

江西赣州废弃离子型稀土矿修复区植被高光谱特征与健康状况评价

魏吉鑫^{1,2}, 刘斯文^{1,3}, 李海潘^{4,5}, 陈文华^{4,5}
WEI Jixin^{1,2}, LIU Siwen^{1,3}, LI Haipan^{4,5}, CHEN Wenhua^{4,5}

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 自然资源部生态地球化学重点实验室, 北京 100037;

4. 赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000;

5. 江西赣南地质工程院, 江西 赣州 341000

1. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Natural Resources for Eco-geochemistry, Beijing 100037, China;

4. Gannan Geological Survey Group, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

5. Geo-engineering Investigation Institute of South Jiangxi Province, Ganzhou 341000, Jiangxi, China

摘要:江西赣州废弃离子型稀土矿山自2016年以来修复成效明显,目前已基本修复完毕,如何科学评价废弃稀土矿山的修复效果,已成为政府亟需解决的问题。传统的多光谱遥感方法对于精确提取修复区植被的种类和健康状况存在较多的局限。为解决上述问题,中国地质调查局支撑赣州七县矿山地质环境调查工作部署了赣州稀土矿矿山地质环境综合调查和评价工作。以无人机搭载高光谱仪为主要遥感调查工具,选择典型的废弃稀土矿山修复区为研究区,进行矿区无人机搭载高光谱仪扫描,获取了龙南县足洞地区2 km²的典型矿区高光谱影像。利用ENVI软件,采用混合线性模型进行矿区原始及修复植被的光谱特征提取,分区分析了废弃稀土矿山地区植被生长情况,对修复区植被的健康状况进行尝试性的评价。该方法将地球化学调查和高光谱遥感相结合为废弃稀土矿山植被生态修复效果的评价提供了一种快速、准确的评价方法。

关键词:赣州脱贫攻坚;废弃稀土矿山修复;无人机搭载高光谱;光谱曲线

中图分类号:P618.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)12-2037-07

Wei J X, Liu S W, Li H P, Chen W H. Hyperspectral characteristics and health status evaluation of vegetation in the restoration area of the abandoned ion type rare earth mine in Ganzhou, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 2037-2043

Abstract: Since the end of 2016, it has become the basic problem for the government to extract the rare earth ions in abandoned mine areas. In order to solve the above problems, China Geological Survey supported the mine geological environment survey of seven counties in Ganzhou, and deployed the comprehensive investigation and evaluation of the geological environment of the rare earth mines

收稿日期:2020-07-10;修订日期:2020-10-16

资助项目:中国地质调查局项目《全国矿山地质环境综合调查与评价(国家地质实验测试中心)》(编号:DD20190703)和国家重点研发计划项目《离子型稀土矿浸矿场地土壤污染控制及生态功能恢复技术》(编号:2019YFC1805103)

作者简介:魏吉鑫(1997-),男,在读博士生,地球化学专业。E-mail:572367827@qq.com

通讯作者:刘斯文(1980-),男,博士后,副研究员,从事矿山环境和地球化学研究。E-mail:siwenzliu@cags.ac.cn

in Ganzhou. In this paper, UAV carrying hyperspectral spectrometer was used as the main remote sensing survey tool, the typical abandoned rare earth mine restoration area was selected as the research area, and the hyperspectral images of 2 km² of typical mining area in zudong area of Longnan county were obtained. With ENVI software, mixed linear model was used to extract spectral characteristics of original and restored vegetation in the mining area. Vegetation growth in abandoned rare earth mine area was analyzed by zoning, and the health status of vegetation in the restoration area was tentatively evaluated. This method combines geochemical survey with hyperspectral remote sensing, and provides a rapid and accurate evaluation means for the evaluation of vegetation ecological restoration effect of abandoned rare earth mines.

