域受降雨影响，土壤流失导致。建议鄂州花湖机场在裸地附近种植部分草地，以防止土壤流失导致机场周围出现较大地表沉降。

PS-InSAR技术可长时序、大范围、高精度监测机场形变，若发现机场及其周边地表沉降严重，可结合光学影像、地表沉降速率等，进一步分析地表沉降原因，有针对性地采取治理措施，防止地表显著沉降导致地质灾害，影响机场安全。

## 参考文献

- [1] 范爱华,朱俊洪,黎明.中国机场航空货运市场时空演变研究:基于2010-2019年运输机场航空货运数据[J].综合运输,2023(11):10-16,30.
- [2] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms[J]. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [3] 朱建军,李志伟,胡俊.InSAR变形监测方法与研究进展[J].测绘学报, 2017(10): 1717-1733.
- [4] 侯祖行,杨成生,雷瑞,等.北京首都国际机场周边及机场内地裂缝形变时序InSAR监测[J].大地测量与地球动力学, 2023(6): 636-642.
- [5] 梅慧慧,周京春,刘勇.基于时序InSAR技术的云南文山砚山机场跑道形变监测研究[J].测绘通报, 2024(S2): 211-216.
- [6] 尹勇,史先琳,钟佳宏,等.联合升降轨Sentinel-1A监测攀枝花机场高边坡二维形变[J].测绘与空间地理信息, 2023(12): 45-48.
- [7] 赵劲松,濮云涛.鄂州机场未来发展路径研究[J].空运商务, 2024(6): 36-40.
- [8] 李德仁,廖明生,王艳.永久散射体雷达干涉测量技术[J].武汉大学学报(信息科学版), 2004(8): 664-668.

# 基于生态要素分析的景观格局生态风险模拟评估 ——以攀枝花市为例

刘恒

(成都市土地储备中心, 四川 成都 610095)

**摘要:** 基于 2000~2020 年土地利用数据, 运用景观格局生态风险评价模型, 对攀枝花市生态风险的时空变化特征进行分析及其发展趋势预测, 同时运用 PLUS 模型对土地利用格局进行扩张分析, 结合扩张趋势分析景观格局生态风险的变化规律, 结果表明, 生态涵养情景攀枝花市景观格局生态低风险区和较低风险区面积占比提高, 高风险区占比下降。研究结果可为攀枝花土地资源合理利用及景观生态风险防控提供参考。

**关键词:** 多情景模拟; 景观格局; PLUS 模型; 生态风险; 攀枝花市

近年来, 随着我国经济的快速多元化发展, 土地资源被过度利用, 加剧了土地质量退化及生态环境恶化, 经济发展与生态保护之间的矛盾变得日益严重<sup>[1]</sup>。生态环境要素是指生态环境中与人类密切相关的自然和人工物质要素的总和, 涵盖影响人类生存发展的各类自然力量及作用。由于山水林田湖草作为自然生态系统至关重要的生态要素, 是在不同自然生态系统之间进行能量传递、物质循环和信息传递的生命共同体, 具有时空差异性和多样性特征, 导致未来各土地利用类型的时空演变存在较大的未知性<sup>[2-3]</sup>。

基于生态要素分析的土地利用格局多情景模拟预测研究, 能够从较长时间尺度揭示生态要素整体和内部关系的完整规律, 从而为未来土地利用格局的演化趋势判断提供支撑。景观生态风险评估以土地利用景观为风险综合体, 在生态风险评价的基础上, 充分考虑景观的异质性和尺度适宜性, 对自然和人为等外界因素导致的不良生态影响进行综合评价, 进而剖析土地利用变化下的景观生态风险演变规律<sup>[4]</sup>。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

攀枝花市地处四川省南部, 位于中国西南部的川滇接合部。攀枝花市的地理环境以侵蚀、剥蚀作用形成的中山丘陵和低山峡谷为主, 山高谷深、盆地交错分布, 如图 1 所示。研究区整体地势自西北到东南呈现出一条南偏的山脉, 全市总面积 7440km<sup>2</sup>。受特殊地理位置和丰富的矿产资源影响, 近十年来攀枝花市重

工业发展滞缓, 生态系统退化严重, 社会经济发展与生态环境保护之间的冲突日益严峻。同时, 受经济快速发展、相关政策调整以及矿产资源开发等多种因素的共同影响, 攀枝花市的土地利用与地表覆被状况呈现出持续变化的特征。

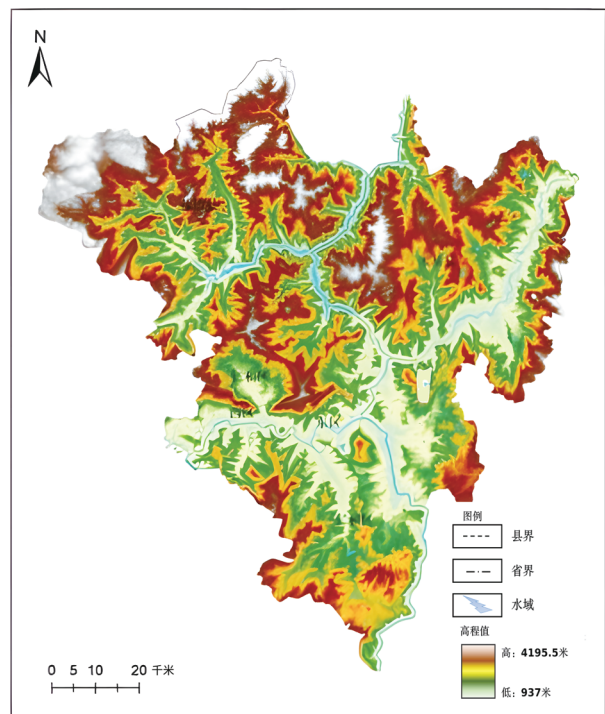


图1 研究区

### 1.2 数据来源

研究选取的土地利用数据来源于攀枝花市 2000 年、2010 年、2020 年 3 期 GlobeLand30 地表覆盖数据, 一级地类分为 8 类, 即耕地、森林、灌木、草地、水域、

作者简介: 刘恒 (1983—), 女, 汉族, 硕士, 工程师, 主要从事土地整治工作。

裸岩、建设用地和湿地。通过对土地利用数据进行几何精校正、拼接和裁剪等处理,分析各类用地占比和空间分布特征,结果发现,灌木穿插分布于森林之间,因此将灌木并入森林,统称为林地,最终将研究区的地类分为7类。

## 2 研究方法

### 2.1 模型建构和情景设置

基于 PLUS 模型来实现对攀枝花市的生态要素多情景模拟,研究共设定3种发展情景:(1)基准情景;(2)生态涵养情景;(3)经济发展情景。利用 PLUS 软件的 Kappa 统计工具,对模拟获取的攀枝花市 2020 年土地利用格局与 2020 年实际土地利用格局进行一致性评估,最终得到 Kappa 系数为 0.802,精度较高。

### 2.2 邻域权重参数设定

邻域权重用于表征不同土地利用类型的扩张潜力,其值介于 0 到 1 之间,数值越趋近于 1,表明该地类的扩张能力越强。研究以 2010~2020 年各地类扩张面积的变化量为基础,通过无量纲化处理确定权重值,计算公式如下:

$$w_i = \frac{-\Delta TA_{\min}}{\Delta TA_{\max} - \Delta TA_{\min}} \quad (1)$$

公式(1)中,  $\Delta TA_{\min}$  为各地类扩张面积变化量的最小值,  $\Delta TA_{\max}$  为各地类扩张面积变化量的最大值,  $w_i$  为土地利用类型  $i$  的邻域扩张权重。计算得到各地类邻域权重如表 1 所示。

表1 各地类邻域权重

图斑	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	裸地
TA/个	276379	423849	331356	117	38831	124469	154
$w_i$	0.652	1	0.781	0.001	0.092	0.294	0.001

### 2.3 景观格局生态风险指数计算

从景观格局视角出发,选取景观破碎度、分离度、优势度、结构指数及损失度指数,构建生态风险评价模型,计算研究区的景观生态风险值,并运用自然断点法将生态风险等级划分为五类,景观格局生态风险指数体系如表 2 所示。特别说明,为确保景观脆弱性( $F_i$ )指标权重确定的科学性与合理性,研究采用专家打分赋值法确定,通过系统性收集和整合生态学、地理信息系统、环境科学与土地规划等领域专家意见,将定性判断转化为定量数据,从而得到各指标的相对权重。景观生态风险指数计算公式为:

$$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (2)$$

将整个研究区划分为大量规则网格(评价单元),对于每一个网格  $k$ ,识别其内部包含哪些景观类型,并计算每种类型的面积比重 ( $A_{ki} / A_k$ )。将第一步计算的各类景观  $R_i$ ,乘以在当前网格的面积比重,然后相加,得到该网格的综合生态风险值 ( $ERI_i$ )。

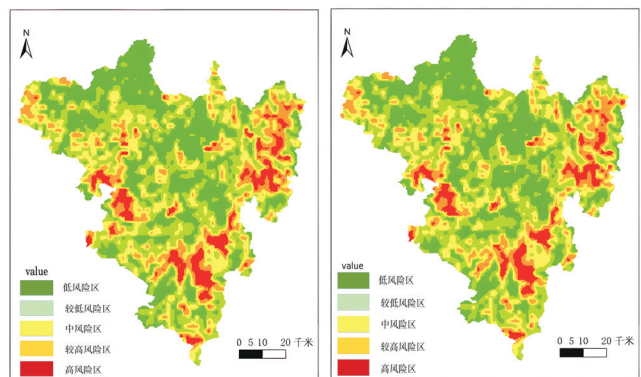
表2 景观格局生态风险指数体系

名称	景观指数
景观破碎度指数 ( $C_i$ )	边缘密度 (ED)
景观分离度指数 ( $N_i$ )	面积加权的平均形状因子 (SHAPE-AM)
景观优势度指数 ( $D_i$ )	斑块结合指数 (COHESION)
景观结构指数 ( $S_i$ )	聚集度指数 (AI)
景观脆弱指数 ( $F_i$ )	聚集指数 (IJI)
景观损失度指数 ( $R_i$ )	最大斑块指数 (LPI)
景观生态风险指数 ( $ERI_i$ )	$S_i = ED + SHAPE-AM + COHESION + AI + IJI + LPI$
	专家打分赋值
	$R_i = \sqrt{S_i \cdot f_i}$
	$ERI_i = \sum_{k=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i$

## 3 景观格局模拟及景观生态风险评估

### 3.1 2000~2020 年景观格局生态风险时空分异

2000~2020 年攀枝花市景观格局生态风险变化如图 2 所示,各等级生态风险面积及占比如表 3 所示。



(a) 2000年

(b) 2010年

(c) 2020年

图2 2000~2020年攀枝花市景观格局生态风险变化

表3 2000~2020年攀枝花市各等级生态风险面积及占比

年份	低风险区		较低风险区		中风险区		较高风险区		高风险区	
	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %	面积/ km <sup>2</sup>	占比/ %
2000年	2303.424	30.96	2217.12	29.8	1508.832	20.28	947.112	12.73	463.512	6.23
2010年	2311.608	31.07	1898.688	25.52	1519.992	20.43	1127.904	15.16	581.808	7.82
2020年	1916.544	25.75	1727.568	23.22	1721.616	23.14	1489.488	19.02	659.928	8.87

由图2和表3可知,从空间分布来看,高风险区集中分布在研究区南部和东北部地区,面积占比从2000年的6.23%增至2020年的8.87%;较高风险区集中分布在研究区的西北部、东北部和南部地区,2000年、2010年、2020年较高风险区面积占比分别为12.73%、15.16%和19.02%;中等风险区集中分布在研究区的东部、西部和南部地区,面积占比从2000年的20.28%升至2020年的23.14%;较低风险区和低风险区集中分布在研究区中部和北部地区,其他地区也有零散分布;研究区2000年、2010年、2020年较低风险区的面积占比分别为29.8%、25.52%、23.22%,从2000年至2020年下降了6.28%;研究区2000年、2010年、2020年低风险区的面积占比分别为30.96%、31.07%、25.75%,从2000年至2020年下降了5.21%。总体而言,研究区的景观格局生态风险等级以低风险、较低风险与中风险为主,景观格局生态风险呈现缓慢上升趋势。

### 3.2 生态要素多情景模拟结果

2040年攀枝花市生态要素多情景模拟结果如表4所示,耕地和林地是研究区的主要用地类型。在3种情景模拟结果下,耕地和林地的面积在研究区用地面积中占比达80%,建设用地则主要集中在南部和东北部的平原地区;林地具有明显扩张趋势,耕地在各类情景下变化不大,这符合保护永久基本农田的发展导向。

表4 2040年生态要素模拟结果

要素类型	基准发展		生态涵养		经济发展		
	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	面积/km <sup>2</sup>	占比/%	
生态要素	耕地	1719.76	21.55	1719.76	21.55	1639.68	20.55
	林地	4738.76	59.39	4898.9	61.4	4735.45	59.36
	草地	1046.46	13.12	1138.35	14.27	1046.46	13.11
	湿地	0.38	0.005	0.44	0.01	0.35	0.004
	水域	105.61	1.32	108.37	1.36	108.92	1.36
其他要素	建设用地	367.74	4.61	109.69	1.37	367.74	5.61
	裸岩	0.27	0.004	3.46	0.04	0.3	0.004

攀枝花市2040年生态要素多情景土地利用模拟结果如图3所示。具体而言,在基准发展情景下,耕地、林地、草地、湿地和水域的面积都有不同程度减

少,林地和耕地缩减范围最为明显,耕地大部分转为建设用地,导致建设用地增幅最大,较2020年约增多179.47km<sup>2</sup>,约占建设用地总面积的50%。在经济发展情景下,2040年攀枝花市的土地利用分布格局延续了基准发展情景的发展规律,说明攀枝花市未来的经济发展情景符合现在的发展规律。在生态涵养情景下,2040年攀枝花市土地利用格局以生态效益最大化为导向,林地和草地呈现明显扩张趋势,林地覆盖面积增加约73km<sup>2</sup>,草地面积扩张约30km<sup>2</sup>,其他地类均有不同程度增减,表明很大程度上提升了区域土地生态价值。

整体来看,与2020年相比,2040年水域在三种情景下均呈缩小趋势,主要受高耗水发展模式及工农业生产导致水污染加剧影响。其中,生态涵养情景下水域缩小幅度最小,经济发展情景下缩小最大。林地仅在生态涵养情景下有所增加;建设用地在基准发展情景和经济发展情景下都呈增加趋势,在生态涵养情景下有所减少。

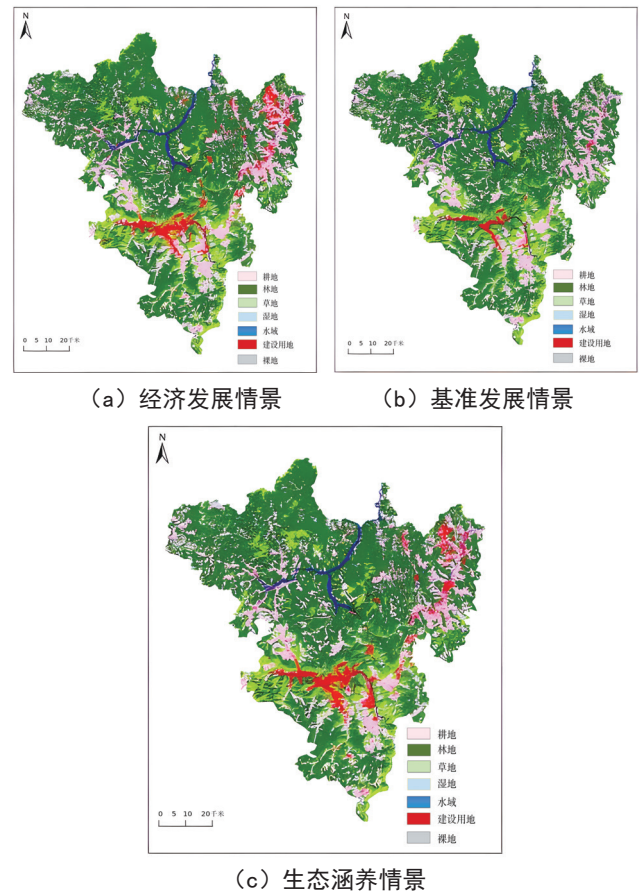


图3 攀枝花市2040年生态要素多情景土地利用模拟结果

### 3.3 多情景下景观格局生态风险预测

2040年三种发展情景下,研究区景观生态风险的空间格局整体呈现东部较高、西部较低的发展特征,

具体的空间分布如图4所示。由图4可知,低风险区和较低风险区面积占比均有提高,占研究区总面积的60%;较高风险区和高风险区占比约为总面积的20%,具体结果如表5所示。由于攀枝花市东部及南部地区钒钛磁铁矿富集,以铁矿为主,空间分布集中,开发时间长,开采规模大,矿山地质环境破坏较为严重,遗留问题多,部分企业对地质环境治理和修复工作投入不足,导致东区和南区景观格局生态风险较高。根据2040年三种发展情景的景观格局生态风险指数和各生态风险等级面积占比可以看出,未来攀枝花市土地利用格局对于生态系统压力有所缓解,整体经济增速可能放缓,同时现行政策下的生态建设在未来发展中起到了良好的导向作用。

