

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.12.013

# 基于无人机遥感影像的裸岩识别及 早期石漠化评价

林家元, 程亚男

1. 西南大学 重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 重庆 400715;
2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715

**摘要:** 石漠化是造成喀斯特地区生态环境退化和社会经济落后的主要因素之一。石漠化现状及其空间分布的调查与评价是治理石漠化的前提。基于卫星遥感技术的石漠化调查评价方法, 因受传感器性能及自然环境的限制, 信息提取精度较低, 适用于裸岩呈大面积连片分布的石漠化地区。无人机遥感技术为石漠化调查评价提供了新的途径, 由于所获图像分辨率高, 特别适用于裸岩呈小面积破碎化分布的早期石漠化地区。以重庆市北碚区槽上地区局部为研究区, 基于无人机可见光影像, 利用面向对象图像分析方法识别提取破碎化裸岩并完成早期石漠化调查评价。采用多尺度分割法来分割影像, 先确定最优分割尺度, 然后创建具有层次结构的地物对象。利用不同层次地物的光谱与形状特征建立对应的地物分类规则。将地物自动分类结果与目视解译数据比较, 对基于规则的对象分类方法进行精度评价。统计研究区所提取裸岩的面积, 根据所占比例, 对石漠化程度进行评价。结果表明, 采用面向对象的规则分类方法对试验区无人机高分辨率影像地物类型分类的总体精度为 88.6%, Kappa 系数为 0.86; 裸岩所占面积为 21.2%, 石漠化程度评价为微度。

**关键词:** 重庆喀斯特槽谷区; 石漠化; 无人机遥感; 面向对象图像分析; 多尺度分割; 分类规则

中图分类号: X87

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1673-9868(2022)12-0125-11



## Identification of Bare Rock and Evaluation of Early Rocky Desertification Using UAV Remote Sensing Image

LIN Jiayuan, CHENG Yanan

1. Chongqing Jinfo Mountain Karst Ecosystem National Observation and Research Station, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Rocky desertification is one of the major factors causing ecological environment degradation and social-economical backwardness in karst areas of Southwest China. Restricted by the sensor performance

收稿日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071678, 41830648)。

作者简介: 林家元, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事无人机环境遥感研究。

and complicated natural environment, the method of rocky desertification investigation and evaluation using satellite remote sensing technology has a relatively low accuracy of extracted information, which is more suitable for large and contiguous distribution area of rocky desertification. UAV remote sensing technology provides a new way for the fine investigation and evaluation of early rocky desertification. Due to the high resolution of the obtained images, it is especially suitable for the karst trough areas where the rocky desertification is distributed in small and discrete patches. In this paper, a karst trough region located in Beibei District of Chongqing was taken as the study area. Based on the UAV RGB image, object-oriented image analysis method was used to identify and extract fragmented bare rock and evaluate early rocky desertification. Firstly, the multi-scale segmentation was used to determine the optimal image segmentation scale and then established the hierarchy of the ground objects. Secondly, the classification rules of various ground object types were established by using the different parameters of spectral and shape features. Thirdly, the accuracy of the rule-based object classification method was evaluated against the visually interpreted results. Finally, the areas of bare rock extracted in the study area were counted, and the degree of rocky desertification was evaluated according to the proportion. The results show that the overall accuracy of the rule-based classification method is 88.6%, the kappa coefficient is 0.86, the area occupation of the bare rock is 21.2%, and the rocky desertification is evaluated as a mild degree. The proposed method has important application value for the early identification and control of rocky desertification in wide karst areas in China.

**Key words:** karst trough region in Chongqing; early rocky desertification; UAV remote sensing; object-oriented image analysis; multi-scale segmentation; classification rule

石漠化是在亚热带脆弱的喀斯特环境背景下,受人类不合理的社会经济活动的干扰破坏,造成土壤严重流失、基岩大面积出露、土地生产力严重下降,地表出现类似荒漠景观的土地退化过程<sup>[1-3]</sup>.中国西南岩溶地区岩石类型主要为碳酸岩,其抗风化能力强,成土速度慢,石漠化一旦发生,很难恢复.喀斯特地貌地形复杂,陡坡多,平地少,陡坡地区土壤容易受到雨水的冲刷形成石漠化,通常坡度大于 $15^\circ$ 的地区容易发生石漠化<sup>[4]</sup>.同时,石漠化地区容易发生山洪、滑坡、泥石流,加上地下岩溶发育,导致水旱灾害频繁发生,几乎连年旱涝相伴.此外,石漠化山地土壤少,贮水能力低,岩层漏水性强,很难给植物提供充足的营养,造成植被稀疏,加上不合理的耕作方式,过度开垦、乱伐乱放牧等人为因素,形成恶性循环,进一步加速了石漠化过程.作为中国三大生态问题之一,喀斯特石漠化的治理已成为重中之重.

治理石漠化的前提是要准确及时地调查获取石漠化的现状及其分布特征,分析形成原因,然后采用有针对性的措施加以治理.调查石漠化的传统方式是人工实地调查,实地调查精度高,但需要耗费大量的人力、物力,而且石漠化多存在于山高坡陡,人烟相对稀少的地区,所以实地调查不能全面完整地获得实际的石漠化状况.随着遥感技术的发展,可以利用卫星遥感图像对石漠化地区进行调查与监测,但是卫星遥感受到传感器性能的限制,所获影像数据分辨率低、获取周期长<sup>[5]</sup>,且需要结合实地调查进行精度验证,容易受到环境的影响.此外,基于卫星遥感影像的地物分类精度也受到多方面的限制,例如无法准确判断阴影部分的地物覆盖类型.卫星遥感调查与监测主要适用于石漠化呈大面积连片分布的地区<sup>[6]</sup>,而对于石漠化早期阶段形成的小面积呈点状或线状零星分布的裸岩则无法有效识别.

