

doi: 10.6046/zrzyyg.2021136

引用格式: 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. (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.)

海南岛 2018 年矿山地质环境遥感评价和生态修复对策

殷亚秋¹, 蒋存浩¹, 鞠星¹, 陈科珏², 汪洁¹, 邢宇¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 宁波市自然资源整治储备中心, 宁波 315042)

摘要: 海南岛矿产资源丰富且独具特色, 矿产资源的开发促进了经济增长, 但也引发了严重的生态环境问题, 对海南岛矿山开采影响情况进行分析, 针对性地提出矿山生态修复的建议, 有利于海南岛生态环境的保护和治理。为此, 采用海南岛 2018 年国产高空间分辨率遥感影像, 通过影像预处理、建立解译标志、人机交互解译等获取矿山占损土地和恢复治理信息。以矿山占损土地和恢复治理信息作为输入, 利用自然地理、基础地质、资源损毁、地质环境等 4 类 13 个评价因子建立矿山地质环境评价指标体系, 基于层次分析法对矿山地质环境影响进行分析评价。结果表明: 严重影响区占海南省土地面积的 0.22%, 主要分布于沿海的文昌市、乐东黎族自治县、海口市秀英区、澄迈县、临高县、昌江黎族自治县等地, 主要矿山地质环境问题为大型铁矿开采引发的采空塌陷、滑坡等次生地质灾害, 滨海锆钛砂矿开采造成水土流失、生态系统退化; 较严重影响区占 1.68%, 主要分布于文昌市、儋州市、澄迈县、琼海市、临高县、海口市、东方市等地, 矿山地质环境问题主要为中小型铁矿开采引起的滑坡等造成的土地损毁, 以及矿山开发对原始地形地貌和自然生态环境造成的严重影响; 一般影响区占 4.93%, 主要分布于海南省的东部沿海、中部和北部经济较发达地区、西部金属矿产较丰富地区, 主要矿山地质环境问题为建材类非金属矿山分布分散、小型矿山开采过程中对地表地貌及自然植被的破坏。根据不同矿山地质环境问题, 研究提出对金属矿山要在消除地质灾害隐患、土壤改良和水环境治理的基础上, 以自然恢复为主、人工修复为辅进行矿区生态修复; 锆钛砂矿以及建材类非金属矿, 要注重恢复地表植被来防治水土流失, 对于滨海沙化严重的矿区, 可采取种植西瓜、花生等农作物进行土壤改良, 再植以木麻黄、青梅等树木, 逐步修复矿区生态系统。

关键词: 海南岛; 遥感; 矿山地质环境; 生态修复

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)02-0194-09

0 引言

海南省位于我国最南端, 全省陆地面积约 3.5 万 km², 是我国矿产资源相对丰富且种类独具特色的省份之一。海南省矿产资源种类丰富, 资源潜力大。根据 2007 年全国主要矿产资源储量通报, 在探明储量的 56 种矿产中, 保有资源储量列全国前十位的矿产有玻璃用砂、钛铁矿砂矿、锆英石砂矿、饰面用花岗岩、油页岩、宝石、天然气、富铁矿、高岭土、红柱石、铝土矿等, 拥有矿产地 435 处, 其中矿产规模达到大型的 69 处、中型的 123 处、小型的 243 处^[1]。海南省矿产资源分布相对集中, 石英砂主要分布于

海南岛沿海沉积阶地, 锆钛砂矿分布于东部的滨海沉积阶地, 铁矿、石灰岩富集在昌江黎族自治县石碌地区, 金矿主要集中在乐东黎族自治县、东方市、昌江黎族自治县、定安县等地, 天然气和石油主要集中在南海西北部和南沙等新生代沉积盆地^[2-3]。此外, 海南省富矿比例较大, 矿床开采技术条件较好。已探明的天然气田多属高产能的大中型气田, 石英砂、铁、锆、金等重要矿产高品位富矿比例也较大。已探获资源储量的多数矿床, 具备“近、浅、易”的特点, 适宜露天开采或选冶的条件良好。海南省具有的优势矿产主要为海域的石油、天然气、天然气水合物, 陆域的富铁矿、石英砂、锆英石钛铁矿砂矿、金、钼、饮用天然矿泉水、热矿水等, 具有特色和比较

收稿日期: 2021-04-25; 修订日期: 2021-08-04

基金项目: 中国地质调查局项目“全国矿山环境恢复治理状况遥感地质调查与监测”(编号: DD20190705)、“全国矿产资源开发环境遥感监测”(编号: DD20160075)和“‘高分辨率动态监测相机及应用技术’高速实时数据在国土资源领域的应用研究”共同资助。

第一作者: 殷亚秋(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为矿产资源遥感监测。Email: yinyaqiu@126.com。

