

DOI: 10.5846/stxb201902170278

王明明, 王世杰, 白晓永, 李世杰, 李汇文, 操玥, 习慧鹏. 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素. 生态学报, 2019, 39(16): 6083–6097.

Wang M M, Wang S J, Bai X Y, Li S J, Li H W, Cao Y, Xi H P. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6083–6097.

## 典型小流域喀斯特石漠化演变特征及其关键表征因子与驱动因素

王明明<sup>1,4</sup>, 王世杰<sup>2,3</sup>, 白晓永<sup>2,3,\*</sup>, 李世杰<sup>1</sup>, 李汇文<sup>1,4</sup>, 操玥<sup>3,4</sup>, 习慧鹏<sup>1,4</sup>

1 中国科学院大学地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081

2 中国科学院大学地球化学研究所, 贵州省科技厅普定喀斯特研究综合试验站, 安顺 562100

3 中国科学院大学地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

4 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 中国西南喀斯特区域土地石漠化生态灾难已经严重制约了经济和社会的发展, 而对石漠化进行治理, 其空间分布信息的准确提取是必不可少的。针对现有石漠化信息提取技术存在不可能发生喀斯特石漠化(Impossible to develop karst rocky desertification, IKRD)范围提取不准确, 关于石漠化的时空演变分析较少及其驱动因子、表征因子繁杂等问题, 本文以典型喀斯特流域后寨河流域为研究对象, 基于高精度影像识别提取 IKRD 范围, 利用植被覆盖度、岩石裸露率对研究区域准确提取石漠化信息, 揭示该区域不同石漠化等级的时空演变规律, 同时探明石漠化分布与地表反照率、坡度的相关性。研究结果表明: (1) 2005 年至 2010 年后寨河流域石漠化程度整体在恶化, 在后寨河流域西南部分和中部极少区域石漠化程度有所减轻, 其余区域基本未发生变化, 而在 2010 年至 2015 年后寨河流域石漠化程度大部分区域都呈减轻状态, 而且石漠化程度减轻强度较大, 在南侧大部分区域石漠化程度都呈减轻状态, 且强度较大。(2) 2005 年至 2010 年后寨河流域石漠化程度减轻、未发生变化以及加重的面积分别为 4.23 km<sup>2</sup>、25.736 km<sup>2</sup>、20.81 km<sup>2</sup>, 各部分面积占比分别为 8.3%、50.7%、41%。(3) 2010 年至 2015 年后寨河流域石漠化程度减轻、未发生变化以及加重的面积分别为 31.87 km<sup>2</sup>、16.57 km<sup>2</sup>、6.85 km<sup>2</sup>, 各部分面积占比分别为 57.6%、30%、12.4%。(4) 石漠化区域的坡度、地表反照率主要集中在 2°—22°、0.12—0.21 之间, 而且随着坡度值的增加, 潜在石漠化、重度石漠化面积占比增高, 轻度石漠化和中度石漠化面积占比降低, 随着地表反照率增加, 潜在石漠化、轻度石漠化面积占比增高, 重度石漠化面积占比降低。综上所述, 在 2005 年至 2015 年间, 后寨河流域石漠化演变因贵州省 2008 年至 2010 年开始实施退耕还林还草等石漠化综合治理工程而呈现先恶化, 后减轻的状态, 同时通过对该区域石漠化分布与地表反照率、坡度的相关分析发现, 地表反照率和坡度可以作为石漠化研究的辅助表征因子和驱动因子。

**关键词:** 石漠化信息提取; 植被覆盖度; 岩石裸露率; 地表反照率

## Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor

WANG Mingming<sup>1,4</sup>, WANG Shijie<sup>2,3</sup>, BAI Xiaoyong<sup>2,3,\*</sup>, LI Shijie<sup>1</sup>, LI Huiwen<sup>1,4</sup>, CAO Yue<sup>3,4</sup>, XI Huipeng<sup>1,4</sup>

1 Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

2 Puding Comprehensive Karst Research and Experimental Station, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences and Science and Technology Department of Guizhou Province, Anshun 562100, China

3 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0502300, 2016YFC0502102); “西部之光”人才培养计划(A类)([2018]X); 贵州省科技计划(2017–2966)