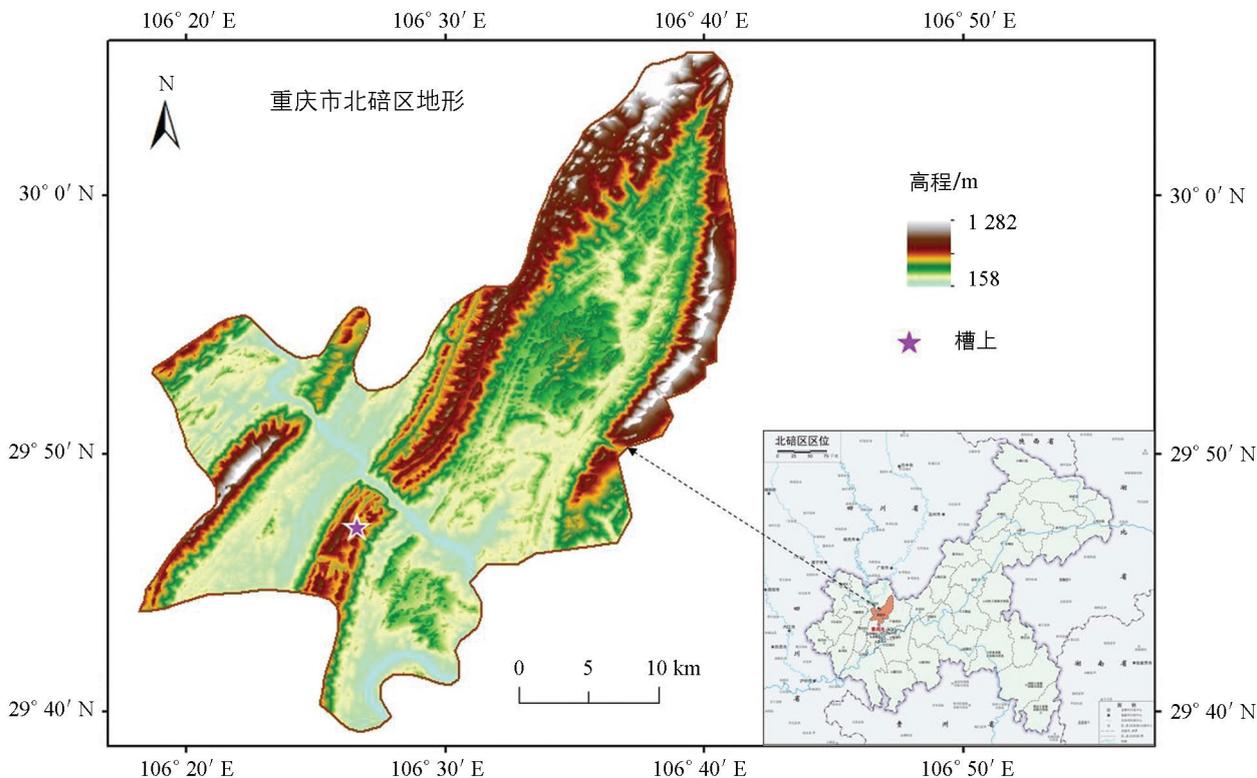
无人机遥感技术的发展克服和突破了利用人工与卫星遥感影像调查石漠化状况的缺陷与瓶颈,得到了越来越普遍的应用<sup>[7-8]</sup>.无人机设备相对较为廉价,便于运输和部署,实时性强,受云的影响较小<sup>[9]</sup>.由于所获图像分辨率高,特别适用于以小面积破碎化分布裸岩为特征的处于早期阶段的石漠化地区的调查.本研究以重庆市北碚区槽上局部为研究区,使用无人机获取高分辨率可见光影像,然后利用面向对象图像分析方法识别提取破碎化零星分布的裸岩,最后根据石漠化裸岩所占面积比例对试验区的早

期石漠化状况进行评价。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区槽上地区, 地处龙凤桥街道中梁山观音峡背斜的嘉陵江南段<sup>[10]</sup>。气候为亚热带湿润气候, 具有春早、夏热、秋迟、冬暖的特点。雨水充沛, 年平均降水量达到 1 105.4 mm。槽上属于典型的喀斯特槽谷地形, 现有荒坡 67 hm<sup>2</sup>, 森林覆盖率不足 18%, 岩溶洼地、小盆地内漏斗、落水洞、地下暗河发育良好, 地表排水网发育不良, 地表水渗漏严重, 用水紧张。耕地大多分布于槽谷谷坡地带, 石牙广布, 单个地块面积小的不足 1 m<sup>2</sup>, 多数只有几十 m<sup>2</sup>。裸岩分布呈现明显的小面积破碎化特征。槽上地区居民点用地分散, 多数居民点位于土壤较好的槽谷低地。槽上地区有 12 个采石场, 采石取土破坏了植被和岩层稳定, 引起水土流失和崩塌事故, 破坏了当地的农业生产和可持续发展。



底图审图号: 渝 S(2020)076 号。

图 1 研究区空间位置

### 1.2 无人机遥感影像

研究区无人机影像获取使用的平台为大疆精灵 4 专业版, 载荷相机为 SONY FC6310, 焦距 8.8 mm, 像素尺寸 5 472×3 648。在航拍作业中, 无人机飞行的相对高度为 120 m, 航向重叠率为 85%, 旁向重叠率为 70%, 采用的地理坐标系为世界 1984 大地坐标系统(WGS84), 投影系统为通用墨卡托投影(UTM), 区号为 48。所获取无人机遥感影像的空间分辨率为 3 cm。将影像输入 Pix4D Mapper 软件中进行处理, 依次经过空中三角测量、匹配点加密、正射校正和镶嵌拼接, 获取的研究区可见光正射影像如图 2 所示。由于图像边缘部分变形比较严重, 且不规则形状影像对图像分析软件处理性能影响较大, 因此后续面向对象分析主要针对矩形裁剪区内的试验区影像数据(图 2b), 其总面积约为 3.14 hm<sup>2</sup>。该区域内除了零星分布的出露裸岩外, 还包括植被、建筑物、道路、裸地和草地等类型, 为研究方法的实现和验证提供了一个地物类型丰富的试验区。