优势的矿产有高岭土、油页岩等^[4-5]。

矿产资源是在特定的地质条件下形成的不可再生资源,具有重要的工业利用价值,对民计生存有重要意义^[6]。我国虽然矿产资源丰富,但是人口众多,人均资源相对贫乏,因此要缓解资源约束的矛盾,就要树立科学发展观,充分考虑资源环境承载能力,综合合理开发利用矿产资源。对矿产资源开发状况进行监测,及时发现矿产开发中存在的问题和对周围环境的影响,能够服务于国家矿产资源开发秩序监管,为实现矿产资源有效合理利用提供基础数据。遥感技术以其大范围、多尺度、长时间的优势在矿产资源监测中得到了广泛的应用^[7-10]。汪洁等^[11]以 2016 年和 2017 年获取的浙江省高空间分辨率卫星影像为数据源,对矿山地质环境及恢复治理情况进行了遥感调查和动态监测,摸清了该矿区地质环境的现状和变化趋势;高俊华等^[12]以准格尔煤田为研究区,采用人工插值和分级加权改进后的灰色关联分析法对区内 16 座露天煤矿山的地质环境进行评价分析,得出以矿山为单元的评价等级分区;赵玉灵^[13]利用高空间分辨率遥感数据开展了 2016—2017 年海南岛东部滨海锆钛砂矿开发占损土地及矿山环境恢复治理状况监测,提出了滨海砂矿废弃地的生态修复建议;殷亚秋等^[14]以 2016—2018 年国产高空间分辨率遥感影像为主要数据源,获取了长江经济带地区废弃露天矿山的分布,以及矿山相关的地质灾害、环境污染信息,并提出了矿山生态环境修复的对策建议。以上研究都为矿山地质环境及恢复治理情况遥感调查和动态监测奠定了基础。

本文以 2018 年海南岛国产高空间分辨率遥感影像为数据源,通过建立矿山占地分类体系,利用遥感解译和信息提取技术,获取海南岛的矿山占损和恢复治理信息;辅以搜集相关资料,选择自然地理、基础地质、资源损毁、地质环境等 4 类共 13 个评价因子,建立矿山地质环境评价指标体系;采用层次分析法,基于建立的矿山地质环境影响评价模型,对海南岛矿山地质环境进行分析评价,提出生态修复的对策和建议,为海南岛矿山矿产资源开发监管、矿山生态修复提供基础数据和技术支撑。

1 研究区概况

海南岛面积 3.39 万 km²,位于我国南海西北部,北隔琼州海峡与广东省雷州半岛相望,西隔北部湾与中国广西壮族自治区钦州市、越南相望,陆地平面呈“雪梨状”椭圆形。海南岛地势四周低平,中间

高耸,呈穹窿山地形,以五指山、鹦哥岭为隆起核心,向外围逐级下降,由山地、丘陵、台地、平原等地貌构成。海岛山脉的海拔多数在 500 ~ 800 m 之间,为丘陵型低山地形;海拔超过 1 000 m 的山峰有 81 座,成为绵延起伏在低丘陵之上的长垣^[15]。海南岛地处热带北缘,属热带季风气候,有“天然大温室”的美称,年平均气温为 22 ~ 27 °C;雨量充沛,年降水量在 1 000 ~ 2 600 mm 之间,年平均降水量为 1 639 mm,有明显的多雨季和少雨季^[16]。

海南岛近年来开采的主要矿种类型为建材等非金属矿产、化工原料非金属矿产、稀有稀土分散元素金属矿产、黑色金属矿产、贵金属矿产、有色金属矿产、冶金辅助原料非金属矿产和能源矿产等。其中建材类非金属矿产主要包括砖瓦用黏土、建筑用玄武岩、建筑用花岗石等矿种,广泛分布于海南岛各个地区;化工原料非金属矿产主要为天然卤水,分布于儋州市、东方市和乐东黎族自治县;稀有稀土分散元素金属矿产主要为锆矿,分布于琼海市、万宁市和文昌市的沿海地区;黑色金属矿产主要为铁矿和钛矿,主要分布于三亚市、昌江黎族自治县、儋州市;贵金属矿产主要为金矿,分布于定安县、东方市、屯昌县、乐东黎族自治县和昌江黎族自治县;有色金属矿产主要为铅矿、钴矿和钼矿,主要分布于文昌市、琼中黎族自治县、定安县、屯昌县和乐东黎族自治县;冶金辅助原料非金属矿产主要为红柱石和萤石,主要分布于儋州市、琼中黎族自治县;能源矿产主要为地热,主要分布于琼海市。海南岛由于矿产开采造成的土地占损类型主要为采场、中转场地和固体废弃物,多集中分布于海南岛的北部,其中采场主要分布于文昌市、澄迈县、海口市秀英区;中转场地主要分布于昌江黎族自治县、海口市秀英区和儋州市;固体废弃物主要分布于昌江黎族自治县、乐东黎族自治县、儋州市、东方市等地。矿山环境恢复治理主要集中分布于文昌市、万宁市、琼海市、海口市秀英区、东方市、昌江黎族自治县等地,恢复治理的面积和分布不仅和矿山分布有关,也和恢复治理措施强度有关。文昌市锆钛矿分布广泛,开采范围大,数量多,并且锆钛矿开采后种植西瓜、造林的恢复治理措施近年来被大范围推广,因此恢复治理面积最大。

