

doi: 10.6046/zrzyyg.2023182

引用格式: 陈理, 张仙, 李伟, 等. 基于分层次多尺度分割的缅甸达贡山镍矿矿区信息提取与动态变化监测[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 55–61. (Chen L, Zhang X, Li W, et al. Hierarchical multi-scale segmentation-based information extraction and dynamic monitoring for the Tagaung Taung nickel deposit, Myanmar[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 55–61.)

基于分层次多尺度分割的缅甸达贡山镍矿 矿区信息提取与动态变化监测

陈理, 张仙, 李伟, 李瑜, 陈昊旻

(中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 高空间分辨率遥感影像已被广泛应用于矿区分类。针对典型露天红土风化壳型镍矿矿区信息提取及其动态变化监测的研究相对较少等问题, 该文以缅甸著名的达贡山镍矿为研究区, 基于 Pleiades 和 GF-2 高空间分辨率遥感影像数据, 首先采用分层次多尺度分割的面向对象分类方法, 提取矿区地物信息; 然后, 对达贡山镍矿的动态变化情况进行分析; 最后, 从定性和定量 2 个方面对分类结果进行精度评价。研究表明, 基于分层次多尺度分割技术的分类识别效果较好, Pleiades 和 GF-2 影像的整体分类精度分别为 94.24% 和 89.02%, Kappa 系数分别为 0.889 和 0.816, 该方法适用于露天红土镍矿的矿区信息提取。通过动态变化分析, 2015—2017 年达贡山镍矿开采规模不断扩大, 开采速度较快, 具有良好的资源开发潜力和广阔的开发前景。研究结果可为缅甸达贡山镍矿区的动态变化监测提供技术支持。

关键词: 分层多尺度分割; 信息提取; 动态变化监测; 镍矿

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0055-07

0 引言

随着遥感技术的快速发展, WorldView, Quick-Bird, IKONOS 和国产高分系列 (GF) 等高空间分辨率遥感影像被广泛应用于农业遥感监测^[1]、植被生物量评估^[2]、土地利用/覆盖变化^[3]、建筑物提取^[4]和矿山开发状况遥感监测及生态环境评价^[5-8]等领域中。特别是近年来, 为了避免“椒盐”效应, 充分利用高空间分辨率遥感影像的光谱、形状、空间和纹理特征来提高分类精度, 面向对象的分类方法已替代了以像元为基本单元的传统分类方法, 逐渐成为研究热点。

在矿区信息提取中, 徐振恒等^[9]利用 GF-1 PMS 数据对我国南方的热液铀成矿区开展了岩性识别, 实现了沉积岩、变质岩和花岗岩等正确分类; 范莹琳等^[10]利用北京二号遥感影像基于面向对象提取了迁西地区的铁尾矿信息; 蔡祥等^[11]采用无

人机低空遥感技术获取矿区影像, 并提出一种基于面向对象和深度学习的矿区无人机影像地物提取方法, 结果表明提取精度明显提高; 董佰山等^[12]利用 GF-2 数据采用面向对象的分类方法对铁矿区的土地利用进行了分类。另外利用 GF-2 数据针对不同的矿种 (如锰矿^[13]及稀土矿^[14]) 也开展了相关研究。然而, 不同的地物类型通常都具有各自适宜的空间尺度, 利用统一的分割尺度很难获得精确的分类效果。针对单一尺度提取影像特征的不合理性, 黄惠萍等^[15]提出了多尺度遥感影像分析方法; 党涛等^[16]基于多层次分割分类模型开展了建筑物的信息提取, 与单一尺度相比, 能够获得更高精度的建筑物提取结果。但是, 针对露天红土型镍矿矿区复杂的地表环境, 利用高空间分辨率遥感影像采用分层次多尺度分割的面向对象分类方法进行信息提取及其动态变化监测的研究较少。因此, 本文拟以缅甸著名的达贡山镍矿为研究区, 基于 Pleiades 和 GF-2 高空间分辨率遥感影像, 针对矿区的复杂性和非

收稿日期: 2023-06-25; 修订日期: 2023-09-22

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“‘一带一路’资源环境卫星遥感解译与应用” (编号: DD20160117) 和自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室航空遥感青年创新基金课题“面向对象的红土型镍矿多要素识别提取与矿业活动变化定量分析研究” (编号: 2020YFL32) 共同资助。

第一作者: 陈理 (1986-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感地质应用研究。Email: chenlixzy@163.com。