图 2 无人机可见光正射影像

## 2 研究方法

破碎化裸岩识别及早期石漠化调查评价的技术流程如图 3 所示。首先,利用多尺度分割将试验区图像分割成若干具有实际意义的影像对象。其次,根据不同地物对象在光谱、形状上的特征定义相应层次的分类规则进行自动对象分类。最后,根据识别提取的裸岩对象所占研究区的面积比例,参考划分标准对早期石漠化进行评价。

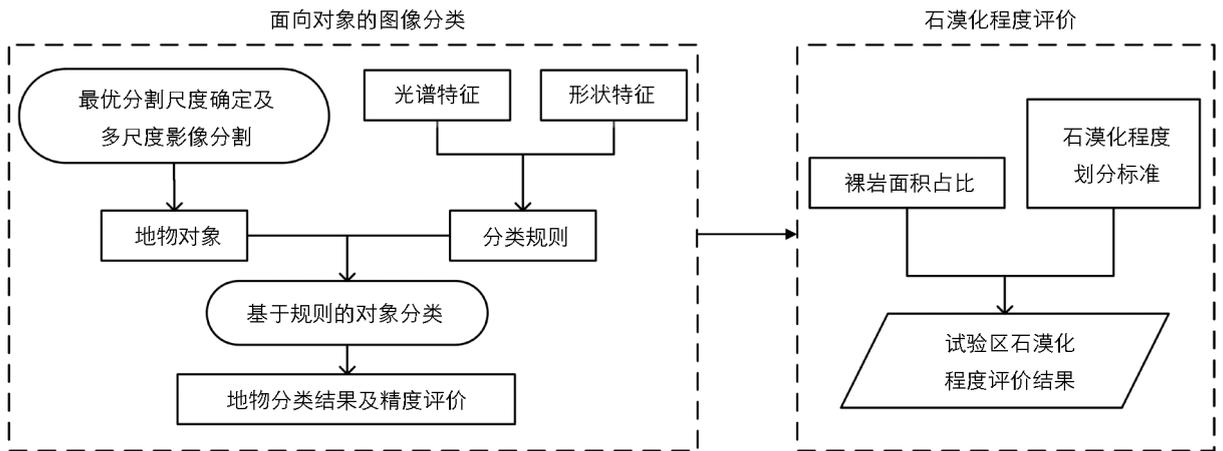


图 3 裸岩识别及早期石漠化调查评价流程

### 2.1 多尺度影像分割

无人机影像有着丰富的空间结构信息和清晰的纹理细节信息,能准确表达对象的表面纹理、内部结构、形状面积和空间关系等。面向对象方法综合了影像对象的光谱、形状、纹理、邻域、层次、空间位置等特征信息,通过分割影像得到同质对象,再根据目标地物的实际要求进行提取<sup>[11]</sup>。因此,影像分割是面向对象图像分析方法的关键步骤之一,其分割原则是:影像对象内部同质性最大、异质性最小,通常需要输入 3 个参数:分割尺度、形状因子、紧凑度因子。尺度参数是基于异质性最小的区域合并算法中的阈值,它直接决定了影像对象大小、分割的质量,甚至影响后续分类及信息提取精度<sup>[12]</sup>。

本研究利用影像分割尺度参数估计工具(Estimation of Scale Parameters, ESP)进行影像最优分割尺度参数的确定<sup>[13]</sup>。它通过采用定量递增的尺度来对影像进行多尺度分割,然后根据目标对象来判断选择最优分割尺度。ESP 工具将不同分割尺度参数下影像对象同质性的局部方差(Local Variance,

LV) 作为分割对象层的平均标准差, 并用 LV 的变化率 (Rate of Change of LV, ROC) 来指示对象分割效果最优的尺度参数. 当 LV 的变化率最大即出现局部峰值时, 该点对应的分割尺度为最优分割尺度. 一般最优分割尺度不止一个, 这是由于不同的最优分割尺度是对应影像内不同地物得出的. 处理过程为: 加载 ESP 工具, 新建一个处理进程, 选择 ESP 算法, 设置好相关参数, 包括初始值、步长值、循环次数等.

经过 ESP 处理后得到图 4, 其中红色折线是局部方差 LV, 蓝色折线是局部方差变化率 ROC, 当 ROC 呈现峰值的时候, 即为局部最优分割尺度. 根据上述原理, 利用 ESP 工具对试验区处理, 产生了若干局部最优分割尺度, 其中尺度 24, 60, 75, 104, 126, 168 依次对应分割结果图 5a-f. 从图 5 可以看出, 当分割尺度为 24 时, 影像被分割得过于破碎(图 5a); 分割尺度为 60 时, 略破碎, 没达到一次分割的目的(图 5b). 当分割尺度为 75 时, 破碎对象相对较少, 裸岩轮廓比较清晰(图 5c). 当分割尺度由 104 增加到 168 时, 对象逐渐被大规模合并, 不是理想结果(图 5d-f). 因此, 可以确定本次分割的最优分割尺度为 75.

