

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.03.012

遥感技术在西北地质调查中的应用及展望

韩海辉,李健强,易欢,阎晓娟,张转,闫瑞,陈霄燕,蔡浩杰

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,陕西 西安 710054)

摘要:西北地区地广人稀、地质结构复杂、自然资源丰富、生态环境异常脆弱,利用遥感技术开展地质调查能起到事半功倍的效果。笔者简要回顾了遥感地质学的发展及西北地区遥感地质工作总体成效,系统归纳了西安地质调查中心通过构建“西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范系统”取得的技术创新成果和新认识,客观分析了遥感技术在西北地质工作中的适用性、实用性及挖掘潜力,以此为缩影展示了遥感技术在西北资源能源勘查、地质环境调查监测、资源环境效应分析中发挥的重要先导作用。通过梳理利用遥感技术解决西北典型资源环境问题面临的挑战与技术短板,提出“十四五”时期应重点围绕西北重点生态工程实施与重点区域综合治理、矿山地质环境恢复治理、战略性矿产资源快速勘查、寒区旱区国土空间优化 4 个应用方向,不断融入大数据、云计算、人工智能、5G 和区块链等高新信息技术,就自然资源要素遥感快速智能识别、地质环境动态变化定量分析与模拟预测、图谱合一的谱遥感地球体检等关键技术展开机理研究和方法创新。研究结果可为推进遥感技术在西北地质调查中的产学研用一体化提供理论依据和技术参考。

关键词:遥感;西北地区;地质调查;智能识别;模拟预测;谱遥感地球体检

中图分类号:P627

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)03-0155-15

Application and Prospect of Remote Sensing Technology in Geological Survey of Northwest China

HAN Haihui, LI Jianqiang, YI Huan, YAN Xiaojuan, ZHANG Zhuan,
YAN Rui, CHEN Xiaoyan, CAI Haojie

(Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation,
Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Northwest China is a vast and sparsely populated area with a complex geological structure, rich natural resources and an unusually fragile ecological environment, so the use of remote sensing technology to carry out geological surveys can achieve twice the result with half the effort. This paper firstly briefly reviews the development of remote sensing geology and the overall effectiveness of remote sensing geological work in Northwest China; secondly, it systematically summarizes the technical innovation results and new understanding achieved by Xi'an Geological Survey Center through constructing the “Demonstration System of Remote Sensing Detection and

收稿日期:2022-02-07;**修回日期:**2022-04-28;**网络发表日期:**2022-08-15;**责任编辑:**姜寒冰

基金项目:中国地质调查局项目“西昆仑成矿带矿产资源遥感地质调查”(1212011120886)、“青海省柴达木北缘地质矿产调查”(12120113032500)、“黄河源地区生态地质调查”(DD20190539)及“西北地区自然资源动态监测与风险评估”(DD20211393)联合资助。

作者简介:韩海辉(1983-),男,博士,高级工程师,主要从事遥感地质调查工作。E-mail:hanhh06@hotmail.com。

Monitoring of Natural Resources in Northwest Special Landscape Area”; meanwhile, it objectively analyzes the applicability, practicality and potential of remote sensing technology in Northwest China’s geological work, and shows the important pioneering role of remote sensing technology in Northwest China’s resource and energy exploration, geological environment investigation and monitoring, and resource and environment effect analysis in recent years. By sorting out the new challenges and technical shortcomings of using remote sensing technology to solve typical resource and environmental problems in Northwest China, we propose that “The 14th Five-Year Plan period” should focus on four application directions: implementation of key ecological projects in Northwest China and comprehensive improvement of key regions, restoration and improvement of mine geological environment, rapid exploration of strategic mineral resources, and optimization of land space in cold and arid regions. At the same time, we should continuously integrate new and advanced information technologies such as big data, cloud computing, artificial intelligence, 5G and blockchain to carry out mechanism research and methodological innovation in remote sensing rapid and intelligent identification of natural resource elements, quantitative analysis and simulation prediction of dynamic changes in geological environment, spectral remote sensing earth health examination combined with spectrum and image. The results can provide theoretical basis and technical reference for promoting the integration of production-academia-research-use of remote sensing technology in the geological survey of Northwest China.

Keywords: remote sensing; Northwest China; geological surveys; intelligent identification; simulation prediction; spectral remote sensing earth health examination

西北地区蕴藏着丰富的石油、煤、天然气、铁、铜、金、镍等能源矿产资源(李文渊等,2006),广泛发育着易引发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害的湿陷性黄土(张茂省等,2016),同时高寒干旱的自然特性下地下水开采与水平衡矛盾相对突出(尹立河等,2021),因此历来就是中国开展地质调查工作的重点和热点地区。卫星遥感技术集中了空间、电子、光学、计算机通信和地学等学科的成就,凭借其宏观、准确、动态、综合、多层次的优势,多年来在西北地质工作中发挥着重要的先导作用(王润生,2011;李志忠,2021a,2021b,2021c;郑雄伟等,2021)。

20 世纪 50 年代中期,开始利用航空摄影黑白航片在秦岭、柴达木、鄂尔多斯等地开展 1:20 万地质填图和石油地质普查(唐文周,1998),到 70 年代利用假彩色影像在西北进行地貌、岩体、构造、水文要素等遥感解译(陈昌礼等,1992;伍跃中等,2002),再发展到近年在“三高”(高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率)时代发展特征下开展西北艰险区岩性填图、蚀变矿物信息提取、地质环境要素调查、地质灾害监测等方面的技术应用,系列成果为西北能源资源勘查、地质灾害防治和地质环境保护修复

等提供了重要支撑(杨金中等,2003;李志忠等,2021a,2021b,2021c;聂洪峰等,2021)。当前,卫星遥感已形成由各种高、中、低轨道相结合,大、中、小卫星相协同,高、中、低分辨率相弥补而组成的全球对地观测系统;遥感地质学科也开始更多地关注对地质要素、地质现象、地质作用的精细化识别和量化分析(Van der Meer et al.,2012;Bishop et al.,2018),为构建西北地区遥感地质调查的“产学研用”体系奠定了基础。

2000 年以来,为更好地服务西部大开发建设,西安地质调查中心聚焦国家资源安全保障和西北地区地质环境保护,综合利用高空间分辨率、多(高)光谱、雷达等遥感技术,在中国西北及中亚邻区的高寒深切割区、高山峡谷区、戈壁荒漠区、绿洲平原区、黄土高原区等不同景观区完成了省部级遥感地质项目及专题 30 余个,涉及地质矿产调查、地质环境调查、土地质量地球化学调查、地质灾害调查等多个方向,汇集形成的“西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范”成果入选“2019 年度中国遥感领域十大事件”(中国遥感应应用协会,2020 年),申请成立的“中国—上合组织地学研究卫星遥感应用中心”

入选“2021年度中国遥感领域十大事件”(遥感学报,2022),有效地推动了多源遥感技术在中国西北及中亚邻区地质调查工作中的规模化应用。

笔者系统梳理了“西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范”取得的成果与认识,并以此为缩影分析了遥感技术在西北地质调查中的适用性、实用性和挖掘潜力。结合“十四五”发展对地质工作的需求及遥感地质学科自身面临的技术难点,探讨了未来开展西北遥感地质调查工作的着力点,结果可为推进遥感技术的产学研用一体化建设提供参考。

1 遥感技术在西北地质调查中的应用历程

遥感是20世纪60年代基于物理学、信息技术、空间技术及传感器技术发展起来的一门空间探测技术,其发展经历了地面遥感、航空遥感和航天遥感3个阶段。遥感地质学是综合应用遥感技术来研究地质规律的一门交叉学科,荷兰学者 Van der Meer 等(2012)根据使用的卫星数据将遥感地质研究应用划分为3个时代:Landsat时代、ASTER时代、高光谱时代,实际也就是多光谱时代和高光谱时代。