通信作者: 李瑜 (1982-), 女, 正高级工程师, 主要从事遥感技术应用和自然资源遥感期刊编辑工作。Email: gtzyygliyu@163.com。

均质性,探讨分层次多尺度分割的面向对象分类方法在矿区信息提取中的应用潜力,旨在为该矿区的动态变化监测提供技术支持。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

达贡山红土型镍矿床位于缅甸北部曼德勒省、实皆省和北掸邦的交界处,属于曼德勒省塔贝金镇^[17]。该矿区地理坐标为 E96°06′~96°10′, N23°33′~23°36′,紧靠依洛瓦底江东岸,南距曼德勒市约 220 km,交通十分便利^[18]。矿区属亚热带季风气候,雨季从每年的 4 月中旬持续到 11 月中旬,雨季长且降水量大,月平均降水量达 145 mm;其他月份为旱季,月平均降水量约 9 mm;年平均降水量约 1 200 mm,年平均气温在 17~30 ℃ 之间^[19],有利于植被生长。该矿区为河流平坝和中低山地貌,山脚平原多为次生热带雨林,海拔约 100 m;山顶周围地势较为平坦,呈略有起伏的平台,覆盖着红壤和茂密的原始热带雨林,最高海拔仅 775 m,红土型镍矿体就产出于该平台。

达贡山矿区大地构造位于青藏板块的密支那—实皆板块结合带,雅鲁藏布江缝合带南段的达贡—密支那缝合带南端^[17],区域矿产与板块缝合带构造具有明显的成因关系。矿区出露三叠系、白垩系、古近系、新近系和第四系地层,区内基性—超基性岩和蛇绿岩发育(图 1)。达贡山红土型镍铬多金属矿与蛇绿岩套密切相关,因此具有优越的镍铬多金属矿成矿有利条件^[18]。该区镍矿体主要分布在达贡山山顶平缓地带,产出于超基性岩体上部的含镍红土

风化壳中,且分层明显,自下而上分别为:基岩—腐岩层(主要含矿层)—褐铁矿化层—红土层^[17]。达贡山红土层与超基性岩红土风化壳的典型残余红土层的矿物含量略有不同,但达贡山红土层的 Ni 和 Cr 含量较高,表明其仍主要由超基性岩风化物质组成。该矿区东西宽 18 km,南北长 12 km,占地面积约 40 km²。矿床边界品位为 1.4%,平均品位为 2.06%,最大单样可达 5.7%;矿体埋深为 1~22 m,厚度一般为 3~25 m,矿体形态和产状明显受地形控制^[20]。该矿区地表土地利用类型包括水体、植被、道路、建筑物、裸土、矿区和尾矿坝等,遥感影像特征丰富。达贡山镍矿资源丰富,地质勘查已圈定镍金属约 70 万 t^[21],综合利用价值高,勘探开发方便,享誉世界,受到各国广泛关注。

1.2 数据源及其预处理

遥感影像数据包括 2015 年 11 月 7 日获取的 Pleiades 影像和 2017 年 1 月 25 日获取的 GF-2 影像。Pleiades 卫星是由法国研制的高空间分辨率地球观测卫星,属于 SPOT 卫星家族的后续卫星^[22]。该卫星传感器可获取空间分辨率为 0.5 m 的全色影像和空间分辨率为 2 m 的 4 个波段的多光谱影像,包括蓝、绿、红和近红外波段。作为我国自主研制的首颗空间分辨率优于 1 m 的民用光学遥感卫星 GF-2,其运行高度为 631 km,倾角为 97.908°,重访周期为 5 d,同样可以获得全色和 4 个波段的多光谱影像^[23]。2 种卫星影像参数对比如表 1 所示。

表 1 Pleiades 和 GF-2 卫星影像参数

Tab.1 Parameters of GF-2 and Pleiades image

参数		Pleiades	GF-2
光谱范围/nm	全色	480~830	450~900
		430~550	450~520
	多光谱	490~610	520~590
		600~720	630~690
空间分辨率/m	全色	0.5	1
	多光谱	2	4
幅宽/km		20	45(2 台相机组合)
获取时间		2015-11-07	2017-01-25

2 种影像均采用 ENVI5.3 软件进行预处理,主要包括以下 3 个步骤^[24-26]:①辐射校正,包括辐射定标和大气校正,可以有效消除影像获取过程中造成的辐射失真;②几何纠正,通过特征点获取准确的地理坐标;③裁剪,利用研究区范围裁剪获取研究区域。研究区 Pleiades 真彩色合成影像如图 2 所示。研究区内由水体、植被、道路、建筑物、裸土、矿区和尾矿坝 7 类地物类别组成。