Key words: Ganzhou poverty alleviation; restoration of abandoned rare earth mines; UAV carrying hyperspectral; spectral curve

江西赣州是离子型稀土矿山的主要产区,自1969年首次发现以来,经历了50年稀土矿山的开采和加工,在世界稀土采矿产业中有重要地位^[1]。但是,在离子型稀土矿山的开采过程中大量使用的池浸(已废弃)、堆浸及原地浸矿的方法,导致地表土壤理化性质和组成成分改变,造成严重的水土流失和植被退化^[2]。自2016年以来,赣州市全面开展废弃稀土矿山治理,主要包括自然恢复和人工治理2类,但开采过程中造成的土壤沙化、酸化和土壤肥力降低,使植被长势不佳,甚至死亡。因此,无论是自然生态恢复和人为修复治理,植被的覆盖率和植物生长程度是表征废弃稀土矿山生态效果的重要参数^[3-5]。

植被高光谱遥感以其准确、快速的特点成为连接遥感数据、地面测量、光谱模型、植物健康评价应用的强有力工具^[6]。根据植被的光谱特征分析发现,可见光及近红外波段反映了植物的植被覆盖程度、植物叶片叶绿素含量及植物叶片的光利用率,其中植物叶片的叶绿素含量和光利用率对植物的生长具有指示作用,是评价植物生长程度的重要指标^[7-8]。本文以龙南县典型稀土矿区为例,首先根据高分辨率遥感图像和实地勘验的结果,以植被发育情况和采矿背景、修复时间为因素,对废弃稀土矿区进行分区;然后,绘制不同分区植被提取特征光谱曲线,并进行对比分析;最后,依据光谱特征曲线,通过ENVI软件对整个区域的植被做林木健康分析,最终为废弃稀土矿山植被修复治理效果提供科学评价。

1 研究区概况

龙南县位于江西省赣州市最南端,以红壤山地丘陵地形为主,森林覆盖率达80.30%,稀土资源丰富,是赣州地区的最大稀土矿产开采地之一^[9]。南方离子型稀土矿山因为其独特的赋存形式及特殊简陋的开采方法,造成废弃稀土矿山地区残存大量

的浸矿液和尾矿砂,植被退化、土壤酸化,大雨降水冲刷造成严重的水土流失,沙化十分严重,土壤肥力低下,矿山地质环境质量差^[10]。自2007年以来,赣州市政府高度重视废弃稀土矿山地质环境恢复治理工作,在龙南县开展多期废弃稀土矿山生态修复治理工作,主要治理过程为根据废弃矿山的地质环境条件人工干预修复治理。为了完成龙南县废弃稀土矿山的治理,龙南县修复工程选取耐酸的、耐干旱、耐贫瘠的植物进行植被恢复,有助于解决水土流失和矿山地质环境修复问题。

研究区位于龙南县足洞稀土矿区,地理位置位于东经114.8513°~114.8559°,北纬24.8260°~24.8324°,面积约2 km²(图1)。目前废弃稀土矿山区域主要可分为3块区域:①早期采用堆浸工艺,后期采用原地浸矿工艺,经过几年的人工干预治理,表层土壤已经有少量有机质,是有机质覆盖的早期修复区域;②水土流失严重,近期人工干预治理的晚期修复区域;③位于矿区附近,未被破坏的原始植被区域(图2)。

2 研究方法

2.1 数据采集及预处理

本次实验是采用无人机搭载高光谱仪扫描地面,基本参数为398.1~1002.0 nm,采样间隔为3.2 nm,空间分辨率约为0.12 m,飞行高度为300 m,拍摄面积为2 km²,拍摄日期为2019年10月。为避免云层的干扰,光谱采集选择了晴朗无云的天气。为消除大气气溶胶、地形的影响,对高光谱数据采用快速大气校正工具(QUAC)。

2.2 光谱曲线提取

在通过无人机获取的高光谱数据时,由于天气变化、植物类型不同、周围环境不可控等因素,必须去除其随机性,在不同区域内随机选取10个植物点,并求平均值,得到光谱曲线(图3)。