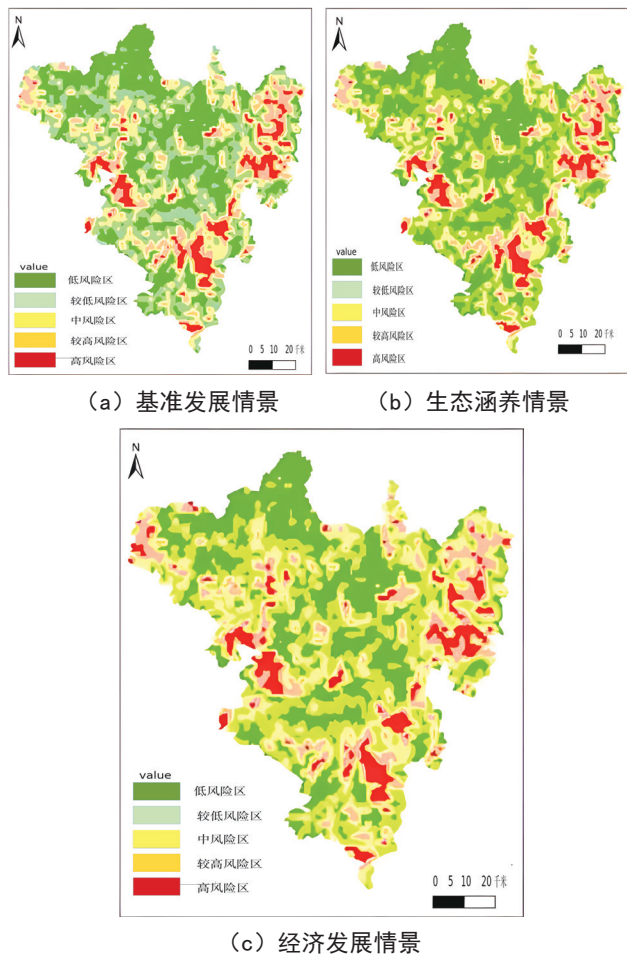


图4 2040年不同发展情景下攀枝花市景观格局生态风险空间分布

表5 2040年不同情景下的各生态风险等级面积占比

情景	低风险区 占比/%	较低风险 区占比/%	中风险区 占比/%	较高风险 区占比/%	高风险区 占比/%
基准发展	31	30	20	13	6
生态涵养	33	29	20	12	6
经济发展	29	30	22	13	7

## 4 结语

土地利用类型是景观格局最直观的表现形式,由于人类活动变更,景观要素的空间结构、生态过程和功能亦随之改变,进而导致景观生态风险状态发生变化<sup>[5-6]</sup>。研究利用PLUS模型,结合未来不同发展变化方向,对土地利用格局进行多情景模拟,体现出土地利用格局的差异;同时结合景观格局生态风险评价模型,分析研究区景观格局生态风险的变化规律。研究发现2020~2040年攀枝花市景观格局生态风险有所下降,高风险区和较高风险区向低风险区和较低风险区转换,反映出研究区生态系统压力有所缓解,自我协调与修复能力有所提高。

在未来发展规划中,应充分考虑自然因素对土地利用发展潜力的影响,构建综合治理新体系,把生态保护放在首位;优化产业结构,提高工业固体废物资源化利用率,积极发展绿色经济与碳汇经济;强化国土空间管控,严格管控受污染地块,提高环境风险防控力度,加强源头治理,兼顾经济发展和生态保护,实现可持续发展。

在未来情景模拟中,土地利用变化约束条件及转移矩阵的设置,主要参考已有文献以及当地发展实际,具有一定主观性,可能在一定程度上影响模拟结果的客观性;同时研究尚未把政策纳入影响因素体系,未能充分体现政策对未来土地利用格局的导向作用。后续研究将进一步融合自然环境的动态变化与人类活动的干扰因素,优化模型精度的验证方法,系统评估多维度的生态风险水平及其驱动机制。

## 参考文献

- [1] 赵建鹏,武江民,贾腊春,等.基于驱动力-压力-状态-响应模型的黄河流域甘肃段生态系统健康评价[J].生态与农村环境学报,2024,40(5):602-611.
- [2] 曹祺文,张曦文,马洪坤,等.景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架:ESRISK[J].地理学报,2018,73(5):843-855.
- [3] 习近平.关于《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》的说明[N].人民日报,2013-11-16.
- [4] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J].中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.
- [5] 徐梦菲,汪霞.基于生态系统服务价值的郑洛沿黄地区景观生态风险时空演变及驱动力分析[J].环境科学,2026(1):444-455.
- [6] 巩小维,周冬梅,张军,等.“三生空间”视角下庆阳市景观生态风险评价及耦合协调度[J].干旱区研究,2025,42(3):556-567.

# 一种纯视觉驱动的端到端无人机定位导航新方法

周瑜<sup>1</sup> 乔书波<sup>2</sup> 马云天<sup>3</sup> 王鹏<sup>4</sup>

(1.61540 部队, 陕西 西安 710054; 2. 信息工程大学, 河南 郑州 450001; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045;

4. 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:** 传统无人机卫星导航系统信号自主性差, 容易受干扰, 战时敌方战区 GNSS 信号必然被干扰、无法使用; 惯性导航系统自主性好, 可不依赖外来信息, 短时精度高, 但定位误差随时间快速积累, 且高精度的惯性导航系统不但重量、体积较大, 且造价昂贵, 对此, 研究提出一种纯视觉驱动的端到端定位新方法, 利用绝对视觉定位将无人机实拍影像与带有地理信息的预置卫星地图进行匹配, 从而在 GNSS 信号中断或不可用时, 获取无人机当前地理位置。经测试, 在算力 20TOPS、功耗 8W 的边缘端设备上, 在不使用 GNSS 和惯性导航的情况下, 可以实现单帧平均定位时间 2s、平均定位误差小于 3m 的快速精准定位, 相较于传统 GNSS 定位精度有所提升, 可支持最低 50m 低空飞行精准定位, 最大飞行速度 36km/h, 可适配多场景、多高度等多种需求。

**关键词:** 定位导航; 纯视觉驱动; 端到端

## 1 引言

现有无人机通常采用卫星导航系统和惯性导航系统<sup>[1]</sup>。其中, 卫星导航系统信号自主性较差, 容易受到干扰, 战时敌方战区 GNSS 信号必然被干扰、无法使用。而惯性导航系统自主性好, 可不依赖外来信息, 也不向外辐射任何信息, 短时精度高, 其主要缺点是定位误差随时间快速积累, 而高精度的惯性导航系统不但重量、体积较大, 且造价昂贵<sup>[2]</sup>。基于视觉的定位技术是一种自主性和精度都比较高的导航定位技术, 是导航定位的一种重要手段, 也是视觉领域的前沿方向<sup>[3-4]</sup>。

基于视觉的导航定位系统具有广阔的发展潜力和许多优点: 不依赖于 GNSS、惯性导航系统和外界信号, 意味着不会受到干扰, 更加安全; 有着更低的延迟, 可以提供优于惯性导航和 GNSS 的实时反馈控制和决策; 对环境变化有更强的鲁棒性<sup>[5]</sup>。

在这一背景下, 亟须发展一种不依赖于外部信号、具备强环境适应性、高鲁棒性、高精度的自主导航技术, 推动无人机在复杂及拒止环境下持续、安全、智能运行。

研究提出了一种纯视觉驱动的端到端定位新方法, 该方法利用绝对视觉定位将无人机实拍影像与带有地理信息的预置卫星地图进行匹配, 从而在 GNSS 信号中断或不可用时, 获取无人机当前的地理位置(经纬度)<sup>[6-7]</sup>。

## 2 算法模型

### 2.1 方法概述

在卫星导航信号缺失或受干扰的复杂环境下, 无人机(UAV)的自主定位能力面临严峻挑战。研究提出了一种纯视觉驱动的端到端、融合深度学习检索与高精度几何配准的视觉定位框架。该框架摒弃了传统移动机器人视觉里程计(VO)中易产生的累积漂移误差, 转而利用全球覆盖的卫星影像作为地理参考基准。

研究方案的核心分为“粗定位检索”与“精定位配准”两个阶段: 首先通过跨视图面积信息传递网络在海量卫星切片库中定位候选区域, 随后利用 SuperPoint 与 SuperGlue 算法组合实现亚像素级的图像对齐。该方案不仅能够有效解决无人机图像与卫星影像之间存在的视角跨度大、尺度不一及纹理演变等难题, 更能在 GPS 拒绝环境下提供稳定、连续且具备地理绝对坐标的定位输出。

### 2.2 具体算法

研究提出的端到端定位新方法需要预先对高分辨率卫星影像数据做阈值处理, 并加载至无人机内存设备, 且影像数据范围大于无人机飞行区域。考虑到卫星影像与无人机航拍影像在分辨率、传感器视角及时间跨度上存在较大差异, 直接进行全图配准计算量巨大, 且成功率也难以保证<sup>[8-9]</sup>。因此, 研究采用“分级搜索、由粗到精”的层级化处理策略, 构建了一套不依赖外部导航信号、具备地理语义理解能力的自主

**作者简介:** 周瑜(1982—), 男, 汉族, 博士研究生, 副研究员, 主要从事航天摄影测量、无人机视觉导航等方面研究工作。

视觉定位方法，同时，因为采取先粗后精的影像配准方法，预置影像范围大小对初始配准时间影像较小，不同范围下配准耗时几乎一致。

为满足无人机低空飞行对定位速度和精度的要求，研究构建一种能在边缘端设备高效运行的视觉定位算法。考虑到图像级检索效率高、像素级配准精度高，研究将二者结合，构建一个两阶段视觉定位框架，以满足实际应用需求。整体框架如图1所示。

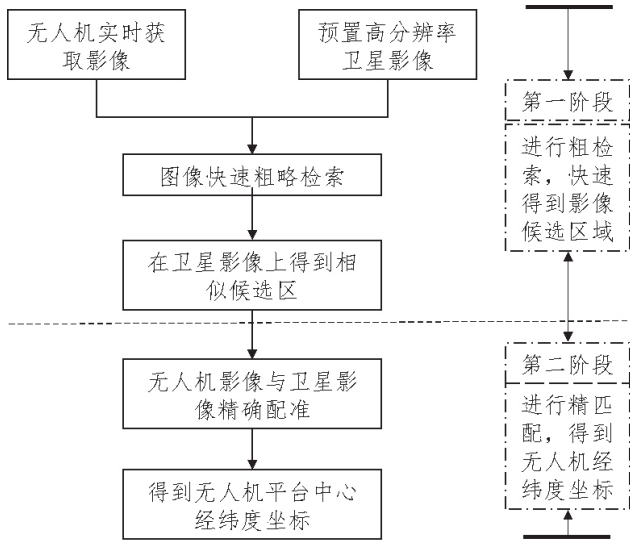


图1 两阶段视觉定位框架原理

### 2.2.1 卫星影像预处理

在无人机飞行过程中，不需要预置概略坐标。首先根据无人机内置气压计获取的高度信息、相机焦距、主点位置，以及相机与平台安装参数等，粗略计算相机获取的影像幅面大小，然后对预置的高分辨率卫星影像进行切片划分，大小与无人机获取的影像幅面相当，具体预处理过程如下：

- (1) 根据无人机实际飞行区域，预置高分辨率卫星影像；
- (2) 根据无人机飞行高度、相机焦距、主点位置以及相机与平台安装参数等，计算相机获取的影像幅面大小；
- (3) 基于20%重叠率，按照相机获取影像幅面大小，将卫星底图切割成若干正方形切片；
- (4) 每一个切片都与其对应的WGS-84经纬度坐标、空间分辨率及方位信息紧密关联。

### 2.2.2 粗定位检索

卷积动作与属性中层模式算法(Convolution Action & Attribute Mid-Level Patterns, CAMP)的设计核心在于独特的“面积信息传递”机制。不同于

常规卷积网络只能提取全局池化特征，CAMP认为图像中的地理信息具有强烈的空间关联性。在特征提取阶段，网络将图像划分为多个局部区域，并模拟无人机在不同俯仰角度下对地面的观测投影。这种机制允许网络学习到一种具有几何不变性的特征表达，即无论无人机是以斜拍还是下视角度观察同一块区域，CAMP都能识别出共有的空间骨架结构，如建筑物轮廓分布、道路交汇关系等。

无人机相机捕获的实时序列图像经过预处理后，输入CAMP网络提取全局语义特征，并计算其与切片库中各卫星影像的相似度得分。通过相似度排序，迅速将搜索范围从广袤的目标区域缩小到几个甚至一个百米量级的候选切片区域。

### 2.2.3 精定位配准

研究基于SuperPoint与SuperGlue算法组合，对无人机影像与预置的高分辨率卫星影像进行精定位配准。SuperPoint是一种全卷积神经网络架构，在一个单一的正向传播过程中可同时完成关键点检测与特征描述符提取。该算法的独特之处在于通过自监督训练，掌握了对角点、边缘等基本几何结构在不同光照和视角下的稳定性判断。对于无人机视觉定位而言，卫星影像可能是不同季节、不同天气拍摄的，而实时图则是当前视角，SuperPoint提取的特征比传统SIFT算子更能捕捉到那些“跨越时间”的稳健特征，如道路交汇点、永久性建筑的屋顶拐角等，且处理速度极快，可满足实时定位需求。

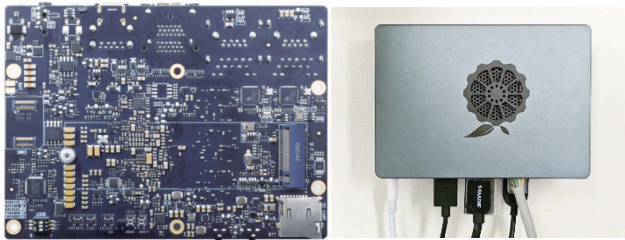
而SuperGlue则作为后续的图匹配网络，有效解决了特征匹配中最具挑战性的“分配”问题。传统匹配策略通常采用简单的特征距离最近邻搜索，但在跨视图定位中，卫星影像与无人机图像的特征分布极度不均，且存在大量重复纹理。SuperGlue网络引入了位置编码、自注意力(Self-attention)和交叉注意力(Cross-attention)机制。其中，自注意力机制让特征点相互“交谈”，识别出图像内部的几何一致性；交叉注意力机制则允许无人机图像中的点去寻找卫星影像中对应的语义目标。最后，算法通过求解Sinkhorn算法处理最优传输问题，能够从充满噪声的特征点云中成功筛选出极高内点率(Inlier Ratio)的匹配对。

在锁定候选卫星切片后，首先利用SuperPoint网络分别提取实时图与卫星影像的深度特征点，通过SuperGlue利用图神经网络的注意力机制，在两幅视

图之间建立稳健的特征关联<sup>[10]</sup>。匹配成功后，再利用特征点对计算两图之间的单应性矩阵（Homography）。通过该矩阵将无人机图像中心点（无人机垂直下视点）精确投影到含坐标信息的卫星切片上。最终，结合卫星影像元数据，解析出无人机的实时经纬度坐标、飞行航向角及相对于地面的相对姿态。

### 3 算力平台

研究选用 Orange Pi AI Pro 20T 作为机载边缘算力平台，如图 2 所示，该设备基于华为昇腾（Ascend）AI 处理器。



(a) 处理器板卡 (b) 处理器外观

图2 选用算力平台

在算力性能方面，该开发板提供了高达 20 TOPS（INT8）的 AI 推理算力，在半精度浮点（FP16）模式亦可达到 10 TFLOPS。这一算力水平满足了项目的基础需求，能够流畅运行高精度的特征提取、特征匹配任务，确保定位系统的实时性与准确性。在提供高性能计算的同时，该设备保持了极低的功耗水平，典型运行功耗仅为 8W。Orange Pi AI Pro 20T 采用高度集成的极致轻量化与紧凑设计：PCB 尺寸仅 115mm×83mm，便于嵌入机身有限空间；整板重量仅 120g，硬件规格参数如表 1 所示。

表1 硬件规格参数

序号	参数项	规格描述
1	主控芯片	昇腾AI处理器（4核64位Arm+AI处理器）
2	AI算力	20TOPS（INT8）/10TFLOPS（FP16）
3	内存	LPDDR4X（可选8GB/16GB/12GB/24GB）
4	存储接口	支持TF卡、eMMC模块及M.2 NVMe/SATA SSD（2280）
5	视觉接口	2个MIPI CSI 4 Lane接口（支持摄像头输入）
6	通信接口	40Pin扩展口（UART/I2C/SPI/GPIO），可直接与飞控通信
7	尺寸	115mm×83mm
8	重量	120g

## 4 实验结果与分析

### 4.1 数据选取

研究构建了一个全新的无人机—卫星测试数据

集，数据如表 2 所示，包括在烟台、泰州以及葫芦岛三个区域的卫星影像和无人机飞行数据。

表2 数据选取

序号	航线名称	场景类型	时间	成像条件	高度/m	帧数	飞行距离/km	平均飞行速度
1	烟台飞行航线1	半自然场景、密集建筑区	2025.4.2	白天	100	45	0.87	36
2	烟台飞行航线2	半自然场景、密集建筑区	2025.4.2	白天	100	66	1.19	36
3	泰州飞行航线1	密集建筑区、稀疏建筑区、自然场景	2018.10.23	白天	450	768	73.86	36
4	泰州飞行航线2	密集建筑区、稀疏建筑区、自然场景	2018.10.23	白天	3450	738	83.17	36
5	葫芦岛校园航线23	密集建筑区、稀疏建筑区、自然场景	2025.9.8	白天+黄昏	120	2918	42.14	21.6
6	葫芦岛海边航线25	密集建筑区、稀疏建筑区、自然场景	2025.9.24	白天	50~250	3067	30.86	21.6

卫星影像数据中，葫芦岛和烟台区域均采用吉林一号卫星影像作为底图数据，影像分辨率为 0.5m，泰州区域则采用公开的谷歌地图数据作为底图，影像分辨率为 0.3m。

无人机图像包括葫芦岛飞行航线 48 条、烟台飞行航线 2 条、泰州飞行航线 2 条。葫芦岛飞行航线总飞行路径约 73km，飞行高度 50~250m，覆盖运动场、道路、住宅区、公园、海边、小镇等不同场景，拍摄时间为秋、冬两个季节，图像分辨率为 4000×2250，总计 5985 张。烟台飞行航线总飞行路径约 2km，飞行高度 100m，覆盖城镇与公园，拍摄时间为春季，图像分辨率为 5280×3956，总计 111 张。泰州飞行航线总飞行路径约 157km，飞行高度 450m，覆盖住宅区、农田、湖边，拍摄时间为秋季，图像分辨率为 3976×2652，总计 1506 张。

### 4.2 试验方法

为提升定位速度，保障长时序视觉定位稳定性，采用链式帧间跟踪与周期性跨域重定位相结合的策略，在多样化复杂环境进行了测试与验证。实验数据涵盖不同的场景类型，包括路面公园场景、海边场景（海岸线和沙滩）、密集建筑群场景（高层住宅区和小镇低层住宅区）、稀疏建筑群场景（校园）及村落场景。同时，实验还覆盖不同的季节，涉及春季、夏季、秋