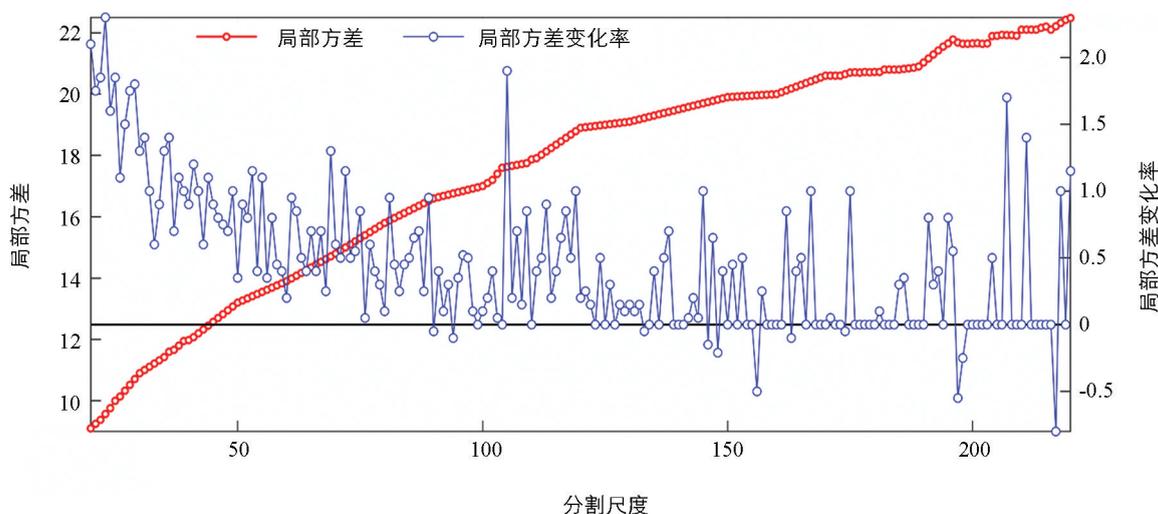


图 4 最优分割尺度参数估计

## 2.2 基于规则的对象分类

面向对象的影像分类规则主要基于地物影像对象或子对象的光谱特征和形状特征来定义, 然后利用所定义的分类规则分层次逐步对影像对象进行归类.

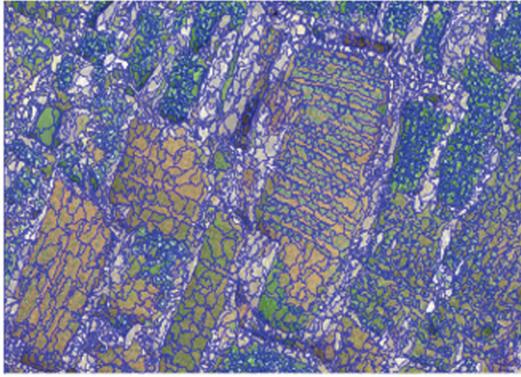
### 2.2.1 光谱特征

光谱特征包括亮度、标准差、平均值、最大平均差分、波段比率等<sup>[14-15]</sup>. 其中, 提取植被常用的归一化植被指数 NDVI 就是一种波段比率, 但是 NDVI 的计算需要近红外波段参与. 对于只有 RGB(红、绿、蓝)3 个波段的遥感影像, Meyer 等<sup>[16]</sup>提出了一种植被指数 VI, 可以仅利用这 3 个波段通过自定义的特征计算方法获得. 在此基础上, 何游云<sup>[17]</sup>整理简化 VI 的计算公式如下:

$$VI = \frac{3G - 2.4 * R - B}{R + G + B} \quad (1)$$

式中:  $G, R, B$  分别为可见光的绿波段、红波段和蓝波段.

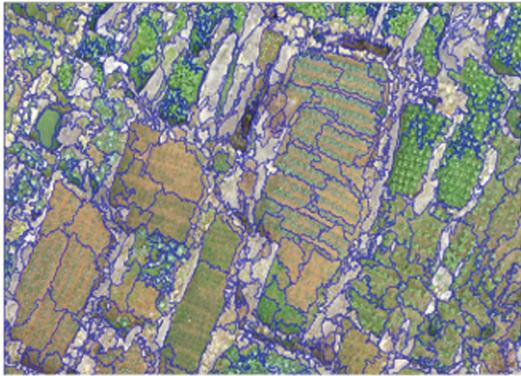
表 1 为试验区各类地物对应的 VI 数据统计. 图 6 为计算得到的试验区 VI 特征影像. 根据表 1, 植被 VI 值最大, 且最大值、最小值以及平均值均远远大于其他几类地物, 其平均值  $> 0.166$ , 其余几类地物平均值均  $< 0$ . 植被与其余几类地物在 VI 特征值上具有较大的差异, 利用植被指数 VI 区分植被与非植被具有很好的效果.