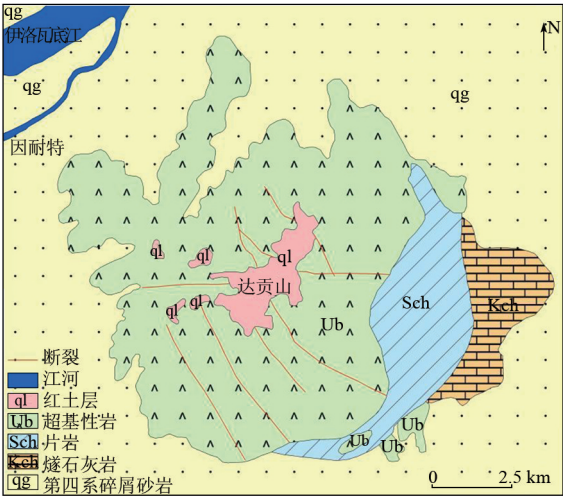
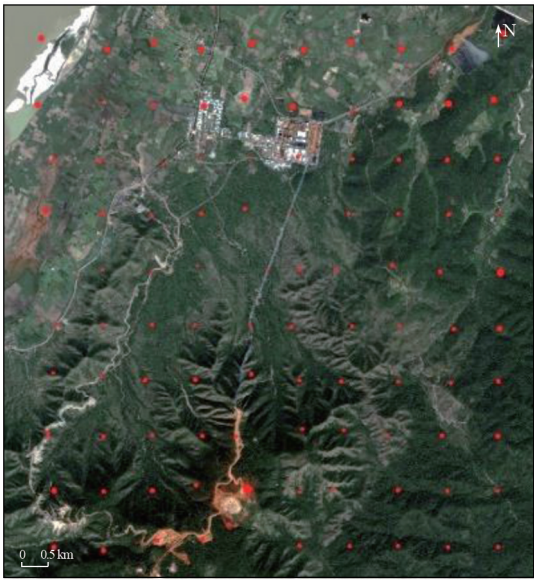


图 1 缅甸达贡山矿区地质简图^[20]

Fig.1 Geological sketch map of Tagaung Taung Orefield in Myanmar



● 验证样本

图 2 研究区 Pleiades 真彩色合成影像和验证样本
Fig.2 True color composite image of Pleiades and verification samples in study area

2 研究方法

面向对象的分类方法就是以由像元合并组成的对象为基本单元,利用对象的光谱、形状和纹理等特征进行地物信息分类提取,其基础就是根据地物的异质性原则将影像进行分割,分割效果的好坏很大程度上决定了分类精度的优劣^[16]。多尺度分割是目前应用最广泛的一种分割方法,依据不同的分割尺度,分割出不同大小的对象,并通过利用分形网格演化区域合并算法保证所分割的对象异质性最小(异质性指标由光谱和形状 2 个因子构成,分别控制着对象的光谱信息和形状对分割结果的影响,形状因子又包括光滑度和紧致度 2 个参数^[27-28])。最优的多尺度分割参数才能保证获得高质量的影像分割结果。尤其是在复杂地表情况下,不同的地物类型都具有各自适宜的空间尺度,利用统一参数的尺度分割难以获得高精度的地物提取结果,需要多层次的分割尺度来匹配不同的地物类型^[29-31]。

综上,本研究采用基于分层次多尺度分割的面向对象分类方法进行矿区提取^[32]。首先,根据研究区内不同地物类型的特征,分 3 个层次进行多尺度分割,不同层次中针对不同的地物选择不同的最优分割尺度;其次,结合物体的光谱特征、纹理特征、形状特征及相关特征,建立分类规则;然后,在研究区域内采用分层次多尺度分割技术提取地物分类结果;最后,利用目视解译获取的验证样本,计算混淆