2 技术流程

研究主要包括遥感影像预处理、矿产环境信息提取、野外验证、矿山地质环境评价、结果分析和对策建议 5 个部分,具体技术流程如图 1 所示。

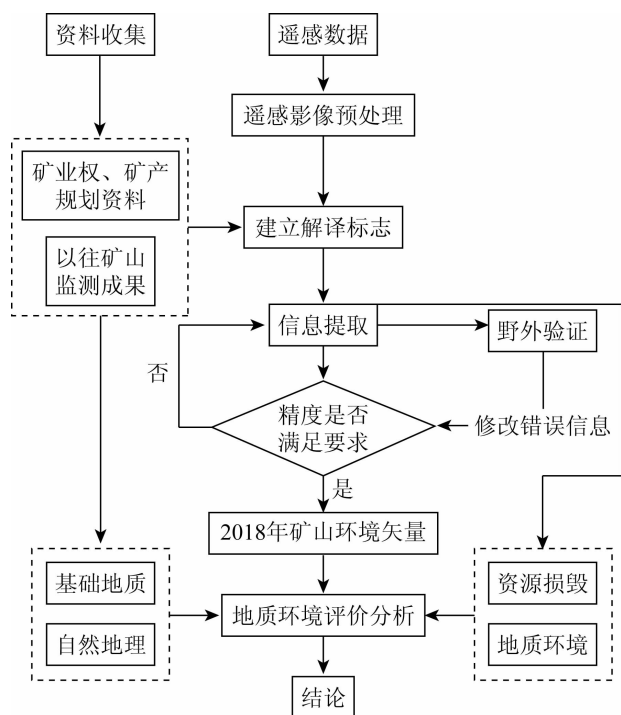


图 1 技术流程

Fig.1 Technique flowchart

接收满足工作需要的海南岛遥感数据,通过预处理获得可用的真彩色遥感影像;在已收集的矿业权、矿产规划资料和以往矿山监测成果基础上建立解译标志;通过人机交互解译和野外验证,获取矿产资源开发状况信息;通过获取不同年份的矿产资源开发状况信息,对变化情况进行提取分析。以解译获取的资源损毁、地质环境信息和收集的基础地质、自然地理信息为基础,选择 13 个评价因子,采用层次分析法对海南岛矿山地质环境进行评价分析,将评价结果划分为严重影响区、较严重影响区、一般影响区和无影响区,并提出海南岛矿山地质环境恢复治理的对策和建议。

3 矿山地质环境遥感评价

3.1 数据源及预处理

研究使用的遥感数据为 2018 年全国土地变更遥感调查数据;对空间分辨率低于 2.5 m 的数据,利用当年的高分一号、高分二号、资源三号等国产高

空间分辨率卫星数据进行替换和补充。对遥感数据进行预处理,经过辐射校正、几何纠正、影像融合,获得研究区的真彩色遥感影像(图 2)。



图 2 矿山真彩色遥感影像

Fig.2 True color remote sensing image of mine

3.2 遥感信息提取

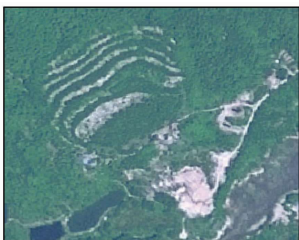
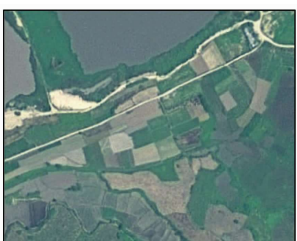
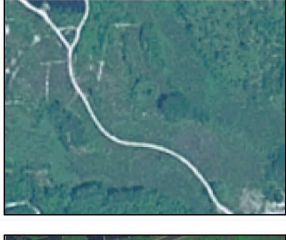
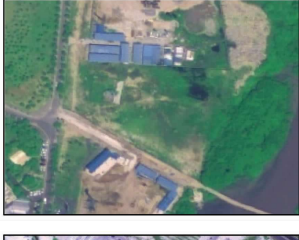
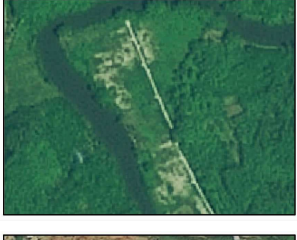
根据海南岛的矿产资源开发特点,建立矿山占地分类体系。将解译提取的矿山占地类型整体分为 2 类,分别为矿山占损土地类型和矿山恢复治理类型。其中,矿山占损土地类型又细分为 4 类,即采场、中转场地、固体废弃物、矿山建筑;矿山恢复治理类别根据恢复治理后的土地类型分为 9 类,分别为林地、耕地、园地、草地、工业仓储用地、住宅用地、交通运输用地、水域及水利设施用地和其他土地。信息提取前基于以往的矿山监测成果进行野外踏勘,根据不同地物的影像特征建立解译标志(表 1),以确保遥感解译标志的可靠性。

