

doi: 10.6046/zrzyyg.2022196

引用格式: 王嘉芃,徐建国,沈家晓,等. 德兴铜矿矿山重金属污染修复效果高光谱遥感评价[J]. 自然资源遥感,2023,35(3): 284–291. (Wang J P,Xu J G,Shen J X,et al. Evaluating the remediation effect of heavy metal pollution in the Dexing copper mine based on hyperspectral remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(3):284–291.)

德兴铜矿矿山重金属污染修复效果高光谱遥感评价

王嘉芃^{1,2}, 徐建国³, 沈家晓^{1,2}, 张登荣^{1,2}

(1. 杭州师范大学遥感与地球科学研究院,杭州 311121; 2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室,杭州 311121; 3. 宁波市宇科国土勘测规划设计有限公司,宁波 315000)

摘要:合理快速评价矿山重金属污染修复的效果对于矿山生态恢复与重建治理工作具有重要意义。以德兴铜矿为例,根据野外实测植被光谱,分析矿区区内主要植被的典型光谱特征;根据实验室化验的植被叶片内重金属含量,分析其重金属含量与光谱特征参数红边位置的关系;利用 2003 年和 2009 年 2 景 Hyperion 高光谱卫星数据计算矿区植被的红边位置,推断矿区植被富集重金属的情况,进而评价矿山重金属污染修复的效果。研究结果表明,在典型复垦区 1 号、2 号尾矿库四周重金属污染修复取得了较好的效果;与 2003 年相比,2009 年重金属污染修复整体上取得了一定的成效,大部分区域被修复,但仍有部分新增污染区,需采取修复措施。该方法可快速、合理、大范围地评价矿区重金属污染修复的效果。

关键词:光谱特征;红边位置;重金属污染修复;高光谱;德兴铜矿

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097–034X(2023)03–0284–08

0 引言

矿产资源的大规模开采导致矿山生态环境问题日益突出,尤其是矿山废弃物中含有大量的重金属元素,会严重污染矿区及周边区域的土壤、水质,直接或间接危害人体健康^[1]。近年来,许多国家和企业已逐渐意识到矿山生态环境保护的重要性并开展恢复治理工作^[2–3]。其中,矿山重金属污染修复成效是评判矿区生态环境保护与恢复好坏的重要标准之一^[4–5],因此,寻找一种合理快速高效的矿区重金属污染修复效果的评价方法十分必要。

矿山重金属污染会影响矿山地物组分,从而影响地物的光谱特征^[6]。高光谱遥感技术具有近似连续的地物光谱信息和强大的地物覆盖识别能力,因此成为遥感评价矿山重金属污染修复效果的首选技术方法^[7]。国内外众多学者研究了植被光谱特征变异与重金属含量的关系,大量研究结果均表明,吸收重金属后的植被光谱较正常植被的光谱会发生明显变化,且重金属含量与表征植被光谱特征的参数存在一定的相关关系^[8–16]。

红边位置被越来越多地作为定量表征与植物生理相关的特征光谱与其变异性的特定参量^[17–19]。Pu 等^[20]利用红边位置估算了森林叶面积指数;姚付启等^[21]利用红边参数研究了植被叶绿素含量高光谱估算模型;余宝等^[22]利用红边位置提取了油菜的种植面积;Zhu 等^[23]利用冠层高光谱的红边位置表征植被对有机物“菲”的反应;张佳伟等^[24]利用不同红边位置算法估测玉米叶绿素含量。因此,可以将红边位置作为表征吸收重金属后的植被光谱特征变异参数,利用植被红边位置变化反映矿山重金属含量,进而评估矿山重金属污染修复的效果。

德兴铜矿自 20 世纪 80 年代初就开始生态修复的试验研究,2014 年正式晋升为国家级“绿色矿山”,矿区生态修复取得了很大成效。为了探究利用高光谱遥感技术评价矿山重金属污染修复效果的方法,以德兴铜矿为研究区,根据野外实测植被光谱和实验室化验的植被叶片内重金属含量,分析其重金属含量与光谱特征参数红边位置的关系;以此为基础,利用 Hyperion 高光谱卫星数据计算矿区植被的红边位置,推断矿区植被富集重金属的情况,进而评价矿区重金属污染的生态修复效果。

收稿日期: 2022–05–16; 修订日期: 2022–08–31

基金项目: 国家重点研发计划项目“典型资源环境要素识别提取与定量遥感技术”(编号:2016YFB0501404)资助。

第一作者: 王嘉芃(1991–),女,硕士,工程师,研究方向为遥感生态监测、环境调查评估。Email: 361608279@qq.com。

通信作者: 张登荣(1966–),男,博士,教授,研究方向为地质遥感、GIS 开发应用。Email: 13805747261@126.com。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

德兴铜矿(图1)位于我国江西省东北部德兴市境内,是一座世界级大型斑岩铜矿。受到矿山开采活动的影响,矿区内重金属污染严重^[25]。自20世纪80年代开始,德兴铜矿加强了绿化、尾矿库和废