矩阵,对分类结果进行精度评估。基于分层次多尺度分割的矿区信息提取流程如图 3 所示。

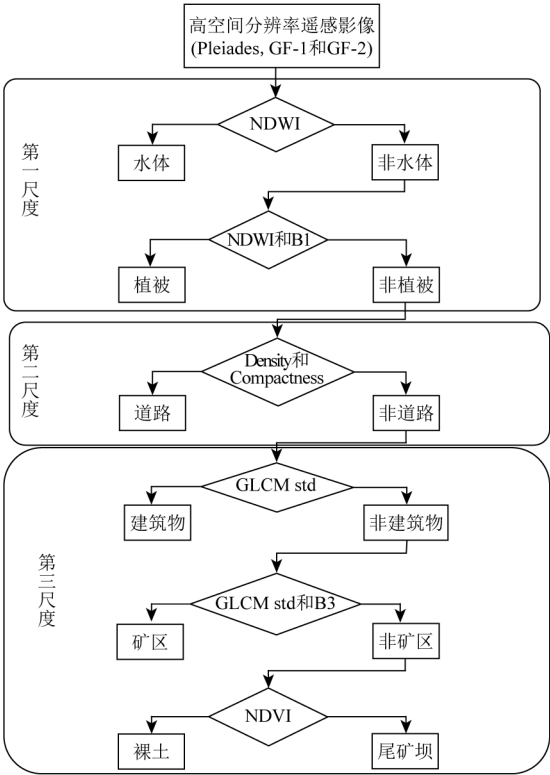


图 3 基于分层次多尺度分割的矿区信息提取流程
Fig.3 Flowchart of mine information extraction based on hierarchical multi-scale segmentation

基于分层次多尺度分割的矿区信息提取具体步骤如下: ①利用 eCognition9.0 软件,导入研究区的蓝光(B1)、绿光(B2)、红光(B3)和 NIR(B4)4 个波段的遥感影像作为输入数据; ②基于分层次多尺度分割技术,采用第一个分割尺度进行分割; ③利用 B2 和 B3 波段计算归一化差异水分指数(normalized difference water index, NDWI)提取水体类别,计算公式为:

$$NDWI = (B3 - B2) / (B3 + B2) ; \quad (1)$$

④在非水体区域,利用 B3 和 B4 波段计算归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),计算公式为:

$$NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3) , \quad (2)$$

根据 NDVI 和 B1 规则提取植被类别; ⑤对未分类的对象进行第二尺度分割; ⑥在非植被区域,按照图斑的密度(density)和紧致度(compactness)规则提取道路类别; ⑦对剩余的未分类对象进行第三尺度分割; ⑧在非道路区域,采用图斑的灰度共生矩阵均值方差(gray-level co-occurrence matrix, GLCM std)规则提取建筑物类别; ⑨在非建筑物区域,采用 GLCM std 和 B3 规则提取矿区类别; ⑩在未分类

对象中,采用 NDVI 规则区分裸土和尾矿坝类别。

3 结果与分析

3.1 矿区提取结果

采用分层次多尺度分割技术的达贡山镍矿矿区地物提取结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,利用 NDWI 和 NDVI 规则,水体和植被都可以被较完整地提取出来。矿区建筑物纹理特征明显,较易于区分。尾矿坝的光谱特征也很明显,也可以清楚地区分。研究区范围内部分矿区亮度较高的区域很容易区分,但是由于大量未开发区域与狭窄的非水泥道路、裸土颜色相似,因此较难区分。为了进一步定量分析分类精度,在研究区域中随机选择 100 个验证样本(图 1)计算混淆矩阵来评估分类结果,分类

精度评价结果如表 2 所示。

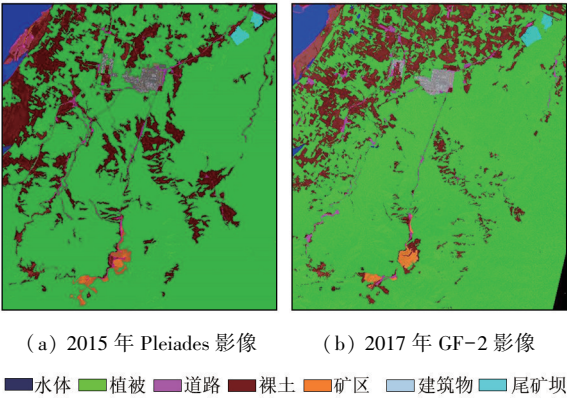


图 4 基于分层次多尺度分割的矿区信息提取结果

Fig.4 Extraction results of mine area information by using hierarchical multi-scale segmentation

表 2 分类结果精度评价

Tab.2 Accuracy evaluation of classification results

数据	精度	类别						
		水体	植被	道路	裸土	矿区	建筑物	尾矿坝
Pleiades	生产者精度/%	100.00	96.52	57.04	87.89	94.78	100.00	100.00
	用户精度/%	100.00	98.07	82.78	69.53	100.00	100.00	100.00
总体精度: 94.24%, Kappa 系数: 0.889								
GF-2	生产者精度/%	100.00	100.00	59.86	67.83	88.87	89.02	100.00
	用户精度/%	100.00	86.72	76.78	90.36	100.00	98.58	100.00
总体精度: 89.02%, Kappa 系数: 0.816								