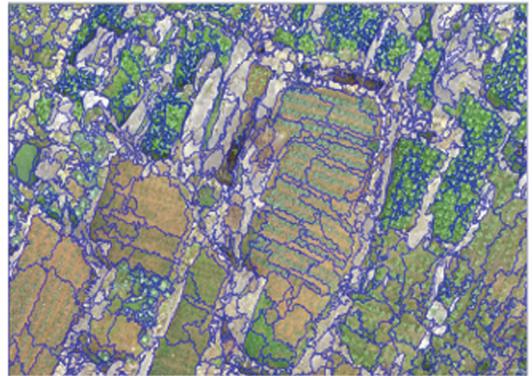
a. 分割尺度为24



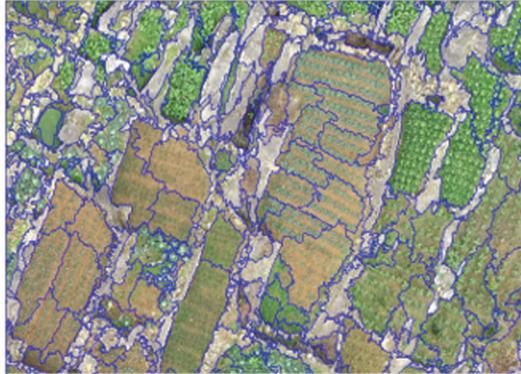
b. 分割尺度为60



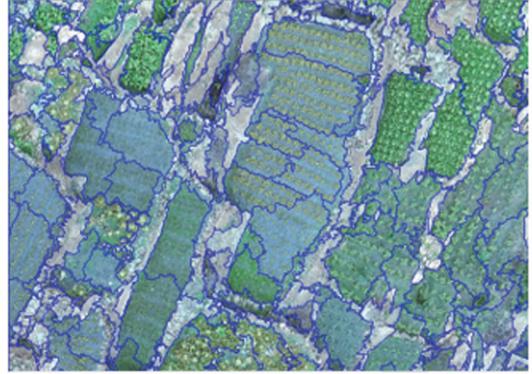
c. 分割尺度为75



d. 分割尺度为104



e. 分割尺度为126



f. 分割尺度为168

图 a-f 的分割尺度分别为 24, 60, 75, 104, 126, 168.

图 5 不同分割尺度下的分割结果影像

表 1 不同地物类型的 VI 数据统计

地物类别	最大值	最小值	平均值	标准差
植被	0.355 0	0.002 1	0.166 2	0.078 3
建筑物	-0.104 0	-0.417 4	-0.171 8	0.032 3
道路	0.000 7	-0.139 4	-0.094 4	0.030 0
裸地	0.016 4	-0.116 5	-0.037 5	0.042 7
裸岩	0.019 0	-0.167 8	-0.098 0	0.313 3
草地	-0.050 1	-0.130 3	-0.096 3	0.017 0

### 2.2.2 形状特征

影像的形状特征主要包括长宽比、宽度、矩形适合性、曲率与长度比、标准差曲率与密度等<sup>[15]</sup>。其中长宽比特征是影像对象边界框长度与宽度的比值；宽度特征指影像对象边界框的宽度值；矩形适合性描述了图像对象与大小和比例相似的矩形的匹配程度；曲率与长度比体现了线状地物的特点；标准差曲率与密度则是对象的紧致程度特征。通过观察不同形状特征下的影像图，合理设置不同地物在该种形状特征下的阈值。图 7a-f 是基于试验区局部样本影像计算获取的与这些形状特征对应的结果影像。



图 6 植被指数 VI 的特征灰度影像

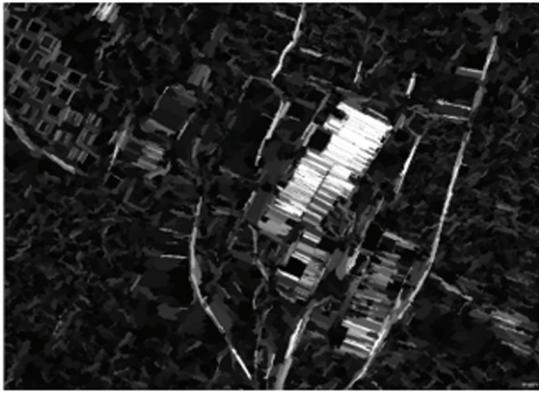
### 2.2.3 分类规则

对高分辨率影像进行多尺度分割之后，具有高复杂性和差异性的地物对象需要利用多种知识来判断其所属类型<sup>[18]</sup>。试验区中的地物类型主要包括植被、建筑物、道路、裸地、裸岩和草地 6 类。分类层次、对应的地物类型及具体的分类规则定义如表 2 所示。

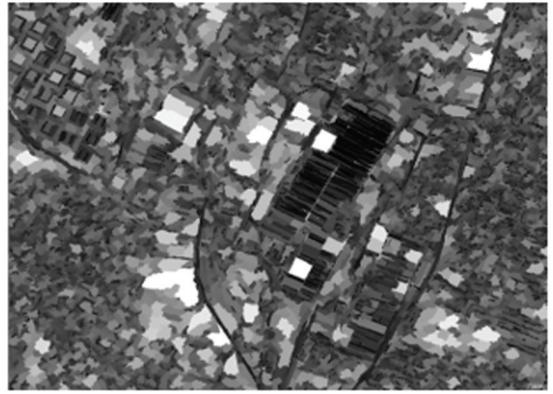
表 2 地物分类规则定义

分类层次	地物类型	分类规则
Level 1	植被	利用植被指数 VI 与 Mean(Blue)定义
	非植被	
Level 2	裸地	利用 Brightness 与 Mean(Green)定义
	建筑物	利用 Length/Width, Density 与 Brightness 定义
	道路	利用 Rectangular Fit, Mean(Blue)与 Maxdiff 定义
	其他	继承非植被
Level 3	裸岩	利用 Density 和 Length/Width 定义
	草地	继承其他类别