表 1 矿山占地遥感解译标志

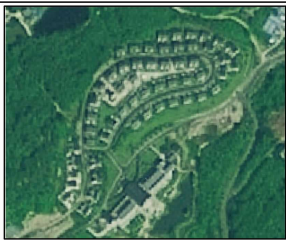
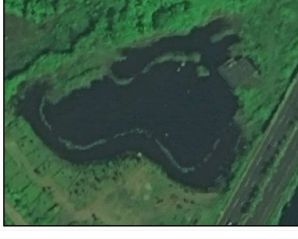
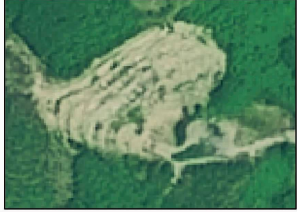
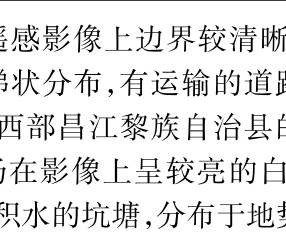
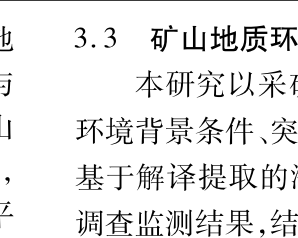
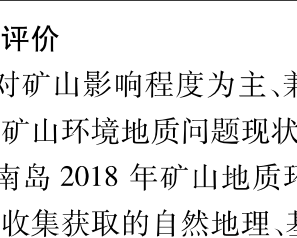
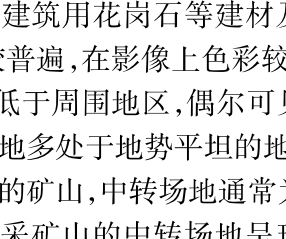
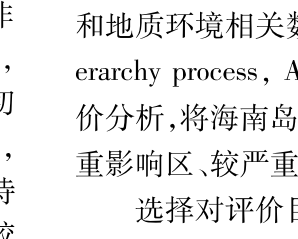
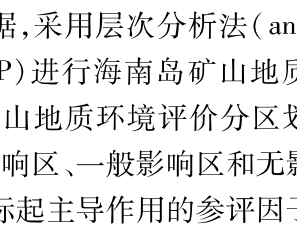
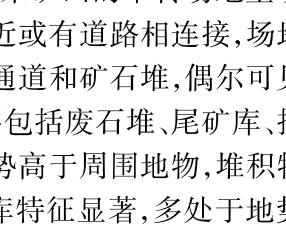
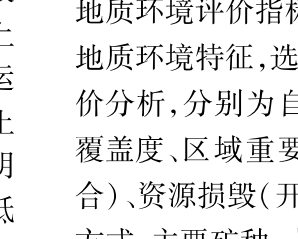
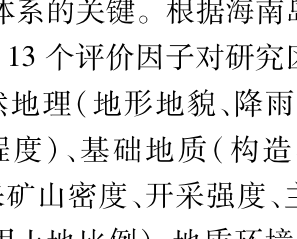
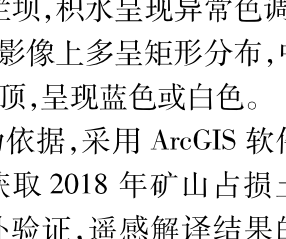
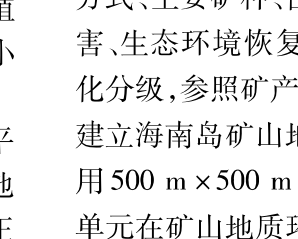
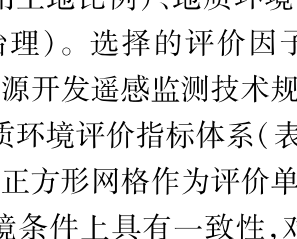
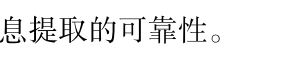
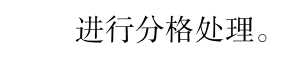
Tab.1 Remote sensing interpretation marks of mine occupation

一级分类	二级分类	解译标志
矿山占损土地	采场	铁矿采场
		铅钛砂采场
		建筑用花岗岩采场

(续表)

一级分类	二级分类	解译标志		
矿山占 损土地	中 转 场 地			
	固 体 废 弃物			
				
	矿 山 建 筑			
	林 地			
	耕 地			
矿 山 恢 复治理	园 地			
	草 地			
	工 业 仓 储用地			

(续表)

一级分类	二级分类	解译标志		
住宅用地				
				
				
				
交通运输用地				
				
				
				
矿山恢复治理				
水域及水利设施用地				
其他土地				

典型的铁矿采场在遥感影像上边界较清晰,地势低于周围区域并呈阶梯状分布,有运输的道路与之相连,多分布于海南省西部昌江黎族自治县的山区地带;锆钛砂矿的采场在影像上呈较亮的白色,不规则形状,周围有成片积水的坑塘,分布于地势平坦的东部滨海平原地带;建筑用花岗石等建材及非金属矿山在海南省分布较普遍,在影像上色彩较亮,明显有切割的痕迹,地势低于周围地区,偶尔可见切割机和运输车辆。中转场地多处于地势平坦的地区,对于地下开采和联合开采的矿山,中转场地通常为特定的加工厂房;而露天开采矿山的中转场地呈现较亮的颜色,与矿山采场邻近或有道路相连接,场地上有明显的分选装置、运输通道和矿石堆,偶尔可见运输车辆。固体废弃物主要包括废石堆、尾矿库、排土场等,废石堆在影像上地势高于周围地物,堆积物明显,粗糙有颗粒感;尾矿库特征显著,多处于地势低洼的地区,影像上可见有拦坝,积水呈现异常色调,植被覆盖稀少。矿山建筑在影像上多呈矩形分布,中小型的矿山建筑多为彩钢屋顶,呈现蓝色或白色。

以建立的解译标志为依据,采用 ArcGIS 软件平台,进行人机交互解译,获取 2018 年矿山占损土地和恢复治理信息。经野外验证,遥感解译结果的正确率达到 95%,证明了信息提取的可靠性。