从表 2 可以看出,2015 年 Pleiades 影像和 2017 年 GF-2 影像的总体分类精度分别为 94.24% 和 89.02%,Kappa 系数分别为 0.889 和 0.816。就地物类别而言,定量与定性分析结果相吻合,水体和植被的光谱特征明显,分类精度明显较高;矿业活动区内的开采区、矿区建筑物和尾矿坝的色调和纹理特征显著,分类规则较易确定,分类效果较好;但狭窄的非水泥道路与裸土光谱特征比较接近,故较难区分,存在一定的错分现象,制图精度和用户精度整体偏低。对比 2 种影像的分类结果,由于空间分辨率的不同,分类精度也存在一定的差异,Pleiades 影像空间分辨率较高,故其分类精度也较高,达到了 94.24%;GF-2 影像空间分辨率较低,其分类精度

也相对较低。但是,总体上两者的分类精度都在 90%左右,可以满足后续矿区动态变化监测研究的需要,多种数据的分类实验也充分证明了本文采用的提取方法的鲁棒性和有效性。

3.2 动态变化分析

基于研究区 2015 年和 2017 年 2 期遥感影像分类提取的矿区、建筑物以及尾矿坝等地物类型,并结合人工目视解译进行修正,开展达贡山镍矿 2015—2017 年间矿区动态变化分析研究。研究区 2015—2017 年镍矿矿区动态变化情况如图 5 所示。为了进一步定量分析 2015—2017 年间矿区的实际动态变化情况,统计分析了研究区矿区露天采场和尾矿坝的面积变化情况(表 3)。

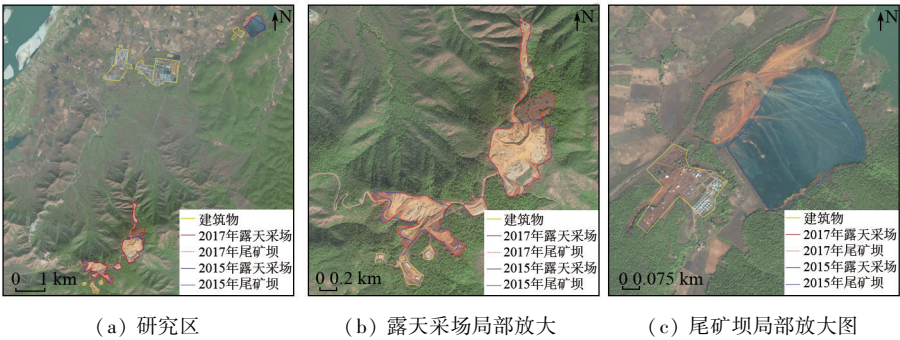


图 5 2015—2017 年达贡山镍矿矿区动态变化

(底图为 GF-2 真彩合成影像)

Fig.5 Dynamic change of Tagaung Taung nickel mine from 2015 to 2017

表 3 2015—2017 年矿区典型地物面积统计
Tab.3 Statistics of typical objects in mining
area from 2015 to 2017 (m²)

年份	矿区露天采场面积	尾矿坝面积
2015 年	898 792.99	249 650.28
2017 年	1 056 184.54	330 737.10

从图 5 和表 3 中可以看出：①2015—2017 年，矿区的中部和南部地区露天采场占地规模持续扩大(图 5(b))，中部露天采场向北扩张明显，南部露天采场整体向外围扩张，北部露天采场范围无明显变化，总体露天采场面积增加 157 391.55 m²；②尾矿坝占地范围也持续扩大(图 5(c))，2015—2017 年间尾矿坝面积增加 81 086.82 m²；③矿区建筑物范围无明显变化，但矿区建筑物数量有所增加。从整体来看，2015—2017 年间，达贡山镍矿的开采规模不断扩大，开采速度较快，呈快速持续扩张的趋势，反映出该矿床具有良好的资源开发潜力和广阔的发展前景。这主要得益于中国有色集团相关技术、人才以及资金的强力支撑，同时也说明缅甸国内对镍矿资源的需求在逐年快速增加。

4 结论与建议

本研究基于 Pleiades 和 GF-2 这 2 种卫星影像数据，采用分层次多尺度分割的面向对象分类方法，开展了缅甸达贡山镍矿矿区信息提取，并对 2015—2017 年间矿区的动态变化情况进行了分析。主要得到以下结论：