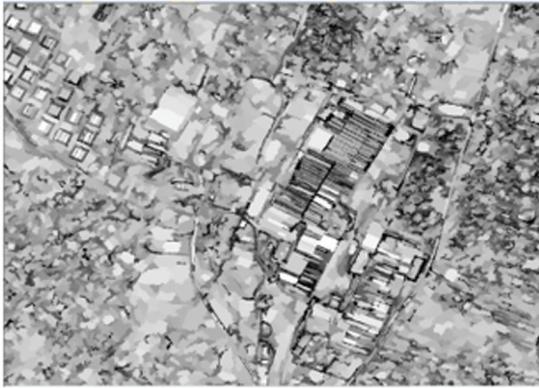
首先，在 Level 1 中主要识别的目标为植被，需要区分出植被与非植被。无人机可见光影像没有近红外波段，需要利用 2.2.1 小节提出的植被指数 VI 对植被进行识别。当  $VI > 0.02$  且 Maxdiff 在  $[1.1, 4]$  范围内时能够很好地区分植被与非植被。其次，在非植被中裸地、人工建筑与其他类别可以通过相应的光谱特征以及形状特征值域来进行区分。当 Brightness 处于  $[139, 153]$  范围且 Mean(Green) 处于  $[103, 132]$  范围时，能够较好地识别出裸地；人工建筑的识别条件是 Brightness 在  $[184, 280]$  范围内且 Rectangular Fit 值  $> 0.81$ ，然后将其他非植被地物赋类为其他类别。在人工建筑中进一步区分出建筑物与道路。Length/Width 特征能够较好地区分建筑物与道路，所以当 Length/Width 处于  $[1.7, 3]$  范围且 Maxdiff 处于  $[0.4, 0.6]$  范围时，可以区分出道路。将区分出裸地、建筑物、道路后的非植被地物赋类为其他类别。在其他类别中区分出裸岩和草地。本研究主要目的是识别提取裸岩，当 Density 处于  $[0.2, 1.9]$  范围时，基本可以分离出裸岩，然后将其他地物赋类为草地。



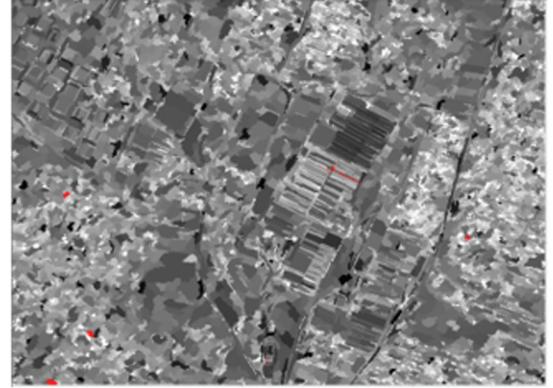
a. 长宽比



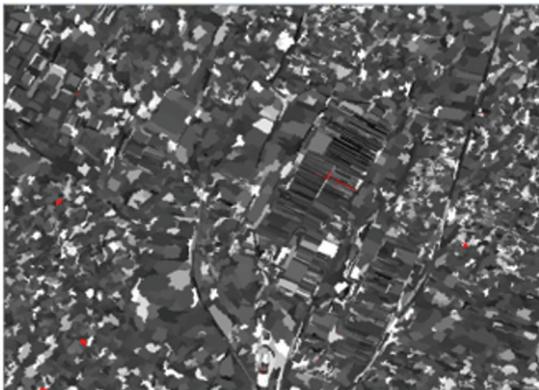
b. 宽度



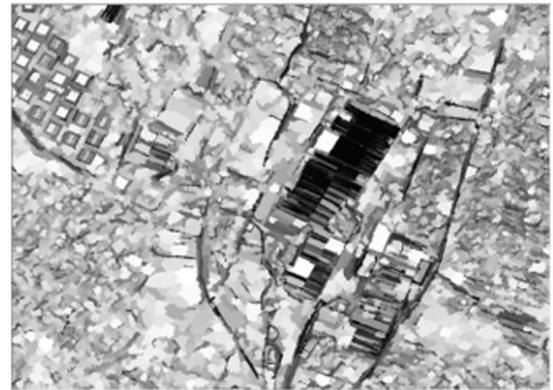
c. 矩形适合性



d. 曲率与长度比



e. 标准差曲率



f. 密度

图 7 各种形状特征计算结果灰度影像

### 2.3 石漠化等级划分标准

石漠化的本质是土地退化的过程,其等级的划分也应以土地利用的适宜性作为标准.通常所说的石漠化早期、中期和后期阶段,实际是一种定性划分.石漠化定量划分所参考的现状指标包括:植被覆盖率、岩石裸露率、土层厚度、植被类型等<sup>[19-20]</sup>.其中,岩石裸露是石漠化景观最明显的特征,也是通过遥感技术能够直接观测和提取到的信息.为了简化评价过程,本研究采用如表 3 所示的基于岩石裸露率的喀斯特石漠化等级划分标准<sup>[21]</sup>.因此,早期、中期和后期石漠化阶段对应的石漠化等级为微度、轻度、中度、强度和极强度,在表 3 中分别列出了相应的裸岩分布特征.

表 3 石漠化等级划分标准

石漠化等级	岩石裸露率/%	裸岩分布特征	主要特征
无石漠化	<20	点状	地表组成物质丰富, 多为水田.
微度石漠化	20~30	点状或线状	地表组成物质一般, 有岩石裸露趋势, 多为非梯田旱地等.
轻度石漠化	31~50	线状	地表组成物质减少, 岩石初步裸露, 多为稀疏灌木草丛.
中度石漠化	51~70	线状或面状	岩石出露, 多数为石质化耕地.
强度石漠化	71~90	面状	岩石具有较大出露面积, 大多数土地没有利用价值.
极强度石漠化	>90	面状	岩石大面积出露, 几乎无利用价值.
非喀斯特		非喀斯特地区不涉及石漠化问题	

## 3 结果

### 3.1 分类结果及精度

#### 3.1.1 分类结果

本研究使用德国 Definiens Imaging 公司的 eCognition Developer 9.0(易康软件)来实现对试验区无人机遥感影像的多尺度分割、对象分类规则定义及自动分类, 然后提取石漠化形成的裸岩. 根据 2.1 所述, 裸岩提取的最优分割尺度为 75. 依据经验并参考其他学者研究, 形状和紧凑度因子均设为 0.5. 在试验区影像分割结果基础上, 利用 2.2.3 定义的分类规则, 最终获得地物类型分类(图 8). 在分类过程中, 道路两侧分割较细碎的斑块容易被错分为裸岩, 灰黑色的建筑物也容易被误分成裸岩, 而规则分类很好地规避了这些问题, 较为精准地区分出了裸岩. 分类后还需要对一些破碎地物以及错分现象进行修改. 具体修改方法是将易康软件生成的多尺度分割矢量边界转成 POI 感兴趣区域, 然后叠加在分类结果图上进行修改.