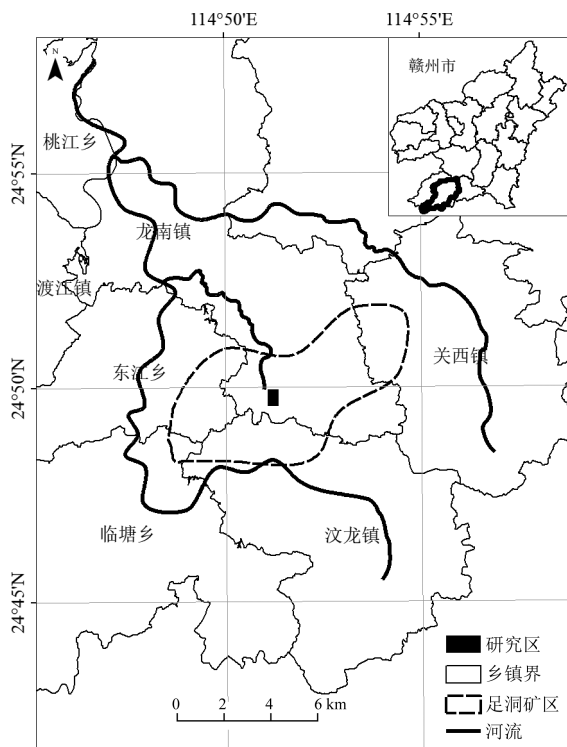


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of the study area

3 原始光谱曲线分析

植被光谱曲线特征主要由两部分构成,一是由于植被自身的特殊结构特征使其具有独特的光谱曲线,能够用来识别植被,二是由于植被受外界干扰,自身结构发生变化,使光谱曲线发生局部变化,能够用来判断植物的生长情况^[11]。

图 4 是一般健康植被(数据来源于 JHU 光谱库)与废弃稀土矿区原始植被、早期修复植被、晚期修复植被的光谱曲线对比图。从高光谱中提取的原始光谱曲线均经过预处理,处理后明显发现一般植被光谱曲线特有的红边、绿峰等现象。

(1)可见光波段(400~700 nm):主要受植物色素的影响,整体上光谱反射率不高,普遍低于 0.15,光谱曲线表现出强吸收特性。在 350~500 nm 波长范围内,由于叶黄素、类胡萝卜素及叶绿素的影响,在光谱特征曲线上形成了第一个吸收谷;在 550 nm 附近,出现了第一个显著的反射峰,是由叶绿素的弱吸收特性引起的;在 670 nm 附近,出现第二个吸收谷,为叶绿素的强吸收带。

(2)近红外波段(700~1002 nm):在 690~800 nm

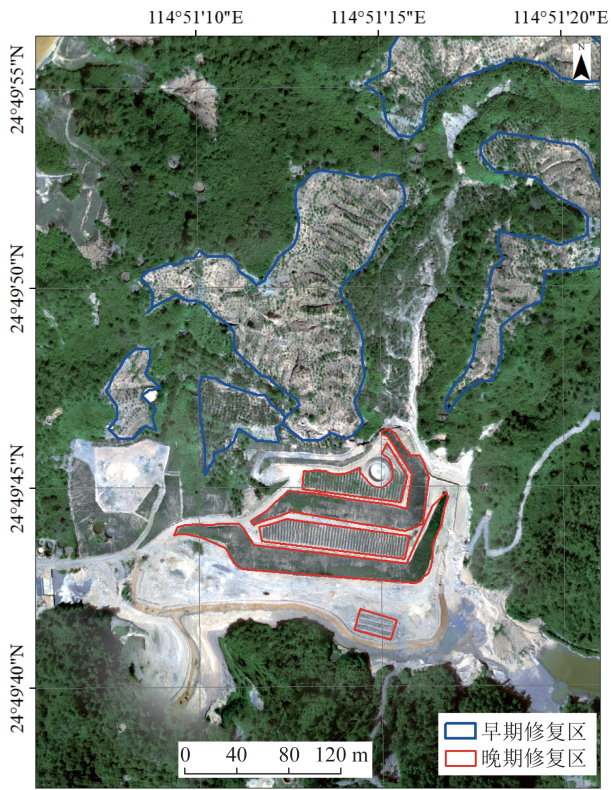


图 2 废弃稀土矿山分区图

Fig. 2 Zoning of abandoned rare earth mines

的近红外波长范围内,光谱特征曲线均出现一个明显的反射“陡坡”,这种由叶绿素的强反射而造成的“陡坡”常被称作植物的“红边效应”,由于植被生长环境、时间序列的不同造成“红边”位置、高度、斜率等存在一定的差异^[12]。