- 1)Pleiades 和 GF-2 这 2 种影像数据的整体分类精度分别为 94.24% 和 89.02%，Kappa 系数分别为 0.889 和 0.816。虽然不同年份的不同数据对同一地区的分类精度存在一定程度的差异，但整体上 2 种数据的分层次多尺度分割的分类效果较好，分类精度均能达到 90%左右，完全可以满足应用需求。多种数据的分类实验也充分证明了基于分层次多尺度分割技术的分类提取方法具有一定的鲁棒性和有效性。
- 2)通过对矿区地物的动态变化分析，2015—2017 年达贡山镍矿开采规模不断扩大，中部和南部地区露天采场占地规模持续扩大，总体露天采场面积增加 157 391.55 m²，尾矿坝占地面积也呈扩大趋势，开采速度较快，充分反映出该矿床具有良好的资源开发潜力和广阔的开发前景。
- 缅甸境内镍矿储量十分丰富，但是地质勘探程度较低，同时本国开采、冶炼及加工工业技术水平落后，严重制约镍矿产业的发展。近些年，缅甸国内矿

业投资政策虽然有一定的变化，但在吸引投资合作方面仍然表现出积极的一面，这为我国企业开展投资合作提供了良好的机遇。建议我国相关企业借鉴中国有色集团与缅甸合作的经验，一方面在达贡山镍矿邻区及缅甸其他镍矿区开展勘查以及联合开发项目，另一方面可投资建立镍矿石冶炼加工厂，转移国内镍矿企业产能，实现合作共赢。

另外，本研究中仍然存在一些不足之处，由于裸土、狭窄的非水泥道路和待开采区域的影像色调相似，难以区分，导致 3 种矿区地物分类精度整体较低。因此，今后应该着重加强这 3 类地物的分类规则研究，进一步提高分类精度。针对分层次多尺度分割技术，如何确定更合理的最优参数也是未来值得研究的课题。

参考文献 (References) :

[1] Upadhyay P, Ghosh S K, Kumar A, et al. Effect on specific crop mapping using WorldView-2 multispectral add-on bands: Soft classification approach [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1): 063524.

[2] Mutanga O, Adam E, Cho M A. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 399-406.

[3] Pacifici F, Chini M, Emery W J. A neural network approach using multi-scale textural metrics from very high-resolution panchromatic imagery for urban land-use classification [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1276-1292.

[4] Longbotham N, Chaapel C, Bleiler L, et al. Very high resolution multiangle urban classification analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 50(4): 1155-1170.

[5] 高俊华, 邹联学, 龙 欢, 等. 基于遥感动态监测的吉林省矿山地质环境及生态修复变化特征分析 [J]. 自然资源遥感, 2022, 34(3): 240-248. doi: 10.6046/zrzyyg.2021278.

Gao J H, Zou L X, Long H, et al. Analysis on characteristics of mine geological environment and ecological restoration changes in Jilin Province based on dynamic remote sensing monitoring [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 240-248. doi: 10.6046/zrzyyg.2021278.

[6] 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.

[7] 王海庆, 郝建亭, 李 丽, 等. 西藏各行政区矿产开采强度遥感分析 [J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 115-119. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.16.

Wang H Q, Hao J T, Li L, et al. Mining intensity analysis of each administrative region in Tibet based on remote sensing [J]. Remote

Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 115–119. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.16.

[8] 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.

[9] 徐振恒, 潘 蔚, 张元涛. 高分一号遥感数据在南方热液铀成矿区岩性识别中的应用研究[J]. 铀矿地质, 2021, 37(2): 227–234.

Xu Z H, Pan W, Zhang Y T. Application of GF1 image in lithology recognition of hydrothermal uranium metallogenic area, South China[J]. Uranium Geology, 2021, 37(2): 227–234.

[10] 范莹琳, 娄德波, 张长青, 等. 基于面向对象的铁尾矿信息提取技术研究——以迁西地区北京二号遥感影像为例[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 153–161. doi: 10.6046/zrzyyg.2021027.

Fan Y L, Lou D B, Zhang C Q, et al. Information extraction technologies of iron mine tailings based on object-oriented classification: A case study of Beijing-2 remote sensing images of the Qianxi Area, Hebei Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(4): 153–161. doi: 10.6046/zrzyyg.2021027.

[11] 蔡 祥, 李 琦, 罗 言, 等. 面向对象结合深度学习方法的矿区地物提取[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 63–71. doi: 10.6046/gtzyyg.2020111.

Cai X, Li Q, Luo Y, et al. Surface features extraction of mining area image based on object-oriented and deep-learning method[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 63–71. doi: 10.6046/gtzyyg.2020111.