3.3 矿山地质环境评价

本研究以采矿对矿山影响程度为主、兼顾矿区环境背景条件、突出矿山环境地质问题现状为原则,基于解译提取的海南岛 2018 年矿山地质环境遥感调查监测结果,结合收集获取的自然地理、基础地质和地质环境相关数据,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)进行海南岛矿山地质环境评价分析,将海南岛矿山地质环境评价分区划分为严重影响区、较严重影响区、一般影响区和无影响区。

选择对评价目标起主导作用的参评因子是建立地质环境评价指标体系的关键。根据海南岛的矿山地质环境特征,选定 13 个评价因子对研究区进行评价分析,分别为自然地理(地形地貌、降雨量、植被覆盖度、区域重要程度)、基础地质(构造、岩性组合)、资源损毁(开采矿山密度、开采强度、主要开采方式、主要矿种、占用土地比例)、地质环境(地质灾害、生态环境恢复治理)。选择的评价因子均可量化分级,参照矿产资源开发遥感监测技术规范划分,建立海南岛矿山地质环境评价指标体系(表 2)。采用 500 m × 500 m 的正方形网格作为评价单元,评价单元在矿山地质环境条件上具有一致性,对研究区进行分格处理。

表 2 海南岛矿山地质环境评价指标体系

Tab.2 Index system of mine geological environment assessment

评价体系	评价指标	评价指标分级标准		
		1 级	2 级	3 级
自然地理	地形地貌	地形复杂,地貌单元类型多,地形坡度 >35°	地形较复杂,地貌单元类型少,地形坡度为 20° ~ 35°	地形简单,地貌单元类型单一,地形坡度 <20°
	降雨量	>800 mm 湿润地区	200 ~ 800 mm 半干旱半湿润地区	<200 mm 干旱地区
	植被覆盖度	<30%	30% ~ 60%	>60%
	区域重要程度	重要区	较重要区	一般区
基础地质	构造	地质构造复杂,断裂构造发育强烈,节理发育,对矿坑、挖损土地充水及矿床开采影响大	地质构造较复杂,断裂构造较发育,节理较发育,对矿坑、挖损土地充水及矿床开采有一定影响	地质构造简单,断裂构造、节理不发育,对矿坑、挖损土地充水及矿床开采影响很小或无影响
	岩性组合	松散堆积物	软岩为主	硬岩为主
资源损毁	开采矿山密度	开采点 >5 个/网格	开采点 1 ~ 5 个/网格	无开采
	开采强度	>50 万 t/a	0 ~ 50 万 t/a	无开采
	主要开采方式	露天	地下	无开采
	主要矿种	能源	金属、非金属	无开采
	占用土地比例	>10%	0 ~ 10%	无矿业占地
地质环境	地质灾害	有 3 个小型或 1 个大型地质灾害	有 1 ~ 2 个小型地质灾害	无地质灾害
	生态环境恢复治理	开采面积 >10%,有 3 个以上地质灾害	矿山占地面积为 0 ~ 10%,且有 1 ~ 2 个地质灾害	无矿山占地和地质灾害

层次分析法是一种解决多目标复杂问题的定性
与定量相结合的决策分析方法^[17-18]。本文通过建
立层次结构模型、构造判断矩阵、层次单排序及其一
致性检验、层次总排序及其一致性检验,从而确定各
个因子的权重(表 3)。

表 3 矿山地质环境评价指标权重分布

Tab.3 Weight of the mine geological
environment assessment index

评价指标	权重
地形地貌	0.04
降雨量	0.02
植被覆盖度	0.05
区域重要程度	0.04
构造	0.04
岩性组合	0.04
开采矿山密度	0.16
开采强度	0.08
主要开采方式	0.06
主要矿种	0.06
占用土地比例	0.17
地质灾害	0.12
生态环境恢复治理	0.12

通过建立矿山地质环境影响评价模型,对矿山
地质环境进行评价,评价模型为:

$$M = \sum \omega_i D_i \text{ ,} \tag{1}$$

式中: M 为矿山地质环境影响综合指数; ω_i 为各个
评价因子的权重; D_i 为各个评价因子的标准化值,
代表各个因子的环境问题影响强度。

基于 ArcGIS 软件平台,通过空间分析和叠置运
算,计算得到每个评价单元的矿山地质环境影响综

合指数;再通过聚类分析,将评价单元分为严重影
响区、较严重影响区、一般影响区和无影响区,评价
结果如图 3 所示。

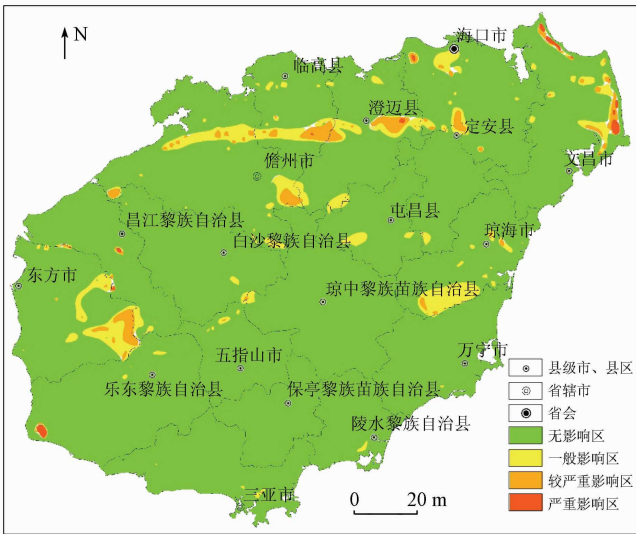


图 3 海南岛 2018 年矿山地质环境影响评价

Fig.3 Assessment of mine geological environment
impact of Hainan Island in 2018

3.4 结果分析及对策建议

3.4.1 评价结果分析

从评价结果得出,海南岛 2018 年严重影响区、
较严重影响区、一般影响区和无影响区分别占该省
份国土面积的 0.22%,1.68%,4.93% 和 93.17%,
总体来看海南岛矿产资源开发对环境的扰动较弱,
绝大部分区域都是矿山环境无影响区。