在植被光谱曲线大致相同的情况下,局部差异反映了在不同环境下植物的生长情况,当植物健康,长势良好时,绿峰、红谷向短波方向移动,即为“蓝移”现象,当植被受到某类因素干扰导致植被生长受到抑制,绿峰、红谷向长波方向移动,即为“红移”现象^[13]。另外,随着土壤中 N 元素含量的增加,红边会向长波方向移动,出现红移现象^[14]。表 1 为绿峰波长及反射率。

表 1 绿峰波长及反射率($n=10$)

Table 1 Wave length and reflectance of green peal wave ($n=10$)

植被类型	波长/nm	反射率/%
原始植被	554.74	0.0495
早期修复区植被	554.74	0.0605
晚期修复区植被	557.50	0.0739
一般健康植被	546.00	0.1051

注:一般健康植被的光谱数据来源于 JHU 光谱库

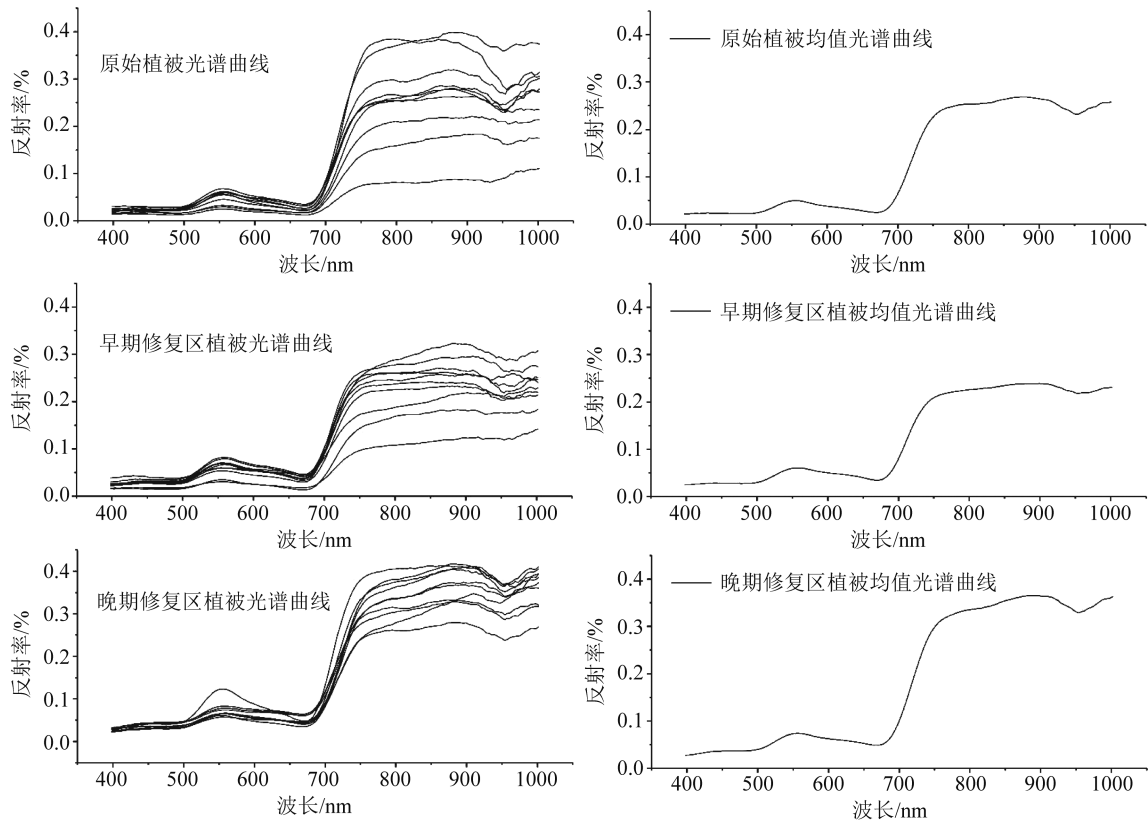


图3 光谱曲线图

Fig. 3 Spectrum curve

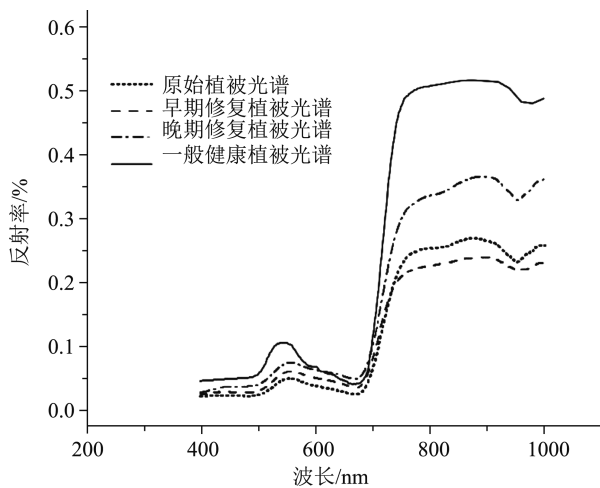


图4 植被光谱曲线

Fig. 4 Vegetation spectral curve

表1中数据表明,废弃稀土矿山中的绿峰波长均比一般健康植被的波长大,存在不同程度的红移现象,原始植被、早期修复植被的绿峰向长波方向

移动了8.74 nm,晚期修复区植被向长波方向移动了11.50 nm,表明废弃稀土矿山地区的植被由于受到某种因素干扰,生长发育受到抑制,光谱曲线存在变异现象,不排除是稀土矿山开采的结果。

根据实地踏勘,早期修复区因为修复时间早,表层形成了有机质层,红移现象与原始植被的红移现象一致。通过不同植被的绿峰反射率对比可知,一般健康植被的绿峰反射率比废弃稀土矿山植被的反射率高。从图4光谱曲线可以发现,一般健康植被的可见光反射率均高于废弃稀土矿山植被,表明废弃稀土矿山植被含有较高的色素含量。赣州离子型稀土矿山独特的堆浸与原地浸矿采矿方式,使土壤中残存有较高的氨氮含量。有研究表明,土壤N元素和含水率对植物叶绿素的含量有正响应关系^[15],因此废弃稀土矿山植被有较高的叶绿素含量。修复区由于水土流失严重,土壤含水量低,植被叶绿素含量低,可见光反射率较高,且存在绿峰反射率大小关系:晚期修复区植被>早期修复区植

被>原始植被。

4 林木健康评价