[12] 董佰山, 杨 耘, 崔琴芳. 基于高分二号的矿区土地利用精细分类与分析[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(1): 81–85.

Dong B S, Yang Y, Cui Q F. Detailed classification and analysis based on separator No. 2 land use in mining area[J]. Journal of Gansu Sciences, 2019, 31(1): 81–85.

[13] 李祥强, 倪 斌, 彭 欣. 基于 OLI 和 GF-2 数据的锰矿化信息提取分析与对比——以新疆西昆仑玛坎苏锰矿带为例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 1040–1049.

Li X Q, Ni B, Peng X. Analysis and comparison of extracting manganese mineralization information from OLI and GF-2 data: An example of the malkansu manganese mine in West Kunlun, Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(5): 1040–1049.

[14] 李恒凯, 瓮旭阳. 基于 GF-2 影像的离子吸附型稀土矿区地表覆盖分层分类提取方法研究[J]. 稀土, 2022, 43(2): 108–119.

Li H K, Weng X Y. Study on stratified and classified extraction method of ion-adsorption rare earth mining area surface cover based on GF-2 image[J]. Chinese Rare Earths, 2022, 43(2): 108–119.

[15] 黄慧萍, 吴炳方. 地物提取的多尺度特征遥感应用分析[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(5): 276–281.

Huang H P, Wu B F. Analysis of the multi-scale characteristics with objects extraction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2003, 18(5): 276–281.

[16] 党 涛, 宋 起, 刘 勇, 等. 基于多层次分割分类模型及其特征空间优化的建筑物提取方法[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 111–122. doi: 10.6046/gtzyyg.2019.03.15.

Dang T, Song Q, Liu Y, et al. Extraction of buildings in remote sensing imagery based on multi-level segmentation and classification hierarchical model and feature space optimization[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3): 111–122. doi: 10.6046/gtzyyg.2019.03.15.

[17] 张道红, 孙 媛. 缅甸达贡山含镍风化壳地质地球化学特征及成矿作用[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(3): 332–338.

Zhang D H, Sun Y. Geological-geochemistry characteristics and minerogenesis of nickel-bearing weathering crust in Taguang Taung, Myanmar[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(3): 332–338.

[18] 潘 瀚, 周守余, 李学彪, 等. 缅甸太公当地区那田塘镍铬多金属矿化探异常特征与找矿潜力[J]. 世界有色金属, 2018(8): 118–120.

Pan H, Zhou S Y, Li X B, et al. The geochemical anomaly characteristics and prospecting potential of the Na ta Lin Taung nickel-chromium polymetallic mineral in Taguang Taung, Myanmar[J]. World Nonferrous Metals, 2018(8): 118–120.

[19] 左黎阳. 缅甸达贡山红土型镍矿 H 区生产勘探、开发利用以及深部找矿研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(3): 79–81.

Zuo L Y. Study on production exploration, development and utilization and deep prospecting in H district of Dagongshan nickel mine in Myanmar[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(3): 79–81.

[20] 程迁群, 罗太旭. 缅甸达贡山风化壳型硅酸镍矿床[J]. 云南地质, 2009, 28(4): 420–424.

Cheng Q Q, Luo T X. Tagaung Taung Ni silicate deposit of weathering crust type, Myanmar[J]. Yunnan Geology, 2009, 28(4): 420–424.

[21] 周守余, 杨明德, 颜自给, 等. 缅甸曼德勒省太公当矿区镍铬矿地质特征[J]. 矿床地质, 2014, 33(s1): 1149–1150.

Zhou S Y, Yang M D, Yan Z J, et al. Geological characteristics of Tagaung Taung Nichrome Mine in Mandalay, Myanmar[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(s1): 1149–1150.

[22] 陈政融, 刘世增, 刘淑娟, 等. 基于 Pleiades-1 高分辨率卫星影像的干旱沙区遥感影像分类——以甘肃民勤青土湖为例[J]. 中国农学通报, 2015, 31(20): 126–130.

Chen Z R, Liu S Z, Liu S J, et al. Classification of arid sand remote sensing image based on Pleiades-1 high resolution satellite image: A case study of Qingtu Lake in Minqin County of Gansu Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(20): 126–130.

[23] 柳明星, 刘建红, 马敏飞, 等. 基于 GF-2 PMS 影像和随机森林的甘肃临夏花椒树种植监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(1): 218–229. doi: 10.6046/zrzyyg.2021112.