在中国西北地区的地质调查工作中,遥感技术应用最为广泛的2个领域是地质矿产勘查和水工环调查,其中地质矿产勘查中的遥感应用开展较早。“七五”期间,原地矿部下属单位就以新疆博罗霍乐北山地区为对象,利用计算机图像处理与遥感数据融合相结合的技术,总结出了一套地质、物探、化探和遥感综合找矿方法,建立了独特的色线带环四位一体、色线环三位一体、色块带三位一体、色带二位一体和线环二位一体等5种遥感信息找矿模式,在工作区内圈定出了13个找矿远景区,20多处找矿预先靶区,其中4个靶区经验证发现有矿化体(带)或矿化现象,找矿效果明显(陈昌礼等,1992)。2000年以来,ASTER被广泛应用于岩性填图、蚀变矿物信息提取及活动断裂构造识别等(Tommaso et al., 2007; Gabr et al., 2010; Son et al., 2014; Bishop et al., 2018),这一阶段地矿系统单位综合 Landsat、ASTER、SPOT等多光谱数据在地质找矿中开展了大量的应用示范工作,如中国国土资源航空物探遥感中心持续开展“1:25万基础调查-遥感方法技术研究”,在新疆土屋-延东斑岩铜矿、黄山超基性岩型

铜镍矿床、沙泉子矽卡岩型多金属矿床等多个矿床展开分析,提出了“去干扰异常主分量门限化技术”流程,发展了基于光谱匹配的蚀变矿物提取方法,为矿产勘查提供了一批矿化线索(杨金中等,2003;张玉君等,2003)。2010~2016年,中国地质调查局组织自然资源航空物探遥感中心、西安地质调查中心及其他遥感地质调查相关单位在西昆仑、阿尔金、东昆仑等西北重要成矿带,利用 Worldview 等亚米级数据完成了上百幅1:5万标准图幅的构造岩性解译、蚀变异常信息遥感提取和找矿预测(杨金中等,2016a;易欢等,2016;张微等,2016),这为后来开展的中国全境矿产资源潜力评价工作奠定了基础。近10年,中国地质调查局相关单位利用国产高分辨率遥感影像,对全国矿产资源开发利用状况进行持续监测,已建成矿山遥感监测技术体系,编制《矿产资源开发遥感监测技术指南》,这为西北重点矿区遥感监测工作的开展奠定了基础(杨金中等,2015,2016b)。

机载高光谱遥感自2010年起被逐渐应用于西北地区地质填图和找矿勘查中,目前已形成了一套航空高光谱遥感矿物填图技术体系,基本解决了航空高光谱数据在地质工程化应用中所遇到的问题(王润生等,2010;闫柏琨等,2016;甘甫平等,2017),而星载高光谱数据尚处于试验探索阶段,规模化应用的条件暂不成熟(Liu et al., 2018;董新丰等,2020;李娜等,2020)。其中,较为典型的机载高光谱示范,如2014年在新疆东天山哈密地区开展了“新疆重点地区航空高光谱调查与找矿预测技术研究”,利用美国 HyMap 成像光谱仪获取了卡拉塔格、东戈壁-泉西2个地区的高光谱数据,在2个地区分别提取出11种和8种蚀变矿物,并建立了红山铜金、东戈壁钼、雅满苏铁等矿床的基于地面高光谱遥感找矿模型,最终综合圈定了17处铜铁钨钼、11处金矿找矿有效靶区(孙永彬等,2018)。2016年,在东昆仑格尔木地区开展的“青海哈日扎—果洛龙洼地区航空高光谱测量及靶区优选”中,利用加拿大 CASI-SASI 成像光谱仪获取了1300 km² 高精度的航空高光谱遥感数据并提取了10余种蚀变矿物,建立了哈日扎—果洛龙洼地区的金矿高光谱找矿模型,圈定了6处优先查证地段,新发现了2处铜、金矿化线索(孙雨等,2015)。

遥感技术在水工环领域主要被用于调查和监测

各类水文地质要素、环境地质要素及地质灾害等。较为典型的应用如 2003~2015 年中国地质调查局组织局属单位在青藏高原、陕北、宁夏沿黄、秦巴山区、关中等区域持续开展了环境地质调查、国土遥感综合调查、地灾遥感监测预警示范等工作,充分利用不同空间分辨率的多光谱遥感数据,全面查明了林草湿、湖泊、冰川等环境要素的变化趋势,详细分析了青藏高原地质环境演化规律、内陆干旱盆地地下水利用和水平衡问题、关中-天水城市群地面沉降及工程地质问题等,多期次监测了黄土高原水土流失和地质灾害发育现状和变化特征,形成了西北 1:1 万~1:100 万地质环境专题系列图(方洪宾等, 2007; 聂洪峰等, 2016; 李志忠等, 2021a)。2012 年起,原环保部和中科院也开展了“全国生态环境十年变化(2000~2010)调查评估”等工作,利用遥感技术综合分析了黄土高原生态工程的生态效应,评估了三江源区生态保护和建设一期工程及塔里木河治理工程的生态成效,认为西北区域生态系统总体向良性发展,但局部区域的治理形势依旧严峻(车向红等, 2015; 陈曦等, 2017; 刘国彬等, 2017; 邵全琴等, 2017)。2019 年起,为全面支撑中国生态保护修复工作,中国地质调查局统筹部署了“生态地质调查工程”,重点开展了中国北方林草湿分布区 1:50 万生态地质调查以及黄河源区、大凉山区等重点生态功能区 1:5 万生态地质调查,掌握了成土母岩、水文地质要素、土壤、地形地貌等生态地质条件,以及荒漠化、湖泊萎缩等生态问题分布数据,其中西北地区旨在进一步查明冻土消融、荒漠化、水土流失等典型资源环境问题及其地质控制要素与互馈机理,遥感技术作为“空-天-地”一体化调查的主要手段发挥了重要作用(聂洪峰等, 2021)。

2 西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范

西部大开发以来,西安地质调查中心开展了一系列遥感地质调查及研究应用工作,形成了“西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范”成果。该成果突破西北高寒深切割区/戈壁荒漠区遥感信息提取、基于人工智能的黄土高原区地质灾害遥感识别、遥感-地球化学协同反演土地元素分布等关键技术,成功引领西昆仑大红柳滩超大型锂辉石矿找矿

突破,实现隐蔽性黄土地质灾害的早期识别和监测预警,创新无人机高光谱遥感与土壤地球化学调查协同分析绿洲区盐渍化分布和强度,创建基于 3S 技术的自然资源空间可视化分析体系,为西北地质环境演变研究和自然资源监管工作提供了有力支撑。

2.1 西北艰险区矿产勘查和地质填图中的遥感应用

西北地区的阿尔金、西昆仑、东昆仑、天山等重要成矿带海拔高、地势起伏大、交通条件差,传统的地面调查工作难以快速大面积展开,而遥感地质技术可为矿产勘查和区调填图工作提供必要的地质体分布信息和矿化蚀变线索。

20 多年来,西安地质调查中心在西北部署开展了大量基础地质和矿产遥感应用工作,制作完成了约 100 余幅 1:50 000 标准图幅的高分辨率遥感影像图、矿化蚀变分布图、遥感地质解译图、重点区分辨率优于 1 m 的岩性-构造遥感解译图、遥感找矿预测图等,为后续地质矿产调查储备和积累了丰富的遥感资料。工作中通过不断探索和构建基于多源遥感数据调查西北特殊景观区矿产资源的方法体系,构建了高寒深切割区遥感+地质+地球化学“空地一体”快速勘查技术方法体系,创新了西北高寒深切割区、戈壁荒漠区的遥感信息提取技术,技术成果成功引领西昆仑大红柳滩超大型锂辉石矿找矿突破,加速甜水海地区萨岔口、五峰山一带铅锌找矿新发现(杨敏等, 2012; 李健强等, 2015; 任广利等, 2017a; 金谋顺等, 2019)。另外,基于高分 1 号、高分 2 号、Quickbird、Geosy-1、Worldview-2、Worldview-3 等 10 种高分遥感数据,率先开展了新疆 1:5 万喀依车山口等艰险区图幅的填图试点,形成了针对艰险区填图的高分和多光谱遥感应用技术体系,总结出适用于不同尺度解译岩性地层的空间展布、组合规律、产出状态及构造样式的技术方法,显著提高了岩性-构造实体的精准识别(Yang et al., 2015, 2018),以此填绘的 K46E020014 图幅被评为“2018 年度全国优秀图幅”,制定提交的“高山峡谷区填图方法指南”得到广泛应用(辜平阳等, 2016),为西北基础地质和矿产地质中遥感技术的规模化应用提供了宝贵经验。

取得的主要创新成果和认识包括:①通过构建高寒深切割区遥感+地质+地球化学“空地一体”快速勘查技术方法体系,建立了西昆仑火烧云地区重

要成矿带区域构造、岩性、成控矿要素的高分辨率遥感解译标志,研发了“伟晶岩型稀有金属矿的识别方法及系统”(专利号 ZL201810049397.1)和“热液型萤石矿的遥感找矿方法”(专利号 ZL202010245482.2),提出了综合地球化学、电阻率测深信息及遥感多特征光谱匹配滤波技术(MTMF)快速识别区内碎屑岩、碳酸盐岩等赋矿围岩的方法(金谋顺等,2019)。