植被指数(VI)是将 2 个或多个波长范围内的地物反射率组合运算,通过植被指数的计算,可以增强植被某种特性。目前,在科学文献中发布了超过 150 种植被指数模型,这些植被指数中只有极少数是经过时间考验的。根据对植被波谱特征产生重要影响的主要化学成分:色素(Pigments)、氮(Nitrogen)、水分(Water)、碳(Carbon),产生了几类较实用的指数:绿度、光利用率、冠层氮、干旱或碳衰减、叶色素、冠层水分含量。这些植被指数可以简单度量绿色植被的数量和生长状况^[16]。

废弃稀土矿山植被受土壤理化性质和组成成分的改变,植物生长发育受到不同程度的影响,通过 ENVI 软件,选取绿度、光利用率、叶色素含量等植物指数,在废弃稀土矿山地区进行林木健康分析,评估矿山开采对植被的影响及修复区修复效果。

绿度指数主要用于评估展示绿色植被的分布及植物的生长情况,它对植物的叶绿素含量、叶子表面冠层、冠层结构较敏感,这些都是植被光合作用的主要物质。通过计算归一化植被指数(NDVI),可评估废弃稀土矿山的生长状况,其计算公式为:

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

式中, ρ_{NIR} = 800 nm, ρ_R = 680 nm。在植被茂密地区,即 LAI 较高的地区,NDVI 敏感度会降低,废弃稀土矿区的植被稀疏,特别适用于稀土矿区度量植被的生长与数量。

光利用率指数是用来度量植被在光合作用中对入射光的利用效率,光的利用效率直接与植被生长速度和光合有效辐射(fAPAR)有很大的关系。通过红绿比值指数(RG)评估和量化植被的光利用效率,其计算公式为:

$$RG = \frac{\rho_R}{\rho_G} \quad (2)$$

式中, ρ_R 为所有红色波段均值, ρ_G 为所有绿色波段均值。RG 比值指数可估算植被冠层发展过程,它还是叶片生产力与胁迫性的指示器,可评价植被的生长状况。

叶色素指数用于度量植被中与胁迫性相关的色素,胁迫性相关的色素主要有花青素等色素,主要存在于衰老植被中,这些指数不能度量叶绿素。通过对叶色素指数中的花青素指数 I (ARI1) 计算,可知植被是否死亡,其计算公式为:

$$ARI1 = \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}} \quad (3)$$

式中, ρ_{550} = 550 nm, ρ_{700} = 700 nm。ARI1 对叶片中的花青素特别敏感,ARI1 越大表明植物冠层花青素含量越高,生存环境越恶劣。