石场的生态复垦和植物修复工作。如今已成功在纯尾砂上种植了水蜡烛和无叶节节草等植物,使尾砂无覆土植被恢复成为可能,并成功筛选出一批适合在废石场生长的植被;随后,植被复垦覆盖至露天采区边坡、酸性废石堆等地;并且进行了一系列“治水”工程。根据地理国情普查的土地利用数据,研究区内的植被以乔木林为主,植被类型以常绿阔叶林、常绿针叶林和针阔混交林为主^[26]。

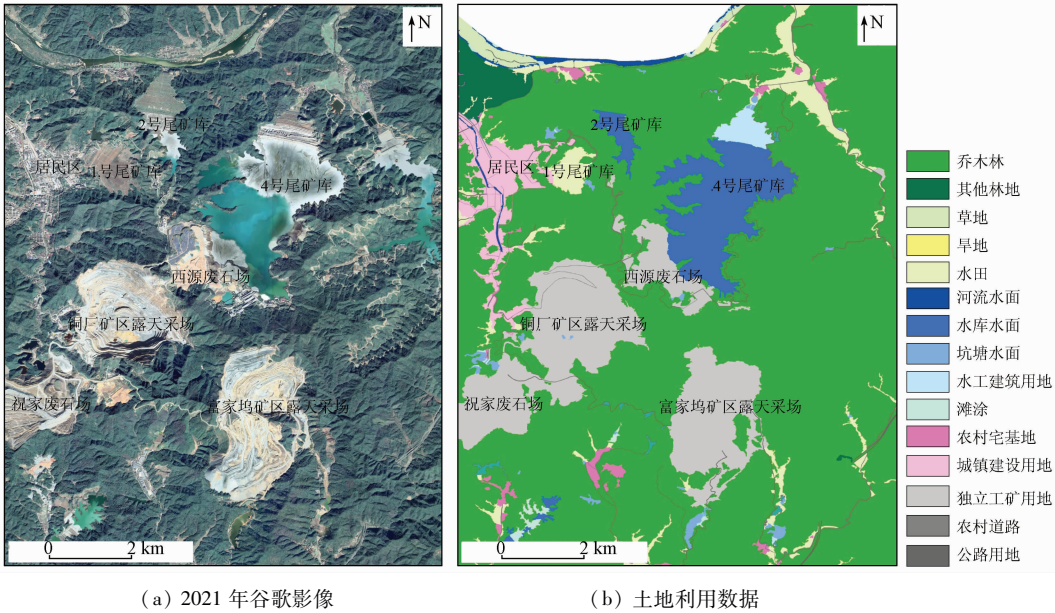


图1 研究区位置
Fig.1 Location of the study area

1.2 数据源及其预处理

1.2.1 野外实测植被光谱数据

野外实测光谱数据为2012年4月15日实测的德兴铜矿矿区的茅草、盐肤木的光谱数据。使用ASD Field Spec 便携式地物光谱仪对研究区内的主要植物(茅草、盐肤木)叶片进行光谱采集,测量波段范围350~1350 nm,光谱分辨率优于8 nm,视场角为25°,实际测量时间为当天9:00—15:00。测量植物叶片光谱前,先将光谱仪预热并进行白板校正;测量时,天空晴朗基本无云,标准光纤探头距离植物叶片1.2 m左右,垂直叶片测量,采样范围约1 m²,每个采样点重复采样10次,以其平均值为该采样点植物叶片的光谱反射率。另外,在远离矿区的无重金属污染区域采集正常植被光谱数据作为背景值。

1.2.2 野外采集植物叶片重金属化验数据

重金属化验数据为2012年4月15日采集的茅草叶片重金属含量数据。野外采集了研究区内典型修复区1号、2号尾矿库及远离矿区的茅草叶片样本,分别用自来水和去离子水冲洗干净,沥干水后在105℃杀青30 min,在60℃的电热干燥箱中烘干至

恒重;研磨后,过100目尼龙筛网,混匀后准确称取4.0 g样品用于灰化法,盐酸溶解提取;其中Cu、Zn和Mn的含量采用火焰原子吸收分光光度法测定,Cd和Pb的含量采用石墨炉法测定,得到茅草叶片样本中各重金属含量化验数据(表1)。

表1 不同尾矿库茅草叶片的重金属含量
Tab.1 Heavy metal content in leaves of thatch
in different tailings reservoirs (mg·kg⁻¹)

采样点	Pb	Cu	Cd	Mn	Zn
1号尾矿库	4.4	19.0	0.15	46	21
2号尾矿库	3.5	12.0	0.10	100	36
背景值	3.1	6.9	0.08	232	25

1.2.3 Hyperion 高光谱遥感数据

高光谱卫星遥感数据为2003年1月12日和2009年4月18日的2景Hyperion数据。本次研究采用的Hyperion数据为L1R级产品,空间分辨率为30 m,242个波段,光谱区间在400~2500 nm,光谱分辨率优于10 nm。在进行信息提取之前需对Hyperion高光谱数据进行预处理,主要包括辐射定标、条纹去除、几何纠正及大气校正。辐射定标采用EO-1使用手册指定的定标系数,将影像的DN值转化