②在东昆仑夏日哈木、北山辉铜山地区,改进了利用 SiO_2 指数与 $\text{Mg}-\text{OH}$ 异常识别超基性岩带的技术方法,新发现多处超基性岩体,为浅覆盖区岩浆型铜镍硫化物矿床的寻找提供了新思路(韩海辉等,2018a)。

③发现多源遥感数据的协同融合,可有效提高对光谱特征相似岩性的分类和目视解译的精度,提高地质填图效率。试点填图结果显示,在减少剖面测制和路线地质调查数量的同时,通过遥感等技术手段,达到了 1:50 000 填图精度,保证了填图成果质量,重新建立了调查区地层层序、岩浆岩序列及构造格架,发现金、铅锌等含矿地质体多处(辜平阳等,2016;Li et al.,2016;易欢等,2016;Yang et al.,2018)。

2.2 西北浅覆盖区蚀变矿物信息遥感提取

西北干旱区岩石破碎、地表风化和沉积物覆盖等现象会造成地物光谱吸收和反射特征减弱,导致遥感异常往往表现为微弱信息,传统的去干扰异常主分量门限化技术、光谱信息散度-光谱梯度角等技术难以精准提取蚀变信息,这进一步造成遥感异常的地质成因和指示意义难以解释。

西安地质调查中心就如何更好利用遥感数据提取蚀变矿物信息并辅助地质找矿开展了大量示范研究。通过承担国家部署在西昆仑、东昆仑、阿尔金、北山等成矿带 10 余项公益性遥感调查项目,创造性地将高分数据、多光谱数据、高光谱遥感数据与地质勘查结合,提出了基于非线性技术、光谱相似度组合等技术提取遥感异常的基础理论与模型方法,改进了快速识别基性岩体的基性度遥感指数法分析方法,建立了西北典型岩矿实测光谱与影像光谱的关联模型,剖析了蚀变矿物信息的地质成因及指示意义,构建了基于高光谱遥感的标志性蚀变矿物组合找矿预测方法。实践应用表明,通过改进遥感方法模型后提取的蚀变异常精度可达 80% 以上,野外查证新发现几十条蚀变带和上百处矿化点、矿化线索,这些线索快速助推新疆甜水海地区萨岔口和五峰山

一带铅锌找矿新发现、昆仑—阿尔金地区锂矿找矿重大突破、青海夏日哈木铜镍矿勘查、天山—北山成矿带远景找矿等“358 省部合作”和找矿突破战略行动(2011~2020)。

取得的主要创新成果和认识包括:①认为遥感异常在本质上是受控于蚀变地质体的空间属性特征,可以从地质异常的非线性特征出发提出基于非线性技术的蚀变矿物信息提取算法,新方法不会受到测试位置、地质背景以及遥感数据源等要素变化的影响(韩海辉等,2017a,2017b,2018b)。

②认为提高光谱相似性的区分度是增强蚀变矿物提取精度的关键,因此改进的高光谱图像蚀变矿物信息提取算法既考虑了光谱曲线的形状特征和幅值特征的相似性,又通过局部光谱吸收特征和丰度特征的匹配突出对光谱细节特征的反映,进一步增大了目标光谱被正确识别的几率,其优势是不受遥感数据源和地理位置的约束;改进的基性度遥感指数法进一步降低了碳酸盐的干扰,提高了对基性—超基性岩体的精准识别度(韩海辉等,2018a,2019,2020)。

③研究建立的多数据源、多方法协同处理方式,有效克服了单一数据源或单一方法的分析结果容易产生不完全性和不确定性的不足,进一步提高了遥感异常在地质应用中的可信度、精确度和适用性(韩海辉等,2016a,2019;任广利等,2017b,2018)。

2.3 高光谱遥感与地球化学协同开展盐渍化土地评价

高光谱遥感是快速监测分析西北干旱—半干旱盐渍土的重要手段,但目前的研究主要是利用土壤光谱特征与盐渍土矿物成分含量之间的关系建立遥感反演模型,很少研究土壤矿物反演的物理机理。

2018 年,西安地质调查中心以新疆焉耆县为试点,结合典型区土壤地球化学调查成果,探索了无人机高光谱遥感技术与土壤地球化学调查技术协同调查体系,建立了盐渍化强度遥感反演模型,实现耕地盐渍化的快速、精准监测识别,以此为基础对新疆焉耆盆地绿洲平原区 1998~2017 年的盐渍化情况进行了示范应用,划定了盐渍化土地分布范围,成果为地方政府土地开发利用和耕地保护提供了科学依据(刘拓等,2018)。

取得的主要创新成果和认识包括:①通过对焉耆盆地遥感与地球化学协同调查研究认为:利用遥感数据可以实现盐渍化强度分析,提高调查监测效

率。星载多光谱数据能够定性表达土壤盐渍化情况,且与地球化学调查结果有一定吻合,但定量精度不够;星载高光谱卫星数据通过定量映射化合物关系进一步提高了对盐渍化信息的识别精度。②利用无人机航拍获取的高光谱影像在空间分辨率方面较卫星高光谱更高,利用无人机高光谱影像反演的土壤盐渍化结果比卫星高光谱影像精度 R^2 大约高 0.4,建立的全盐量与土壤反射率模型能直接反映土壤中盐分的含量情况,训练模型和预测模型的精度高达 0.94,而 Na^+ 和 Cl^- 离子与土壤反射率之间的训练模型和预测模型的精度也达到 0.8 以上。③遥感和地球化学调查数据在盐渍化调查中具有数据融合的特点,二者可以协同开展盐渍化调查,且预测结果基本一致。

2.4 基于人工智能的隐蔽性黄土地质灾害早期识别和监测预警

西北地区长期以来都是地质灾害多发地带,山体滑坡、泥石流等灾害给当地造成很大的人员财产损失,黄河中上游的黄土高原区更是中国地质灾害 3 大高发区之一,传统的地面工作手段难以展开全域调查监测和实时调查监测。

2000 年以来,西安地质调查中心依托原国土资源部“西北地区地质灾害调查评价与关键问题研究”计划项目、国家发展和改革委员会“国家高技术产业发展项目卫星及应用产业发展专项”、科技部“黄土滑坡失稳机理、防控方法研究与防治示范”重点研发计划等项目的实施,在陕北、关中、陇南等黄土高原典型区,采用多源遥感影像开展地质灾害与环境地质条件解译,划分重点调查区和一般调查区,建立了黄土地质灾害国产卫星遥感解译标志并进行人机解译(韩海辉等,2016b;李健强等,2017;丁辉等,2019)。现场核查调查表明,黄河中上游共发育滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害 20 504 处,其中滑坡 10 517 处、崩塌 5 768 处、泥石流 4 579 处(李志忠等,2021a)。

技术创新方面,团队建立了黄土地质灾害早期人工智能识别系统。该技术基于多源数据融合技术,结合 InSAR、无人机航摄、LiDAR、贴近摄影等手段获取地质灾害灾变形态特征、位移变化等特征,创新性地利用深度学习技术将面向对象识别的地物边界结果自动映射到“分割对象”上,实现地物边界和类型的准确分类,提高地质灾害的遥感智能化解译精度,进而达到长时序地貌遥感监测与短时相

InSAR 形变监测相结合的滑坡早期预警(李政国等,2015,2018;张茂省等,2019)。这种多频段、多参数的天-空-地一体化监测预警技术,有效判读了黄土区地质灾害的孕灾背景、灾害特征、变形速率以及发展趋势,为地质灾害防治、评价以及突发地质灾害应急处置等相关工作提供了基础资料(李志忠等,2021a)。以上技术取得了良好的应用效果,2016 年以来,在延安宝塔区识别黄土地质灾害隐患 200 余处,野外核查正确率达 76%,已实现天水、延安和沿黄公路沿线大面积强降雨引发黄土地质灾害灾情的多次成功预警,有效保障了灾害易发区的人身财产安全。