季和冬季,且涵盖不同的时间段,如清晨、正午、傍晚。测试数据还包含光照充足和阴天等多种光照条件。

### 4.3 定位误差测试结果

在整条飞行航线上,计算出每张图像中心点配准经纬度与真实经纬度之间的差值,并将其作为定位误差,在此基础上分别统计每条航线上的最大定位误差、最小定位误差和平均定位误差。研究以泰州飞行航线2、烟台飞行航线2以及葫芦岛海边航线25为例进行结果分析与可视化展示。

#### (1) 泰州飞行航线2

泰州飞行航线2的飞行距离为83km,共包含738张图像,飞行航线整体布局如图3所示。经计算统计,最大定位误差为2.688m,最小定位误差为2.450m,平均定位误差为2.538m。

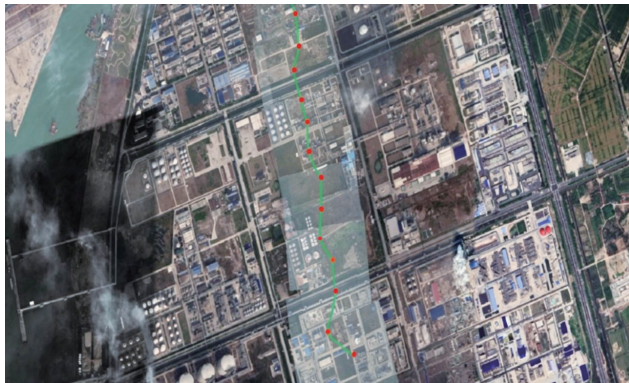


图3 泰州无人机飞行航线

#### (2) 烟台飞行航线2

烟台飞行航线2的飞行距离为31km,共包含66张图像,飞行航线整体布局如图4所示。经计算统计,最大定位误差为2.888m,最小定位误差为2.65m,平均定位误差为2.719m。

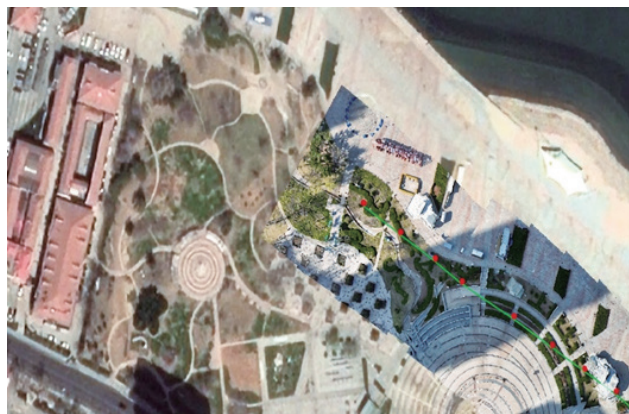


图4 烟台无人机飞行航线

#### (3) 葫芦岛海边航线25

葫芦岛海边航线25的飞行距离为2km,共包含

3067张图像,飞行航线整体布局如图5所示。经计算统计,最大定位误差为2.788m,最小定位误差为2.15m,平均定位误差为2.511m。



图5 葫芦岛海边无人机飞行航线

### 4.4 飞行速度测试结果

在整条飞行航线上,首先统计出所有图像的总处理时间,再计算出平均每张图像的定位时间。研究以泰州飞行航线1、葫芦岛校园航线23以及烟台飞行航线1为例进行展示。

#### (1) 泰州飞行航线1

泰州飞行航线1的飞行距离为73km,共包含768张图像,大小为3976像素×2652像素,平均每帧定位时间约为1.869s,具体如表3所示。

#### (2) 葫芦岛校园航线23

葫芦岛校园航线23的飞行距离为42km,共包含2918张图像,大小为4000像素×2250像素,平均每帧定位时间约为1.94s,具体如表3所示。

#### (3) 烟台飞行航线1

烟台飞行航线1的飞行距离为800m,共包含45张图像,大小为5280像素×3956像素,平均每帧定位时间约为1.96s,具体如表3所示。

表3 飞行定位处理时间

序号	航线	处理图片数量	总处理时间/s	单帧平均定位时间/s
1	泰州飞行航线1	768	1435.39	1.869
2	葫芦岛校园航线23	240	464.64	1.94
3	烟台飞行航线1	45	88.2	1.96

### 4.5 不同场景适用性测试

研究选取城市公园、沙滩岸线、密集建筑物、稀疏建筑物、居民地、草场农田等六个场景,分别对算法进行适用性和稳定性测试,不同场景实用性测试影像如图6所示。

城市公园、沙滩岸线、密集建筑物、稀疏建筑物、居民地、草场农田等六个场景的定位精度如表4所示。

经过六个不同场景的验证，结果发现，与 GNSS 导航相比，研究算法的平均精度定位由 3.39m 提升至 2.55m，提升约 24.8%。



图6 不同场景适用性测试影像

表4 不同场景的定位精度

序号	场景	影像航线	定位精度/m	
			研究算法	GNSS
1	城市公园	烟台飞行航线2	2.719	3.423
2		葫芦岛校园航线23	2.444	4.124
3	沙滩岸线	葫芦岛海边航线25	2.511	3.225
4	密集建筑物	葫芦岛校园航线23	2.414	3.652
5	稀疏建筑物	葫芦岛校园航线23	2.5	2.989
6	居民地	葫芦岛校园航线23	2.718	3.221
7	草场农田	泰州飞行航线2	2.538	3.121
平均定位精度			2.55	3.39

#### 4.6 不同高度适用性测试

针对葫芦岛海边航线 25，分别选取不同作业高度下的无人机影像数据，其中飞行高度 50m 时无人机影像 82 张，飞行高度 100m 时无人机影像 74 张，飞行高度 120m 时无人机影像 68 张，飞行高度 200m 时无人机影像 220 张；另选取泰州飞行航线 2 飞行高度 450m 时无人机影像 738 张，经统计，得到无人机定位精度结果如表 5 所示。

表5 无人机定位精度

序号	飞行高度/m	影像航线	影像数量	定位精度/m	
				研究算法	GNSS
1	50	葫芦岛海边航线25	82	2.831	3.125
2	100		74	2.814	3.736
3	120		68	2.51	2.989
4	200	泰州飞行航线2	220	2.864	3.365
5	450		738	2.538	3.224
平均定位精度				2.71	3.29

## 5 结语

研究提出一种纯视觉驱动的端到端无人机绝对视觉定位模型，可实现高精度、高效率的无人机定位，适配国产化边缘端设备，自主可控。经测试，在算力 20TOPS、功耗 8W 的边缘端设备上，可满足多场景、多高度等需求：最低支持 50m 至 450m 无人机无 GNSS 条件下飞行精准导航定位，最大飞行速度 36km/h；可实现单帧平均定位时间 2s、平均定位误差小于 3m 的快速精准导航定位，相较于传统 GNSS，定位精度有一定提升。

## 参考文献

- [1] 索文凯,胡文刚,伍锡山,等.基于光学视觉辅助无人机自主降落研究综述[J].激光杂志,2019(4):9-13.
- [2] 王亭亭,蔡志浩,王英勋.无人机室内视觉/惯导组合导航方法[J].北京航空航天大学学报,2018(1):176-186.
- [3] 樊邦奎.樊邦奎院士:六大方向,知悉无人机的未来[J].机器人产业,2017(1):59-64.
- [4] Zhao, Lin, Qiu, Haiyang, Feng, Yanming. Analysis of a robust Kalman filter in loosely coupled GPS/INS navigation system[J]. Measurement, 2015, 80:138-147.
- [5] Lupton, T., Sukkarieh, S. Visual-Inertial-Aided Navigation for High-Dynamic Motion in Built Environments Without Initial Conditions[J]. IEEE Transactions on Robotics: A publication of the IEEE Robotics and Automation Society, 2012, 28(1):61-76.
- [6] Rui Dou, Haibin Duan. Lévy flight based pigeon-inspired optimization for control parameters optimization in automatic carrier landing system[J]. Aerospace science & technology, 2017, 61:11-20.
- [7] 倪卫国,黄晓荣,叶银霞,等.图像识别技术在无人机自动着陆导航中的应用分析[J].科学技术创新,2025(19):118-121.
- [8] 王世勇,乾国康,李迪,等.面向边缘特征的实时模板匹配方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2023,51(9):1-10.
- [9] Markus Ulrich, Patrick Follmann, Jan-Hendrik Neudeck. A comparison of shape-based matching with deep-learning-based object detection[J]. tm-Technisches Messen, 2019, 86(11):685-698.
- [10] 文代洲,王晰,任明俊.基于渲染视角采样的轻量化模板匹配算法[J].激光与光电子学进展,2024,61(18):394-402.

# 基于全站仪自动监测和神经网络校正的深基坑变形监测研究

李德根

(贵州黔美测绘工程院, 贵州 贵阳 550080)

**摘要:** 针对深基坑变形监测点位离散、人工效率低及单一手段难以全面表征围护变形的问题, 以贵阳某大型深基坑为例, 提出融合全站仪自动监测、测斜仪监测与反向传播神经网络校正 (Back Propagation Neural Network, BPNN) 的深基坑变形监测方法。通过布设自动监测点获取围护结构表层位移时序, 并结合测斜深层水平位移建立校正模型。结果表明, 全站仪可反映施工阶段性变形, 最大水平位移小于 10mm; 与测斜趋势一致, 但校正前 MAE 约 5.2mm, BPNN 校正后平均绝对误差 MAE 降至 1.8mm、决定系数  $R^2$  提高至 0.91。该方法可提升自动监测精度与稳定性, 为基坑安全监测与信息化管理提供支撑。

**关键词:** 全站仪自动监测; 测斜仪; 深基坑; 神经网络校正

## 1 引言

深基坑工程是城市地下空间开发的重要组成部分, 其施工过程受土体卸荷、支护结构受力调整及周边环境扰动等多重因素影响, 易引发围护结构侧移、地表沉降及临近建(构)筑物变形, 因而对变形监测的精度、时效性和完整性提出了较高要求。传统监测方法如测斜仪、水准测量和全站仪等, 具有精度高、技术成熟的优点, 但在现场施工干扰强、监测频率要求高的条件下, 人工观测效率与时效性受到限制, 且不同监测手段在观测对象与指标含义上存在差异, 导致监测成果难以直接对比融合, 进而影响对围护结构变形过程的全面刻画与风险判识<sup>[1]</sup>。

近年来, 自动化监测技术在深基坑工程中得到广泛应用, 其中全站仪自动监测可对围护结构顶部及关键控制部位开展连续化、高频率的位移观测, 能较好地反映基坑施工期间的阶段性变形特征<sup>[2]</sup>; 测斜仪则可提供深层土体水平位移信息, 是评估支护结构受力与变形机制的重要依据<sup>[3]</sup>。然而, 全站仪监测以离散测点表征表层位移, 测斜监测反映深部侧向位移, 两者在监测对象、空间代表性与物理意义上并不完全一致, 全站仪自动监测结果还可能受到视线遮挡、目标稳定性、观测几何及施工振动等因素影响, 造成局部偏差<sup>[4]</sup>。为提高自动化监测成果的可用性与一致性, 以贵阳某大型深基坑工程为研究对象, 构建“全站仪自动监测—测斜仪对照—BPNN 校正”的变形监测方法。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域概况

以贵阳某商业综合体深基坑工程为研究对象。该基坑平面整体呈近似梯形, 东西向最长约 230m, 南北向宽约 115m, 总开挖面积约 19300m<sup>2</sup>, 外部支护结构总长约 625m。工程周边环境较为复杂, 北侧临近城市轨道交通区段, 对基坑施工过程中的围护结构变形控制提出较高要求。根据施工组织与空间分区情况, 基坑分为南、北两个作业区, 其中北侧区域进一步划分为 5 个子区。结合施工优先级、现场通行条件, 选取北二区作为主要监测区, 北一区 and 北五区作为辅助监测区。该工程施工涉及分区开挖、内支撑转换及主体结构施工等多个阶段, 具有明显的阶段性变形特征, 能较好地反映深基坑围护结构在施工期间的时空演化规律。

### 2.2 数据来源

研究所用数据主要包括全站仪自动监测位移数据、传统测斜监测数据及施工辅助资料三部分。全站仪自动监测数据提供高频连续的表层位移信息, 测斜监测数据提供深层变形校核基准, 施工辅助资料提供工况解释与机理分析支撑。

(1) 全站仪自动监测数据: 在基坑围护结构顶部及关键控制部位布设监测棱镜, 采用全站仪自动监测系统对监测点三维坐标进行周期性观测, 获取围护结构表层位移时序信息。监测周期根据施工阶段分级设置, 开挖及支撑施作/转换等关键阶段加密观测, 观

**作者简介:** 李德根 (1991—), 男, 汉族, 本科, 助理工程师, 研究方向为工程测量。

测周期为 2h/次 (12 次/d)；一般开挖阶段观测周期为 4h/次 (6 次/d)；非关键阶段 (开挖间歇、结构施工相对稳定阶段) 观测周期为 24h/次 (1 次/d)。各期监测数据与施工工况一一对应，为后续变形规律分析与 BPNN 校正提供基础。该类数据自动化程度高、观测频率高、时序连续性好，能较好表征围护结构在不同施工阶段的位移响应特征，尤其适用于识别开挖、支撑安装及转换等关键工况下的表层变形特征，是研究开展基坑围护结构表层位移演化分析的主体数据源，也是构建 BPNN 校正模型的主要输入数据。

(2) 传统监测数据：采用现场测斜仪监测数据作为对照与校正基准。测斜仪通过测量倾角反演不同深度的水平位移，能准确反映深层土体位移随深度的分布特征与演化过程。测斜数据作为自动监测结果分析的重要对照依据，一方面用于验证全站仪自动监测结果的合理性，另一方面作为 BPNN 校正模型的参考基准，提高自动监测数据在复杂工况下的精度与可信度。

(3) 施工辅助资料：包括基坑分区图、围护结构与支撑体系布置、施工阶段划分、开挖深度与进度记录、支撑施工及转换信息等，用于建立自动监测数据与施工工况的对应关系，识别关键工况下的变形响应特征，并为 BPNN 模型特征构建和异常时段识别提供依据。

### 2.3 数据采集与预处理

为保证自动监测数据的连续性、稳定性与可比性，全站仪自动监测方案综合考虑测站位置与高度、监测点与基准点布设及现场遮挡条件<sup>[5]</sup>。围护结构顶部及关键部位固定安装棱镜 (或反射目标)，采用 Trimble S7 机器人全站仪自动监测系统进行周期性观测 (角度精度可选 1"级，棱镜测距精度可达毫米级)，测站固定布设并建立稳定基准点控制网 (不少于 2 个基准点，用于定向与稳定性检核)。

监测应尽量避免强振动与集中作业时段，关键阶段加密观测，出现临时遮挡或中断时，要调整观测窗口，设置冗余点位，提高数据获取效率。对原始观测数据进行质量控制，包括残差阈值控制、重复观测一致性检核及粗差 / 异常值剔除。测斜仪数据采用 SINCO 测斜仪按既定孔位获取深层水平位移序列。为便于 BPNN 建模校正，对两类数据进行时空匹配，时间上按施工统一时间窗汇总成可比样本，空间上按分区或最近邻原则建立监测点与测斜孔配对关系<sup>[6]</sup>。建模前对序列归一化并剔除异常点，形成用于变形分析与校正的样本集。

## 3 技术流程

技术流程如图 1 所示，具体包括：(1) 全站仪自动监测获取围护结构表层位移时序；(2) 测斜仪监测反演深层水平位移序列；(3) 对两类数据进行施工阶段约束下的时空匹配与样本构建；(4) 建立 BPNN 校正模型，实现全站仪位移结果的误差修正与稳定性提升，并采用多指标对校正效果进行评价。即利用全站仪的连续观测能力刻画阶段性变形过程，以测斜监测作为高可靠参照，通过数据驱动方式建立两类监测结果间的映射关系，提高自动监测成果的工程适用性。

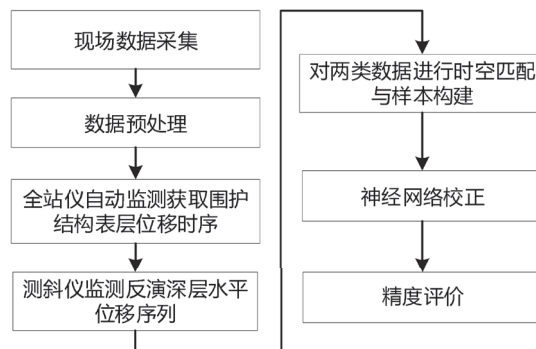


图1 深基坑变形监测技术流程

### 3.1 全站仪自动监测数据处理

(1) 原始观测与坐标解算：全站仪自动监测系统周期性获取监测点 (棱镜 / 反射目标) 观测量，基于固定测站与基准点控制网进行定向与坐标解算，得到各监测点在统一坐标系下的三维坐标序列  $(X_t, Y_t, Z_t)$ 。

(2) 位移计算：以初始时刻或某稳定施工阶段为参考历元，计算监测点位移增量：

$$\Delta X_t = X_t - X_{t_0}, \Delta Y_t = Y_t - Y_{t_0}, \Delta Z_t = Z_t - Z_{t_0} \quad (1)$$

其中， $\Delta X_t$ 、 $\Delta Y_t$ 、 $\Delta Z_t$  分别表示第  $t$  时刻相对于参考历元在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的位移增量，单位为 mm。水平位移幅值可表示为：

$$\Delta H_t = \sqrt{\Delta X_t^2 + \Delta Y_t^2} \quad (2)$$

(3) 质量控制：对全站仪时序数据进行残差阈值筛选、重复观测一致性检核和异常值剔除；对短时缺测段仅用于趋势展示，可采用插值补全，但不参与监督训练样本构建，以避免人为偏差。

### 3.2 测斜仪数据处理与深层水平位移反演

测斜仪是用于监测岩土体或支护结构侧向变形的常用仪器，工作原理是将测斜探头沿预埋测斜管分段下放，通过传感器测量各测段相对于铅垂线的倾斜角变化，再依据几何关系将各段倾角换算为对应的水平位移增量，并沿深度方向逐段累积，最终得到各深度