为绝对辐射亮度值；检查每个波段数据质量时发现第 9—12 波段条纹严重,采用低通滤波方法去除条纹,抑制噪声；将 2 景 Hyperion 数据与已校正的 Landsat ETM 数据进行配准,保证几何纠正的精度在半个像元以内；利用 USGS 发布的 Hyperion 高光

谱图像大气纠正算法 (FLAASH) 进行大气校正。经过预处理后 2009 年的 Hyperion 数据如图 2 (a) 所示,图中十字位置的大气校正后植被波谱曲线如图 2(b) 所示。

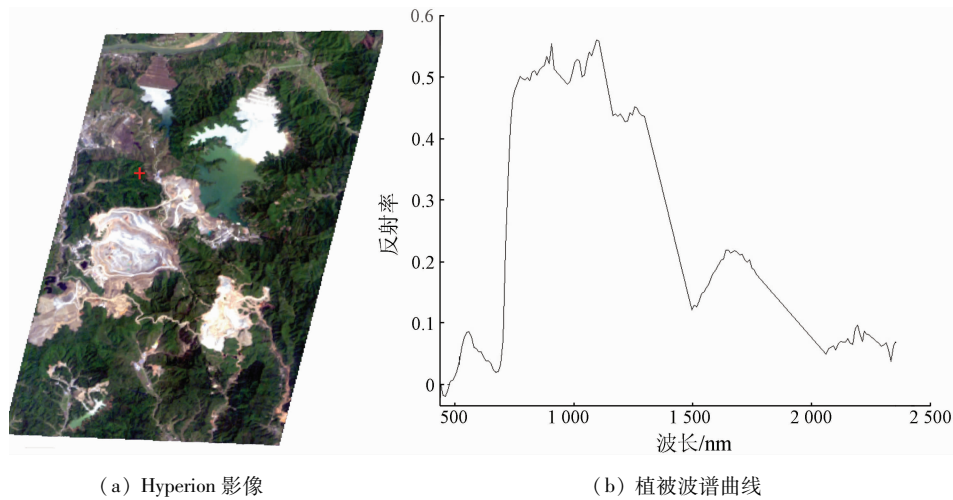


图 2 Hyperion 影像预处理后效果

Fig. 2 Hyperion image after atmospheric correction

2 研究方法

依据前人相关研究^[9],选定红边位置作为表征植被光谱特征变异的参量,利用红边位置变化分析矿区植被重金属含量,进而反映矿区重金属污染修复的效果。首先利用矿区植被野外实测的光谱数据分析其光谱特征,计算实测点红边位置,分析红边位置与叶片重金属含量的关系,佐证可以利用红边位置反映矿山重金属污染修复效果；然后利用 2 景不同时间相的 Hyperion 高光谱遥感数据计算研究区植被红边位置,分析不同红边位置计算方法的适用性,并确定表征正常情况的红边位置阈值；最后比较 2 景影像间红边位置变化,依据重金属含量与红边位置变化关系分别推断 2 景影像中矿区重金属污染修复的效果。总体技术路线如图 3 所示。植被红边位置计算方法对结果有较大影响^[27]。目前红边位置的计算方法主要分为 2 类：一类是基于导数光谱,如最大一阶导数法、拉格朗日法和线性外推法等；另一类则基于曲线拟合,如四点插值法、倒高斯模型法和多项式拟合法等^[27-28]。薛利红等^[27]认为最大一阶导数法与叶绿素含量的关系存在不连续性,拉格朗日法和倒高斯模型法在一定程度上存在对高叶绿素含量的饱和现象；张永贺等^[28]的研究表明五次多项式拟合法提取红边位置估算叶绿素含量的精度最高,但是算法过于复杂,四点内插法估算精度次

之,但计算简便。Pu 等^[20]研究利用拉格朗日法、四点插值法、多项式拟合和倒高斯模型 4 种方法从 Hyperion 影像中提取红谷位置和红边位置,结果表明,四点插值法是提取 Hyperion 影像中这 2 个参数的最佳方法。因此,本文采用四点插值法^[20,28],选用中心波长值为 671.02 nm,701.55 nm,742.25 nm 以及 782.95 nm 的 4 个波段,提取 Hyperion 数据中植被的红边位置。

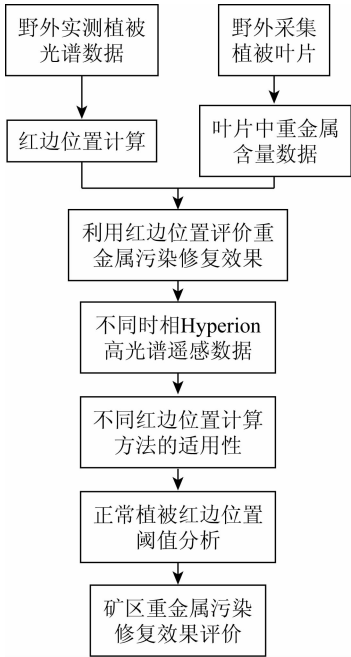


图 3 总体技术路线

Fig. 3 The overall technical route

具体过程如下:首先利用归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI) $NDVI_{705} > 0$ 剔除矿区的水体,公式为:

$$NDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705}), \quad (1)$$
式中 R_{705} 和 R_{750} 分别为波长为 705 nm 和 750 nm 处的反射率值。然后利用绿光波段(550 nm)反射率不小于红光波段(680 nm)反射率(即 $R_{550}/R_{680} \geq 1$)的原则剔除矿区陆地非植被像元;最后利用四点插值法^[20,28]计算剩余植被像元的红边位置。