2.5 3S 技术支撑黄河中上游流域自然资源调查和地质环境演化分析

围绕西北自然资源开发利用动态监测和生态地质环境演化分析,西安地质调查中心利用多源、多时相遥感数据开展叠加分析,结合地面环境地质调查,建立了空地一体化的调查方法体系和基于 3S 技术的自然资源空间叠加分析系统,快速实现对西北重要经济区土地开发利用现状数据、国土空间规划数据、基本农田保护数据的符合性分析,为国家自然资源监管部门工作提供了技术支撑(韩海辉等,2012,2015;阎晓娟等,2013,2015;高婷等,2016)。在黄河流域,通过承担“黄河源地区生态地质调查”公益性项目,开展了黄河中上游地区冰川融化、冻土消融、湿地退缩、土地退化等典型生态地质问题的遥感动态监测与水循环关键要素遥感定量反演研究,厘清了黄河源头生态格局演化规律并构建“空天地”生态地质调查监测体系,选择水量平衡法评价了黄河上游生态功能保护区水源涵养功能;依托“中国遥感应用协会黄河流域高质量发展遥感分会”平台,完成黄河中上游流域 1980~2020 年土地利用变化遥感监测,以及黄河中上游流域 50 多个国家重大项目用地的合规性遥感监测和重点矿区矿产疑似违法图斑的遥感监测,探索了基于遥感技术的黄土高原区自然资源调查和生态修复工程评估技术体系,为黄河中上游流域生态保护和高质量发展战略提供了重要的基础数据(李志忠等,2021a,2021b,2021c),汇编出版的《黄河中上游自然资源图集》得到社会各界的广泛关注与肯定。

取得的主要创新成果和认识包括:①遥感监测发现 1980~2020 年间黄河上游生态趋势总体变好,生态恢复还需加强,局地生态退化现象仍需关注,如

扎陵湖上游、花石峡—甘德一带局部地区草地退化仍较为严重,阿尼玛卿的哈龙冰川40年退缩了1.2 km,现仅存6.5 km,年均退缩68 m。②黄河上游生态功能区的区内水源涵养量1990~2019年期间空间变化较为明显,若尔盖-玛曲生态功能保护区水源涵养量高于黄河源生态功能保护区。1990~2019年期间,整个黄河上游生态功能保护区水源涵养量小于50 mm的面积增加了10.6%左右,而水源涵养量100~200 mm的面积减少了9.9%,其中以黄河源区生态功能保护区变化较为显著,水源涵养量逐渐呈减少趋势。③黄河上游生态功能区生态适宜性呈现出较明显的地带性分布规律,即自东南向西北生态适宜性逐步降低,其中高适宜性地区主要分布在若尔盖-玛曲生态功能保护区(面积约为28 772 km²),中适宜性地区主要分布在黄河源生态功能区中东部(面积约为38 574 km²),低适宜性地区主要集中在黄河源生态功能区的西部(面积约为18 494 km²)。

3 遥感技术在西北地质调查应用中的主要问题

通过开展“西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测示范”,笔者团队积累了宝贵的工作经验,也发现目前遥感技术在西北地质调查应用中仍存在3方面的问题与挑战。

(1)多源遥感数据的融合、同化及协同应用亟待完善。近年来,中国发射的卫星包括资源系列、环境系列、气象系列、通讯系列、海洋系列和高分辨率对地观测系列等,在卫星数量、质量和星座上均取得重大突破,其中自然资源部为牵头主用户的陆地遥感卫星就达27颗,基本实现了亚米级高空间分辨率与高时间分辨率的有机结合。充足的数据源一方面有效保障了对自然资源全要素的调查监测,另一方面也带来了急需解决的技术问题,即多源遥感数据的融合、同化及协同应用。众所周知,不同卫星数据在空间/光谱分辨率、波段参数、图像信噪比、特征目标识别性等方面各有优势和不足,通过探索研发有效的数据融合和数据同化技术,将各类数据协同结合起来,相互取长补短,可更全面地反映地质体目标,提供更强的信息解译能力和更可靠的分析结果,这样不仅扩大了各数据的应用范围,而且提高了分析精度、应用效果和实用价值。西北地区地

势高差大、地貌景观复杂、冰雪云雾天气多,这种情况下开展遥感地质工作更需要优先解决不同数据的融合与同化问题,但目前这方面工作多处在实验探索阶段,方法与模型多不成熟,工程化的示范应用也难以展开;另外,多源数据如何合理协同应用,不同尺度调查成果的综合集成平台如何建立、各期调查数据的数据基底是否能够有效吻合等问题都需要进一步探索。

(2)地学信息提取技术的定量化、精细化、智能化水平不够。当前的遥感地质调查应用中,定性的研究应用居多,即对影像进行常规处理后,采用目视解译的方式从影像上直接判读断层、岩性、地质灾害等地质信息,近年也尝试采用一些自动化分析技术辅助提高解译精度与解译效率,但效果欠佳。例如,矿产调查中使用的蚀变异常遥感提取模型,其提取结果仍然包含了不少伪异常信息,往往还需要大量的人工干预。地质环境调查中提取土地利用类型的元胞自动机和多智能体等模型在精细化方面仍然存在明显的局限性(李少英,2017)。预警模型阈值设置与优化在地质灾害监测中一直是一个备受关注的实践问题。面对自然资源全要素综合调查与监测,当前遥感信息提取的自动化程度支撑不足,急需加深对半定量/定量化提取模型与提取技术的研究,特别是面对西北高寒区、荒漠戈壁区、高山峡谷区等特殊景观区时,方法与模型是否具有智能性、精确性、普适性及实际可操作性更是成为其能否工程化或规模化应用的关键。

(3)地学信息提取建模的深层物理机理研究亟待加强。当前的地学研究中许多遥感模型是基于统计学规律、相关关系而归纳出来的数学模型,而其深层机理并不清晰,很多模型的普适性不强。例如,土壤污染调查中通常通过金属离子含量与遥感影像波段的相关性大小选取敏感波段,利用数学方法建立关联模型来反演重金属污染,虽然这种反演有一定效果但并未深究物理机理,一方面会导致难以解释结果的多重性;另一方面模型无法复制或推广使用于其他地方。西北地区景观多样,需要针对不同区域地物特性,加强其反射、吸收、透射和发射电磁波能力的研究,建立西北典型地学光谱数据库,依据电磁波谱(光谱)特征来改进和创新地质体反演或提取模型,实现基础理论提升遥感模拟应用的水平。

4 新时期西北遥感地质工作的需求方向与着力点

4.1 需求方向

强化举措推进西部大开发形成新格局,是中国“十四五”时期深入实施区域协调发展战略的首要任务。西部大开发“十四五”实施方案中明确提出,要发挥科技创新的引领带动作用,提高矿产资源等勘探开发技术水平和转化效率,增强国家能源和重要资源保障能力,加强生态保护修复和环境治理,着力推动绿色发展,因此公益性遥感地质调查工作需要紧密围绕这些国家需求展开科学研究与技术攻关。

(1)西北重大生态工程与区域综合治理的监测评估。西北地区作为中国的“江河源”和“生态源”,是重要的生态安全屏障。但长久以来,资源无序开采,能源过度开发,水土气污染趋于严重,加之气候暖湿化和其他人类活动干扰,脆弱的生态系统遭到破坏后难以自我恢复,产生草甸草原退化、土地沙化盐碱化、湿地湖泊萎缩、水土流失、水涵养下降、冰川冻土急剧消融等西北典型的资源环境问题。“十四五”时期,为进一步保障生态安全,国家将在三江源、祁连山、秦岭等具有国家生态代表性的保护地加大水土保持、天然林保护、退耕还林还草、退牧还草、重点防护林体系建设等重点生态工程的实施力度,并稳步在汾渭平原等地开展土壤污染、水体污染、大气污染等区域综合治理。遥感作为一种可提供大尺度、长序列、全时段监测的手段,长期以来为调查评估西北生态系统的结构、过程、格局、功能、质量提供着充分保障(欧阳志云等,2014;聂洪峰等,2021;李志忠等,2021b)。未来,在自然资源调查、生态地质调查、健康地质调查等工作中,以像元级为观测尺度,利用多源遥感技术对重大生态工程与区域综合治理的进度、效率、质量及连锁效应,精细化开展定量评估和可视化分析将显示出更大的应用需求和发展潜力。

(2)矿山地质环境恢复治理监测评估。建国以来,西北地区富饶的能源矿产资源为保障中国经济社会高速发展作出了巨大贡献,如可可托海“功勋矿”、察尔汗盐湖钾盐矿、锡铁山铅锌矿、金川镍矿、白银铜矿、金堆城钼矿及其他大型煤矿和油田。但70多年的持续开采下矿山地质环境问题日渐凸显,