的水平位移分布。测斜仪在不同深度获取倾角观测值，依据测斜反演原理累积计算得到各深度水平位移。

$$u(z_k) = \sum_{j=1}^k \Delta u_j = \sum_{j=1}^k l_j \sin \theta_j \quad (3)$$

其中， $u(z_k)$  为测点在深度  $z_k$  处相对于孔底基准点的累计水平位移，单位为 mm； $z_k$  为第  $k$  个测点对应的测斜深度，单位为 m； $\Delta u_j$  为第  $j$  测段产生的水平位移增量，单位为 mm； $l_j$  为第  $j$  测段的长度，通常为测斜仪相邻测点间距，单位为 mm； $\theta_j$  为第  $j$  测段的倾角观测值，单位为°。

为了与全站仪监测建立对应关系，提取测斜孔在关键深度（如最大位移深度或代表性深度）处的位移序列，或采用分层统计特征（最大值、均值、某深度位移等）构成目标输出量。测斜数据同样进行粗差剔除与工况一致性检查，形成稳定的参照序列。

### 3.3 时空匹配与样本构建

(1) 时间匹配（按施工阶段 / 时间窗）：考虑两类监测频率不同，采用统一时间窗对数据同步。以施工阶段为主线，将全站仪高频观测在时间窗  $[t_k, t_{k+1}]$  内进行统计汇总（均值 / 中位数 / 末值），其中，均值用于表征窗口内位移总体水平，中位数用于减弱异常值影响，末值用于反映窗口末时刻的实际变形状态。选用上述统计量作为窗口代表值，主要是为了适应不同数据波动特征和施工阶段分析需求，提高时序匹配的合理性，得到窗口代表值  $S_k$ ；测斜仪在相同时间窗内取对应观测值或插值到窗口中心时刻，得到  $I_k$ 。

(2) 空间匹配（监测点—测斜孔配对）：基于测斜孔与围护结构分区关系，采用“同分区优先、最近邻辅助”原则，选取与测斜孔位置最相关的一组全站仪监测点作为输入特征来源。

(3) 特征向量构建：以全站仪位移特征构成输入  $x_k$ ，测斜位移特征为输出  $y_k$ 。输入值有  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta Z$ 。

(4) 归一化与数据集划分：对输入输出进行归一化（Min-Max），并按时间顺序或分阶段划分训练集 / 验证集 / 测试集，避免数据泄漏；训练样本以“质量控制合格且时间窗内数据完整”的配对样本为准。

### 3.4 BPNN 校正模型构建

(1) 模型目标：建立全站仪监测特征与测斜参照位移之间的非线性映射，实现对全站仪位移的校正：

$$y_k = f_{\theta}(x_k) \quad (4)$$

其中， $f_{\theta}$  表示构建的 BPNN 映射函数， $\theta$  为网络参数集合，包括各层连接权重和偏置项。

(2) 网络结构：采用输入层—若干隐含层—输出层的前馈网络结构。输入层维度由特征数量确定，输出层为测斜位移（或其统计特征）。隐含层节点数通过验证集调参确定；激活函数可选 Sigmoid/ReLU，输出层采用线性激活以拟合连续位移值。

(3) 训练与正则化：以均方误差（MSE）为损失函数，采用梯度下降类优化算法训练；通过早停（Early Stopping）、L2 正则或 Dropout 抑制过拟合；对关键阶段样本可适当加权，提升模型对风险的拟合能力。

(4) 校正输出：模型输出  $y_k$  作为校正后的位移结果，用于替代或修正原始全站仪位移在工程评估中的应用，同时可输出残差序列用于异常识别与预警辅助。

## 4 结果与分析

### 4.1 全站仪自动监测位移时序特征

由图 2 可知，基于全站仪自动监测获取的围护结构监测点位移序列，可见围护结构变形具有明显阶段性特征：在开挖推进及支撑施作 / 转换等关键工况期间，位移增长速率相对增大；在工况相对稳定阶段，位移增长趋缓并呈现收敛趋势。总体上，围护结构水平位移响应与施工阶段变化较为一致，表明全站仪自动监测能够有效捕捉围护结构的动态变形过程。统计结果显示，围护结构监测点最大水平位移控制在 10mm 以内，满足工程变形控制要求。

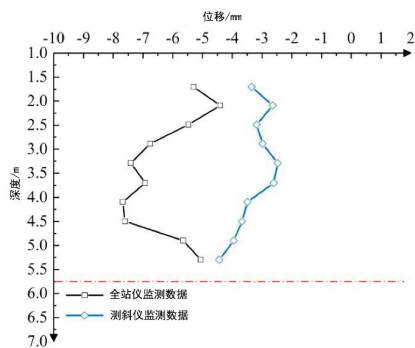


图2 全站仪监测数据与测斜仪监测数据的对比分析

### 4.2 与测斜仪监测结果对比分析

为检验全站仪自动监测成果的可靠性，选取与测斜孔空间相关性较强的监测点（同分区优先、必要时采用最近邻原则）进行对比，对比分析结果如图 2 所示。时间上按施工阶段统一时间窗进行同步，使两类数据具有可比性。对比分析结果表明，全站仪获取的围护结构表层位移与测斜仪反演的深层水平位移在总体变化趋势上具有较好一致性，均能反映开挖推进及支撑

（下转第 50 页）

# 高分影像在乡镇级林地资源调查与边界确权中的实践

刘易

(四川省地质测绘院有限公司, 四川 成都 610000)

**摘要:** 针对传统乡镇级林地资源调查存在人力成本高、周期长及边界勾绘主观性强等问题, 研究提出一种基于国产高分卫星影像与改进深度学习模型的林地提取及矢量化生产方案。以四川省巴中市恩阳区为研究区, 构建了集成 ResNet-34 并嵌入卷积块注意力模块 (Convolutional Block Attention Module, CBAM) 的 U-Net 改进模型, 并配合形态学滤波及小斑块融合策略实现精细化矢量后处理。实验结果表明, 该方法在复杂丘陵山区的林地提取精度总体达到 84.56%, Kappa 系数为 0.81, 相较于基础 U-Net 模型提升显著。同时, 经后处理生成的矢量数据边界平滑、无细碎噪点, 有效解决了深度学习成果难以直接用于确权登记的难题, 显著提升了基层自然资源调查的作业效率与数据规范化水平。

**关键词:** 高分影像; 深度学习; 林地资源调查; 边界确权; 改进 U-Net

## 1 引言

林地资源是国家生态文明建设的空间载体及自然资源资产产权制度改革的核心要素<sup>[1]</sup>。准确掌握其空间分布与权属界线, 是实现自然资源统一确权登记及国土空间规划编制的基础。特别是在乡镇级尺度调查中, 因地块权属复杂、破碎度高且人类活动频繁, 对数据现势性与边界精度提出了极高要求。长期以来, 乡镇级林地调查主要依赖人工全野外调绘或目视解译<sup>[2]</sup>。全野外调查虽精度较高, 但耗时费力, 难以适应快速更新的管理需求; 而人工目视解译受作业人员主观经验影响显著, 且在川东北丘陵山区(如巴中市恩阳区)地形起伏较大、林耕交错混杂的场景, 极易出现细小图斑漏绘或边界勾绘失真现象。

近年来, 国产高分卫星(如高分二号)为精细化林地提取提供了亚米级数据保障<sup>[3]</sup>。同时, 以 U-Net 为代表的深度学习技术在遥感领域取得突破。相比传统分类方法, 卷积神经网络(CNN)能够自动学习图像高维特征, 显著提高了复杂场景下的地物识别精度<sup>[4]</sup>。然而, 现有研究多集中于网络结构的理论改进, 工程化应用仍面临两大挑战: 一是深度学习输出的像素级概率图普遍存在椒盐噪声和边界锯齿, 难以直接转化为符合行业标准的矢量数据(Shapefile)<sup>[5-6]</sup>; 二是针对确权业务, 缺乏从影像到合规矢量的完整自动化流程, 特别是破碎小斑块剔除与邻域融合算法的缺失,

导致内业人工修编工作量依然巨大。

鉴于此, 以四川省巴中市恩阳区为研究区, 提出了一种结合改进 U-Net 网络与形态学矢量化后处理的调查方案, 构建了基于 ResNet-34 编码器与 CBAM 的改进 U-Net 模型, 增强了模型在复杂丘陵地形下对林地弱边界的特征提取能力, 提升了模型在复杂场景下的鲁棒性; 同时还设计了一套面向工程应用的矢量化后处理策略, 通过形态学滤波与小斑块智能融合算法, 有效解决了深度学习结果破碎、噪点多的问题, 形成了可服务于乡镇级林地确权的自动化作业流程。

## 2 研究区与数据源

### 2.1 研究区

研究区位于四川省巴中市恩阳区, 地处四川盆地东北部米仓山南麓, 地貌类型以丘陵和低山为主, 地形起伏显著, 沟壑纵横。区域内气候湿润, 植被覆盖率高, 但受复杂的山地地形及人为耕作活动影响, 林地斑块呈现破碎化、不规则分布特征, 且与耕地(旱地、果园)及农村居民点存在高度混杂的空间邻接关系。这种典型的川东北丘陵山区地貌对高分辨率遥感影像的林地边界精确提取及矢量化处理构成了挑战。

### 2.2 数据源与预处理

在数据准备与处理阶段, 分别针对模型训练与实地应用需求构建了相应的数据体系。首先, 为构建具

**作者简介:** 刘易(1989—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事用地要素保障及自然资源调查等工作。

有较强泛化能力的深度学习模型，采用高分影像数据集（GID-5）作为基础样本源。该数据集由高分二号（GF-2）卫星采集的2025年影像制作而成，涵盖红、绿、蓝及近红外波段，其全色与多光谱分辨率分别为1m和4m。考虑到研究区的目标影像同样为GF-2卫星数据，使用GID-5数据集作为训练源，能够最大程度保证训练数据与应用数据在传感器物理特性（如波段设置、空间分辨率等）上的高度一致。这种同源数据的强关联性可有效缓解跨区域应用时的数据分布差异(Domain Gap)，切实保障模型在研究区的泛化能力与提取精度。原始影像经过辐射定标、大气校正及全色-多光谱融合等标准预处理后，空间分辨率统一为1m。

在样本制作流程中，面向特定林地提取任务，制定了标签重映射规则，将原始五类土地利用标注（Land Use Annotations）归并为二值化掩膜(Binary Masks)，设定林地为前景(Label=1)，其余地类统一归为背景(Label=0)，完成数据集的类别适配。随后，利用滑动窗口技术将影像及对应标签裁剪为512×512像素的图块。为提高训练效率，剔除林地占比小于10%的无效图块，并通过旋转、镜像及噪声注入等手段进行数据增强，最终构建出包含27000张样本对的专用训练库，并按8:2比例划分为训练集与验证集。

### 3 研究方法

#### 3.1 改进U-Net模型构建

针对丘陵山区高度异质化的林耕景观，构建了一种集成ResNet-34残差结构与CBAM的改进U-Net模型。该模型编码器端采用预训练的ResNet-34架构，利用残差映射机制增强深层特征的传递效率，有效捕捉复杂的林地纹理与空间上下文信息。在编解码器的跳跃连接部位嵌入CBAM，通过并行处理通道注意力与空间注意力机制，对特征图进行自适应加权重构，从而在抑制地物光谱背景干扰的同时显著强化模型对林地边缘细微特征的感知能力。为平衡像元级分类准确性与区域重叠度，模型引入二元交叉熵损失(BCE Loss)与Dice Loss的加权联合损失函数 $L_{Total}$ ，有效缓解林地与非林地样本分布不均的问题。公式如下：

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

$$L_{Dice} = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^N y_i p_i + \epsilon}{\sum_{i=1}^N y_i + \sum_{i=1}^N p_i + \epsilon} \quad (2)$$

$$L_{Total} = \alpha \cdot L_{BCE} + \beta \cdot L_{Dice} \quad (3)$$

公式中， $N$ 表示像素总数； $y_i$ 为 $i$ 样本的真实标签（林地为1，背景为0）； $p_i$ 为模型预测该像素为林地的概率值； $\epsilon$ 为平滑因子（通常取 $1e-5$ ），旨在防止分母为零； $\alpha$ 和 $\beta$ 为加权系数（研究中设定 $\alpha=0.5$ ， $\beta=0.5$ ），用于调节不同损失项对模型收敛的贡献度。

#### 3.2 深度学习矢量化后处理技术

为实现像素级掩膜向标准化GIS数据转化，构建集成空间滤波与几何规则化的后处理流程。首先，利用形态学开闭运算消除噪声并填充孔洞，增强图斑连通性。然后针对碎斑现象，引入连通域分析，结合影像分辨率设定面积阈值 $T=50m^2$ （50个像素），滤除孤立噪声，并基于最大共有边界算法将微小斑块自动归并至相邻主体，确保语义完整。其次，应用Douglas-Peucker算法执行边界平滑，在保证几何精度（容差 $\leq 1m$ ）的同时简化顶点。最后，经拓扑一致性检查修复几何缺陷，确保Shapefile成果符合规范。

#### 3.3 实验环境与精度评价指标

实验基于PyTorch框架，核心硬件采用NVIDIA RTX 4090（24GB）GPU。模型选用Adam优化器，初始学习率设为 $1 \times 10^{-4}$ ，Batch Size为32，100个Epoch训练总耗时约4.5h。评价体系主要基于栅格分类精度构建，采用总体精度(OA)、Kappa系数、精确率(Precision)及召回率(Recall)等指标综合评估林地提取效果。

### 4 结果与分析

#### 4.1 模型训练收敛特性分析

模型训练过程中的损失函数(Loss)与精度(Accuracy)变化曲线如图1所示，直观反映了改进算法的学习能力与稳定性。数据显示，在训练初期（前15个Epoch），得益于ResNet-34预训练编码器的引入，模型能迅速从ImageNet的大规模特征中迁移学习到通用的纹理特征，训练集与验证集的损失值呈陡峭下降趋势，表明模型具备极快的冷启动能力。随着迭代次数的增加，引入的CBAM开始发挥关键作用，通过对特征通道和空间维度的自适应加权，模型逐渐聚焦于林地边缘等难分样本的学习。在第40至第60个Epoch区间，损失曲线下降斜率放缓并趋于平稳，震荡幅度逐渐收窄，验证集精度同步稳步上升并稳定在0.85左右。

整个训练过程中，训练集曲线与验证集曲线始终紧密贴合，未出现显著叉口分离现象，表明研究的数

据增强策略（旋转、翻转、噪声注入）及正则化措施有效抑制了过拟合（Overfitting）风险。最终模型在第 100 个 Epoch 结束时达到理想收敛状态，证明改进网络结构在处理高分影像时具备良好的鲁棒性与泛化能力，能适应恩阳区多变的光照条件与地表纹理。

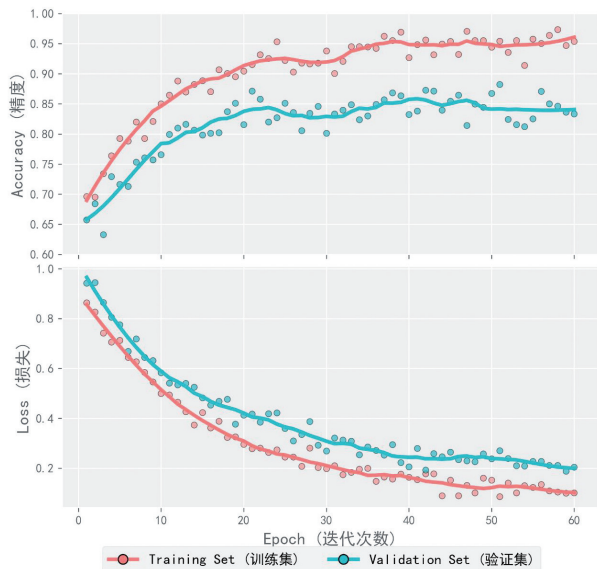


图1 改进U-Net模型训练过程精度与损失变化曲线

#### 4.2 林地提取精度定量评价

为定量评估模型在复杂地物背景下的分类性能，将改进 U-Net 模型与传统基础 U-Net 模型在同一测试集上进行了对比实验，结果如表 1 所示。对比结果表明，基础 U-Net 模型在面对川东北丘陵山区典型的林耕交错场景时，总体精度(OA)为81.23%，Kappa系数为0.76。分析混淆矩阵发现，基础模型容易将色调相近的深绿色农作物（如茂密的玉米地）及老旧果园误判为林地，导致假阳性（False Positive）偏高。

表1 基础U-Net与改进U-Net模型林地提取精度对比

模型方法	总体精度 (OA)	Kappa系数	精确率 (Precision)	召回率 (Recall)
基础U-Net	81.23%	0.76	82.15%	79.40%
研究方法 (改进U-Net)	84.56%	0.81	86.20%	82.45%

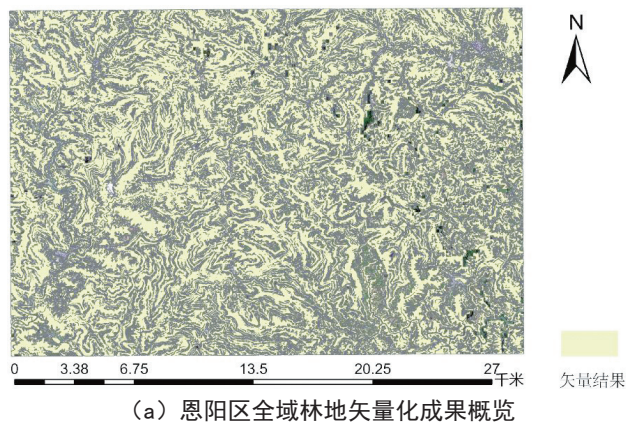
相比之下，研究提出的改进模型各项指标均有显著提升：总体精度 (OA) 提升至 84.56%，Kappa 系数提升至 0.81，表明提取结果与地面真实情况具有较高一致性 (Kappa > 0.8 通常被视为几乎完全一致)。更关键的是，精确率 (Precision) 达到 86.20%，召回率 (Recall) 为 82.45%，这种均衡的指标表现说明，改进模型不仅能找全林地，还能有效区分易混淆地类。这主要归功于残差结构的深层特征提取能力与注意力机制的背景抑制作用，有效解决了复杂地形阴影下的