通过选定相关植被指数(NDVI、RG、ARI1),ENVI 软件林木健康分析可创建整个森林区域健康程度的空间分布图。林木健康程度分布图将健康等级分为 9 类,可用于评估森林健康程度,数值越大代表林木越健康,数字 1 代表裸地,故舍去。

从图 5 可以发现,原始植被区域森林健康等级较高,受到影响程度较低,早期修复区由于水土流失严重,表层土壤少,植被覆盖低,推测晚期修复区由于受土壤酸化的影响,大部分植被长势差,甚至出现死亡。

5 结 论

本文通过无人机搭载高光谱成像仪,收集龙南县足洞矿区修复区高光谱图像,提取不同分区植被的光谱曲线,并评价足洞矿区森林健康程度,得出以下结论。

(1)废弃稀土矿山地区植被光谱曲线在 550 nm 处出现反射峰,在 450 nm、670 nm 处出现吸收谷,与一般健康植物的光谱特征一致。另外,植被光谱曲线在 700~800 nm 形成陡坡,光谱反射率迅速上升到红谷 4 倍以上。

(2)废弃稀土矿山地区的植被与一般健康植被相比,发生了不同程度的“红移”现象,其中晚期修复区植被的红移现象最明显。初步断定,在废弃稀土矿山地区,植被受到环境胁迫影响,主要因素可能为土壤酸化。

(3)通过对废弃稀土矿山地区植被的森林健康分析,植被生长受到矿山影响程度不同,离矿区越远,植被越健康,且存在不同分区健康程度大小变化:原始植被>早期修复区植被>晚期修复区植被,表明矿山开采会对植被恢复有抑制作用,需要长期修复治理才能使植被恢复到正常健康水平。