3 结果与分析

3.1 野外实测植被光谱数据特征分析

图 4 中 1 号和 2 号尾矿库内茅草及盐肤木 2 种植物的地面光谱均出现不同程度的“蓝移”现象,波谱变异特征明显:叶绿素强反射峰反射增强,红谷吸收减弱;700 nm 附近的反射率上升的斜率减小,红边出现 4 ~ 19 nm 的“蓝移”现象,该特征在图 4

茅草的表现中尤为显著,这是植物重金属含量过高的典型变异特征。利用四点插值法可知,1 号和 2 号尾矿库茅草的红边位置分别是 712 nm 和 709 nm,背景值的红边位置为 721 nm,1 号尾矿库茅草红边位置蓝移 9 nm,2 号尾矿库茅草红边位置蓝移 12 nm;同理,1 号和 2 号尾矿库盐肤木的红边位置分别是 716 nm 和 714 nm,背景值的红边位置为 720 nm,1 号尾矿库盐肤木红边位置蓝移 4 nm,2 号尾矿库盐肤木红边位置蓝移 6 nm。由表 1 可知,1 号和 2 号尾矿库中茅草叶片的铜重金属含量远远超过了作为背景值叶片的含量,同时茅草光谱的红边位置明显小于作为背景值正常生长植被光谱的红边位置。结合前人研究^[9],植被光谱红边位置变化与植被重金属含量密切相关,一般情况下红边位置越接近正常值,重金属含量越低,反之,红边位置越小,重金属含量越高,这为进一步利用 Hyperion 高光谱卫星遥感数据提取红边位置,评价研究区重金属污染修复效果奠定了实验基础。

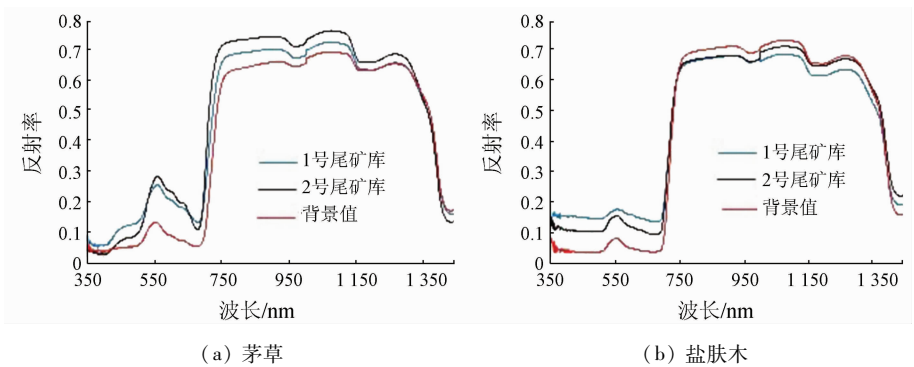


图 4 茅草和盐肤木反射波谱曲线
Fig. 4 Spectral curves of thatch and rhus chinensis

3.2 Hyperion 影像时相对红边位置计算结果的影响分析

2003 年和 2009 年 Hyperion 影像的时相相差 3 个月,为了分析时相差异对本文结果的影响,选取了研究区内相对均匀分布的 2 585 个正常植被像元样本数据,利用四点插值法计算正常植被像元的红边位置,分析 2 幅影像中正常植被的红边位置差异。结果表明,2003 年正常植被红边位置均值为 722 nm,2009 年正常植被红边位置均值为 724 nm,相比受重金属污染产生的红边位置蓝移程度而言,2 幅影像因时相不同导致的红边位置变化差异不大。这可能与研究区处于亚热带湿润季风区,且以常绿树种为主要植被类型有关。马东辉等^[29]指出冬季常绿植被具有相似的光谱特征,叶绿素变化稳定的常绿植被,其光谱随季节变化较为稳定;吴继友等^[30]指出红边特征随季节的长期大趋

势变化与叶绿素含量随季节的大趋势变化相关,从春季 4 月底—6 月中旬,红边位置呈微弱上升趋势。由于 2003 年影像时间为 1 月 12 日,2009 年影像时间为 4 月 18 日,1 月初—4 月初同属植物生长的萌芽期,叶绿素含量变化较小,因此对研究区内常绿植被的光谱特征影响也较小。

3.3 矿区重金属污染修复效果高光谱遥感评价

利用四点插值法分别计算了 2003 年和 2009 年 Hyperion 高光谱数据的红边位置,并以 Hyperion 影像正常植被样本计算的红边位置最小值作为区分红边位置变异的阈值。经统计分析,2003 年和 2009 年红边位置变异的阈值为 718 nm,将红边位置计算结果进行决策树分类得到最终红边位置信息(图 5),图 5 中红色部分代表红边位置变异区,绿色部分代表红边位置正常区,黑色部分为无植被覆盖区。