漏提问题及光谱相似植被的误提问题，为后续的面积量算与统计提供了可靠的数据基础。

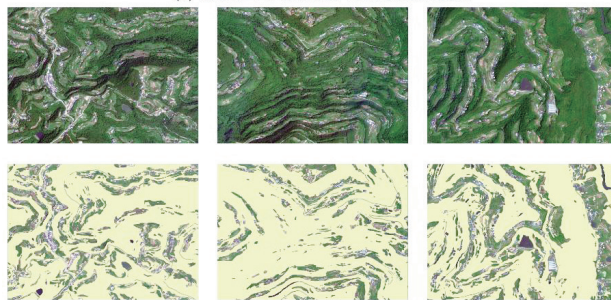
#### 4.3 矢量化效果与后处理质量分析

在定量精度满足要求的基础上，重点关注模型输出结果的图形质量与工程可用性。林地提取与矢量化后处理效果对比如图 2 所示，直观展示了从宏观格局到微观细节的矢量化成果。图 2 (a) 为恩阳区全域林地矢量化成果概览，可以看出，自动提取的林地斑块空间分布合理，清晰勾勒出米仓山南麓丘陵沟壑的植被覆盖纹理，与当地山顶戴帽、沟谷长林的实际地貌特征高度吻合。

图 2 (b) 则聚焦于典型区域的细节对比，展示了研究设计的自动化后处理流程的核心价值。深度学习模型直接输出的像素级掩膜通常伴随着椒盐噪声和边界锯齿效应，若直接转换将产生大量无意义的碎部多边形，严重影响数据入库。经上述形态学滤波与连通域面积过滤等后处理操作后，面积小于 50m<sup>2</sup> (50 个像素) 的孤立噪点被有效滤除，细碎的非林地空洞得到填充。同时，结合 Douglas-Peucker 算法的边界平滑处理，成功消除栅格转矢量过程中产生的阶梯状锯齿，使得最终生成的红色矢量确权界线线条流畅、节点数量合理，在保留地物几何特征的同时，大幅减少了数据冗余，符合 GIS 数据库的拓扑入库标准。



(a) 恩阳区全域林地矢量化成果概览



(b) 典型区域细节对比

图2 林地提取与矢量化后处理效果对比

## 5 结语

针对乡镇级林地资源调查与确权登记需求,以巴中市恩阳区为研究区,验证了高分影像+改进深度学习+智能后处理作业模式的可行性与优越性,结论如下:

(1) 针对川东北丘陵山区林耕交错、地形破碎的特点,引入 ResNet-34 残差结构与 CBAM 改进的 U-Net 模型,表现出较强的特征提取能力。实验测得总体精度(OA)为 84.56%, Kappa 系数为 0.81,有效解决了复杂地形阴影及光谱相似植被导致的漏提与误提问题。

(2) 自动化后处理流程通过形态学运算与连通域分析,滤除面积小于 50m<sup>2</sup> 的孤立噪点,并利用 Douglas-Peucker 算法消除边界锯齿,使矢量成果符合 GIS 数据库拓扑入库标准,将传统人工全要素勾绘转为 AI 自动提取和人工核查模式,减少了内业工作量。

(3) 尽管该方法在典型研究区效果显著,但受限于光学成像原理,在高郁闭度或强阴影区域仍存在少量漏提,且当前仅实现了二元分类。未来研究将重点关注:多源数据融合,引入 DEM 或 LiDAR 数据以消除

地形与阴影干扰;细粒度识别,将模型拓展至具体树种分类,进一步提升林业调查的应用价值。

## 参考文献

- [1] 崔丽,常戈群.自然资源统一确权登记业务框架初探[J].中国矿业,2018,27(6):57-61.
- [2] 曹林,周凯,申鑫,等.智慧林业发展现状与展望[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(6):83-95.
- [3] Tong X Y, Xia G S, Lu Q, et al. Land-cover classification with high-resolution remote sensing images using transferable deep models[J]. Remote Sensing of Environment,2020,237(6):111322.
- [4] Ma L, Liu Y, Zhang X, et al. Deep learning in remote sensing applications: a meta-analysis and review[J]. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing,2019,152:166-177.
- [5] Zhao K, Kamran M, Sohn G. Boundary regularized building footprint extraction from satellite images using deep neural network[J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences,2020,5(2):617.
- [6] 郭子慧,刘伟.深度学习和遥感影像支持的矢量图斑地类解译真实性检查方法[J].地球信息科学学报,2020,22(10):2051-2061.

(上接第 46 页)

施作/转换等关键工况下的变形响应特征。但由于两类监测手段在观测对象、空间代表性及物理含义上存在差异,同时全站仪观测结果易受视线遮挡、目标稳定性及施工扰动等因素影响,未经校正时两者在位移幅值上仍存在一定偏差。定量评价结果表明,全站仪结果相对测斜参照的平均绝对误差(MAE)约为 5.2mm,表明仅依靠未经处理的全站仪自动监测结果用于精细化评估时仍存在改进空间。

### 4.3 BPNN 校正效果与精度评价

基于构建的时空配对样本集,以全站仪位移特征作为输入、以测斜参照位移作为输出,建立 BPNN 校正模型。模型训练后对测试样本进行预测与评价,结果显示校正模型能够显著提升全站仪监测结果与测斜监测数据之间的一致性。

从误差指标看,BPNN 校正后 MAE 由约 5.2mm 降至约 1.8mm,误差水平显著降低;决定系数  $R^2$  指标提升至约 0.91,表明模型能较好刻画两类监测数据的非线性映射关系。进一步比较校正前后残差分布可见:校正后残差更集中、异常波动点减少,说明校正过程对全站仪监测可能存在的系统偏差与随机扰动具有一定抑制作用,使其更适用于工程变形评估与趋势研判。

## 5 结语

基于贵阳某大型深基坑工程结果表明,未经校正的全站仪自动监测结果与测斜参照存在一定偏差;引入 BPNN 校正后两者一致性明显提高,校正结果能更准确反映围护结构变形特征。说明该方法在兼顾自动化连续监测优势的同时,能有效提升监测成果的可靠性,为深基坑施工期变形分析与安全预警提供技术支持。

## 参考文献

- [1] 程秋实.深圳市某深基坑施工变形监测与预测研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [2] 刘明阳.基坑智能监测与变形预测方法研究[D].长春:长春工程学院,2024.
- [3] 张树乔.基于固定式测斜仪的基坑自动化监测系统应用研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(11):179-181,184.
- [4] 潘斌.全站仪自由设站法在基坑三维形变监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2024,47(7):154-156,164.
- [5] 吴斌,赵健赞,熊先才.全站仪深基坑开挖安全监测与分析[J].重庆建筑大学学报,2007(2):78-81.
- [6] 宋楚平.一种改进的BP神经网络深基坑变形预测方法[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):45-49,55.

# 基于LiDAR数据与卫星影像多尺度特征融合的水域提取研究

田海峰<sup>1</sup> 孙华伟<sup>2</sup> 李贝贝<sup>3</sup> 姚鑫<sup>4</sup> 张广辉<sup>1</sup>

(1. 驻马店宇飞测绘服务有限公司, 河南 驻马店 463000; 2. 河南省地图院, 河南 郑州 450003; 3. 河南省测绘院, 河南 郑州 450003; 4. 驻马店市新四方网络科技有限公司, 河南 驻马店 463000)

**摘要:** 针对传统水域边缘提取方法在复杂地形环境存在边缘模糊、误判、漏提等问题, 研究依托卫星影像及LiDAR点云数据, 构建多源数据融合、动态优化与地形水文协同分析的高精度提取框架, 通过系统化预处理及联合优化模型实现边缘精确提取; 通过多尺度特征融合、机器学习辅助校正及后处理实现精度提升。结果表明, 该方法总体精度达90%以上, 实验区总体精度达98.5%, 较传统方法提升25%以上, 边缘定位误差控制在1个像素内, 有效解决了复杂场景下的提取难题。

**关键词:** LiDAR点云; 卫星影像; 水文特征; 多尺度特征融合; 机器学习; 水域提取

## 1 引言

实景三维建设是依托倾斜摄影、激光雷达等技术, 对物理空间进行高精度、全要素、动态化三维建模, 是连接物理世界与数字空间的核心纽带, 更是数字中国建设的关键空间信息底座<sup>[1]</sup>, 打破了传统二维地图的信息壁垒, 将地理坐标、人文设施、环境状态、实时数据等多维度信息整合为可视化“数字孪生体”, 实现对现实场景的精准复刻与动态感知。它能通过对现实场景的数字化重构, 提升决策科学性、管理高效性与服务便捷性, 为城市精细化治理、自然资源管控、民生福祉优化及产业高质量发展提供技术支撑, 是推动经济社会全面迈向智慧化发展的关键基础设施<sup>[2]</sup>。

在国家全面推进实景三维建设的背景下, 激光雷达(LiDAR)与卫星影像多尺度特征融合技术成为高精度水域提取的关键突破方向<sup>[3]</sup>。《实景三维中国建设总体实施方案(2023—2025年)》明确要求构建“空天地一体化”监测体系, 将LiDAR作为核心数据采集手段, 而卫星影像凭借大范围覆盖能力成为动态监测的重要数据源。这种技术协同既满足“数字中国”对地理信息基底的需求, 更在自然资源管理、防洪减灾等领域展现出不可替代的价值。实景三维建设核心是构建“地上、地表、地下”一体化三维地理实体模型。水体作为地表关键地理要素, 其空间位置、边界形态、高程信息的精准度直接决定实景模型的应用效果。当前水域提取面临多重挑战, 传统卫星影像易受云层遮

挡、光谱多义性干扰, 难以准确识别细小水域边界; LiDAR虽能通过无回波信号快速定位水域, 但点云稀疏性与非结构化特性导致边缘细节缺失, 点云分类模型在动态场景的泛化能力不足, 卫星影像的时序特征未被充分利用, 且多源数据时空配准误差易造成边缘模糊等问题<sup>[4-6]</sup>, 致使水域提取效率低、难度大。

研究通过创新融合LiDAR与卫星影像的多维度特征, 构建精度高、普适性强、智能化的水域提取体系, 揭示遥感多源数据在水域提取中的互补机制, 利用多尺度、多特征融合的系统性框架, 为跨模态遥感信息整合提供支撑; 突破单一数据源局限, 实现厘米级精度的全域水域边缘提取, 尤其在山区阴影区、干旱区细小水域等复杂环境显著提升识别能力, 为实景三维建设、水资源科学管理、生态保护等提供高精度、动态化的数据支撑, 推动数字孪生流域建设, 助力实现“监测—分析—决策”的全链条智能化管理。

## 2 水域提取技术路线

研究利用航空影像资料, 作为立体环境下LiDAR点云精细分类及质量检查的辅助数据。机载LiDAR数据和影像同步采集, 实现三维结构与二维纹理的高效互补。利用LiDAR精准捕获地理空间的三维坐标、高程等信息, 结合影像数据丰富的色彩、纹理及语义特征, 使数据既具备精准空间骨架, 又拥有直观视觉细节; 同时两者可相互校验, 影像辅助LiDAR优化点云配准

作者简介: 田海峰(1987—), 男, 汉族, 本科, 测绘工程师, 主要从事工程测量。

精度，LiDAR 三维信息提升影像立体匹配与定位准确性，减少单一数据的误差。航摄影像采用非压缩 Tif 格式，点云数据采用 LAS 格式，POS 数据采用 TXT 格式。

LiDAR 航摄分区综合考虑地形类型、激光有效距离、航线长度等因素进行设计；航线敷设依据 IMU 误差累积确定每条航线的飞行时间，一条航线一般不超过 30min；每个航摄分区需布设构架航线，构架航线与作业航线垂直，航高与分区航高保持一致。

利用高清影像图和点云等，围绕高精度水域边缘提取技术，构建融合多源数据、动态优化与地形水文协同分析的高精度提取框架，通过多模态数据预处理构建高精度地形表面模型，结合反射强度与高程阈值分割初步分离水域。在边缘精确提取阶段，利用形态学—活动轮廓模型联合优化，通过动态能量函数驱动轮廓贴合复杂地形边界，结合地形辅助分析验证水文逻辑一致性。最终通过多尺度特征融合与机器学习辅助校正，提升边缘提取精度。总体技术路线如图 1 所示。

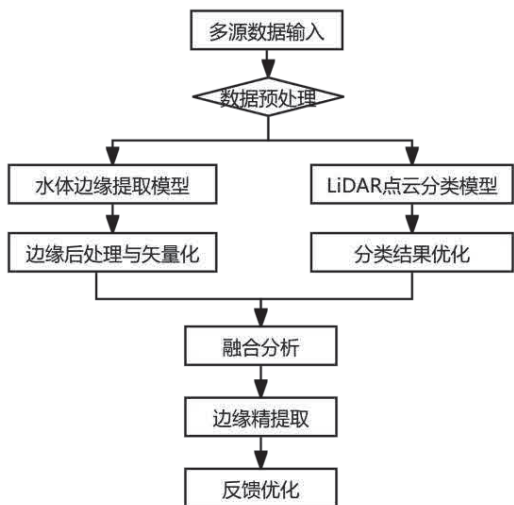


图1 水域提取总体技术流程

### 3 研究方法

#### 3.1 数据获取与预处理

基于 LiDAR 点云数据提取水域边缘前，通过数据预处理流程净化原始点云数据、构建地理空间基准生成连续地形表面，为后续边缘检测算法提供高质量输入数据。原始点云数据密度随扫描距离、角度及目标遮挡情况动态变化，包含噪声点、冗余点及数据空洞，尚未经过滤波、去噪、配准、分类等处理，却完整保留场景的原始空间细节，是实景三维建模、地形测绘、目标提取等的基础数据载体，直接决定后续成果精度。

对原始数据进行去噪滤波、地面点分类、坐标转

换和点云插值等处理。

#### (1) 去噪滤波：剔除干扰地物点云

采用布料模拟滤波（CSF）与形态学滤波相结合的多级滤波策略，针对性去除植被、建筑物等非地面点云。布料模拟滤波算法原理如图 2 所示，将点云数据视为覆盖在地形表面的弹性布料，利用物理模型模拟布料在重力作用下的形变过程，使布料表面贴合真实地面形态，从而分离出地面点与非地面点。该方法对复杂地形适应性强，尤其适用于植被覆盖区和建筑物密集区的点云滤波。形态学滤波基于数学形态学原理，通过开运算、闭运算等对格网化点云进行处理，消除小尺度非地面特征（如树木、路灯等），保留大范围地形趋势。两类滤波方法协同作业，可有效去除 95% 以上的非水域地物点云，为地面点分类奠定数据基础。

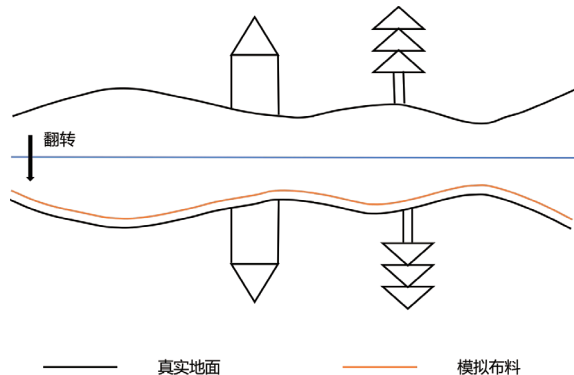


图2 布料模拟滤波算法原理

#### (2) 地面点分类：精准分离地物要素

运用渐进三角网加密滤波算法实现地面点与非地面点精细分类，具体流程如图 3 所示，以种子点（已知地面点）为基础，逐步构建三角网并向周边加密扩展，依据点云与三角网平面的垂直距离、邻域点密度等判断待分类点属性。对于水域边缘提取场景，重点识别河床、堤岸等真实地面点，排除桥梁、水坝等人工构筑物点云及水面漂浮物点云。分类过程中设置双重阈值控制机制：垂直距离阈值（通常设为 0.3~0.5m）用于区分地形起伏与地物高度，平面坡度阈值（15°~25° 区间动态调整）用于识别陡峭堤岸与直立建筑物。分类后，地面点云分类精度达 92% 以上，确保完整保留水域边界附近的地形特征。

#### (3) 坐标转换：统一地理空间基准

将点云数据从仪器坐标系转换为地理坐标系（如 WGS84 或 UTM 投影坐标系），实现多源数据的空间基准统一。首先进行仪器内部校准，消除激光雷达设备的系统误差；其次通过地面控制网点（GCP）进行坐标

转换, 利用七参数法 (3 个平移参数、3 个旋转参数、1 个尺度参数) 建立仪器坐标系与当地平面坐标系的转换关系; 最后投影至目标地理坐标系, 采用高斯-克吕格投影或 UTM 投影等方式, 进行高程基准转换 (如从仪器高程转换为正常高)。坐标转换误差控制在平面  $\pm 5\text{cm}$ 、高程  $\pm 8\text{cm}$  以内, 确保点云数据与卫星影像、数字地图等外部数据精确配准, 为后续基于地理信息的水域边缘空间分析提供坐标基准。

