

## 项目公示信息

一、项目名称：面向地表灾害监测的测绘遥感理论与关键技术

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省教育厅

提名意见：

项目针对复杂地形区地表灾害监测精度差、效率低等难题，开展了理论、技术与应用全链条研究，取得主要创新成果包括：（1）提出了以最小二乘为基础的乘性误差模型平差理论和数据计算复杂性降低方法，误差计算精度提升了38%-100%；（2）提出了基于三维点云的地表灾害微分量化算法和切片算法，改进了DEM差分算法，构建了基于多源多模态数据的地表灾害监测系列方法，提升了复杂地形区地表灾害测绘遥感监测的精度和效率；（3）基于上述成果，研发了地表灾害监测预警平台，显著提升了灾害监测效果。相关成果发表论文80篇，包括《Remote Sensing of Environment》、《Journal of Geodesy》等多篇顶级期刊论文；授权发明专利7项，实用新型专利3项，软件著作权8件，培养博硕士研究生79名。成果已在全国地质灾害监测、水土保持、矿区开采沉陷等领域应用，近三年直接经济效益超6000万元，经济效益和社会效益显著。龚健雅院士等组成的评价专家组认为该成果总体达到国际先进水平，其中乘性误差模型平差理论与方法、基于三维点云的地表灾害微分量化算法和切片算法处于国际领先水平。该成果为地表灾害监测和防控提供了高效解决方案，对应急管理科学与技术的发展有重要意义。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。**特提名为陕西省科技进步奖一等奖。**

### 三、项目简介

我国山区分布广泛，地形复杂，构造发育活跃，灾害隐患分布广泛，加之近年极端暴雨事件频发、人类工程活动加剧，地质灾害、水土流失、开采沉陷等地表灾害防治形势愈发严峻，已成为我国生态文明建设和经济社会发展的重要制约因素。据应急管理部计，2024年洪

涝和地质灾害造成5344.9万人次不同程度受灾，因灾死亡失踪709人，紧急转移安置254.4万人次，倒塌房屋5.8万间，损坏房屋37.9万间，直接经济损失达2630.4亿元。因而，地表灾害防灾减灾已成为我国面临的重大问题。地表灾害多发于地貌复杂地形高陡区域，人工监测难以开展，传统测绘遥感理论与方法的关键技术效率、精度与可靠性受到制约，极大限制了地表灾害高效精准监测，成为当前灾害预警与防治亟待解决的痛点问题。

随着新一代空天技术发展，对地观测迈入大数据时代，全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、激光雷达(Light Detection And Ranging, LiDAR)、合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar Interferometry, InSAR)以及甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)等新型观测技术为地表灾害监测提供了海量高精度数据支撑，克服了高陡复杂区域灾害人工监测可达性问题。然而，复杂地形区种类繁多、结构复杂的海量监测数据存在大量误差，为数据处理带来挑战，误差的高效消除和削弱成为地表灾害监测的主要挑战之一。此外，地表灾害多发于地形复杂区域，而当前多源数据监测关键量化算法多适用于平坦区域，对于地表灾害高发区域监测精度低、适用性差。因此，亟需发展面向复杂地形区地表灾害监测的测绘遥感新理论和技术，提升复杂地形区数据误差处理及地表灾害量化的精度和效率，为灾害调查、识别、评估、预警以及决策等提供参考。

鉴于此，在国家自然科学基金项目、陕西省自然资源厅项目以及企事业单位合作项目等多项科研项目支持下，项目组自2012年以来系统开展了复杂地形区地表灾害监测数据误差处理理论与方法、顾及多模态数据误差的复杂地形区地表灾害监测预警关键技术和集成关键技术及理论的地表灾害监测平台等方面的研究。主要创新包括：