海南省矿山地质环境严重影响区主要分布于沿
海的文昌市、乐东黎族自治县,北部的海口市秀英
区、澄迈县、临高县,西部的昌江黎族自治县等 6
个集中区。涉及矿种主要为铁矿、锆钛砂矿、建筑用砂

等。除昌江黎族自治县存在铁矿大规模地上地下联合开采外,余下地区均以露天开采为主。昌江黎族自治县铁矿开采历史时间长、开采规模大,形成了大面积的矿山开发损毁土地,矿山占地类型主要为采场、中转场地、固体废弃物等,引发了较突出的采空塌陷、滑坡等次生地质灾害,对区域生产安全和生态环境造成了严重的影响。东部滨海地区的锆钛砂矿储量大、开采方便,形成了大片的开采损毁土地,主要为采场、中转场地等占地类型,采矿活动造成了地表植被的砍伐,加之该地区气温高、旱季长的气候条件,导致了水源不足,加剧了水土流失,造成生态系统的退化。此外,文昌市是台风登陆比较频繁的地区,随风产生大量风沙流,本已贫瘠的砂土中养分进一步流失,导致区域生态环境更加恶化^[19-20]。

较严重影响区主要分布于文昌市东部沿海,儋州市、澄迈县、琼海市的中部,临高县的南部,海口市的北部和西部,东方市的东部等地。涉及矿种主要为黑色金属矿和建材类非金属矿开采区域,该区域矿产资源开采规模以中小型为主,但开采矿山数量较多,矿山开发占地主要为采场和固体废弃物,铁矿开采区滑坡等损毁土地较为突出,矿山开发对原始地形地貌和自然生态环境造成了较严重影响。

一般影响区主要分布于海南省的东部沿海、中部和北部经济较发达地区、西部金属矿产较丰富地区,南部分布较小。主要为建材类非金属矿产,含少量小型稀有稀土分散元素矿产和金属矿产,该区域的矿山分布较分散且开采规模小,存在的主要矿山地质环境问题为矿山开采过程中对地表地貌及自然植被的破坏。

无影响区分布面积最广,全区各个市县均有分布,区域内基本无大中型矿山出露,或仅涉及个别小型非金属矿山,对区域生态环境影响较小或基本无影响。

3.4.2 修复治理建议

针对不同地区的矿山地质环境问题,要因地制宜、分类施策。针对金属矿山开采引发的地质环境问题(如铁矿、金矿、钨矿等),应先消除地质灾害隐患,对露天开采形成的采坑进行边坡稳固,对地下开采形成的采空塌陷地,结合实际地质环境特点进行回填复垦和改造。其次,针对金属矿开采形成的废水、废渣和废气造成较突出的水体污染和土壤污染问题,应先进行土壤改良、水环境治理去除污染,再结合海南岛的区域特征,采取自然修复为主,人工修复为辅的原则,进行矿山占地的复垦和绿化,恢复矿区生态系统的稳定性。

针对锆钛砂矿和建材类非金属矿(如建筑用花

岗岩矿、石灰岩、砂岩等)开采造成的环境问题,要注重植被的恢复,防治水土流失,改善采矿引起的生态系统退化问题。对问题比较严重的滨海沙地,开采过的废弃沙地较贫瘠,可以种植西瓜、花生等农作物进行土壤改良,积累足够养分后种植适宜生长的木麻黄、青梅等树木,逐步建立稳定的防护林生态系统。

4 结论

本文以 2018 年海南岛国产高空间分辨率遥感影像为数据源,通过建立矿山占地分类体系,基于以往的矿山监测成果进行野外踏勘,根据不同地物的影像特征建立解译标志,采用人机交互解译获取 2018 年海南岛矿山占损土地和恢复治理信息。根据海南岛的矿山地质环境特征,选择自然地理、基础地质、资源损毁、地质环境等 4 类 13 个评价因子建立矿山地质环境评价指标体系,采用层次分析法确定各个因子的权重指标,建立矿山地质环境影响评价模型,获取每个评价单元的矿山地质环境影响综合指数,利用聚类分析获取矿山开采严重影响区、较严重影响区、一般影响区和无影响区 4 类。通过对评价结果进行分析得出,海南岛 2018 年严重影响区、较严重影响区、一般影响区和无影响区分别占该省份国土面积的 0.22%、1.68%、4.93% 和 93.17%。