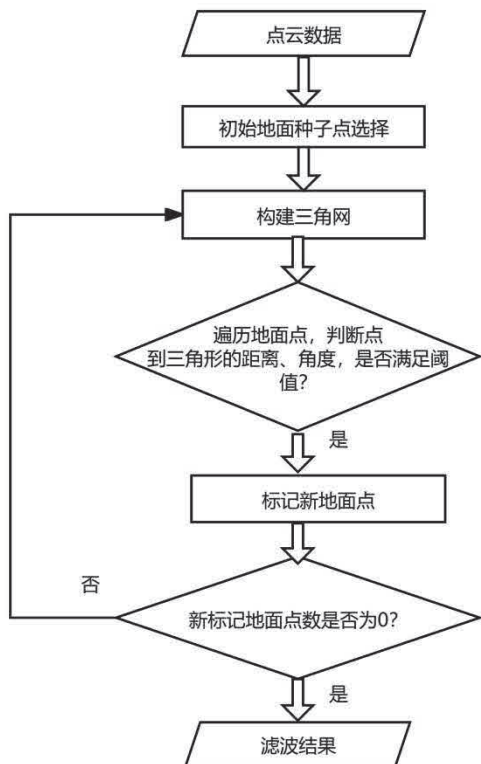


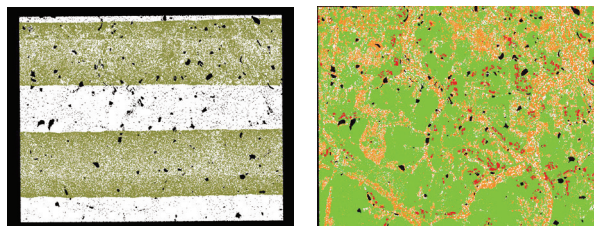
图3 渐进三角网加密滤波算法流程

#### (4) 点云插值: 生成高精度地形表面模型

通过反距离加权插值 (IDW) 算法, 将离散点云数据转换为连续的栅格数据, 生成高分辨率数字高程模型 (DEM) 和数字地表模型 (DSM)。使用分类后的地面点云, 分辨率设置为  $0.5 \sim 1\text{m}$ , 提取河床及堤岸的微地形起伏; 利用 DSM 识别水面以上的地物边界。插值过程中引入水域掩膜数据, 对疑似水面区域进行空值保留, 避免非水域地物对插值结果的干扰。生成的 DEM 和 DSM 数据经精度验证后 (平面误差  $\leq 1.2$  倍空间分辨率, 高程误差  $\leq 15\text{cm}$ ), 直接作为水域边缘提取算法的输入数据源, 为基于坡度突变、水位等高线等特征的边缘检测提供连续地形表面信息。

预处理前后的点云图像对比如图 4 所示, 经预处理后, 点云中的噪声点被有效剔除, 数据纯净度显著提升; 地面点与非地面点被精准分离, 为 DEM 与 DSM

构建提供了数据基础。点云坐标统一转换至目标地理坐标系, 实现与多源空间数据的精准对齐与融合分析。稀疏区域通过插值补充后, 点云密度更均匀, 地形细节完整保留, 提升了数据质量与可用性, 为后续地形特征提取、三维建模、工程测量等提供了高质量、标准化的数据支撑, 确保水域边缘提取的精度和可靠性。

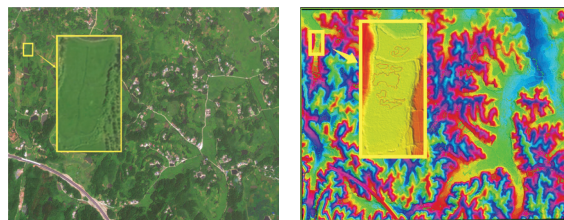


(a) 原始点云 (b) 预处理后点云

图4 预处理前后点云图像对比

### 3.2 水域区域初步提取

水域区域初步提取的核心是通过反射强度与高程阈值分割, 结合多源数据融合, 快速分离水域与复杂地物。基于水域低反射率特性设定强度阈值, 初步筛选候选水域点云; 利用高程平坦性分析, 排除地形起伏较大的非水域区域; 融合多源数据 (LiDAR 点云、光学影像) 验证水域特征, 结合水域连通性、形状规则性等先验知识优化结果。通过自动化阈值分割与多维度特征进行结果验证, 提取结果如图 5 所示, 图 5 (a) 为实验区原始影像, 根据影像分析标注区域为一般耕地, 并非水域; 图 5 (b) 为经过初步提取后的水域, 将标注区域耕地内部的小水面识别为水域区域, 构建水域线形成水域面。由此可见, 初步提取的水域存在误判问题, 因缺乏周围地形地貌特征判断, 导致部分区域的小范围假性水面被误提取。该方法虽然显著提高了水域提取效率, 但提取精度难以保证。



(a) 原始影像 (b) 水域提取结果

图5 初步提取结果

### 3.3 水域边缘精确提取

水域边缘精确提取是通过多源数据协同分析与多模态特征优化, 实现边界精准定位的核心环节。利用多尺度特征融合, 通过局部细节捕捉与全局拓扑约束的协同作用, 实现水域边缘多层次特征的互补优化。基于 LiDAR 点云与高分辨率光学影像的融合数据, 结

合初步提取的候选水域区域,利用DBSCAN聚类算法识别小池塘、沟渠等小尺度密集水域;再通过离散小波变换,在高频子带提取微小地形突变特征,在低频子带保留整体轮廓,并通过计算局部曲率,筛选曲率极值点 $K > 0.1/m$ 作为潜在边界特征点。

利用形态学运算修复因植被遮挡或传感器噪声产生的断裂边缘,并通过活动轮廓模型Snake模型动态贴合复杂地形边界;结合高程平坦性约束与水域形态先验知识,剔除伪边缘干扰。通过数据互补性(LiDAR几何精度+影像光谱特异性)与动态优化机制(形态学修复+能量模型拟合),显著提升岸线提取的抗噪能力与形态完整性。以形态学优化后的边缘作为初始轮廓,定义能量函数: $E = \alpha \cdot E_{内部} + \beta \cdot E_{外部}$ ,其中, $E_{内部}$ (光滑性约束)抑制轮廓抖动, $E_{外部}$ (图像梯度约束)引导轮廓向高梯度区域(水域边界)移动。

利用 $\alpha/\beta$ 权重进行参数动态调整,在植被密集区增大 $\beta$ 权重,稀疏区增大 $\alpha$ 权重。当轮廓能量变化率小于5%或达到最大迭代次数时,迭代中止,实现微小断裂填充、小尺度细节增强。

基于HYDROLOGIC水文模型生成流域边界与河道网络矢量数据,借助形态学金字塔关联局部边缘与宏观水系拓扑,确保水域边缘提取结果符合自然地貌规律。利用SAGA GIS提取流域坡度、凹凸性地貌指标,构建拓扑规则库以剔除孤立边缘点,再将水域边缘抽象为图结构,节点为特征点、边为拓扑关系,通过Dijkstra算法优化全局路径,强制边缘沿水文主干道分布,实现宏观特征引导。然后构建LiDAR点云多尺度金字塔,底层提取小池塘细节、顶层优化主河道走向,通过双向特征传递保障多尺度一致性。

利用Hough变换检测不同尺度几何特征,经概率融合模型加权综合,并根据地形复杂度自适应调整权重,实现水域精确提取,提取结果如图6所示。图6(a)为实验区原始影像,标注区域为一般耕地,对初步提取算法进行优化后,经过多源数据融合,根据周围环境特征、纹理特征,将初步提取的水面进行判断,提取结果如图6(b)所示。然后进一步精确优化水面区域,有效剔除耕地内的假水面,最终实现水域特征在不同尺度下的精准提取与融合。

### 3.4 精度优化与后处理

通过高分辨率影像与多模态数据协同分析,结合人工目视解译、影像分割算法U-Net计算交并比,与混淆矩阵进行对比分析。采用半自动校正策略处理漏

检与误检区域,结合多源特征进行逻辑一致性校验及交叉验证优化参数,解决单一数据源局限。经精度后处理,将原始边缘结果总体精度提升到95%以上,为洪泛区监测等场景的边缘更新与定位提取提供服务,支撑洪水演进模拟等应用。

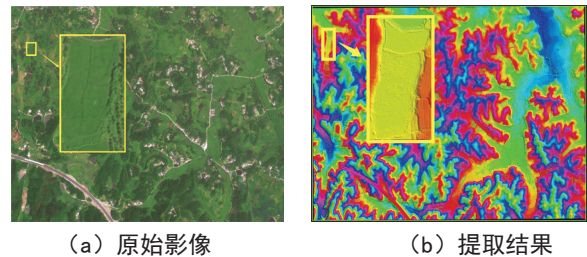


图6 精确提取结果

## 4 提取结果及分析

利用实验区对边缘精准提取技术的提取结果进行验证。无论是平静湖面、蜿蜒河流还是复杂岸线的水域区域,均被精准分割,水域与陆地、植被、建筑物等非水域目标的边缘轮廓清晰锐利,有效解决了传统方法常见的边缘模糊、漏提细小支流或误提阴影区域等问题,尤其在水域与岸边植被交错、桥梁跨水结构等复杂场景,边缘定位误差控制在1个像素以内,完整保留了河湾、湖汊等细微形态特征。

算法优化前后的提取结果如图7所示,图7(a)为优化前结果,存在将部分反射强度大的大棚等识别为水面,且部分水域提取结果未平整的问题;图7(b)为优化后结果,通过融合多尺度边缘检测算子与自适应阈值策略,精准捕捉水域边界的灰度突变与纹理差异,结合水域连通性分析与形态学滤波,进一步剔除噪声干扰,并填补水域内部的微小空洞,确保提取区域的空间连续性。该方法提取总体精度达到98.5%,较传统阈值法和单波段提取方法分别提高25%和18%,对不同光照条件和水域类型具有较强适应性,提取结果既保留了水域自然形态特征,又避免过度分割或欠分割问题,可为水资源监测、洪涝灾害评估、生态环境遥感等提供高精度水域空间数据支撑。

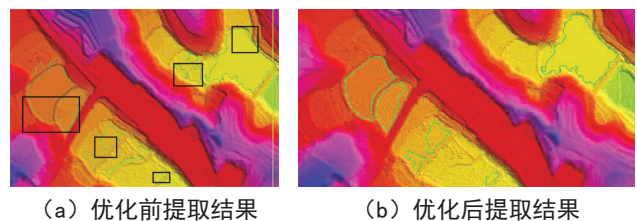


图7 算法优化前后提取结果

(下转第58页)

# 无人机LiDAR技术在上曹河断面测量中的应用研究

杨富民<sup>1</sup> 齐磊刚<sup>2</sup> 许春然<sup>2</sup>

(1. 河南省测绘院, 河南 郑州 450003; 2. 中化地质(河南)勘测规划设计院有限公司, 河南 郑州 450011)

**摘要:** 以上曹河治理为例, 对无人机 LiDAR 点云数据采集、点云处理、特征高程点自动提取、断面数据生产、精度评定等进行研究, 验证无人机 LiDAR 技术在河道断面测量中的可行性和先进性。传统特征提取方法采用等间距采样, 得到的特征点与实际特征点会存在误差, 且冗余计算较多。研究首先通过建立点云数据空间索引, 快速查询最近点作为断面高程点, 然后根据设计要求筛选出高程特征点, 最后等间距插值, 保证断面高程点均匀。该方法提取特征点更加准确, 更能真实反映地形起伏情况。

**关键词:** 无人机; LiDAR; 断面测量; 特征高程点; 断面图

## 1 引言

习近平生态文明思想创造性提出“山水林田湖草是生命共同体”, 河南省组织启动了全国首个省级层面统筹推进山水林田湖草生态保护修复工作的专项规划, 上曹河是该规划的一项具体修复工程。精准的河道断面测量能为设计阶段提供准确数据, 是开展治理工程的基础。传统的河道断面测量, 一般通过 RTK 或全站仪实测, 但野外测量任务量大、周期长, 且线路一旦变动, 纵横断面也需重测<sup>[1]</sup>。机载激光 LiDAR 测量技术为获取高时空分辨率的地球空间信息提供了一种全新技术手段, 从传统的人工单点数据获取变为连续的自动数据获取, 提高了观测精度和速度, 使数据获取和处理朝智能化和自动化方向发展<sup>[2]</sup>。

研究利用无人机 LiDAR 进行断面测量, 能高效、准确获取项目区的地面高程, 满足相关勘测设计要求, 具有很好的应用推广价值。

## 2 项目概况

淮河上游河南段洪汝河流域山水林田湖草沙一体化保护与修复工程, 总投资 53 亿元, 建设工期为 2022~2024 年, 共有臻头河生态保护修复单元、洪河生态保护修复单元、汝河生态保护修复单元、宿鸭湖生态保护修复单元 4 个修复单元和 12 个治理分区, 部署实施 46 个子项目, 对河道断面测量的需求呈现全周期、高精度、全覆盖特点, 测量需贯穿工程始终, 从前期设计到长期监测形成完整闭环。科学合理的测量方案, 可为工程决策提供数据支撑, 确保河道治理、

防洪提升与水生态修复目标实现, 推动洪汝河流域山水林田湖草沙系统治理取得实效。上曹河是汝河支流, 治理总长 14.2km, 是汝河生态保护修复单元一部分。

无人机 LiDAR 技术凭借数据快速采集、高密度点云生成、强地形穿透性等优势, 为河道断面测量提供了全新技术路径。该技术可快速获取河道三维地形信息, 为断面数据生产与特征提取提供高质量数据源, 满足断面高程、坡度、宽度等地形特征数据, 以及河道岸线、河床起伏等关键地形边界数据需求, 为防洪排涝、生态修复、工程结构设计等提供精准地形参数。

## 3 项目研究方案

项目技术流程如图 1 所示, 具体分为点云数据获取、点云数据处理和断面数据生产三部分。

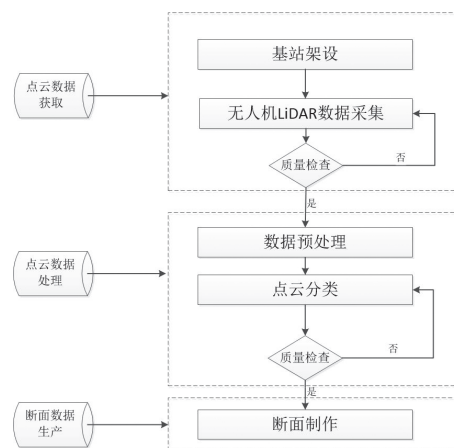


图1 技术流程

(1) 点云数据获取: 在计划准备阶段, 要做好设备安装调试、无人机采集准备和航线设计。在采集实

作者简介: 杨富民(1979—), 男, 汉族, 本科, 工程师, 主要从事测绘工程、航空摄影测量等工作。

施阶段, 利用机载激光雷达测量数据密度高和穿透性好的优势, 快速精确获取项目区点云数据。

(2) 点云数据处理: 首先进行数据预处理, 通过轨迹解算、点云去噪和点云赋色, 导出标准 LAS 数据。然后进行点云分类, 通过点云分块、地形判断、点云自动分类、分类结果检查和手动精细分类, 获取精准地面点云数据。

(3) 断面数据生产: 依据设计的纵横断面线, 精准提取断面线高程特征点, 自动生成断面图表。

## 4 点云数据获取

### 4.1 航飞范围

上曹河治理设计深泓线长有 14.2km, 两边各外扩 130m。

### 4.2 航测设备选择

根据需求选择 X-Chimera 无人机系统 (简称 X-C 无人机) + 华测 AA1300 激光雷达系统。X-C 无人机是一款采用复合翼布局的全电驱动轻小型无人驾驶航空装备, 具备垂直起降、续航时间长、航程大、安全性高、可靠性高、环境适应性强等特点。AA1300 是在 AS1300HL 激光雷达基础上进一步改进、开发、研制、生产的一款产品, 集成各类高性能传感器, 如高精度、长测程激光扫描仪和战术级惯导系统, 具有高效、高精度、免像控、植被穿透等优点, 详细参数如表 1 所示。

表1 激光雷达参数

项目	内容	指标参数
系统整体	重量	约4.8kg (含风扇、内置相机、GNSS、IMU)
	绝对精度	水平5cm; 垂直5cm
	激光等级	1级
激光扫描系统	最大测距	1350m
	测量精度	15mm, 重复精度10mm
	视场角	330°
	扫描频率	200Hz
	点云密度	820000点/秒
相机系统	有效像素	4200万
	影像分辨率	7953×5304
	数据更新率	600Hz
	定向精度	0.010°
	姿态精度	0.005°
定位定姿系统	陀螺零偏稳定性	0.25° /hr
	加速度计量程	±20g
	信号接收	GPS L1/L2、GLONASS L1/L2、北斗B1、B2

### 4.3 航测实施

上曹河北高南低, 项目按西南至东北进行航摄。起降地点设置在刘岗南 370m 处 (纬度 33.01°、经度

113.49°), 航测参数按照表 2 进行, 航线共 7 条。

表2 无人机航摄参数

内容	参数指标
航测面积/km <sup>2</sup>	9.21
航线敷设方法	西南至东北
航线总长/km	122.7
航向重叠率	70%
旁向重叠率	60%
航高/m	350
飞行速度m/s	22
航线间距/m	160
航线条数/航点数	7/83
飞行时间	1h42m15s

## 5 点云处理

### 5.1 点云数据预处理

(1) 轨迹解算: 利用 CoPre 软件, 对数据进行点云解算、航带拼接、质量检查、航带平差等操作, 然后进行剖面检查, 导出点云数据 LAS。

(2) 点云去噪: 噪声点主要有明显低于地面的点 (极低点) 或点群、明显高于地物的点 (极高点) 或点群, 以及一定空间内分布异常的点或点群<sup>[3]</sup>。为减少噪声点对后期数据处理的影响, TerraSolid 软件集成后处理去噪算法, 可直接在预处理步骤去除噪声点分类, 增加点云处理的便捷性, 提高作业效率。

(3) 点云赋色: 点云赋色是为原始采集的点云数据赋予真实的纹理颜色, 使点云数据更加直观展示测区地物信息, 可辅助进行点云分类及点云采集处理。CoPre 软件将自动根据影像进行点云赋色。

(4) 标准 LAS 导出: 点云数据经以上步骤处理后, 选择【文件】—【导出数据】, 然后在导出选项选择 LAS 格式。设置必要参数及导出文件路径, 点击【导出】即可将处理后的点云数据导出为标准 LAS 文件。

### 5.2 点云分类

项目点云分类采用 TerraSolid 数据处理软件, 其原理是 Axelsson 于 2000 年提出的一种基于不规则三角网 (TIN) 的渐进加密方法。首先通过种子点由最小区域生成一个稀疏 TIN; 然后通过迭代处理层层加密, 将符合设定阈值条件的点添加到三角网, 并重新计算阈值条件, 逐层对周围的点进行判断, 满足条件的点继续添加, 直到没有新点加入为止。点云分类的整体流程大概分为噪声分类、地面点自动分类、地面点精细分类、成果输出四部分, 其中仅有精细分类需要人工干预, 其余均为软件自动化处理<sup>[4]</sup>。