土地损毁、水土污染、矿区地质灾害、水土流失、自然景观破坏等严重影响了人民的生产生活和西北生态屏障建设。为此,全国国土规划纲要(2016~2030年)明确提出要加快矿产资源开发集中区综合整治,一方面开展矿山地质环境恢复治理,推进历史遗留矿山综合整治,稳步推进工矿废弃地复垦利用,到2030年历史遗留矿山综合治理率达到60%以上;另一方面完善地区绿色矿山建设标准体系,全面推进绿色矿山建设,建成一批绿色矿业发展示范区,到2030年全国规模以上矿山全部达到绿色矿山标准。量化的目标任务下,如何科学有效地监管和评估综合整治的过程及效果尤为关键,这就需要高新技术的有力支撑。笔者团队前期通过卫星遥感技术对陕北地区绿色发展评价的指标选择、技术流程和评价方法进行了实证研究,取得了良好的应用效果(李志忠,2022)。西北地区资源富集、矿山分布相对集中,未来可进一步发挥多源遥感时空谱联合的优势,在矿产资源开发集中区定期定量分析和评估矿山布局合理性、资源集约利用高效性、生态恢复治理优良性、矿地和谐绿色稳定性等综合整治成果,高效实现技术逻辑与行政逻辑的匹配与融合。

(3)战略性矿产资源快速勘查。全球碳达峰、碳中和和“双碳”目标共识的形成,将促使新能源产业所需的矿产资源呈爆发式增长。国际能源署(IEA)最近发布的报告和国际货币基金组织(IMF)预测显示,未来20年与新能源相关的关键矿产需求总量将会增加2~4倍,部分矿产需求也将会大幅飙升,例如锂的需求会增加13倍以上,石墨增加8倍以上,钴增加6倍以上,镍增加6倍以上,锰增加3倍以上,稀土增加3倍以上,铜增加2倍以上,钼增加2倍以上,硅增加2倍以上,这些矿产资源将成为未来低碳社会的“粮食”或“新石油”(鞠建华,2022)。西北地区的矿产勘查肩负着保障国家矿产资源安全的重任,近年来以遥感为依托的“空地一体”快速勘查技术在战略性找矿突破中发挥了重要作用,如助力南疆地区形成了火烧云-大红柳滩铅锌锂、玛尔坎苏富锰矿、阿尔金西段萤石锂铍等多个大型矿产资源基地。未来,新能源矿产的供需缺口必然会成为实现“双碳”目标的瓶颈,智能化快速勘查技术的创新与突破必将迎来前所未有的发展机遇。

(4)寒区旱区国土空间优化调配分析。西北绝大多数区域都在胡焕庸线以西,高寒气候和干旱-半

干旱气候下形成了草原、沙漠、绿洲、戈壁、雪域高原等特殊景观区,呈现出地域广阔但起伏破碎、资源丰富但生态脆弱、河湖众多但水量少且分配不均。近年来在资源型工业、灌溉型农业、畜牧业及城镇化的多重作用下,国土空间开发利用保护中的不合理、不均衡、不协调等问题日渐突出,尤其是在关中平原、河套平原、南疆等区域水土资源利用低效。如何根据区域特点科学优化调配生产、生活、生态空间结构已成为当务之急(周道静等,2020),而将活动断裂、地质灾害、富硒土地、水资源等地质要素和分析理论加入国土空间优化则是对关中盆地等西北城市群承载规模测算的有益补充(张茂省等,2020)。遥感与地理信息技术是当前开展“双评价”以优化国土空间的主要技术手段之一,已在多源信息提取同化、评价模型构建、空间分析、数据库集成及可视化表达等技术难点中发挥了显著优势(李满春等,2020)。未来,在地球科学理论指导和高新信息技术支持下,基于“3S”平台融合更多地学新数据、新技术和新方法,研发构建定量化、智能化的空间优化模型和动态信息监管平台是建立资源环境承载能力监测预警体系的关键内容。

4.2 工作着力点

(1)有针对性地深化遥感调查监测。卫星遥感已进入多层、立体、多角度、全方位和全天候的对地观测时代,后续必须带着问题有针对性地开展遥感地质调查。①要充分发挥出遥感可对生态环境本底和动态变化进行长序列观测的优势,紧密围绕全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035年)等方案指出的主要问题,重点对青藏高原生态屏障区(三江源、祁连山、若尔盖-甘南)和黄河重点生态区(黄土高原、秦岭、贺兰山)进行遥感地质调查,尤其是加强对高原湖泊、冰川、湿地、冻土、荒漠化的监测,通过定量模型分析人地关系,科学提出生态保护和修复建议,筑牢西部生态安全屏障。②科学分析矿产资源开发利用面临的国际国内新形势与新挑战,在《战略性矿产找矿行动(2021~2035年)》中发挥遥感先行的探测优势,在南疆和中西亚等区域继续开展遥感+地质+地球化学的“空地一体”快速勘查技术方法体系示范,形成快捷、简易、有效的方法予以推广,尤其是加强对境外勘查中蚀变矿物信息遥感提取方法和找矿应用模型的研究。③以自然保护区为重点,利用多源遥感技术监测秦

岭、祁连山等地矿山恢复治理、大中型绿色矿山建设、生态空间转用等活动引起的地质环境变化,在国土安全底线思维下利用遥感技术综合分析、评估、优化寒区旱区的国土空间利用和绿色发展方式,构建智能化空间优化模型和动态信息监管平台,并提出对策建议助力美丽西部建设。

(2)创新和突破智能提取地学信息的关键技术。未来工作中首要任务是不断从理论和方法上对遥感地质技术进行创新,突破定量遥感研究与应用中的关键技术问题。①继续以西北特殊景观区自然资源遥感探测与监测为基础,加强光谱学等理论研究,研究多源卫星时空谱融合遥感智能解译技术,改进和创新地质信息的遥感提取算法,完善天-空-地一体化对地探测技术体系的建设。②要紧抓高光谱发展机遇,发展基于谱遥感的大地体检技术、时空谱联合自然资源质量与生态修复监测技术、国土空间治理遥感监测与分析技术,并以时空信息、空间分析和区域建模为支撑构建绿色发展评估体系、优化国土空间的地学指标体系及可视化表达方法体系。③紧跟国际前沿,研究高精度、多频次、全谱段支持下遥感智能监测和模拟预测与大数据、深度学习、北斗等新技术的融合,提高地质灾害监测预警、基础地质填图、蚀变矿物信息提取等方向的应用水平。

(3)构建并完善西北遥感地质的产学研用体系。未来的工作需要构建一个内外部循环促进的新发展格局。①依托“中国遥感应用协会黄河流域高质量发展遥感分会”“中国-上合组织地学研究中心卫星遥感应用中心”等平台,深入同地方沟通实际应用需求,并通过项目历练等过程不断提高科技人员的自身业务实力。②拓展交流研讨合作,尤其是加强与中科院、国内外高校、研究机构及企事业单位的交流学习,建立优势互补的长效合作机制,发挥各自优势联合申报国家和省部级科研平台及项目。③积极参与竞争性项目的申报,逐步通过多方合作和市场竞争,增强科研转化能力和服务竞争力。④不断培养跨学科团队与人才,产出有西北特色的调查研究成果,推动遥感地质的产学研用体系建设,逐步提高遥感地质成果的影响力和话语权。

5 结论

(1)遥感技术在西北特殊景观区地质调查中发

挥了重要作用,为快速勘查资源能源、保护修复地质环境、监测预警地质灾害等工作提供了有力支撑,是一种经济可行且能起到事半功倍效果的技术方法,应继续加速遥感技术在地学各个领域的示范应用与成果转化。

(2)通过实例验证发现,遥感技术在多源遥感数据的融合同化与地学协同应用、地学信息量化与智能化提取、地学现象分析预测模型机理等方面还存在技术短板与挑战,需要进一步融入大数据、云计算、人工智能等信息技术,就遥感地质学科发展与应用的关键技术展开机理研究和方法创新。

(3)公益性遥感地质调查工作需要当好地质转型先锋军,面向西北生态安全、能源资源安全、国土空间安全等区域协调发展需求,构建并完善西北遥感地质的产学研用一体化体系,快速有效地支撑服务西北地区山水林田湖草沙冰一体化保护修复、矿产资源开发集中区综合整治、新能源战略矿产勘查、资源环境承载规模测算预警等新时代自然资源工作。

致谢:谨以此文庆祝中国地质调查局西安地质调查中心成立 60 周年。本文介绍的“遥感技术在西北地质调查中的应用及展望”成果是西安地质调查中心集体智慧的结晶,撰写中得到了中心领导、各业务处室及任广利、辜平阳、丁辉、金谋顺、李政国、李文明、乔耿彪等多位同事的大力支持和帮助,李志忠、刘拓、伍跃中、雷学武、魏锦萍等专家给予了精心指导,在此向大家表示衷心感谢!