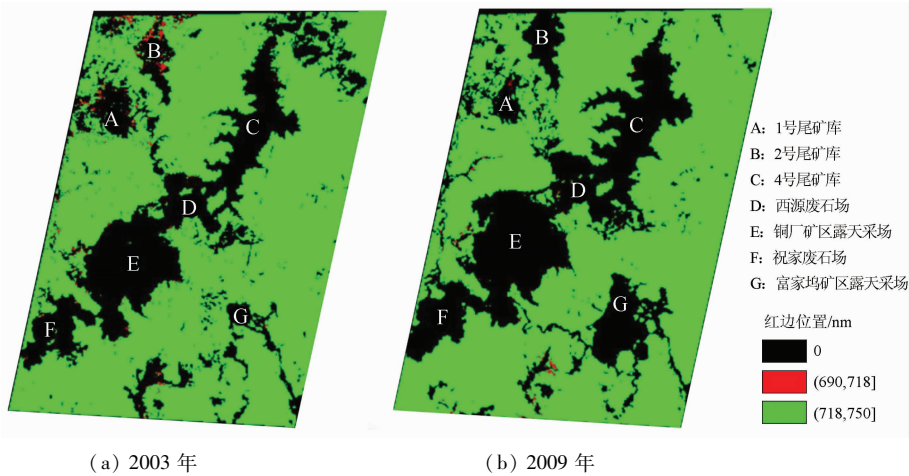


图 5 2003 年和 2009 年德兴铜矿植被红边位置
Fig.5 Red edge position of vegetation in Dexing copper mine in 2003 and 2009

3.3.3.1 典型复垦区

1 号和 2 号尾矿库是德兴铜矿典型的复垦区。从图 5 中可看出,相比 2003 年,2009 年 1 号和 2 号尾矿库四周红边位置变异明显减少,2 个尾矿库周围的植被覆盖明显增多。甘甫平等^[25]利用 Hyperion 数据也提取了 2003 年德兴铜矿植被污染信息(红边位置信息),从其研究结果中可清晰看出,2003 年 1 号尾矿库大部分区域、2 号尾矿库周边植被的红边位置均在 705 ~ 707 nm,这些区域受到重金属的严重污染;从本次研究结果中也可以看到,与 2003 年甘甫平等^[25]提取的结果相比,2009 年矿区红边位置变小区域明显减少。这在一定程度上说明了 1 号和 2 号尾矿库的重金属污染修复效果较好。

这一结果与 2 个尾矿库开展生态修复与土地复垦工作密不可分。1 号尾矿库 1986 年停止使用,开始进行生态修复与土地复垦研究。早在 1999 年,张海星等^[31]就在尾矿库边坡 3 hm²试验地进行生态恢复模式试验,百喜草、无叶节节草和弯叶画眉草等 7 种先锋草本植物已在尾砂上定居生长;2001 年,杨修等^[32]也在 1 号尾矿库库面纯尾砂立地进行植被恢复与重建试验,研究了矿区自然植被的次生演替序列和 13 种试验先锋草种的优劣势,也选出了水蜡烛和假俭草等 12 种优良的试验先锋草种。截止到 2010 年,1 号尾矿库已复垦面积达到 0.775 3 km²,约占总面积的 93%;2 号尾矿库仍处于工作状态,已复垦面积为 0.579 3 km²,约占 2 号尾矿库总面积的 48%。从典型复垦区来看,矿区重金属污染修复取得了较好的成效。

3.3.3.2 红边位置变异程度

利用决策树方法对 2003 年和 2009 年的红边位置计算结果进行分类,并分别统计每个红边位置区

间内的像元个数。文中选取了 700 ~ 716 nm 红边位置变异范围,以 1 nm 为间隔,比较每个区间内 2003 年和 2009 年红边位置变异像元个数(图 6),红边位置越小,重金属污染程度越高,进而分析重金属污染修复在各个污染程度的效果。从图 6 中可知,在 700 ~ 716 nm 每个 1 nm 区间内,2009 年的红边位置变异像元个数均少于 2003 年,这不仅说明了 6 a 来重金属污染修复取得了较好效果,而且反映了 6 a 间的修复对不同程度的重金属污染都取得了一定的成效。

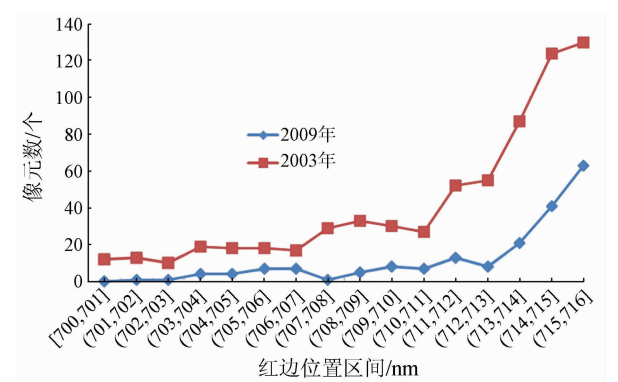


图 6 2003 年和 2009 年相同红边位置区间内像元个数对比
Fig.6 Comparisons of the number of pixels in the same red edge position intervals in 2003 and 2009