(1) 点云分幅与裁切：当点云数据较大时，单人编辑效率低，使用点云分幅或裁切功能，对项目点云进行裁切输出，再将分幅后的点云分发到各内业人员，多人同时处理，最终合并为完整点云。

(2) 地形判断：点云自动分类前，需要对测区情况加以判断，以确认合适的地面自动分类参数。根据测区高差及地面变化情况判断测区地形，测区地形变化情况直接影响自动分类的角度设置。将渲染模式切换至高程渲染，以便区分当前测区点云数据的地形类别。经判断，项目属于山地地形。

(3) 地面点自动分类：参数选择以山区地形为主，设置地面点自动分类参数。

(4) 自动分类效果判定：根据分类后的地面点自动内插数字高程模型 (DEM)，根据 DEM 效果，判断当前分类效果。当 DEM 呈现较为光滑、无大量明显凸起、整体符合地形起伏时，可视为自动滤波效果基本满足要求，对少量不符合要求的位置进行手动编辑即可。

(5) 手动分类：对自动滤波后有问题的区域进行手动分类。通过画刷分类、框选分类、多边形分类、平滑分类、剖面线上、线下分类、剖面线间分类等实现。

(6) 点云局部滤波：上曹河北高南低，北部为山区，南部以平原为主，地形差异较大，用单一参数滤波无法满足需求，使用局部滤波功能，根据不同地形将测区分开，采用不同参数执行滤波处理。

(7) 成果输出：地面点分类结束后，即可导出分类结果。北部山区分类成果如图 2 所示。

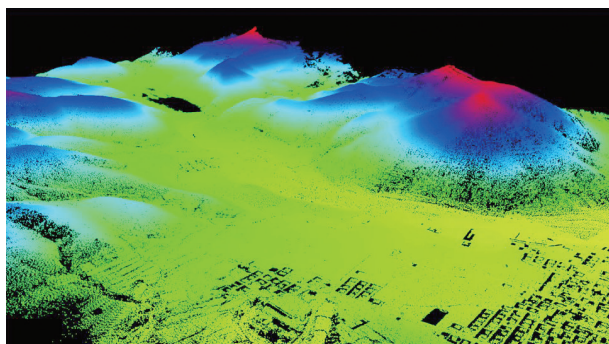


图2 北部山区地面点

## 6 断面数据生产

### 6.1 特征高程点自动提取

传统方法是采用等间距采样提取断面高程点，这种方法得到的特征点与实际特征点存在误差，且冗余计算较多<sup>[5]</sup>。因此，项目先准确提取断面高程特征点，再进行等间距插值。

(1) 对点云数据创建空间索引。LiDAR 点云数据建立空间索引的方法主要有规则格网法、四叉树、八叉树等<sup>[6]</sup>。根据项目数据特点，采取八叉树法。

(2) 在指定范围查询最近点，以最近点高程作为断面线上对应点高程。

(3) 从断面线起点开始逐一计算邻近点高差，根据断面设计要求设置高差阈值，该项目设置为 0.5m，过滤小于阈值的高程点。

(4) 在断面线上进行等间距插值，确保断面高程点均匀。

K0+100 高程特征点对比如图 3 所示，“图上”为原始点云在 K0+100 断面处拉的剖面，“图中”为传统等间距采样法提取的断面高程特征点，“图下”为采用新提取法自动提取的断面高程特征点。通过对比，新方法提取的高程特征点更准确，与传统等间距采样法相比更能真实反映地形起伏情况。

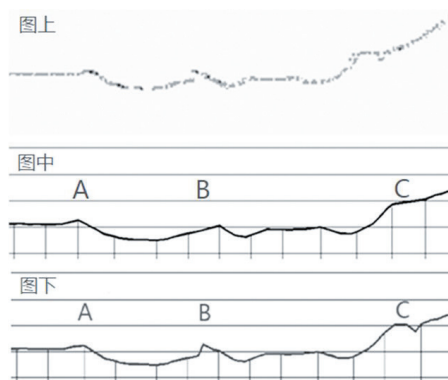


图3 K0+100高程特征点对比

### 6.2 生成断面图

基于 .net 开发平台，编制断面图生成工具，根据上述步骤提取的高程特征点，自动生成断面图。项目设计深泓线长 14.2km，生成断面图 144 个。

## 7 精度评定

为检验无人机 LiDAR 断面测量成果质量，在测区选择均匀分布的 30 个检查点进行精度评定，外业利用 RTK 获取检查点的真实坐标值，并在点云相同位置提取检查点的坐标值，经过误差分析计算，得到测区成果精度。精度评定如表 3 所示。

由表 3 可知，测区平面最大误差 0.041m，最小误差 0.019m，平面中误差 0.028m；高程最大误差 0.034m，最小误差 0.011m，高程中误差 0.023m。《水利水电工程测量规范》断面测量精度指标为垂直精度  $\leq \pm 0.050\text{m}$ ，无人机 LiDAR 点云精度满足规范要求。

表3 精度评定

ID	$\Delta X/m$	$\Delta Y/m$	平面误差/m	高程误差/m
JCD01	0.013	0.017	0.021	0.022
JCD02	0.018	0.017	0.025	0.029
JCD03	0.013	-0.027	0.030	-0.025
JCD04	-0.026	0.032	0.041	0.034
JCD05	0.025	-0.022	0.033	-0.025
JCD06	-0.013	0.015	0.020	0.019
JCD07	0.017	-0.014	0.022	0.015
JCD08	0.018	-0.016	0.024	-0.025
JCD09	0.013	0.022	0.026	0.020
JCD10	-0.019	0.026	0.032	0.029
JCD11	0.015	0.013	0.020	-0.029
JCD12	0.018	-0.031	0.036	0.013
JCD13	0.013	-0.029	0.032	0.027
JCD14	-0.016	0.025	0.030	-0.022
JCD15	0.021	-0.017	0.027	0.028
JCD16	0.019	0.015	0.024	-0.016
JCD17	-0.022	-0.011	0.025	0.024
JCD18	0.025	0.018	0.031	0.025
JCD19	0.015	0.017	0.023	-0.027
JCD20	-0.026	0.016	0.031	0.011
JCD21	0.013	-0.016	0.021	0.031
JCD22	-0.024	0.013	0.027	-0.029
JCD23	0.017	-0.031	0.035	0.021
JCD24	0.012	0.024	0.027	0.018
JCD25	-0.018	-0.028	0.033	-0.022
JCD26	0.028	-0.023	0.036	0.028
JCD27	0.013	0.014	0.019	0.023
JCD28	-0.027	0.016	0.031	-0.022
JCD29	0.013	-0.017	0.021	0.013
JCD30	0.025	0.019	0.031	0.028

## 8 结论

与传统 RTK 断面测量相比,利用无人机 LiDAR 开

(上接第 54 页)

## 5 结语

研究围绕复杂地形水域边缘提取的核心需求,通过多源数据融合、动态优化与地形水文协同分析,构建了一套从数据获取到高精度输出的全流程技术体系,实现从理论创新到工程应用的关键突破。从系统化的数据预处理净化数据基础,到结合反射强度与高程特征的初步提取,再到形态学与活动轮廓模型联合优化的精确提取,以及多尺度融合与机器学习辅助的精度优化,研究形成了一套完整高效的技术流程。实验结果表明,该方法对平静湖面、蜿蜒河流、复杂岸线等各类水域均可实现精准分割,边缘轮廓清晰锐利,完整保留河湾、湖汊等细微形态特征,总体精度达 98.5% (较传统阈值法提高 25%、单波段法提高 18%),且对逆光、多云等光照条件及清澈/浑浊水域均具有强适应性,既避免过度分割又防止欠分割。

研究不仅验证了该技术在实景三维建设中的有效性,更为水资源监测、洪水演进模拟、生态环境遥感

展断面测量,可高效、准确获取项目区地面高程信息,且人工投入少,项目周期短、效率高,满足相关勘测设计要求。传统特征提取方法多采用等间距采样,易造成特征点与实际地形特征存在误差,且存在大量冗余计算。研究通过构建点云数据空间索引,快速查询最近点作为断面高程点,再根据设计要求筛选出高程特征点,开展等间距插值处理,确保断面高程点分布均匀。该方法提取的特征点精度更高,能更真实反映地形起伏变化,提升了断面测量结果的可靠性与实用性。

## 参考文献

- [1] 蒋珊珊. 机载激光雷达技术 (LiDAR) 在汉十铁路断面生产中的应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(3): 31-33, 38.
- [2] 范小辉, 许国良, 李万林, 等. 基于深度图的三维激光雷达点云目标分割方法[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 284-291.
- [3] 高永涛. 机载 LiDAR 数据处理及公路设计中断面图自动提取的研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [4] 杜艺, 葛帅, 单萌蕾. 一种基于 LiDAR 点云的河道纵横断面获取方法[J]. 北京测绘, 2020, 34(8): 1114-1118.
- [5] 李艳, 杨少艳, 屈仁飞, 等. 顾及要素特征的机载激光点云道路断面提取算法[J]. 安徽建筑, 2023, 30(12): 180-182.
- [6] 路明月, 何永健. 三维海量点云数据的组织与索引方法[J]. 地球信息科学, 2008, 10(2): 190-194.

等领域提供了高精度、可靠的水域空间数据支撑。未来,研究将进一步拓展 SAR 影像、无人机倾斜摄影等多源数据融合应用,优化极端地形下的算法适应性,推动水域边缘提取技术向更智能、更泛化的方向发展。

## 参考文献

- [1] 谢云鹏, 吕可晶. 多源数据融合的城市三维实景建模[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(4): 143-154.
- [2] 苏宁, 张泽旭, 袁萌萌, 等. 一种空间目标三维激光点云与可见光图像重建点云融合方法[J]. 深空探测学报, 2021, 8(5): 534-540.
- [3] 谭衢霖, 王今飞. 结合高分辨率多光谱影像和 LiDAR 数据提取城区建筑[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(5): 741-748.
- [4] 金帅, 蒋飞熊, 陈进华. 基于车载 LiDAR 点云数据的杆状地物分类模型[J]. 北京测绘, 2024, 38(12): 1718-1723.
- [5] 王强辉, 曾仁廉. 基于 LiDAR 生成的 DEM 水域半自动置平处理方法[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(4): 68-70.
- [6] 程圆娥, 周绍光, 袁春琦, 等. 结合 LiDAR 与遥感影像的水域边界提取方法[J]. 地理空间信息, 2017, 15(2): 76-79.

# 基于优化卡尔曼滑动滤波算法的压差式静力水准数据处理

刘乐川

(中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 401120)

**摘要:** 目前, 静力水准仪作为一种高精度、自动化的垂直位移监测设备, 已被广泛应用于重大基础设施的精密动态变形监测作业。但压差式静力水准仪的测量易受温度变化影响。针对这一问题, 研究提出了一种基于优化卡尔曼滑动滤波算法的压差式静力水准数据处理方法。结果表明: 相较于传统卡尔曼滤波方法, 采用优化卡尔曼滑动滤波处理压差式静力水准数据, 可以极大地提高测量高差精度, 显著降低均方根误差; 同时, 能够有效减少因温度导致的高差日周期变化, 使处理后的高差时间序列更加平稳、可靠, 最终获取的沉降曲线更加真实反映监测点位的实际沉降情况, 可为工程结构的安全状态评估与预警提供更为准确的数据支撑。

**关键词:** 卡尔曼滑动滤波; 压差式静力水准数据处理; 压差式静力水准仪

## 1 引言

在传统高程测量体系中, 精密水准仪是开展高程控制测量的核心仪器, 能获取监测点位在一定时间的高程变化信息, 但作业模式依赖人工逐点观测, 存在观测周期长、时效性差、劳动强度大等缺陷, 难以满足现代工程对变形信息及时、高效、快速获取的需求。随着大型基础设施安全监测要求的不断提高, 能实现自动化、连续化、实时化监测的压差式静力水准仪应运而生, 打破了传统方法在监测时效方面的瓶颈。

近年来, 压差式静力水准仪凭安装便捷、精度稳定、可远程传输等优势, 已在轨道交通、水利工程、建筑基坑等领域得到广泛应用。刘新宇等<sup>[1]</sup>将静力水准仪应用于地铁隧道结构监测, 为施工期隧道结构安全提供数据保障; 张伟云等<sup>[2]</sup>设计了沉降自动化采集系统, 并应用于软基处理工程监测, 验证了其可行性与实用性。压差式静力水准仪工程适用性良好, 但环境温度变化仍是影响测量精度的重要因素, 单日温度变化为 5~20℃, 液体管及液体密度均受温度影响, 温度对精密获取点位高程信息影响较大, 因此诸多学者对此展开研究。王盼婷<sup>[3]</sup>基于误差变量模型构建了液体温度与压力的关系模型, 计算了不同温度的液体密度; 陈果等<sup>[4]</sup>探究了环境温度对压差式静力水准仪测试精度的影响, 除温度造成系统误差外, 观测数据还可能夹杂由外界扰动或设备异常引起的粗差, 因此

粗差识别与处理是确保监测成果可靠的关键; 高品红等<sup>[5]</sup>提出一种检测变形监测粗差数据的新方法, 并在工程实例中取得较好效果。

总体来看, 现有研究多集中于对温度效应分析及测量精度的影响探讨, 而针对静力水准原始监测数据中温度扰动与粗差噪声叠加情况下的数据处理方法研究仍相对不足, 尤其缺少能够兼顾动态变化特征与滤波平滑效果的处理方法。鉴于温度日变化具有一定规律性, 研究引入卡尔曼滑动滤波算法, 对静力水准监测序列中的随机噪声与异常波动进行抑制, 并在保留沉降变化总体趋势的基础上提高数据的平滑性与可靠性, 从而更真实地反映监测点位的沉降变化情况。

## 2 压差式静力水准仪原理

安装布设方面, 相比传统液压式或电容式设备, 压差式静力水准仪机械结构更简洁, 具有安装便捷、抗干扰能力较强和环境适应性好等优点, 因此被广泛用于复杂高陡边坡、大型桥梁、大坝及地铁隧道等工程的动态精密自动化水准监测。压差式静力水准仪通常由网关、供电系统(含太阳能板和电缆)、线缆、储液箱、液管、气管及沿管路串联布设的基准点和监测点组成。其中, 网关主要负责监测数据采集与无线传输, 供电系统保障系统长期连续稳定运行。压差式静力水准仪安装布设如图 1 所示。压差式静力水准仪遵循连通器原理, 通过充满液体的液管将各监测点连接为统

作者简介: 刘乐川(1975—), 男, 汉族, 本科, 高级工程师, 研究方向为隧道设计。

一液位基准。各传感器节点实时采集监测点的液位压强及环境温度等参数，其中压强数据用于表征液柱高度变化，温度数据用于液体密度及系统误差修正。依据静液压关系可将监测点液位压强变化换算为相对基准点的液位高差，进而求得监测点的沉降变化量。

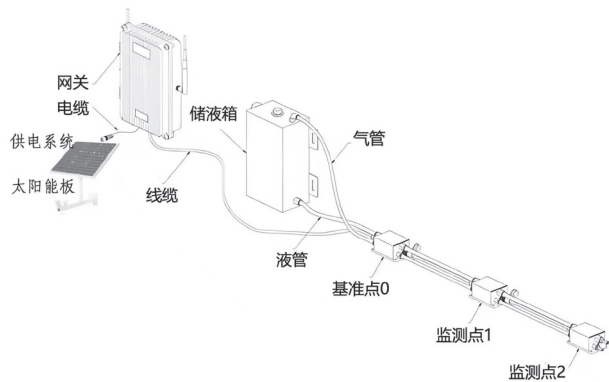


图1 压差式静力水准仪安装布设

### 3 卡尔曼滤波

监测点1和监测点2相对基准点0的实测高差序列数据如图2所示，由图2可知，在自动化高频采集过程中，原始监测序列随机分布大量幅值较大、呈明显尖峰状的离群值，即粗差数据。这些数据不仅掩盖了监测点位随温度变化产生的周期性波动，还使监测结果明显偏离监测体真实的物理变形趋势。若未经处理，直接将含有大量畸变点的数据用于后续形变分析与安全预警，易导致计算结果严重失真，甚至引发误报。

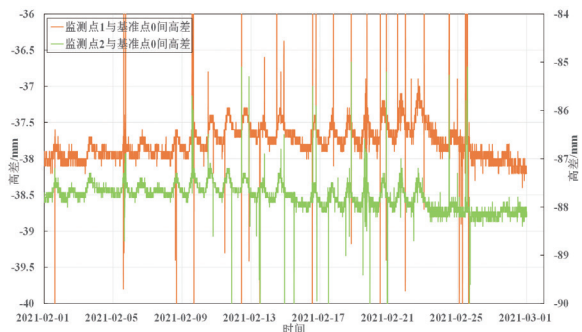


图2 监测点1和监测点2相对基准点0间实测高差

针对非平稳且含显著离群点的监测序列，传统卡尔曼滤波算法虽在处理服从高斯分布的白噪声方面表现优异，但对观测异常值极为敏感，直接应用会导致状态更新发生偏移甚至滤波发散<sup>[6]</sup>。因此，还原数据真实变化的核心是构建更稳健的数据处理模型。采用滑动窗口统计分析方法与阈值判别方法精准识别和剔除序列中的突变异常值，结合改进的卡尔曼滤波算法对监测序列进行平滑与最优状态估计，有效抑制多源环境

噪声，最大限度还原结构体真实的沉降变形规律。

卡尔曼滤波法是依据上一时刻的状态量及过程模型来预测下一时刻的状态量。假设第*i*-1时刻的监测点与基准点间的高差测量值为 $h_{i-1}$ ，过程模型计算出的高差值为 $h_{i-1}^{model}$ ，根据系统的数据模型，可基于上一时刻的高差测量值预测出第*i*时刻的模型值 $h_i^{model}$ ：

$$h_{i-1}^{model} = Ah_{i-1}^{model} + BU_i \quad (1)$$

其中， $U_i$ 为第*i*时刻系统的控制量， $A$ 、 $B$ 为模型状态变化的系数矩阵，同样，量测方程的系统协方差 $P$ 需要及时更新。

$$P_{i-1} = AP_{i-1}A' + Q \quad (2)$$

其中， $Q$ 为系统状态变化的噪声，根据第*i*时刻的系统状态量和协方差计算出第*i*时刻的最优估计值：

$$h_{i-1}^{model} = h_{i-1}^{model} + K_i(h_i - Hh_{i-1}^{model}) \quad (3)$$

$$K_i = \frac{P_{i-1}H'}{H \cdot P_{i-1}H' + R} \quad (4)$$

$$P_i = (I - K_iH)P_{i-1} \quad (5)$$

其中， $K_i$ 为第*i*时刻的卡尔曼增益， $R$ 为测量噪声， $H$ 为测量系统的系数矩阵， $I$ 为单位矩阵， $P_i$ 为第*i*时刻的系统协方差。