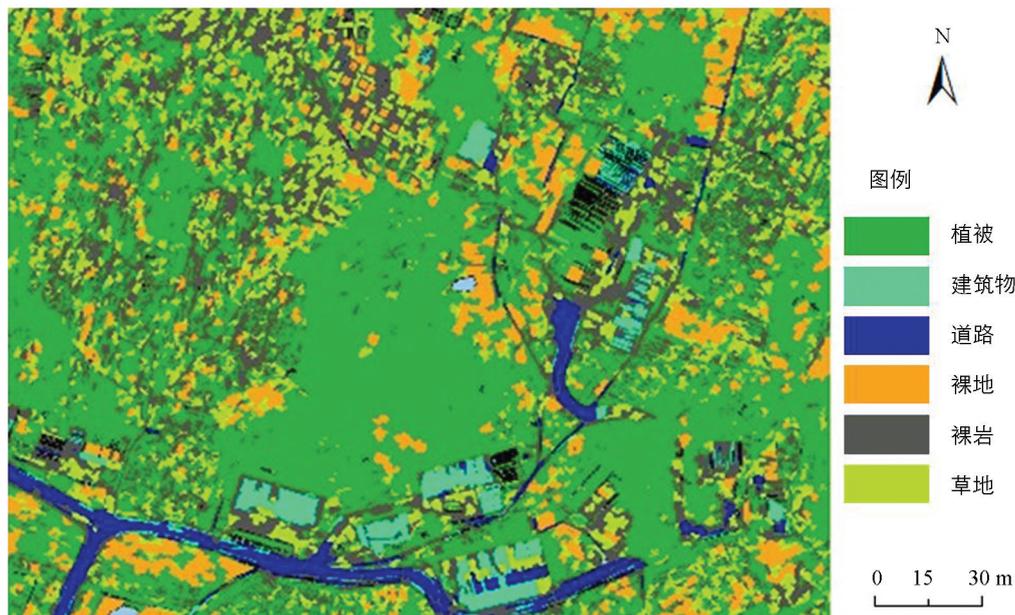


图 8 基于规则的分类结果

#### 3.1.2 分类精度

在 ESRI ArcMap 中, 从试验区无人机遥感影像中随机选取 335 个样本点, 通过目视解译确定样本点所属地物类别. 其中, 植被为 57 个样本点, 建筑物为 54 个样本点, 道路为 53 个样本点, 裸地为 50 个样本点, 裸岩为 77 个样本点, 草地为 44 个样本点. 根据分类结果建立混淆矩阵, 计算规则分类方法下的生产者精度、用户精度、总体精度和 Kappa 系数, 具体精度评价结果如表 4 所示.

表 4 规则分类结果精度

类别	植被	建筑物	道路	裸地	裸岩	草地
植被	52	0	0	2	2	1
建筑物	1	46	3	0	4	0
道路	0	2	47	0	3	1
裸地	1	1	0	45	2	1
裸岩	0	1	3	0	71	2
草地	1	0	2	2	4	35
生产者精度/%	91.2	85.1	88.6	90	90.0	79.5
用户精度/%	94.5	92	85.4	91.8	82.5	87.5
总体精度/%				88.6		
Kappa 系数				0.86		

### 3.2 石漠化程度评价

试验区的总面积为  $3.14 \text{ hm}^2$ ，如图 9 所示，基于规则的试验区地物分类结果中，植被面积为  $1.56 \text{ hm}^2$ ，占比 49.71%；草地面积为  $0.36 \text{ hm}^2$ ，占比 11.33%；建筑物面积为  $0.09 \text{ hm}^2$ ，占比 2.84%；道路面积为  $0.10 \text{ hm}^2$ ，占比 3.05%；裸地面积为  $0.37 \text{ hm}^2$ ，占比 11.87%；裸岩面积为  $0.67 \text{ hm}^2$ ，占比 21.2%。根据表 3 石漠化等级划分标准，试验区评价为微度石漠化，即早期石漠化区域。