3.3.3.3 红边位置变异区域变化

对 2003 年和 2009 年红边位置变异(690 ~ 718 nm)区进行遥感解译,运用空间分析功能,获得了 2009 年相比 2003 年重金属污染已修复区域和新增污染待修复区(图 7)。从图 7 可看出,矿区重金属污染已修复区多集中于 1 号尾矿库四周、2 号尾矿库四周、西源废石场和铜厂矿区露天采场东南侧,这与德兴铜矿已开展生态修复工作的主要区域相吻合。而新增的重金属污染区则分布于铜厂矿区露天采场北侧山间谷地和富家坞矿区露天采场西南侧山间谷

底,这多是由于2个采场内酸性水长期冲刷矿石,导致大量重金属元素溢出,堆积于地势低洼的山间谷地;且从影像上可以分辨出这些山间谷底植被并不茂盛,对重金属的吸附作用并不明显。这应当引起矿区生态环境部门的警觉,需采取一定的措施对这些区域进行针对性的生态修复,以减轻重金属污染、保护矿区生态环境。

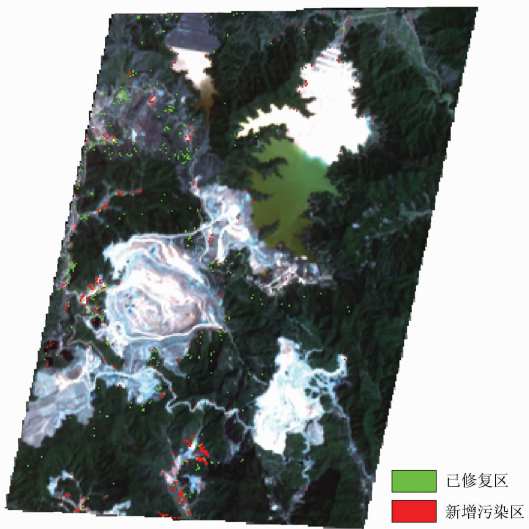


图7 相比2003年,2009年已修复区和新增污染区分布
Fig.7 Compared with 2003, the distribution of repaired and newly polluted areas in 2009

4 结论与讨论

1)通过系统分析了矿区典型植物茅草和盐肤木的野外实测波谱特征与重金属含量的相关关系,以红边位置作为表征光谱特征变异的参量,利用不同时相的Hyperion高光谱卫星数据,获得了矿区植被红边位置信息;根据矿区植被红边位置的变异程度,推断矿区植被富集重金属的情况,进而评价矿区重金属污染的生态修复效果。该方法具有理论基础,流程简单可行,可移植性强。

2)以德兴铜矿为例,分析讨论了矿区重金属污染在典型复垦区、红边位置变异程度和红边位置变异区域变化上的修复效果:在典型复垦区1号和2号尾矿库四周重金属污染修复取得了较好的效果;与2003年相比,2009年重金属污染修复整体上取得了一定的成效,大部分区域被修复,但仍有部分新增污染区。

但是,本次研究的方法仍然存在一定的缺陷:一是,本次实验选用的Hyperion高光谱卫星遥感数据空间分辨率为30 m,导致计算红边位置时视所有植物为单一物种,忽略了不同物种之间的光谱特征

差异性,这可能对红边位置变异阈值的选择有所影响;二是,植物光谱的红边位置变化除了受矿区重金属污染的影响外,还可能受地表渗漏的酸、碱废水及大气中的氟化氢(HF)、二氧化硫(SO₂)等有害气体的影响,虽然本次研究的植物同在一个研究区,但也无法保证除重金属含量外的其他自然条件完全相同,这可能导致在评价重金属污染修复效果时存在一定偏差;三是,虽然从提取的红边位置信息中可清晰看出红边位置较正常位置是否有蓝移,也能在一定程度上反映该区的重金属含量高低,说明重金属污染修复的效果,但始终无法定量地反映出红边位置蓝移区域的重金属含量。因此,本文评价方法仍需经过更严谨的改进,进一步开展更多针对性研究工作,以求更精确地评价矿区重金属污染修复的效果,服务于矿山生态环境修复与治理工作。

参考文献(References):

[1] De Simoni B S,Leite M G P. Assessment of rehabilitation projects results of a gold mine area using landscape function analysis[J]. Applied Geography,2019,108:22-29.

[2] 李国政. 绿色发展视阈下矿山地质修复模式的升级与重塑[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版),2019(3):92-104.

Li G Z. Upgrading and reshaping of mine geological restoration mode from the perspective of green development[J]. Journal of China University of Mining and Technology (Social Sciences), 2019(3):92-104.