参考文献(References):

车向红,冯敏,姜浩,等. 2000—2013 年青藏高原湖泊面积 MODIS 遥感监测分析[J]. 地球信息科学学报,2015, 17(01):99-107.

CHE Xianghong, FENG Min, JIANG Hao, et al. Detection and Analysis of Qinghai-Tibet Plateau Lake Area from 2000 to 2013[J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(01): 99-107.

陈昌礼,刘纪选. 地矿部遥感地质工作的回顾与展望—庆祝地质矿产部成立 40 周年[J]. 国土资源遥感,1992,(3): 5-8.

CHEN Changli, LIU Jixuan. Review and prospect of remote sensing geological work of the Ministry of Geology and

Mineral Resources-celebrating the 40th anniversary of the establishment of the Ministry of Geology and Mineral Resources [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1992, (3): 5-8.

丁辉,张茂省,朱卫红,等. 黄土滑坡高分辨率遥感影像识别——以陕西省延安市地区为例[J]. 西北地质,2019, 52(03):231-239.

DING Hui, ZHANG Maosheng, ZHU Weihong, et al. High Resolution Remote Sensing for the Identification of Loess Landslides: Example from Yan'an City[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(03): 231-239.

董新丰,甘甫平,李娜,等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报,2020,24(4):454-464.

DONG Xinfeng, GAN Fuping, LI Na, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 454-464.

方洪宾,赵福岳,路云阁,等. 青藏高原生态地质环境遥感调查研究[J]. 国土资源遥感,2007,(04): 61-65.

FANG Hongbin, ZHAO Fuyue, LU Yunge, et al. Remote Sensing Survey of Ecological and Geological and Environmental Factors in Qinhai-Tibetan plateau[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, (04): 61-65.

甘甫平,李万伦,闫柏琨,等. 高光谱遥感地质作用建模及应用[M]. 北京:科学出版社,2017.

GAN Fuping, LI Wanlun, YAN Bokun, et al. Modeling and application of hyperspectral remote sensing geological processes [M]. Beijing: Science Press, 2017.

高婷,韩海辉,杨敏,等. 基于遥感技术的国土遥感综合调查方法研究——以林地资源为例[A]. 第十五届全国数学地质与地学信息学术研讨会,2016,44-47.

GAO Ting, HAN Haihui, YANG Min, et al. Research on Comprehensive Survey Method of Land Based on Remote sensing Technology—A Case for Forestland Resources [A]. The 15th National Symposium on Mathematical Geology and Geo-information, 2016, 44-47.

辜平阳,陈瑞明,查显峰,等. 高山峡谷区 1:50 000 地质填图技术方法探索与实践——以新疆乌什北山为例[J]. 地质力学学报,2016,22(4):837-855.

GU Pingyang, CHEN Ruiming, CHA Xianfeng, et al. Exploration and Practice of 1:50 000 Geological Mapping Techniques for Alpine-Gorge Area: A Case Study in Beishan Area of Wushi, Xinjing[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(4): 837-855.

- 韩海辉,高婷,易欢,等. 基于变电分析法提取地势起伏度——以青藏高原为例[J]. 地理科学,2012,32(1): 101-104.
- HAN Haihui, GAO Ting, YI Huan, et al. Extraction of Relief Amplitude Based on Change Point Method: A Case Study on the Tibetan Plateau[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 101-104.
- 韩海辉,王艺霖,李健强,等. 雷达地形测绘 DEM 用于青藏高原地貌分类[J]. 遥感信息,2015,30(4):43-48.
- HAN Haihui, WANG Yilin, LI Jianqiang, et al. Classification of Tibetan Plateau Landform Using SRTM - DEM [J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(4): 43-48.
- 韩海辉,王艺霖,李健强,等. 资源三号卫星在地质灾害调查中的应用对比——以宝鸡黄土区为例[J]. 遥感信息, 2016b,31(02):69-74.
- HAN Haihui, WANG Yilin, LI Jianqiang, et al. Application Contrast of ZY-3 Satellite in Geological Hazard Survey: A Case Study of Baoji Loess Areas[J]. Remote Sensing Information, 2016b, 31(02): 69-74.
- 韩海辉,王艺霖,任广利,等. 基于 ASTER 数据的北山方山口地区蚀变矿物提取与找矿应用[J]. 遥感技术与应用, 2016a,31(2):368-377.
- HAN Haihui, WANG Yilin, REN Guangli, et al. Extraction and Application of Altered Mineral in Prospecting from ASTER Data in Fangshankou, Beishan [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016a, 31(2): 368-377.
- 韩海辉,王艺霖,任广利,等. 遥感蚀变异常非线性分析方法研究—以北山新、老金厂为例[J]. 国土资源遥感,2017a, 29(1):43-49.
- HAN Haihui, WANG Yilin, REN Guangli, et al. Nonlinear Analysis Method for Remote Sensing Alteration Anomalies: A Case Study of Xinjinchang and Laojinchang in Beishan[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017a, 29(1): 43-49.
- 韩海辉,王艺霖,杨敏,等. 分维变点法在遥感蚀变异常提取中的应用[J]. 国土资源遥感,2017b,29(3):137-142.
- HAN Haihui, WANG Yilin, YANG Min, et al. Application of Fractal Dimension-Change Point Method to the Extraction of Remote Sensing Alteration Anomaly[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2017b, 29(3): 137-142.
- 韩海辉. 基于多源遥感数据的北山方山口地区遥感蚀变矿物提取与找矿应用研究岩矿波谱数据分析与信息提取方法研究[D]. 西安:长安大学,2018b.
- HAN Haihui. Study on the Extraction and Application of Altered Mineral in Prospecting from Multi-Source Remote Sensing Data in Fangshankou, Beishan [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018b.
- 韩海辉,王艺霖,张转,等. 东昆仑浅覆盖区遥感蚀变异常提取与分析[J]. 遥感信息,2018a,33(4):72-79.
- HAN Haihui, WANG Yilin, ZHANG Zhuan, et al. Extraction and Analysis of Remote Sensing Alteration Anomaly at Shallow Loess Covering Area in East Kunlun[J]. Remote Sensing Information, 2018a, 33(4): 72-79.
- 韩海辉,王艺霖,张转,等. 一种新的高光谱遥感蚀变矿物提取算法—MSSSt 相似光谱匹配组合法[J]. 遥感信息, 2019,34(5):21-28.
- HAN Haihui, WANG Yilin, ZHANG Zhuan, et al. A New Spectral Matching Method for Altered Mineral Identification from Hyperspectral Remote Sensing-MSSSt [J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(5): 21-28.
- 韩海辉,王艺霖,任广利,等. 几种高光谱分析法在蚀变矿物信息提取中的对比分析[J]. 西北地质,2020,53(4): 223-234.
- HAN Haihui, WANG Yilin, REN Guangli, et al. A Comparison Analysis of Several Hyperspectral Methods in the Extraction of Altered Minerals: A Case Study of Laojinchang in Beishan Area [J]. Northwestern Geology,2020, 53(4): 223-234.
- 金谋顺,高永宝,李侃,等. 伟晶岩型稀有金属矿的遥感找矿方法——以西昆仑大红柳滩地区为例[J]. 西北地质, 2019,52(04):222-231.
- JIN Moushun, GAO Yongbao, LI Kan, et al. Remote Sensing Prospecting Method for Pegmatite Type Rare Metal Deposit: Taking Dahongliutan Area in Western Kunlun for Example [J]. Northwestern Geology, 2019, 52(04): 222-231.
- 鞠建华. “双碳”目标背景下矿业发展新机遇与实现路径[J]. 中国矿业,2022,31(1):1-5.
- JU Jianhua. New Opportunities and Implementation Path of Mining Development Under the Background of “Double Carbon” Goal[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(1): 1-5.
- 李健强,任广利,高婷,等. 库浪那古岩群铁矿找矿潜力浅析——以西昆仑大同乡一带为例[J]. 西北地质,2015, 48(3):289-298.
- LI Jianqiang, REN Guangli, GAO Ting, et al. Iron Deposit Prospecting Potential in the Kulangnagu Rock Group: a