(1) 在理论方法研究方面，提出了以最小二乘为基础的乘性误差模型平差理论和数据计算复杂性降低方法，显著提升了复杂地形区误差计算精度和效率。

(2) 在关键技术研究方面，基于数据误差处理理论，提出了基

于三维点云的地表灾害微分量化算法和切片算法，改进了DEM

（Digital Elevation Model）差分算法，构建了基于多源多模态数据的地表灾害监测系列方法，提升了复杂地形区地表灾害测绘遥感监测的精度和效率。

（3）在集成应用方面，基于复杂地形区地表灾害监测理论和技术创新，研发了地质灾害数字化调查与监测预警平台，并在水土保持、管线安全运维、矿区开采沉陷控制等领域得到应用，提升了监测效果，并推广应用。

项目针对复杂地形区地表灾害理论与技术创新，在Remote Sensing of Environment、Journal of Geodesy、Natural Hazards、测绘学报、水土保持学报等国内外权威期刊发表论文80篇，授权发明专利7项、实用新型专利3项、软件著作权8项。项目成果已在黄河水利委员会、中国石油天然气集团有限公司、中国地质调查局、陕西煤业化工集团有限责任公司、中煤航测遥感集团公司、广州南方测绘科技股份有限公司等企事业单位业务中广泛应用，取得6000余万元经济效益和显著社会效益。成果支撑了国家自然科学基金联合基金重点项目、水利部重大科技项目等的申报和实施，获陕西省教育厅科技进步一等奖1项、中国测绘学会测绘科学技术奖二等奖1项、陕西省测绘地理信息学会科技进步一等奖和二等奖各1项。

#### 四、客观评价

##### （一）科技成果鉴定意见

2025年1月8日，中国灾害防御协会在北京组织召开了“面向地表灾害监测的测绘遥感理论方法与关键技术研究”项目科技成果评价会。邀请了武汉大学龚健雅院士、浙江大学刘仁义教授、“灾害风险综合研究”国际科学计划办公室杨赛霓教授、应急管理部国家自然灾害防治研究院杨思全研究员、中国矿业大学汪云甲教授、中科院地球环境研究所唐亚明研究员、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所郭晓军研究员对项目组的成果进行评价，评价委员会听取了项目组的汇报，审阅了相关技术资料，经质询讨论最终认为项目组的研究成果“总体上达到国际先进水平，其中乘性误差模型平差理论与方

法、基于三维点云的地表灾害微分量化算法和切片算法处于国际领先水平”。

## （二）与国内外同类技术比较

### （1）地表灾害监测预警数据误差处理理论与方法方面

①乘性误差模型与传统加性误差模型精度相比：对于地表灾害数据的处理，几乎所有的团队都是基于加性误差模型进行。针对新型观测技术获取的地表灾害监测数据受乘性误差干扰的情况，项目组从理论上证明了基于传统加性误差模型的最小二乘解不再具有方差最小性。同时证明了大地测量学领域经常使用的正态分布不是拟似然函数对应的微分方程的解。在 LiDAR 技术估算滑坡体积的应用中，乘性误差模型解算得到的滑坡体积相比于加性误差模型更符合真实情况，精度提升最大时达 19%，对于大型滑坡体来说，该结论具有重大的现实意义。此外，项目组提出利用乘性误差模型来计算滑坡体积的思想得到了外国学者 Hojun You 的肯定，该学者在 2023 年从另一角度对该成果进行了验证。

### （2）顾及计算复杂性的加性/乘性/加乘混合误差模型平差算法方面

①EIV 模型替代公式与原公式对比：项目组提出的替代公式更加简洁易懂，更能理解估值的性质，也更容易编程实现。在观测值为 1000，未知参数个数为 500，系数矩阵随机独立元素为 400000 的部分 EIV 模型中，替代公式的计算复杂度是每次迭代进行 0 (109)次运算，原公式是 0 (6.4\*1016)次运算，替代公式显著降低了计算复杂度。

②拉格朗日法与 Tienstra 的等式约束平差法对比：在等式约束平差方面，拉格朗日法是最常用的方法。项目组从算法的理论角度首先发现并证明了 Tienstra 的等式约束平差法比拉格朗日法计算量小。当等式约束个数与未知参数个数比值  $h$  接近 0 时，Tienstra 的等式约束平差法相比于拉格朗日法提升了 100%， $h$  等于 0.5 时，Tienstra 的等式约束平差法提升的计算效率达到最低，此时为 38%。表明 Tienstra 的等式约束平差法相比于拉格朗日法，提升的计算效率在 38%到 100%之间。