[3] 殷亚秋,蒋存浩,鞠星,等. 海南岛2018年矿山地质环境遥感评价和生态修复对策[J]. 自然资源遥感,2022,34(2):194-202. doi:10.6046/zrzyyg.2021136.

Yin Y Q,Jiang C H,Ju X,et al. Remote sensing evaluation of mine geological environment of Hainan Island in 2018 and ecological restoration countermeasures[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(2):194-202. doi:10.6046/zrzyyg.2021136.

[4] Vicenc C,Oriol O,Josep M A. RESTOQUARRY: Indicators for self-evaluation of ecological restoration in open-pit mines[J]. Ecological Indicators,2019,102:437-445.

[5] Hou X Y,Liu S H,Zhao S,et al. Interaction mechanism between floristic quality and environmental factors during ecological restoration in a mine area based on structural equation modeling[J]. Ecological Engineering,2018,124:23-30.

[6] 杨灵玉,高小红,张威,等. 基于Hyperion影像植被光谱的土壤重金属含量空间分布反演——以青海省玉树县为例[J]. 应用生态学报,2016,27(6):1775-1784.

Yang L Y,Gao X H,Zhang W,et al. The estimating heavy metal concentrations in topsoil from vegetation reflectance spectra of Hyperion images:A case study of Yushu County,Qinghai,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(6):1775-1784.

[7] 李盛阳,刘志文,刘康,等. 航天高光谱遥感应用研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程,2019,48(3):0303001.

Li S Y,Liu Z W,Liu K,et al. Advances in application of space hyperspectral remote sensing(invited)[J]. Infrared and Laser Engi-

- neering, 2019, 48(3): 0303001.
- [8] 杨璐, 高永光, 胡振琪. 铜胁迫下植被光谱变化规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(4): 74–76.
Yang L, Gao Y G, Hu Z Q. Study on spectral change of vegetation under Cu stress[J]. Mining Research and Development, 2008, 28(4): 74–76.
- [9] 李庆亭, 杨锋杰, 张兵, 等. 重金属污染胁迫下盐肤木的生化效应及波谱特征[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 284–290.
Li Q T, Yang F J, Zhang B, et al. Biogeochemistry responses and spectral characteristics of rhus chinensis mill under heavy metal contamination stress[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(2): 284–290.
- [10] 任红艳, 庄大方, 潘剑君, 等. 重金属污染水稻的冠层反射光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 430–434.
Ren H Y, Zhuang D F, Pan J J, et al. Study on canopy spectral characteristics of paddy polluted by heavy metals[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 430–434.
- [11] 赵汀, 王安建, 夏江周. 泊水河流域重金属污染区五节芒叶片光谱特征响应研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(2): 46–54. doi:10.6046/gtzyyg.2010.02.11.
Zhao T, Wang A J, Xia J Z. The spectral response of typical vegetation leaves to heavy metal pollution in Jishui River basin[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(2): 46–54. doi:10.6046/gtzyyg.2010.02.11.
- [12] Liu M L, Liu X N, Wu L, et al. Wavelet-based detection of crop zinc stress assessment using hyperspectral reflectance[J]. Computers and Geosciences, 2011, 37: 1254–1263.
- [13] 陈圣波, 周超, 王晋年. 黑龙江多金属矿区植物胁迫光谱及其与金属元素含量关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1310–1315.
Chen S B, Zhou C, Wang J N. Vegetation stress spectra and their relations with the contents of metal elements within the plant leaves in metal mines in Heilongjiang[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(5): 1310–1315.
- [14] Deventer H V, Cho M A. Assessing leaf spectral properties of Phragmites australis impacted by acid mine drainage[J]. South African Journal of Science, 2014, 110: 1–12.
- [15] 朱叶青, 屈永华, 刘素红, 等. 重金属铜污染植被光谱响应特征研究[J]. 遥感学报, 2014, 18(2): 335–352.
Zhu Y Q, Qu Y H, Liu S H, et al. Spectral response of wheat and lettuce to copper pollution[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(2): 335–352.
- [16] Song L, Jian J, Tan D J, et al. Estimate of heavy metals in soil and streams using combined geochemistry and field spectroscopy in Wan-sheng mining area, Chongqing, China[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 34: 1–9.
- [17] Zheng T, Liu N, Wu L, et al. Estimation of chlorophyll content in potato leaves based on spectral red edge position[J]. IFAC – Papers OnLine, 2018, 51(17): 602–606.
- [18] Li D, Cheng T, Zhou K, et al. WREP: A wavelet-based technique for extracting the red edge position from reflectance spectra for estimating leaf and canopy chlorophyll contents of cereal crops[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017(129): 103–117.
- [19] Prabir K D, Karun K C, Laxman B, et al. A modified linear extrapolation approach towards red edge position detection and stress monitoring of wheat crop using hyperspectral data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(4): 1432–1449.
- [20] Pu R L, Gong P, Biging G S, et al. Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003(41): 916–921.
- [21] 姚付启, 张振华, 杨润亚, 等. 基于红边参数的植被叶绿素含量高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(s2): 123–129.
Yao F Q, Zhang Z H, Yang R Y, et al. Hyperspectral models for estimating vegetation chlorophyll content based on red edge parameter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(s2): 123–129.
- [22] 余宝, 黄敬峰, 石晶晶, 等. 基于红边位置变化特征的油菜种植区域提取[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 145–152.
She B, Huang J F, Shi J J, et al. Extracting oilseed rape growing regions based on variation characteristics of red edge position[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 145–152.
- [23] Zhu L H, Chen Z X, Wang J J, et al. Monitoring plant response to phenanthrene using the red edge of canopy hyperspectral reflectance[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014(86): 332–341.
- [24] 张佳伟, 王仲林, 谭先明, 等. 利用不同红边位置算法估测玉米叶绿素含量[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(4): 464–472.
Zhang J W, Wang Z L, Tan X M, et al. Estimation of corn chlorophyll content using different red edge position algorithms[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47(4): 464–472.
- [25] 甘甫平, 刘圣伟, 周强. 德兴铜矿矿山污染高光谱遥感直接识别研究[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2004, 29(1): 119–126.
Gan F P, Liu S W, Zhou Q. Identification of mining pollution using Hyperion data at Dexing copper mine in Jiangxi Province, China[J]. Earth Science(Journal of China University of Geosciences), 2004, 29(1): 119–126.
- [26] 付卓, 肖如林, 申文明, 等. 典型矿区土壤重金属污染对植被影响遥感监测分析——以江西省德兴铜矿为例[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(6): 66–68.
Fu Z, Xiao R L, Shen W M, et al. Monitoring and analysis of the impacts of soil heavy metal pollution on vegetation in typical mining areas using remote sensing imageries: A case study of Jiangxi Dexing copper mine[J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(6): 66–68.
- [27] 薛利红, 杨林章. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 165–169.
Xue L H, Yang L Z. Comparative study on estimation of chlorophyll content in spinach leaves using various red edge position extraction techniques[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 165–169.
- [28] 张永贺, 郭啸川, 褚武道, 等. 基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 798–804.
Zhang Y H, Guo X C, Chu W D, et al. Estimation model of schima