- Case Study on the Datong Township of West Kunlun Area [J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48 (3): 289-298.
- 李健强, 韩海辉, 高婷, 等. 资源三号卫星在地质灾害调查评价中的应用——以宝鸡黄土区为例[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(s1): 73-80.
- LI Jianqiang, HAN Haihui, GAO Ting, et al. The application of ZY-3 satellite to geological hazards survey and evaluation: A case study of Baoji loess area[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2017, 29(s1): 73-80.
- 李满春, 陈振杰, 周琛, 等. 面向“一张图”的国土空间规划数据库研究[J]. *中国土地科学*, 2020, 34(05): 69-75.
- LI Manchun, CHEN Zhenjie, ZHOU Chen, et al. “One Map” Oriented Database Investigation for Territorial Space Planning [J]. *China Land Science*, 2020, 34 (05): 69-75.
- 李娜, 董新丰, 甘甫平, 等. 资源一号 02D 卫星高光谱数据地质调查应用评价[J]. *航天器工程*, 2020, 29(06): 186-191.
- LI Na, DONG Xinfeng, GAN Fuping, et al. Application Evaluation of ZY-1-02D Satellite Hyperspectral Data in Geological Survey [J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 29(06): 186-191.
- 李少英, 刘小平, 黎夏, 等. 土地利用变化模拟模型及应用研究进展[J]. *遥感学报*, 2017, 21(3): 329-340.
- LI Shaoying, LIU Xiaoping, LI Xia, et al. Simulation model of land use dynamics and application: Progress and prospects[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21 (3): 329-340.
- 李文渊, 董福辰, 姜寒冰, 等. 西北地区重要金属矿产成矿特征及其找矿潜力[J]. *西北地质*, 2006, 39(2): 1-16.
- LI Wenyuan, DONG Fuchen, JIANG Hanbing, et al. Metallogenetic Characteristics and Prospecting Potential of Major Metallic Minerals in Northwest China[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(2): 1-16.
- 李政国, 隋立春, 张茂省, 等. 基于遥感图像分割和形态学的黄土滑坡后壁自动提取方法[J]. *地质通报*, 2015, 34 (11): 2132-2137.
- LI Zhengguo, SUI Lichun, ZHANG Maosheng, et al. Identification and extraction of loess landslide scarp based on remote sensing image segmentation and mathematic morphology method[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(11): 2132-2137.
- 李政国, 唐亚明, 薛强等. 基于遥感影像和 DEM 的后退式滑坡破坏黄土台塬进程及原因分析[J]. *灾害学*, 2018, 33 (04): 108-113.
- LI Zhengguo, TANG Yaying, XUE Qiang, et al. Process and Cause Analysis of Loess Landslide in Landslide Area Based on Remote Sensing Image and DEM [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(04): 108-113.
- 李志忠, 洪增林, 刘拓, 等. 土地与地质灾害遥感监测服务黄河中上游高质量发展[J]. *卫星应用*, 2021a, (03): 33-41.
- LI Zhizhong, HONG Zenglin, LIU Tuo, et al. Remote Sensing Monitoring of Land and Geological Hazards for High-quality Development in the upper and middle Reaches of the Yellow River [J]. *Satellite Application*, 2021a, (03): 33-41.
- 李志忠, 穆华一, 刘德长, 等. “遥感先行”服务自然资源调查技术变革与调整[J]. *地质与资源*, 2021b, 30 (02): 153-160.
- LI Zhizhong, MU Huayi, LIU Dezhong, et al. REMOTE SENSING FIRST: Service for the Technological Revolution and Innovation in Natural Resources Survey[J]. *Geology and Resources*, 2021b, 30(02): 153-160.
- 李志忠, 汪大明, 王建华, 等. “谱遥感”与地球体检计划[J]. *地球科学*, 2021c, 46(09): 3352-3364.
- LI Zhizhong, WANG Daming, WANG Jianhua, et al. Application of Spectral Remote Sensing Technology in Inspection of the Earth [J]. *Earth Science*, 2021c, 46 (09): 3352-3364.
- 李志忠, 孙萍萍, 陈霄燕, 等. 基于卫星遥感技术的绿色发展指标——以中国西部地区为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2022, 44.
- LI Zhizhong, SUN Pingping, CHEN Xiaoyan, et al. Green Development Index Based on Satellite Remote Sensing Technology: A Case Study in the Western China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44.
- 刘拓, 段星星, 赵禹, 等. 西北五省耕地 1: 25 万土地质量地球化学调查项目成果报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2018.
- 聂洪峰, 方洪宾, 杨金中, 等. 国土遥感综合调查工程总体目标的设计与实现[J]. *中国地质调查*, 2016, 3(05): 1-6.
- NIE Hongfeng, FANG Hongbin, YANG Jinzhong, et al. Design and Implement for Overall Target of Land Remote Sensing Integrated Survey Engineering [J]. *Geological Survey of China*, 2016, 3(05): 1-6.
- 聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 生态地质调查工程进展与主要成

- 果[J]. 中国地质调查, 2021, 8(01): 1-12.
- NIE Hongfeng, XIAO Chunlei, DAI Meng, et al. Progresses and Main Achievements of Ecogeological survey project[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(01): 1-12.
- 欧阳志云, 王桥, 郑华, 等. 全国生态环境十年变化(2000—2010年)遥感调查评估[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 462-466.
- OUYANG Zhiyun, WANG Qiao, ZHENG Hua, et al. National Ecosystem Survey and Assessment of China (2000—2010)[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(4): 462-466.
- 任广利, 范廷宾, 余元军, 等. 多源遥感信息在喀喇昆仑火烧云一带找矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2017a, 53(06): 1164-1173.
- REN Guangli, FAN Tingbin, YU Yuanjun, et al. Application of Multi-Source Remote Sensing Information to Metallogenic Prediction in the Huoshaoyun Region of Karakorum, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2017a, 53(06): 1164-1173.
- 任广利, 杨敏, 李健强, 等. 高光谱蚀变信息在金矿找矿预测中的应用研究——以北山方山口金矿线索为例[J]. 国土资源遥感, 2017b, 29(03): 182-190.
- REN Guangli, YANG Min, LI Jianqiang, et al. Application of hyperspectral alteration information to gold prospecting: A case study of Fangshankou area, Beishan[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017b, 29(03): 182-190.
- 任广利, 梁楠, 张转, 等. 高光谱标志性蚀变矿物组合在找矿预测中的应用研究——以东昆仑东—西大滩一带金矿床为例[J]. 西北地质, 2018, 51(02): 93-107.
- REN Guangli, LIANG Nan, ZHANG Zhuan, et al. Iconic Altered Mineral Assemblages on Prospecting Prediction by Hyperspectral Remote Sensing: Example from the Gold Deposits in Dongdatan and Xidatan Region of East Kunlun Mountain[J]. Northwestern Geology, 2018, 51(02): 93-107.
- 孙永彬, 王瑞军, 魏本赞, 等. 高光谱遥感地空综合预测方法在新疆卡拉塔格地区铜金矿床找矿中的应用[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 178-191.
- SUN Yongbin, WANG Ruijun, WEI Benzan, et al. The application of hyperspectral remote sensing ground-air integrated prediction method to the copper gold deposit prospecting in Kalatag area, Xinjiang[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 178-191.
- 孙雨, 赵英俊, 李瀚波, 等. 青海省都兰县阿斯哈金矿区 HySpex 高光谱矿物填图及其找矿意义[J]. 地质学报, 2015, 89(01): 195-203.
- SUN Yu, ZHAO Yingjun, LI Hanbo, et al. HySpex Hyperspectral Mineral Mapping of Asisha Gold Ore District in Dulan County, Qinghai Province and Its Prospecting Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(01): 195-203.
- 唐文州. 我国遥感地质工作的现状和近期展望[J]. 国土资源遥感, 1998, (2): 24-32.
- TANG Wenzhou. Current situation and prospect of remote sensing geological work in China [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1998, (2): 24-32.
- 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, 2010, (1): 1-13.
- WANG Runsheng, GAN Fuping, YAN Bokun, et al. Hyperspectral Mineral Mapping and Its Application[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, (1): 1-13.
- 王润生, 陈微, 杨苏明, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1699-1743.
- WANG Runsheng, CHEN Wei, YANG Suming, et al. Geological Remote Sensing Technology and Its Application [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.
- 伍跃中, 谭克龙, 马贺平. 西部遥感发展现状与前景展望[J]. 国土资源遥感, 2002, (04): 1-6.
- WU Yaozhong, TAN Kelong, MA Heping. Current Development Situation and Prospects of Remote Sensing in the Western China[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2002, (04): 1-6.
- 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例[J]. 中国地质调查, 2016, 3(04): 55-62.
- YAN Bokun, DONG Xinfeng, WANG Zhe, et al. Mineral Information Extraction Technology by Airborne Hyperspectral Remote Sensing and Its Application Progress: An Example of Mineralization Belts of Western China [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(04): 55-62.
- 阎晓娟, 高婷, 杨军录. 制图表达在土地利用图编制中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(3): 166-169.
- YAN Xiaojuan, GAO Ting, YANG Junlu. The Application of Representation in the Land Use Map Compilation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, 36

(3): 166-169.