### (3) 顾及多源多模态数据误差的地表灾害监测预警关键技术方面

①改进后的 M3C2 算法与国外提出的原始 M3C2 算法的精度对比：通过对比本成果优化的 M3C2 算法（M3C2\_PD）与原始 M3C2 算法可知：优化后的算法在两个试验小区地形量化中的绝对误差和相对误差均有一定程度的减小，精度较原始 M3C2 算法有不同程度的提升。此外，对比分析本成果优化后的 M3C2 算法与原始 M3C2 在地形变化量化中的误差减小幅度对地形因子的响应可知，在地形复杂程度越高的情况下，改进后的 M3C2 精度的提升越明显，表明通过本成果对原始 M3C2 算法的改进，不仅提升了算法的精度，亦使其更加适用于地形复杂区域地表灾害量化评估。

②3D-M3C2 算法与国内外传统算法 DoD 在地形变化量化精度上的对比：3D-M3C2 算法计算得到的产沙量与采样值高度吻合，其中 A 小区和 B 小区中 3D-M3C2 计算值与采样值的线性拟合  $R^2$  分别达到了 0.85 ( $p<0.01$ ) 和 0.92 ( $p<0.01$ )，而国内外经典地形变化算法 DoD 算法在沟谷坡侵蚀体积计算中几乎失效（A 小区： $R^2=0.04$ ；B 小区： $R^2=0.13$ ）。

③DuD 算法与国内外相关研究中的算法对比：DUD 算法结合排除法监测精度最高（平均相对误差 49.6%），且明显高于直接 DoD 误差估计结合减去法（平均相对误差 72.9%）、统一 0.15m 阈值结合排除法（平均相对误差 74.2%）、误差源阈值法（平均相对误差为 75.8%）、方差克服阈值法（平均相对误差 93.1%）和统一 0.15m 阈值结合减去法（平均相对误差 91.3%）。

④SCCD 算法与国内外已有算法（3D-M3C2 算法、DoD 算法）对比：SCCD 算法与 3D-M3C2 算法监测精度相近（平均误差介于 10.07%~13.32%之间），明显高于 DoD 算法（平均误差为 35.30%）。然而，地形形态趋于复杂时，本算法和 DoD 算法的误差变化较小，而 3D-M3C2 算法的误差范围从 10.87%激增至 167.89%。表明，SCCD 算法对于复杂地形区地表灾害的适用性在一定程度上优于国内外的相关算法。

### （三）重要科研奖励

基于项目组的研究成果，获陕西省教育厅科技进步一等奖 1 项、中国测绘学会测绘科学技术奖二等奖 1 项、陕西省测绘地理信息学会科技进步一等奖和二等奖各 1 项。

### （四）同行评价情况

#### （1）地表灾害监测预警数据误差处理理论与方法方面

迄今为止，包括数学界在内的几乎所有科学与工程领域都采用通用的拉格朗日法，项目组首先发现并证明了 **Tienstra** 的等式约束平差法比包括统计数学和大地测量学在内的各相关领域广泛使用的拉格朗日法计算工作量小，荷兰科学院院士、国际著名大地测量学家 **Teunissen** 教授高度评价该研究成果是对 **Tienstra** 平差理论做出了新的原创性贡献。

#### （2）顾及计算复杂性的加性/乘性/加乘混合误差模型平差算法方面

项目组提出的新型测量平差理论与方法已经逐渐引起了国内外学者的重视和关注。国内学者王乐洋教授后续在我们工作的基础上开展了一系列的研究，在国际权威期刊（如：**Measurement Science and Technology**、**Measurement Science and Technology**、**Earth, Planets and Space** 等）发表了多篇高质量论文。其中的基本理论均是引自我们团队的论文。项目组也把所有理论研究成果应用到对地观测技术中来，通过激光测距 **LiDAR** 技术模拟一个滑坡模型，研究分析了乘性观测误差对于 **DEM** 构建及其在估计滑坡方量方面的影响。该成果更是被外国学者 **Hojun You** 从另一个角度出发进行了验证。