1) 严重影响区主要分布于沿海的文昌市、乐东黎族自治县,北部的海口市秀英区、澄迈县、临高县,西部的昌江黎族自治县等 6 个集中区。主要矿山地质环境问题为大型铁矿开采引发的采空塌陷、滑坡等次生地质灾害,对区域生产安全和生态环境造成了严重的影响;沿海锆钛砂矿开采造成的地表植被的砍伐,加剧水土流失,造成生态系统的退化。

2) 较严重影响区主要分布于文昌市东部沿海,儋州市、澄迈县、琼海市的中部,临高县的南部,海口市的北部和西部,东方市的东部等地区。主要矿山地质环境问题为中小型铁矿开采引起的滑坡等造成的土地损毁,矿山开发对原始地形地貌和自然生态环境造成了较严重影响。

3) 一般影响区主要分布于海南省的东部沿海、中部和北部经济较发达地区、西部金属矿产较丰富地区,南部分布较小。主要矿山地质环境问题为建材类非金属矿山分布分散、小型矿山开采过程中对地表地貌及自然植被的破坏。

根据不同矿山地质环境问题,提出对矿山生态修复的对策和建议:

1) 对金属矿山首先消除地质灾害隐患,稳固采坑边坡,回填复垦和改造采空塌陷;其次,进行土壤

改良和水环境治理去除污染;最后,以自然恢复为主、人工修复为辅进行矿区生态系统的修复。

2)对锆钛砂矿、建材类非金属矿,主要注重防治水土流失,对问题比较严重的滨海沙地,采取种植西瓜、花生等农作物进行土壤改良,再植以木麻黄、青梅等树木,逐步建立稳定的防护林生态系统。

参考文献 (References):

- [1] 温宁,张志荣,王修田,等.矿产勘查结硕果——海南省地质矿产勘查开发局“十五”期间重要地质找矿成果综述[C]//“十五”重要地质科技成果暨重大找矿成果交流会.中国地质学会,2006:194-196.
Wen N, Zhang Z R, Wang X T, et al. Achievement of mineral exploration: Summary of important geological prospecting achievement of Hainan bureau of geology and mineral exploration and development during the tenth five-year plan period[C]//“Tenth Five-year Plan” Important Geological Science and Technology Achievements and Important Prospecting Achievements Exchange Meeting. Geological Society of China, 2006: 194-196.
- [2] 李鹏伟.海南省矿山开发状况及恢复治理遥感监测[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
Li P W. Remote sensing monitoring of mine development and restoration in Hainan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [3] 全长亮.海南岛海砂资源的分类特征及成矿特点分析[J].中国地质调查,2018,5(3):74-80.
Tong C L. Classification and metallogenic characteristics of sea sand resources in Hainan Island. [J]. Geological Survey of China, 2018, 5(3): 74-80.
- [4] 余海青.海南省海洋经济现状及战略研究[D].天津:天津大学,2009.
Yu H Q. Present situation and strategy of marine economy in Hainan Province[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [5] 王堂源.海南省海岸带生态环境可持续发展实证研究[D].成都:成都理工大学,2011.
Wang T Y. An empirical study on sustainable development of ecological environment in coastal zone of Hainan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [6] 黄萍.自然资源使用权制度研究[D].上海:复旦大学,2012.
Huang P. Study on the system of use right of natural resources [D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [7] 王润生,熊盛青,聂洪峰,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 R S, Xiong S Q, Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.
- [8] 关涛.中国土地资源配置与可持续发展研究[D].黑龙江:东北农业大学,2002.
Guan T. Research on the allocation and sustainable development of land resources in China [D]. Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2002.
- [9] 邓辉.高精度卫星遥感技术在地质灾害调查与评价中的应用[D].成都:成都理工大学,2007.
Deng H. Application on investigation and evaluation of geohazard by high-precision satellite remote sensing technique [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [10] 汪洁,刘小杨,杨金中,等.基于国产高空间分辨率卫星数据的浙江省矿山环境恢复治理典型模式分析[J].国土资源遥感,2020,32(3):216-221. doi:10.6046/gtzyyg.2020.03.28.
Wang J, Liu X Y, Yang J Z, et al. Typical model analysis of mine geological environment restoration and management in Zhejiang Province based on domestic high-resolution satellite data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(3): 216-221. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.03.28.
- [11] 汪洁,殷亚秋,于航,等.基于RS和GIS的浙江省矿山地质环境遥感监测[J].国土资源遥感,2020,32(1):232-236. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.31.
Wang J, Yin Y Q, Yu H, et al. Remote sensing monitoring of mine geological environment in Zhejiang Province based on RS and GIS [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 232-236. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.31.
- [12] 高俊华,刘莎莎,杨金中,等.基于遥感的露天煤矿集中区地质环境关联评价——以准格尔煤田为例[J].国土资源遥感,2021,33(1):183-190. doi:10.6046/gtzyyg.2020006.
Gao J H, Liu S S, Yang J Z, et al. Gray correlation evaluation of geological environment in the open-pit coal mine concentration area based on remote sensing: A case study of the Zhungeer Coalfield [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 183-190. doi: 10.6046/gtzyyg.2020006.
- [13] 赵玉灵.基于层次分析法的矿山环境评价方法研究——以海南岛为例[J].国土资源遥感,2020,32(1):148-153. doi:10.6046/gtzyyg.2020.01.20.
Zhao Y L. Study and application of analytic hierarchy process of mine geological environment: A case study in Hainan Island [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 148-153. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.20.
- [14] 殷亚秋,杨金中,汪洁,等.长江经济带废弃矿山占损土地遥感调查与生态修复对策[J].国土资源遥感,2020,32(2):170-176. doi:10.6046/gtzyyg.2020.02.22.
Yin Y Q, Yang J Z, Wang J, et al. Remote sensing survey of land occupied and damaged by abandoned mines along the Yangtze River Economic Belt and research on ecological remediation countermeasures [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 170-176. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.22.
- [15] 王博.基于Aster G-Dem的海南岛地形地貌信息提取与土地利用景观格局分析[D].海口:海南大学,2010.
Wang B. Topographic and geomorphic information extraction and landscape pattern analysis of land use in Hainan Island based on Aster G-Dem [D]. Haikou: University of Hainan, 2010.
- [16] 卢俊培.海南大农业的命脉——森林[J].热带林业科技,1981(4):1-6.
Lu J P. The lifeblood of great agriculture in Hainan: Forest [J]. Tropical Forestry Science and Technology, 1981(4): 1-6.
- [17] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008(5):148-153.
Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. Study and application of analytic hierarchy process [J]. China Safety Science Journal, 2008(5): 148-153.
- [18] 倪绍祥.近10年来中国土地评价研究的进展[J].自然资源学报,2003(6):672-683.
Ni S X. Progress in the research on land evaluation in China during the last 10 years [J]. Journal of Natural Resources, 2003(6): 672-