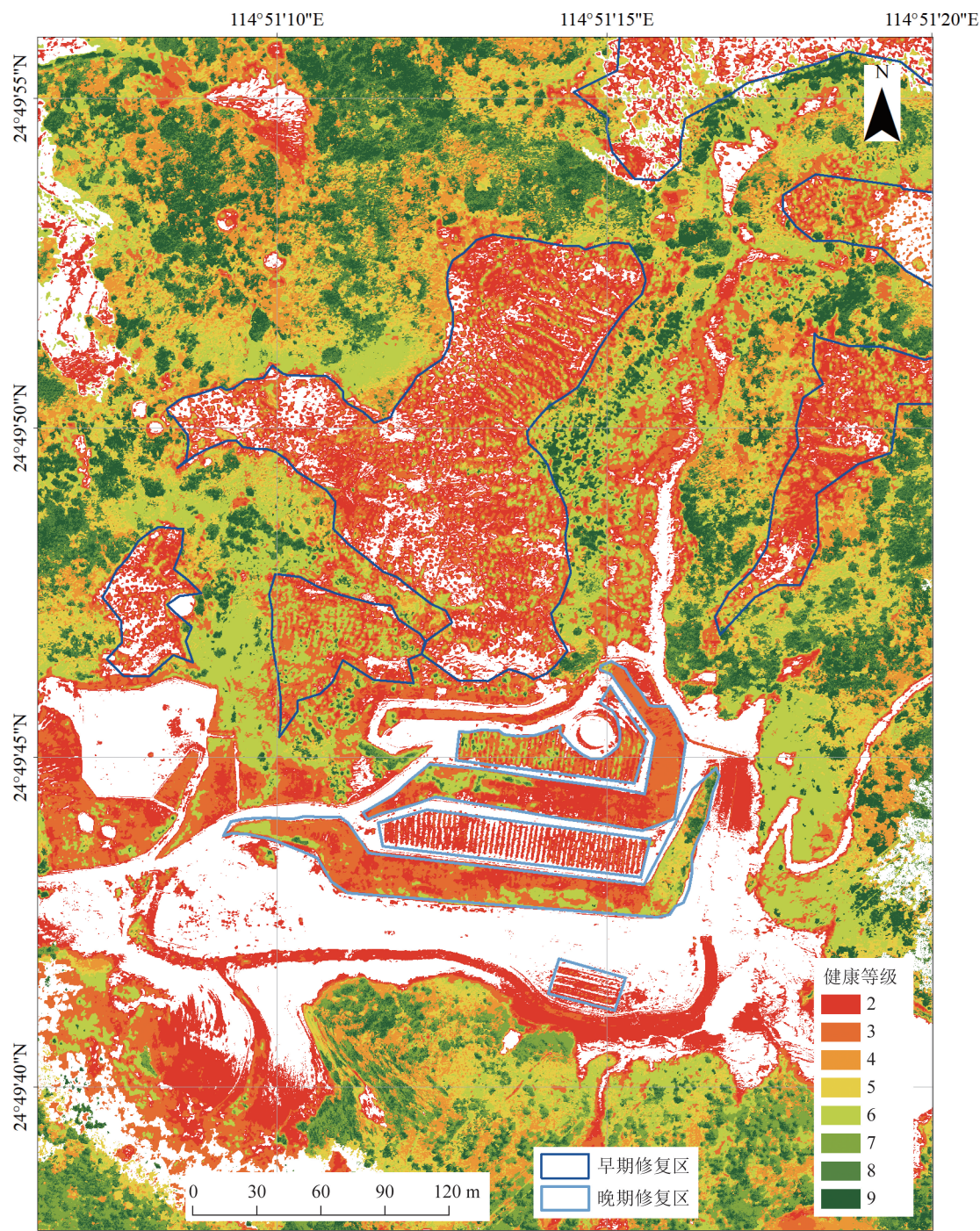


图 5 林木健康分布图

Fig. 5 Distribution of forest health

致谢:野外实地调查由项目组和赣南地质调查大队共同完成,高光谱数据由中国地质科学院国家地质实验测试中心提供,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 丁嘉榆. 离子吸附型稀土研究、勘查、开发利用史上一些重大事项的回顾(二)[J]. 稀土信息, 2017, 396(3): 25-29.
[2] 刘芳. 龙南离子型稀土矿生态环境及综合整治对策[J]. 金属矿山,

- 2013, (5): 135-138.
- [3] 张春雷. 赣南离子型稀土矿区水土保持方案研究——以龙南县足洞矿区和定南县岭北矿区整合项目为例[J]. 江西理工大学学报, 2016, (37): 52-58.
- [4] 刘云, 杨晋, 冷从德. 赣南废弃稀土矿山地质环境治理现状及发展趋势[J]. 地质灾害与环境保护, 2015, 26(2): 45-49.
- [5] 周彩云, 程晓迪, 张焱, 等. 龙南县离子型稀土矿区复垦土壤的质量研究[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会第十九次会议暨"农田土壤污染与修复研讨会"第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集, 2017.
- [6] 申广荣, 王人潮. 植被高光谱感的应用研究综述[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2001, 19(4): 315-321.
- [7] 宫兆宁, 赵雅莉, 赵文吉, 等. 基于光谱指数的植物叶片叶绿素含量的估算模型[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5736-5745.
- [8] 郑腾飞, 于鑫, 包云轩. 多角度高光谱对光化学反射植被指数估算光能利用率的影响探究[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 577-584.
- [9] 龙南县地方志编纂委员会编. 龙南县志 1986—2009[M]. 北京: 方志出版社, 2011: 8.
- [10] 廖振楠, 何文, 刘洪兴, 等. 龙南离子型稀土矿山地质环境质量评估研究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(4): 106-111.
- [11] 罗庆洲, 李先华, 梅安新. 邻坡反射辐射对地物反射率计算的影响评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 932-935.
- [12] 葛元梅, 陈翔宇, 洪帅, 等. 基于红边参数不同品种的估算模型[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(6): 1032-1040.
- [13] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] 王仲林, 谌俊旭, 程亚娇, 等. 不同宽窄波段组合的光谱参量对夏玉米穗位叶氮素含量估测[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(2): 152-160.
- [15] 谢华, 沈荣开, 徐成剑, 等. 水、氮效应与叶绿素关系试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2003, (8): 40-43.
- [16] 郭锐. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 71-75.