#### （3）顾及多源多模态数据误差的地表灾害监测预警关键技术方面

因斯布鲁克大学教授 **Martin Rutzinger** 在遥感领域权威期刊 **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 所发表论文中对我们的 **SCCD** 算法中的二维切片理论进行了肯定。遥感领域权威期刊 **Remote Sensing of Environment** 审稿人指出我们提出的切片算法是一种新颖的且具有前景的体积量化算法 “**The introduced slicing**

approach is novel and a promising technique for the estimation of volumes of change...”。

遥感领域顶级期刊 *Remote Sensing of Environment* 审稿人认为 3D-M3C2 算法的克服了已有算法的不足。德国柏林自由大学教授，生态遥感领域国际知名学者，Fabian Faßnacht 充分肯定了申请人在复杂地形区侵蚀体积三维算法和沟道侵蚀过程研究的贡献，认为将产生广泛影响。

#### （五）软件检测报告

针对西安瑞特森信息科技有限公司委托的“星瑞源地质灾害野外调查数据采集系统 V1.0”软件进行登记检测，检测报告由陕西省软件评测中心出具。依据相关测试细则和国家标准，对用户文档、功能性、信息安全性、可靠性、易用性、易安装性等项目进行检测。各项技术要求检测结果均符合，各检测项目均通过，结论为所检项目均通过。

## 五、代表性论文专著目录

序号	论文专著名称	刊名	作者	第一完成单位	年卷页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	知识产权是否归国内所有
1	Alternative formulae for parameter estimation in partial errors-in-variable s models	Journal of Geodesy	Yun Shi, Peiliang Xu, Jingnan Liu, Chuang Shi	西安科技大学	卷：89 期：1 页码范围：13-16	2014 年 9 月 4 日	Peiliang Xu	Yun Shi	Yun Shi, Jingnan Liu, Chuang Shi	29	26	是
2	A computational complexity analysis of Tienstra's solution to equality-constrained adjustmen	Studia Geophysica et Geodaetica	Yun Shi, Peiliang Xu, Junhuan Peng	西安科技大学	卷：61 期：4 页码范围：601-615	2017 年 1 月 24 日	Peiliang Xu	Yun Shi	Yun Shi, Junhuan Peng	2	1	是
3	Improving the application of UAV-LiDAR for erosion monitoring through accounting for uncertainty in	Catena	Pengfei Li, Dou Li, Jinfei Hu, Fabian Ewald Fassnacht, Hooman Latifi, Wanqiang Yao, Jianjian Gao, Faith Ka Shun Chan, Tianmin Dang,	西安科技大学	卷：234	2023 年 9 月 15 日	Jinfei Hu	Pengfei Li	Pengfei Li, Dou Li, Jinfei Hu, Wanqiang Yao, Jianjian Gao,	7	3	是



	DEM of difference		Fuquan Tang						Tianmin Dang, Fuquan Tang			
4	Development of gully erosion processes: A 3D investigation based on field scouring experiments and laser scanning	Remote Sensing of Environment	Chendi Gao, Pengfei Li, Jinfei Hu, Lu Yan, Hooman Latifi, Wanqiang Yao, Mingkui Hao, Jianjian Gao, Tianmin Dang, Shuhua Zhang	西安科技大学	卷: 265	2021 年 8 月 28 日	Pengfei Li	Chendi Gao	Pengfei Li, Dou Li, Jinfei Hu, Wanqiang Yao, Jianjian Gao, Tianmin Dang, Fuquan Tang	19	12	是
5	SCCD: A slicing algorithm for detecting geomorphic changes on topographically complex areas based on 3D point clouds	Remote Sensing of Environment	Xin Yang, Jinfei Hu, Pengfei Li, Chendi Gao, Hooman Latifi, Xiao Bai, Jianjian Gao, Tianmin Dang, Fuquan Tang	西安科技大学	卷: 303	2024 年 1 月 27 日	Pengfei Li	Xin Yang	Pengfei Li, Dou Li, Jinfei Hu, Wanqiang Yao, Jianjian Gao, Tianmin Dang, Fuquan Tang	3	2	是