Liu M X, Liu J H, Ma M F, et al. Monitoring of Zanthoxylum bungeanum Maxim planting using GF-2 PMS images and the random forest algorithm: A case study of Linxia, Gansu Province[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(1): 218–229. doi: 10.6046/zrzyyg.2021112.

[24] 陈 L, Qin Q M, 陈 C, et al. Remote sensing information of mineralizing alteration extraction methods[C]//2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany. IEEE, 2012: 5947–5950.

[25] Chen L, Qin Q M, Bai Y B, et al. Integrating remote sensing and super-low frequency electromagnetic technology in exploration of buried faults [C]//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS. Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2013: 811-814.

[26] Zhen G W, Chen L, Chen C, et al. Alteration anomaly information extraction using hyperspectral remote sensing in coalbed methane enrichment [C]//2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing, China. IEEE, 2016: 5394-5397.

[27] 李靖霞, 文金花. 基于多尺度分割技术的高分辨率影像信息提取方法分析 [J]. 防护林科技, 2021 (1): 42-45.

Li J X, Wen J H. Analysis of high-resolution image information extraction method based on multi-scale segmentation technology [J]. Protection Forest Science and Technology, 2021 (1): 42-45.

[28] 陈俊任, 周晓华, 卢 兴. 基于分层次多尺度分割的面向对象地物分类方法 [J]. 江西测绘, 2018 (4): 26-29.

Chen J R, Zhou X H, Lu X. Object-oriented classification method for surface features based on hierarchical and multi-scale segmentation [J]. Jiangxi Cehui, 2018 (4): 26-29.

[29] 苏腾飞. 基于边界信息的多尺度遥感影像分割质量非监督评价方法 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35 (1): 35-40. doi: 10.6046/zrzyyg.2021444.

Su T F. A unsupervised quality valuation method for multi-scale remote sensing image segmentation based on boundary information [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35 (1): 35-40. doi: 10.6046/zrzyyg.2021444.

[30] 刘小丹, 于 宁, 邱红圆. 基于谱直方图的遥感图像分层次多尺度植被分割 [J]. 国土资源遥感, 2017, 29 (2): 82-89. doi: 10.6046/gtzyyg.2017.02.12.

Liu X D, Yu N, Qiu H Y. Hierarchical multi-scale vegetation segmentation of remote sensing image based on spectrum histogram [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29 (2): 82-89. doi: 10.6046/gtzyyg.2017.02.12.

[31] 薛昱晟. 面向地理国情地表覆盖变化检测的多尺度分割方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (1): 47-51.

Xue Y S. Multi-scale segmentation method regarding land cover change detection of national geographic conditions monitoring [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44 (1): 47-51.

[32] Chen L, Li W, Zhang X, et al. Application of object-oriented classification with hierarchical multi-scale segmentation for information extraction in nonoc nickel mine, the Philippines [C]//2018 Fifth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA). Xi'an, China. IEEE, 2018: 1-3.

Hierarchical multi-scale segmentation-based information extraction and dynamic monitoring for the Tagaung Taung nickel deposit, Myanmar

CHEN Li, ZHANG Xian, LI Wei, LI Yu, CHEN Haomin

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: High-resolution remote sensing images have been widely applied to classification of ore deposits. However, there is a lack of studies on the information extraction and dynamic monitoring of open-pit lateritic nickel deposits. Using high-resolution remote sensing images from the Pleiades and GF-2 satellites, this study investigated the famous open-pit Tagaung Taung nickel deposit in Myanmar. First, information about surface features was extracted using object-oriented classification based on hierarchical multi-scale segmentation. Then, the dynamic changes in the nickel deposit were analyzed. Finally, qualitative and quantitative assessments of the classification accuracy were carried out. The results indicate that the hierarchical multi-scale segmentation technology exhibited encouraging classification and identification effects, with overall classification accuracy of 94.24% and 89.02% and the Kappa coefficients of 0.889 and 0.816, respectively for images from the Pleiades and GF-2 satellites. Therefore, the proposed method is suitable for the information extraction of open-pit lateritic nickel deposits. The dynamic change analysis reveals that the Tagaung Taung nickel deposit experienced continuous expansion of mining at high mining speeds from 2015 to 2017. It can be inferred that this deposit has great potential and broad prospects for resource development. The results of this study can provide technical support for the dynamic monitoring of the Tagaung Taung nickel deposit in Myanmar.

Keywords: hierarchical multi-scale segmentation; information extraction; dynamic monitoring for changes; nickel deposit

(责任编辑: 陈昊昊)