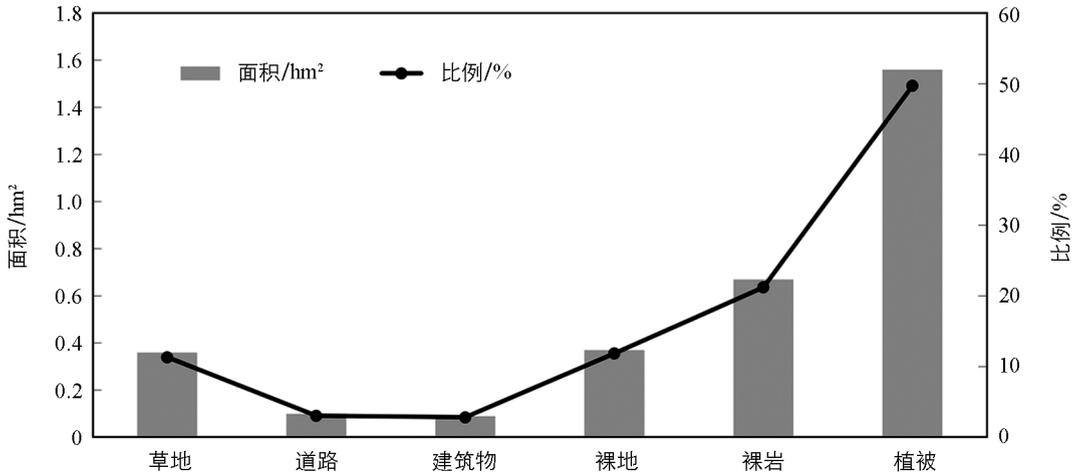


图 9 各类地物类型面积及占比

## 4 结论

石漠化是指因水土流失而导致地表土壤流失，基岩裸露，土地丧失农业利用价值和生态环境退化的现象。全面及时地掌握喀斯特地区石漠化的程度及分布是治理石漠化的前提，而小面积破碎化分布的裸岩识别是利用卫星遥感技术开展喀斯特地区石漠化早期调查评价所面临的难题。本研究以重庆市北碚区槽上地区局部为试验区，基于无人机所获可见光遥感影像，利用面向对象图像分析方法识别提取裸岩，并根据微度裸岩面积占比实现早期石漠化调查评价。研究结果表明：① 利用无人机遥感影像仅有的红、绿、蓝 3 个波段所计算的植被指数 VI 能够较好地区分植被与非植被地物对象；② 利用光谱特征和形状特征定义的分类规则对无人机遥感影像进行自动地物分类的总体精度为 88.6%，Kappa 系数为 0.86；③ 试验区所识别提取的裸岩所占面积比例为 21.2%，根据石漠化等级划分标准，该试验区石漠化程度评价为微度即早期石漠化。

本研究证明了将无人机可见光影像和面向对象图像分析方法用于早期石漠化调查评价的可行性和有效性，特别是对于小面积破碎化分布的裸岩识别精度较高。通常来说，喀斯特地区石漠化形成后，如

果没有人工干预治理,会逐步经历从微度到轻中度再到重度的演化过程.随着石漠化程度的加深,其治理的难度和成本都会急剧增加.因此,本研究提出的针对小而破碎的裸岩识别及早期石漠化调查评价方法对于国内广大喀斯特地区石漠化的早期识别和早期治理具有推广应用价值.然而,对于轻中度以上的石漠化调查评价,卫星遥感能够覆盖较大的空间范围,这种情况下无人机遥感并不能体现其优势.不过无人机局部小范围的石漠化调查评价结果可以作为卫星遥感石漠化调查的验证数据,可以弥补人工地面调查验证效率低的不足.

### 参考文献:

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨 [J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 孙凡, 徐圣旺, 姚小华. 黔中典型喀斯特地区季节性石漠化动态研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 9-16.
- [3] 郑红雷, 谢世友, 夏凯生, 等. 重庆南川石漠化及对策研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2010, 35(1): 197-201.
- [4] 周忠发. 遥感和 GIS 技术在贵州喀斯特地区土地石漠化研究中的应用 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 52-54, 66.
- [5] 黄华明, 汤仲安. 无人驾驶飞机在湖南国土资源管理中的应用 [J]. 测绘工程, 2010, 19(1): 42-45.
- [6] 王金华, 李森, 李辉霞, 等. 石漠化土地分级指征及其遥感影像特征分析——以粤北岩溶山区为例 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 765-770.
- [7] 孙虎. 结合无人机调查与 Landsat 影像的喀斯特石漠化评估 [D]. 昆明: 云南大学, 2018.
- [8] 尹林江, 周忠发, 李韶慧, 等. 基于无人机可见光影像对喀斯特地区植被信息提取与覆盖度研究 [J]. 草地学报, 2020, 28(6): 1664-1672.
- [9] 王枚梅, 林家元, 林沂, 等. 基于无人机可见光影像的亚高山针叶林树冠参数信息自动提取 [J]. 林业资源管理, 2017(4): 82-88.
- [10] 何多兴, 谢世友, 路洪海. 岩溶槽谷地区土地整理的总结与思考——以重庆市北碚区槽上为例 [J]. 中国岩溶, 2003, 22(1): 35-40.
- [11] BLASCHKE T. Object Based Image Analysis for Remote Sensing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 2-16.
- [12] DRĂGUȚ L, CSILLIK O, EISANK C, et al. Automated Parameterisation for Multi-Scale Image Segmentation on Multiple Layers [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 88: 119-127.
- [13] DRĂGUȚ L, TIEDE D, LEVICK S R. ESP: a Tool to Estimate Scale Parameter for Multiresolution Image Segmentation of Remotely Sensed Data [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 859-871.
- [14] 张振勇, 王萍, 朱鲁, 等. eCognition 技术在高分辨率遥感影像信息提取中的应用 [J]. 国土资源信息化, 2007(2): 15-17, 33.
- [15] TRIMBLE. eCognition Developer 9. 0 Reference Book [M]. Munich, Germany: Trimble Germany GmbH, 2014.
- [16] MEYER G E, NETO J C. Verification of Color Vegetation Indices for Automated Crop Imaging Applications [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(2): 282-293.
- [17] 何游云. 无人机遥感估测林木地上生物量的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [18] 闫利, 赵展, 聂倩, 等. 利用规则进行高分辨率遥感影像地物提取 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 636-639.
- [19] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 李凤全. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨——以贵州省为例 [J]. 热带地理, 2004, 24(2): 145-149.
- [20] 张承琴, 王普昶, 龙翠玲, 等. 贵州喀斯特峰丛洼地不同石漠化等级植物群落物种组成和多样性特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 48-53.
- [21] BAI X Y, WANG S J, XIONG K N. Assessing spatial-Temporal Evolution Processes of Karst Rocky Desertification Land: Indications for Restoration Strategies [J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(1): 47-56.