五、代表性知识产权和标准规范等目录

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号	授权公告日	证书编号	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)
1	发明专利	一种基于地形点云的沟壑体积变化切片方法	中国	ZL 2022 1 0923370.7	2022 年 11 月 04 日	5557051	西安科技大学	李朋飞；杨鑫；胡晋飞；高晨迪；张淑花；严露；李豆；郝铭揆；李伟光
2	发明专利	一种基于地形点云的沟壑体积变化三维计算方法	中国	ZL 2021 1 0569873.4	2022 年 07 月 15 日	5314592	西安科技大学	李朋飞；高晨迪；胡晋飞；严露；郝铭揆
3	发明专利	一种基于激光点云的地形变化检测方法	中国	ZL 2024 1 0095879.6	2024 年 01 月 23 日	7275980	西安科技大学	李朋飞；张晓晨；胡晋飞；高晨迪；白晓；严露；黄珂瑶
4	发明专利	一种 GIS 数据采集方法	中国	ZL 2019 1 0864411.8	2020 年 12 月 15 日	4154201	西安瑞特森信息科技有限公司	李崇贵
5	发明专利	一种 GIS 数据渲染方法	中国	ZL 2019 1 0864421.1	2023 年 03 月 24 日	5804168	西安瑞特森信息科技有限公司	李崇贵

## 六、主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
师芸	1	无	教授	西安科技大学	西安科技大学	负责地表灾害监测预警数据误差处理理论与方法的构建和组织实施，建立了加乘性混合随机误差模型大地测量平差理论与方法、地表灾害监测数据计算复杂性降低方法。
李朋飞	2	无	教授	西安科技大学	西安科技大学	针对复杂地形区域地表灾害量化不足的问题，创新性的研发并改进了 DUD 算法、3D-M3C2 以及基于切片理论的 SCCD 算法，并将以上算法集成应用于地表灾害数字化调查与监测预警平台，成果应用经济和社会效益显著。
刘铁铭	3	无	高级工程师	西安市国土整治和生态修复中心	西安市国土整治和生态修复中心	系统研究并且指导了地质灾害监测关键技术问题的各项研究工作。将项目组平差理论和空间大地测量新技术用于生产实践。并利用 InSAR 技术开展矿区开采沉陷规律研究与生态修复等相关工作。
李崇贵	4	董事长	教授	西安瑞特森信息科技有限公司	西安瑞特森信息科技有限公司	主要参与完成了地表灾害数字化调查与监测预警系统的开发，实现了地表灾害调查数据的在线推送、实时共享和即时更新，成果应用经济和社会效益显著。
刘立峰	5	局长	高级工程师	黄河水土保持绥德治理监督局（绥德水土保持科学试验站）	黄河水土保持绥德治理监督局（绥德水土保持科学试验站）	参与完成复杂地形区地表灾害遥感监测新方法研究，对复杂地形区地形变化量化算法进行验证并应用于实践。
陈峥	6	技术总监	工程师	西安瑞特森信息科技有限公司	西安瑞特森信息科技有限公司	参与地表灾害数字化调查与监测预警系统的研发工作。
胡柳茹	7	无	讲师	西安科技大学	西安科技大学	与第一完成人合作开展利用 InSAR 技术开展矿区开采沉陷规律研究与生态修复等相关工作。
胡晋飞	8	无	副教授	西安科技大学	西安科技大学	主要参与了复杂地形区地形变化经典量化算法和流域尺度的地形变化切片算法研发，并参与改进了地表灾害数字化调查与监测预警系统。
王绪鹏	9	副总经理	工程师	西安瑞特森信息科技有限公司	西安瑞特森信息科技有限公司	参与地表灾害数字化调查与监测预警系统的研发工作。
唐柄哲	10	无	讲师	西安科技大学	西安科技大学	主要参与了复杂地形区地表灾害遥感监测新方法的研究工作，协助进行流域尺度的地形变化切片算法研发。