阎晓娟,王鹏,高婷. 土地变更调查之管理信息标注入库探讨[J]. 测绘与空间地理信息,2015,38(6):106-108.

YAN Xiaojuan, WANG Peng, GAO Ting. Discussion about the Management Information of the Land Use Change Survey[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2015, 38(6): 106-108.

《遥感学报》. “2021 年度中国遥感领域十大事件”评选结果出炉[EB/OL]. 2022.05.30. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzU2MTM4MTYzOQ==&mid=2247538357&idx=1&sn=ec15986341600614cc622b10d457b0ff&chksm=fc7bbeddc0c37cb2decae4542030fe090b940d1f20432d309be2932c4adb9d9455e29a8d8ea&token=1146840731&lang=zh_CN#rd.

杨金中,方洪宾,张玉君,等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. 国土资源遥感,2003,(3): 50-53.

YANG Jinzhong, FANG Hongbin, ZHANG Yujun, et al. Remote Sensing Anomaly Extraction in Important Metallogenic Belts of Western China[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, (3): 50-53.

杨金中,秦绪文,聂洪峰,等. 全国重点矿区矿山遥感监测综合研究[J]. 中国地质调查,2015,2(4):24-30.

YANG Jinzhong, QIN Xuwen, NIE Hongfeng, et al. Comprehensive Research on Remote Sensing Monitoring of the National Concentration Zones of the Important Mine [J]. Geological Survey of China, 2015, 2(4): 24-30.

杨金中,荆青青,聂洪峰. 全国矿产资源开发状况遥感监测工作简析[J]. 矿产勘查,2016b,7(2):359-363.

YANG Jinzhong, JING Qingqing, NIE Hongfeng. Analysis of the mineral resource development status of remote sensing monitoring in national land[J]. Mineral Exploration, 2016b, 7(2): 359-363.

杨金中,王海庆,陈微. 西昆仑成矿带高分辨率遥感调查主要进展与成果[J]. 中国地质调查,2016a,3(5):7-12.

YANG Jinzhong, WANG Haiqing, CHEN Wei. Main Progress and Achievements of High Spatial Resolution Remote Sensing Survey on West Kunlun Metallogenic Belt[J]. Geological Survey of China, 2016a, 3(5): 7-12.

杨敏,李健强,高婷,等. WorldView-2 数据在地质调查中的应用[J]. 现代矿业,2012,27(6):35-37.

YANG Min, LI Jianqiang, GAO Ting, et al. Uses of WorldView-2 Multispectral Data in Geological Survey

[J]. Morden Mining, 2012, 27(6): 35-37.

易欢,李健强,韩海辉,等. 遥感技术在阿尔金贝壳滩地区矿产资源综合调查中的应用[J]. 中国地质调查,2016,3(04):1-5.

YI Huan, LI Jianqiang, HAN Haihui, et al. Application of Remote Sensing in Integrated Survey on Mineral Exploration in Beketan, Altyn[J]. Geological Survey of China, 2016, 3(04): 1-5.

尹立河,张俊,王哲,等. 西北内陆河流域地下水循环特征与地下水资源评价[J]. 中国地质,2021,48(4): 1094-1111.

YIN Lihe, ZHANG Jun, WANG Zhe, et al. Groundwater circulation patterns and its resources assessment of inland river catchments in northwestern China[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1094-1111.

张茂省,胡炜,孙萍萍,等. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J]. 地球环境学报,2016,7(4):323-334.

ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides[J]. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4): 323-334.

张茂省,贾俊,王毅,等. 基于人工智能(AI)的地质灾害防控体系建设[J]. 西北地质,2019,52(2):103-116.

ZHANG Maosheng, JIA Jun, WANG Yi, et al. Construction of Geological Disaster Prevention and Control System Based on AI[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 103-116.

张茂省,刘江,董英,等. 国土空间优化中的关键地质要素分析与“双评价”方法[J]. 地学前缘,2020,27(4): 311-321.

ZHANG Maosheng, LIU Jiang, DONG Ying, et al. Analysis of key geological factors and the “dual evaluation” method for land space optimization[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(4): 311-321.

张微,金谋顺,张少鹏,等. 高分遥感卫星数据在东昆仑成矿带找矿预测中的应用[J]. 国土资源遥感,2016,28(2): 112-119.

ZHANG Wei, JIN Moushun, ZHANG Shaopeng, et al. Application of High Resolution Remote Sensing Data to Ore-Prospecting Prediction in East Kunlun Metallogenic Belt[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(2): 112-119.

张玉君,曾朝铭,陈薇. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源

- 遥感, 2003, (2): 44-49+78.
- ZHANG Yujun, CENG Chaoming, CHEN Wei. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM+(TM) data and their application: method selection and technological flow chart[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2003, (2): 44-49+78.
- 郑雄伟, 彭李, 尚坤. 基于国产卫星的遥感地质解译能力评估[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(03): 1-10.
- ZHENG Xiongwei, PENG Bei, SHANG Kun. Assessment of the interpretation ability of domestic satellites in geological remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(03): 1-10.
- 周道静, 徐勇, 王亚飞, 等. 国土空间格局优化中的“双评价”方法与作用[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 814-824.
- ZHOU Daojing, XU Yong, WANG Yafei, et al. Methodology and Role of “Double Evaluation” in Optimization of Spatial Development Pattern[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 814-824.
- 中国遥感应用协会. 2019年度中国遥感领域十大事件[J]. 卫星应用, 2020, (8): 10-12.
- China Association of Remote Sensing Application. Top 10 Events in China remote Sensing field in 2019[J]. Satellite Application, 2020, (8): 10-12.
- Bishop C, Rivard B, De Souza Filho C R, et al. Geological Remote Sensing[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 64: 267-274.
- Gabr S, Ghulam A, Kusky T. Detecting Areas of High-Potential Gold Mineralization Using ASTER Data[J]. Ore Geology Reviews, 2010, 38(1-2): 59-69.
- Li Jianqiang, YI Huan, REN Guangli, et al. High-resolution remote sensing and potential analysis of iron ore prospecting: Taking Datong Township, West Kunlun Area for example[C]. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 46 (2016) 012006. doi: 10.1088/1755-1315/46/1/012006.
- Liu L, Feng J L, Rivard B, et al. Mapping Alteration Using Imagery from the Tiangong-1 Hyperspectral Spaceborne system: Example for the Jintanzi gold Province, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 64: 275-286.
- Son Y S, Kang M K, Yoon W J. Lithological and Mineralogical Survey of the Oyu Tolgoi Region, Southeastern Gobi, Mongolia Using ASTER Reflectance and Emissivity Data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 205-216.
- Tommaso I D, Rubinstein N. Hydrothermal Alteration Mapping Using ASTER Data in the Infiernillo Porphyry Deposit, Argentina[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 32(1-2): 275-290.
- Van der Meer F D, Van der Werff H M A, Van Ruitenbeek F J A, et al. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: A review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 14(1): 112-128.
- Yang Min, Li Jianqiang, Gao Ting, et al. Uses of WorldView-2 Multispectral Data in Extracting Potential Iron Mineralization Zones[C]. International Conference on Applied Science and Engineering Innovation, 2015, 1860-1868.
- Yang Min, Kang Lei, Chen Huaqing, et al. Lithological mapping of East Tianshan area using integrated data fused by Chinese GF-1 PAN and ASTER multi-spectral data[J]. Open Geosciences, 2018, 10(1): 532-543.