- 683.
- [19] 赵玉灵, 杨金中, 殷亚秋, 等. 海南岛东部滨海锆钛砂矿开发状况遥感监测与生态恢复治理对策研究[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 143–150. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 19.
- Zhao Y L, Yang J Z, Yin Y Q, et al. Research on remote sensing monitoring of zirconium – titanium sand mine exploitation and strategies of ecological restoration on the eastern beach of Hainan Island [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(4): 143 – 150. doi:10.6046/gtzyyg. 2019. 04. 19.
- [20] 高 静. 海南岛东部滨海砂矿废弃地植被恢复效应的比较研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2007.
- Gao J. Comparative study on vegetation restoration effect of coastal placer abandoned land in eastern Hainan Island [D]. Haikou: Hainan Normal University, 2007.

Remote sensing evaluation of mine geological environment of Hainan Island in 2018 and ecological restoration countermeasures

YIN Yaqiu¹, JIANG Cunhao¹, JU Xing¹, CHEN Keyang², WANG Jie¹, XING Yu¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Ningbo Natural Resources Management and Reservation Center, Ningbo 315042, China)

Abstract: The exploitation of rich and unique mineral resources in Hainan Island has promoted economic growth but has also caused serious ecological environment problems. Analyzing the impacts of mining in Hainan Island and proposing suggestions on ecological restoration facilitate the protection and management of the ecological environment in Hainan Island. To this end, this study obtained the information on land destruction and ecological restoration of mines in Hainan Island using 2018 remote sensing images with high spatial resolution through image preprocessing, establishing interpretation indicators, and man – machine interactive interpretation. Specifically, with the information on land destruction and ecological restoration of mines as input, the assessment indicator system for mine geological environment was established based on 13 assessment factors of four categories, namely physical geography, basic geology, resource damage, and geological environment. Then, this study analyzed and assessed the effects of the geological environment of mines based on the analytic hierarchy process, obtaining the following results. The severely affected areas account for 0.22% of the total land area of Hainan Province and are mainly distributed in Wenchang City, Ledong Li Autonomous County, Xiuying District of Haikou City, Chengmai County, Lin’gao County, and Changjiang Li Autonomous County. The mine geological environment problems in these areas mainly include secondary geological disasters such as mining collapse of goaves and landslides caused by the mining of large – scale iron ore mines, as well as soil erosion and ecosystem degradation caused by the mining of coastal zirconium – titanium placers. The moderately severely affected areas account for 1.68% of the total land area of Hainan Province and are mainly distributed in Wenchang City, Danzhou City, Chengmai County, Qionghai City, Lin’gao County, Haikou City, and Dongfang City. The mine geological environment problems mainly include land damage caused by landslides induced by the mining of small – and medium – sized iron ore mines, as well as severe impacts on original terrain and landforms and the natural ecological environment caused by mining. The generally affected areas account for 4.93% of the total land area of Hainan Province and are mainly distributed in the coastal areas in the eastern part, the economically developed areas in the middle and northern parts, and the area with rich metallic minerals in the western part in Hainan Province. The mine geological environment problems in these areas mainly include the destruction of the surface landforms and natural vegetation caused by the mining of the scattered small nonmetal mines of building materials. This study proposed ecological restoration countermeasures targeting the different geological environment problems. For metal mines, it is suggested to primarily restore the ecosystem by natural restoration methods, supplemented by artificial restoration methods based on the elimination of geological hazards, soil improvement, and water environment management. For zirconium – titanium placers and nonmetal mines of building materials, it is recommended to restore vegetation to prevent water and soil erosion. For the coastal mine areas with severe desertification, it is recommended to gradually restore the ecosystem of the mining areas by growing crops such as watermelons and peanuts to improve soil and planting trees such as casuarina and *Vatica hainanensis*.

Keywords: Hainan Island; remote sensing; geological environment of mines; ecological restoration

(责任编辑: 陈 理)