superba leaf chlorophyll content based on red edge position[J]. Infrared and Laser Engineering,2013,42(3):798 – 804.

[29] 马东辉,柯长青. 南京冬季典型植被光谱特征分析[J]. 遥感技术与应用,2016,31(4):702 – 708.

Ma D H, Ke C Q. Research on spectral characteristics of winter typical vegetation in Nanjing[J]. Remote Sensing Technology and Application,2016,31(4):702 – 708.

[30] 吴继友,杨旭东,张福军,等. 山东招远金矿区赤松针叶反射光谱红边的季节特征[J]. 遥感学报,1997,1(2):124 – 128.

Wu J Y, Yang X D, Zhang F J, et al. Seasonal characteristics of spectral reflectance of korean pine leaves in the gold mine area of Zhaoyuan City in Shandong Province[J]. Journal of Remote Sensing,1997,1(2):124 – 128.

[31] 张海星,姚丽文,熊报国,等. 德兴铜矿 1 号尾矿库废弃土地生态恢复试验研究[J]. 环境与开发,1999,14(1):10 – 11.

Zhang H X, Yao L W, Xiong B G, et al. Study on the eco – recover test of waste land of 1# tailings bank in Dexing copper mine[J]. Environment and Exploitation,1999,14(1):10 – 11.

[32] 杨修,高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J]. 生态学报,2001,21(11):1932 – 1940.

Yang X, Gao L. A study on re – vegetation in mining wasteland of Dexing copper mine, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11):1932 – 1940.

Evaluating the remediation effect of heavy metal pollution in the Dexing copper mine based on hyperspectral remote sensing

WANG Jiapeng^{1,2}, XU Jianguo³, SHEN Jiaxiao^{1,2}, ZHANG Dengrong^{1,2}

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, China; 3. Ningbo Yuke Land Survey, Planning and Design Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Evaluating the remediation effect of heavy metal pollution in mines properly and rapidly holds considerable significance for ecological restoration and rehabilitation of mines. Based on the field – measured vegetation spectra, this study analyzed the typical spectral features of the main vegetation in the Dexing copper mining area. According to the heavy metal content in the leaves of vegetation tested in the laboratory, this study analyzed the relationship between heavy metal content and red edge position – a spectral characteristic parameter. This study calculated the red edge position of the vegetation in 2003 and 2009 using 2 – scene Hyperion hyperspectral data, inferring the heavy metal enrichment in the vegetation of the mining area. Furthermore, this study evaluated the remediation effect of heavy metal pollution in the mining area. The results show that satisfactory results have been achieved from the remediation of heavy metal pollution around mine tailings nos. 1 and 2 in typical reclamation areas. Compared with 2003, 2009 witnessed generally satisfactory remediation effects of heavy metal pollution, with most areas being remedied and some newly polluted areas requiring remediation. The method proposed in this study can achieve a quick and reasonable evaluation of the remediation effect of large – scale heavy metal pollution in mining areas.

Keywords: spectral feature; red edge position; remediation of heavy metal pollution; hyperspectrum; Dexing copper mine

(责任编辑: 李 瑜)