### 4 工程实例验证

为验证所提算法在实际复杂工程环境的有效性，选取重庆某高陡边坡自动化监测项目于2021年2月连续28d采集的实测时间序列数据作为研究对象。在野外自然环境，受昼夜交替及局部气候变化影响，压差式静力水准仪管路内部的流体密度与体积会发生周期性热胀冷缩。这种物理变化直接映射到传感器端，导致输出的高差数据呈现显著的日周期波动特征。

在构建数据处理模型时，为彻底剥离非结构性环境干扰，精准提取监测点位真实的缓慢沉降特征，在卡尔曼滤波的状态估计基础上，引入滑动滤波机制进行二次平滑处理，最终输出的数据集记为KarSF-data。从结果可以看出，KarSF-data成功削弱日内温度剧变带来的高差震荡，平滑的轨迹线能更加贴切、真实地反映监测点位在长周期下的沉降演化规律。

在野外自动化监测精度评估中，由于缺乏绝对真实高程基准，且地质体与工程结构在单日尺度的实际沉降变形较小，研究采用该领域通用的工程近似假设，即将单日内实测高差数据的算术平均值作为该监测日的相对真实高差参考基准。基于此基准，研究引入

平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE), 对卡尔曼滤波数据集 (Kar-data) 与卡尔曼滑动滤波数据集 (KarSF-data) 的解算精度进行对比分析。其中, MAE 用于表征预测值与真实值偏差的平均绝对水平, 能直观反映整体误差大小; RMSE 用于表征误差平方平均后的离散程度, 对较大误差更为敏感, 能突出反映数据异常偏差对整体精度的影响。计算公式如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i^M - X_i^R| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^M - X_i^R)^2} \quad (7)$$

其中,  $X_i^M$  是卡尔曼滤波处理后的高差和卡尔曼滑动滤波后的高差,  $X_i^R$  是将当天实测高差的平均值近似作为该日的真实高差参考值,  $n$  为样本数据量。

对监测点 1 和监测点 2 连续 28d 的卡尔曼滤波结果与卡尔曼滑动滤波结果进行对比, 计算每日 MAE 和 RMSE, 结果如表 1 所示。与卡尔曼滤波相比, 卡尔曼滑动滤波处理后的误差更小, 更能真实反映监测点高差变化特征。

表1 监测点卡尔曼滤波和卡尔曼滑动滤波数据精度对比/mm

day	监测点1				监测点2			
	Kar-data		KarSF-data		Kar-data		KarSF-data	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
1	0.03	0.68	0.02	0.42	0.02	0.88	0.03	0.43
2	0.03	0.43	0.02	0.35	0.04	0.48	0.03	0.59
3	0.11	1.16	0.05	0.82	0.12	1.26	0.09	0.91
4	...	...	...	...	...	...	...	...
28	0.03	0.12	0.06	0.20	0.04	0.16	0.01	0.09
最大值	0.16	1.16	0.15	0.82	0.18	1.26	0.16	0.91
最小值	0.02	0.12	0.00	0.10	0.02	0.13	0.00	0.09
平均值	0.09	0.51	0.04	0.33	0.10	0.56	0.04	0.34

传统卡尔曼滤波与卡尔曼滑动滤波处理后的 MAE 值如图 3 所示。监测点 1 与监测点 2 经过卡尔曼滑动滤波算法处理后, MAE 值整体呈显著下降趋势, 表明引入滑动窗口机制, 有效增强了模型对时间序列局部非平稳波动的自适应调节能力, 提高了压差式静力水准数据的整体解算精度。针对图 3 极个别监测日滤波效果提升不显著现象, 经追溯原始气象数据分析认为, 主要归因于该时段监测现场发生剧烈的天气与温度突变。环境温度骤变导致管路内液体密度发生快速非线性漂移, 使系统状态转移矩阵在极短时间内难以完美跟踪极端的动态变化, 但整体误差仍处于可控范围。

综合各项评价指标的量化统计结果, 从全局 MAE 的均值水平来看, 相较于传统滤波模型, 改进后的卡

尔曼滑动滤波算法将数据精度平均提升 56%。综上所述, 在复杂恶劣的监测环境, 卡尔曼滑动滤波不仅克服了常规算法易受突变噪声干扰的缺陷, 更能深度还原和挖掘监测点位真实的沉降变形规律, 为后续结构安全评估与异常状态预警提供了数据支撑。

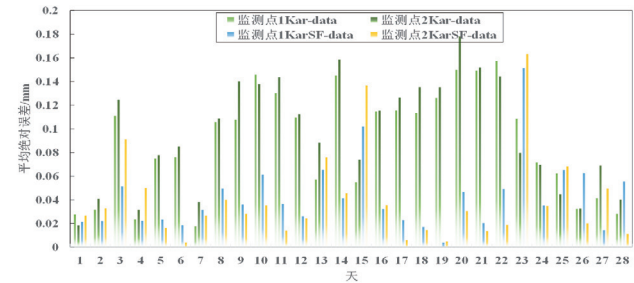


图3 传统卡尔曼滤波与卡尔曼滑动滤波MAE值对比

## 5 结语

研究提出一种基于优化卡尔曼滑动滤波的压差式静力水准数据处理与状态估计方法, 在剔除环境干扰引起的离群粗差基础上, 引入滑动窗口机制, 对传统卡尔曼滤波进行了自适应改进。研究提出的优化处理框架能够更加精准、真实地还原监测点位在复杂工况下的真实沉降演变趋势, 为后续的边坡变形机理深层次分析及灾害自动化安全预警提供了高可靠度的数据底座与算法支撑。但研究算法验证主要基于特定监测场景, 不同工况下的普适性仍需进一步检验; 同时, 对温度、仪器状态及外界扰动等多因素耦合作用的考虑不够充分。未来可结合更多工程实例与多源环境信息, 进一步完善误差建模与参数自适应更新机制, 不断提升算法的鲁棒性、泛化性和实时预警应用能力。

## 参考文献

- [1] 刘新宇,王勇,唐超.静力水准自动化测量技术应用于地铁隧道结构监测[J].测绘通报,2021(8):69-73.
- [2] 张伟云,杨建贵,马昌龙.沉降自动化采集系统在软基处理中的应用[J].水利与建筑工程学报,2019,17(3):48-54.
- [3] 王盼婷.压差式静力水准仪动态监测数据误差处理方法及应用[D].太原:太原理工大学,2025.
- [4] 陈果,李波,吴琪.环境温度对压差式静力水准仪测试精度影响试验研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(1):92-99.
- [5] 高品红,臧公瑾.基于SSA改进IQR的GNSS变形监测数据粗差检测[J].测绘技术装备,2025,27(1):1-8.
- [6] 贺晗,陶庭叶,冯佳琪,等.抗差自适应卡尔曼滤波模型及其在塌陷区监测中的应用[J].大地测量与地球动力学,2019,39(12):1265-1269.

# 近水楼台“不得月”

◎ 陈鲁民

1955年评军衔时，彭德怀在“哈军工”就读的侄子彭起超，按规定可评上尉。时任国防部长的彭德怀，却硬是打电话让陈赓院长给侄子授了个中尉。后来，他给侄子写信解释：“你既为彭家人，就要遵守彭家的家风，那就是任何时候都要清正、廉洁、诚实。老实人有时会吃亏，但从长远看，老实人不吃亏。想想那些为革命牺牲的人，你还会为肩上多一颗豆豆、少一颗豆豆烦恼吗？俗话说，近水楼台先得月，可从我这，得改改这个规矩，那就是近水楼台不得月……”。

（2016年5月15日《中国纪检监察报》）

“近水楼台先得月”，指因靠近有利位置，得地利之便，有便宜可占，更易获得好处。而“近水楼台不得月”，则指虽身处便利、处于优势地位，却不利用职务之便谋私、不占公家便宜、不搞特殊化，是一种人格高尚表现，也是对握有权力者的廉政要求。

要做到“近水楼台不得月”，首先要拒绝特权，守住底线。权力岗位都是“近水楼台”，掌握各种资源、信息、便利，必须用来谋公为民，造福社会，而绝不能以为自己、亲友、身边人谋利，搞“先得月”的潜规则。许多优秀公仆都在这方面身体力行，自律甚严，为众人做出学习榜样。谷文昌任福建省林业厅副厅长时，在木材方面有

“先得月”之便，但二女儿结婚想让他批点木材做家具，却被他严词拒绝：“我管林业，如果我做一张桌子，下面就会做几十张、几百张，我犯小错误，下面就会犯大错误。当领导的要先把我的手洗净，把自己的腰杆挺直！”

要做到“近水楼台不得月”，须公私分明，不越界限。身居“近水楼台”，务必要分清公私，清醒用权，身在便利中，心在规矩里，不占公家一分一毫便宜，不利用职务捞取不正当利益。延安时期，条件十分艰苦，张闻天陪同民主党派客人参观，吃饭时上了平时吃不到的土鸡、海带炖肉。席间，张闻天仅吃了两碗小米饭，夹了两筷子青菜，那些荤菜他一筷子都没动。事后张闻天解释说：“加菜是让客人吃的，我不能揩公家的油。”身在便利中，心在规矩里，老革命家的操守令人高山仰止。

要做到“近水楼台不得月”，须公正用权，不徇私情，不因为“近水”就“得月”，对亲朋好友不偏袒、不照顾、不特殊对待，让规则大于关系、公心大于私欲。1968年，周恩来的侄女周秉建到内蒙古牧区插队，1970年参军。周恩来知道后，竭力劝阻她说，虽说你参军合乎正当手续，难道这里就没我的因素吗？越是干部子弟，就越要从严要求。所以，她只当了3个月兵，就被伯父劝告继续回牧区插队。这

也启示我们，“近水楼台”者，不仅个人要洁身自好，对亲友的关爱，也必须建立在服从人民利益、组织原则、公平正义的基础之上。

要做到“近水楼台不得月”，须一尘不染，一丝不苟。老红军黄开群长期在后勤战线工作，管着鱼塘、果园、养鸡场，可他从来从不占一点便宜。有一次，他到养鸡场检查工作，饲养员让他拿几个鸡蛋，他坚决拒绝：“让我多吃公家一个鸡蛋，比吃药都难受。”所谓“不得月”，就要这样从一点一滴做起。

平心而论，不论在任何地方，“近水楼台”都是客观存在的，但究竟是谋求“先得月”还是坚持“不得月”，则取决于一个人的觉悟与品格，也是衡量一个公仆是否合格的重要标准。对领导干部来说，岗位是责任，不是福利；便利是条件，不是特权；权力是让你为人民服务的，不是让你为自家捞好处的。因而，越是靠近利益，越要严于律己，拒绝诱惑；越是权高位重，越要循规蹈矩，一尘不染，做到心有所畏、言有所戒、行有所止，“任何时候都要清正、廉洁、诚实”。

“近水楼台不得月”，是党员干部应有的高风亮节，是人民公仆必备的思想觉悟，是廉洁官员不可或缺的精神境界，亦是难得的人间清醒。☑（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）

# 蓝花楹下的春城诗篇

◎ 贺斌

四月的风，裹挟着暖意掠过滇池的水面，轻轻叩响了昆明的门扉。宛如被施了魔法，一夜之间，昆明悄然蜕变成一座梦幻的紫色城堡。蓝花楹如同大自然精心雕琢的仙子，将这座四季如春的城市，浸染成一片如梦如幻的仙境，也把这座城市的浪漫与诗意推向极致。

漫步街头，抬眼望去，满树繁花，如云似霞，仿佛是大自然打翻了调色盘，把最浪漫的紫色，毫无保留地倾洒在昆明的大街小巷。就连穿梭其间的双层赏花巴士，也是紫色的，用蓝花楹装扮着，成了这浪漫画卷中的一部分。它行驶在紫色花树夹道的路上，与漫天的紫霞相互映衬，将“梦幻”二字诠释得淋漓尽致。无论是驻足观望的行人，还是透过车窗欣赏的乘客，都忍不住用手机记录下这一幕。原来，浪漫不仅藏在自然风景里，也融入城市的日常，变成蓝花楹下的诗行。

教场中路，无疑是这场紫色盛宴的主舞台。2千米的道路，仿若踏入被蓝花楹编织成的一条璀璨紫色隧道。每到花期，这里便成了昆明最热闹的打卡地。漫步其中，头顶是交错的枝桠搭建起的天然花帘，层层叠叠的蓝紫色花朵，将天空遮蔽得严严实实，只留下斑驳的光影在地面跳跃，似乎，扫一扫地上动态的“二维码”，就能迅速进入童话世界一样。午后三点，阳光穿过花隙，如同一束束金色的丝



线，为花瓣勾勒出金边。逆光而立，按下快门的瞬间，仿佛定格了整个春天的浪漫。眼前，一位身着白色连衣裙的姑娘，戴一顶蓝花楹图案的草帽，轻盈地穿梭在花海间，那灵动的身影，宛如从童话中走出的精灵，与梦幻的景致融为一体。只见游人如织，快门声此起彼伏，每个人都试图用镜头留住这转瞬即逝的美好。

如果说教场中路是热烈奔放的，那么翠湖公园的蓝花楹则多了几分温婉与静谧。碧波荡漾的湖面，宛如一面巨大的镜子，倒映着岸边的蓝花楹。微风吹过，花瓣纷纷飘落，宛如紫色的雪花，轻盈坠入水中，随着水波缓缓飘荡。晨晖洒在湖面上，水光粼粼，与蓝花楹相互辉映，形成又一幅绝美画卷。湖畔的长椅，是最佳的观赏点。坐在那里，静静看着花影在水中摇曳，内心无比宁静。偶尔有几只小鸭子游过，打破了湖面的平静，荡起层层涟漪，也将花影揉碎，却又在瞬间重新拼凑，宛如一幅动态的水墨画，令人如痴如醉。

盘龙江畔的蓝花楹，又有着别

样风情。临江步道上，蓝花楹的枝丫低垂，仿佛在与江水深情相拥。江风徐徐吹来，带着湿润的水汽，也带着花的芬芳把游人灌醉。夕阳西下，金色的阳光将花瓣镀上一层金边，远远望去，宛如一串串紫色的灯笼，在江边摇曳。一群年轻人，沿江骑行，感受着“花雨”的洗礼。花瓣在身后飞舞，车轮碾过飘落的花瓣，发出沙沙的声响，像激活了五线谱，发出悦耳的乐音。风从耳边呼啸而过，花瓣纷纷扬扬，有的落在车筐里，有的落在身上，也有的追着车轮飞舞，仿佛在与骑行的游人嬉戏。这一刻，浪漫与自由交织，只剩下满心的惬意与欢喜。

每年4月下旬至5月中旬，是蓝花楹最美的时光，这短暂的绚烂，更显得弥足珍贵。在昆明，蓝花楹不仅仅是一种植物，更是这座城市春天的象征，是浪漫与美好的代名词。当蓝花楹的花瓣落在肩头，人们总会不自觉地闭上眼睛，许下一个美好的愿望。因为在这座城市里，连风都带着温柔的花语，仿佛在告诉每一个人，生活中的美好无处不在，只要用心去感受，就能发现属于自己的浪漫与惊喜。

蓝花楹下的昆明，是一首写不完的诗，是一幅看不够的画。它用那一抹梦幻的紫色，编织着一个又一个浪漫的故事，吸引着无数人前来，沉醉在这如诗如画的美景之中，不愿醒来。☑（作者单位：义乌市自然资源和规划局）

# 《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:基金资助项目需注明基金名称及编号;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人文;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

# 河南省测绘地理信息技术中心开展廉政国防教育活动



本刊讯 为缅怀革命先烈的丰功伟绩，传承红色精神血脉，强化党员使命担当，筑牢廉洁自律思想防线，4月1日，河南省测绘地理信息技术中心组织机关及所属各单位、共建社区的党员、团员青年代表25人，走进郑州市烈士陵园开展清明节祭扫暨廉政、国防教育活动。

陵园内松柏苍翠、庄严肃穆，革命烈士纪念碑傲然矗立。全体人员整齐列队、神情庄重，向先烈敬献鲜花、肃立默哀。大家在烈士墓区驻足追思，在回望历史中感悟初心使命，在精神洗礼中汲取奋进力量，以简朴而庄重的仪式，寄托对革命先烈的深切缅怀与崇高敬意。

祭扫仪式完成后，大家有序开展参观学习，接受国防与廉政教育洗礼。在陵园南区的国防教育馆，通

过馆内陈列的实物、图文资料及场景展示，大家系统学习我国国防建设的发展历程与辉煌成就，进一步增强国防意识与家国情怀，并深刻认识到测绘地理信息技术在国防建设中的重要作用。在郑州市廉政教育基地的中原英烈纪念馆，馆内以丰富的历史图片、实物遗存和文献史料，生动展现革命先烈忠诚于党、廉洁奉公、舍生取义的崇高风范，使全体人员接受了深刻的廉政警示教育，进一步明晰廉洁修身、廉洁从政的时代内涵，持续筑牢拒腐防变的思想根基。

此次祭扫活动既是对革命先烈的深切缅怀，更是一次集党性、国防、廉政于一体的全面精神淬炼。参与人员纷纷表示，将对革命先烈的崇敬、对国防责任的担当、对廉洁自律的坚守，转化为推动测绘地理信息事业高质量发展的强大动力。☑（李华/文、图）



4·22 第57个世界地球日

主题宣传活动周（2026年4月20-24日）

# 珍爱自然资源 守护美丽中国

## 构建从山顶到海洋 的保护治理大格局