马东晖	11	无	中级工程师	西安科技大学	西安科技大学	针对地质灾害野外调查费时费力的难题，利用深度学习技术开展地质灾害监测等相关工作，显著提高了地质灾害调查的工作效率。
高健健	12	无	工程师	黄河水土保持绥德治理监督局（绥德水土保持科学试验站）	黄河水土保持绥德治理监督局（绥德水土保持科学试验站）	参与了复杂地形区地表灾害遥感监测新方法研究工作，协助进行复杂地形区地形变化经典量化算法的精度验证和应用。
党恬敏	13	无	工程师	黄河流域水土保持生态环境监测中心	黄河流域水土保持生态环境监测中心	主要参与了复杂地形区地形变化量化算法DUD、3D-M3C2、SCCD的研发。
吕杰	14	无	讲师	西安科技大学	西安科技大学	利用深度学习技术开展地质灾害监测等相关工作，显著提高了地质灾害识别的工作效率。
余昊	15	无	无	西安科技大学	西安科技大学	与第一完成人合作开展大地测量平差理论与方法等相关工作。

## 七、主要完成单位情况

### 1.西安科技大学

项目主要完成单位，主要共同完成地表灾害监测数据误差处理理论与方法、顾及多模态数据误差的地表灾害监测关键技术以及地表灾害监测方法与关键技术的集成应用。

### 2.西安市国土整治和生态修复中心

本项目的主要完成单位之一，对本项目科技创新和推广应用做出的主要贡献包括：（1）将项目提出的监测方法用于矿区开采沉陷监测和地质灾害监测，开展技术推广应用。（2）与第一完成人单位联合培养数名硕士、博士研究生，提升了项目成果的社会效益。

### 3.西安瑞特森信息科技有限公司

本项目的主要完成单位之一，对本项目科技创新和推广应用做出的主要贡献包括：（1）研发了地表灾害数字化调查与监测预警平台。（2）在全国多地、多领域开展地表灾害监测预警应用。

### 4.黄河水土保持绥德治理监督局（绥德水土保持科学试验站）

本项目的主要完成单位之一，对本项目科技创新和推广应用做出

的主要贡献包括: (1) 该单位为项目主要合作单位, 协助申报单位发展了复杂地形区地表灾害遥感监测新方法, 在优化复杂地形区地形变化经典量化算法中有重要贡献; (2) 在黄土高原推广应用项目所研发的地表灾害遥感监测方法, 实现了区域地表灾害及扰动状况的高效监测; (3) 将项目提出的监测方法用于地表灾害监测和减灾措施布设, 开展技术推广应用。

#### 5. 黄河流域水土保持生态环境监测中心

本项目的主要完成单位之一, 对本项目科技创新和推广应用做出的主要贡献包括: (1) 该单位为项目主要合作单位, 协助申报单位发展了复杂地形区地表灾害遥感监测新方法, 在流域尺度地形变化切片算法研发中具有重要贡献; (2) 将项目提出的地表灾害遥感监测方法用于黄河中游地区地表灾害调查和评估工作, 实现了本项目技术研发成果的推广应用。

### 八、完成人合作关系说明

第一完成人师芸和李朋飞、胡晋飞、唐柄哲、胡柳茹是陕西省测绘地理信息学会地表灾害遥感团队成员。李朋飞、刘立峰、高健健、党恬敏共同发表论文。师芸、刘铁铭共同发表论文。师芸、吕杰、马东晖共同发表论文。师芸、胡柳茹共同发表论文。余昊为师芸指导的博士研究生。师芸、李朋飞、李崇贵为西安科技大学测绘科学与技术学院团队成员。李崇贵、陈峥、王绪鹏为西安瑞特森信息科技有限公司成员。