收稿日期: 2019–02–17; 修订日期: 2019–05–08

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixiaoyong@vip.skleg.cn

<http://www.ecologica.cn>

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The ecological disaster of karst rocky desertification in the karst area of southwestern China has severely restricted the economic and social development. To control karst rocky desertification, accurate extraction of its spatial distribution information is indispensable. We consider the problems of inaccurate extraction of impossible to develop karst rocky desertification (IKRD) range, less analysis of the temporal and spatial evolution of karst rocky desertification, complicated driving factors and characterization factors, which exist in the existing technology of karst rocky desertification information extraction. This paper takes the typical karst basin—Houzhai River Basin as the research area. We extracted IKRD range based on high resolution image and using fractional vegetation coverage and rock exposure rate to accurately extract karst rocky desertification information from the study area. We want to reveal the evolution law of different karst rocky desertification levels in this area, and prove the correlation between the distribution of karst rocky desertification and the distribution of surface albedo and slope. The results showed that: (1) from 2005 to 2010, the karst rocky desertification of Houzhai River Basin as a whole has deteriorated. Few central parts of the southwestern has been alleviated, while the rest of the area has not changed. However, most areas of karst rocky desertification in the Houzhai River Basin have been alleviated from 2010 to 2015, and the degree of karst rocky desertification has been reduced significantly, which was more evident in most areas of the southern part in the Houzhai River, and the intensity was relatively high. (2) From 2005 to 2010, the area of karst rocky desertification with alleviated, unchanged, and aggravated were 4.23 km<sup>2</sup>, 25.74 km<sup>2</sup> and 20.81 km<sup>2</sup>, accounting for about 8.3%, 50.7%, and 41.0%, respectively. (3) From 2010 to 2015, the area of karst rocky desertification with alleviated, unchanged, and aggravated were 31.87 km<sup>2</sup>, 16.57 km<sup>2</sup> and 6.85 km<sup>2</sup>, accounting for about 57.6%, 30.0% and 12.4%, respectively. (4) The slope and surface albedo of karst rocky desertification area were mainly concentrated between 2°—22° and 0.12—0.21. With the increase of slope, the proportion of potential karst rocky desertification, and severe karst rocky desertification increases, the proportion of light karst rocky desertification and moderate karst rocky desertification decreased. With the increase of surface albedo, the proportion of potential karst rocky desertification and light karst rocky desertification increased, and the proportion of severe karst rocky desertification decreased. In summary, from 2005 to 2015, the evolution of karst rocky desertification in Houzhai River Basin was firstly deteriorated and then alleviated due to the implementation of comprehensive karst rocky desertification control projects such as returning farmland to forests and grasslands in Guizhou Province from 2008 to 2010. At the same time, the correlation analysis between the distribution of karst rocky desertification and the distribution of the surface albedo slope showed that the surface albedo and slope could be used as auxiliary characterization factors and driving factors to karst rocky desertification research.

**Key Words:** karst rocky desertification information extraction; fractional vegetation cover; rock exposure rate; surface albedo

我国西南地区是石漠化分布面积最广的区域,土地石漠化是该区域长久以来的重大生态顽疾,而西南地区同时也是我国重要的生态屏障。喀斯特地区石漠化的发育主要是由喀斯特地区脆弱的地质背景以及不合理的人为影响所造成的<sup>[1-3]</sup>,而且石漠化的发育常伴随有水土流失加重、土壤肥力下降、旱涝灾害频发、生物多样性锐减等次生灾害,严重影响了区域生态环境,限制了区域经济开发利用方式,阻碍了区域居民生产生活水平提高,制约了区域经济社会可持续发展<sup>[4-5]</sup>,为解决长久以来的石漠化生态灾害问题,实现石漠化精准治理,需要对石漠化时空信息进行精确提取,同时探讨石漠化发育、演变机理。目前针对石漠化的研究主要集中于石漠化的遥感提取方法、演变、驱动因子等的研究。

为服务于喀斯特区域石漠化综合监测治理,同时解决石漠化分布信息提取困难的问题,许多学者针对石漠化信息提取的方法进行了深入研究,如陈起伟利用不同石漠化程度的光谱特性进行了石漠化信息提取<sup>[6]</sup>,

<http://www.ecologica.cn>

吴风志利用 OLI 数据以植被覆盖率、裸岩率、坡度作为评价指标,对禄劝县石漠化敏感性做了评价<sup>[7]</sup>,夏学齐提出了“植被线”、“石漠化几何指数”的概念,并利用 IKONOS 数据对普定县进行了石漠化信息提取<sup>[8]</sup>。黄秋昊提出利用 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、NDRI (Normalized Difference Rock Index) 以及 NDRI-NDVI 来提取喀斯特石漠化区域<sup>[9]</sup>,而后张晓伦提出利用 TM4 与 TM7 来替换黄秋昊 NDRI 计算公式中的 TM3 与 TM5,从而利用像元二分模型提取岩石裸露率、石漠化信息等<sup>[10]</sup>。岳跃民通过研究发现利用高光谱数据、植被指数和石漠化综合指数 KRDSI 可以直接提取石漠化评价指标因子<sup>[11]</sup>。涂杰楠采用 RapidEye 高清影像数据并利用比值密度分割法进行了云南鹤庆县石漠化信息提取<sup>[12]</sup>,提出了基于波段比值和密度分割的半定量石漠化信息提取方法。朱大运分别利用 GF-1 与 Landsat-OLI 数据计算各植被指数,并利用欧氏距离对比分析该指数对石漠化信息提取的可分性,并得出 Landsat-OLI 在石漠化信息提取的可分性略优于 GF-1<sup>[13]</sup>。针对石漠化遥感提取的方法,岳跃民分别从喀斯特地质背景复杂性以及遥感数据源、提取方法、提取结果等方面系统论证了石漠化信息遥感提取方法的不确定性,同时为后续相关研究提供了方法学上的启示<sup>[14]</sup>。以往关于石漠化信息提取方法的研究从影像光谱特性、纹理色彩特征等多方面对石漠化表征特征进行了深入分析,对喀斯特区域石漠化监测治理很有意义,然而,这些研究也存在一些问题:数据源空间分辨率、光谱分辨率差异化以及提取方法多种多样等造成提取效果不一,同时提取方法缺乏标准化、统一化,无法实现不同研究结果的同步对比。因此,为提高石漠化信息提取结果的可对比性,同时节约提取成本实现对石漠化信息的快速高效提取,亟需选取一种提取精度高、效率高、成本低并且可对比性强的石漠化研究方法,对喀斯特不同区域石漠化信息进行提取研究,为石漠化对比研究及大区域石漠化综合监测治理提供技术支撑。

同时,为了实现石漠化长期监测及石漠化发育演变机理探索,许多学者利用遥感手段对石漠化时空演变进行了研究,如童立强通过分析 TM 数据自身特点,采用 TM5/TM4 来增强石漠化信息,以裸岩率、植被覆盖度及其空间特征为基本依据,介绍了石漠化提取的方法和技术,并利用图像分类方法完成 20 世纪 90 年代末至本世纪初西南岩溶地区石漠化信息提取<sup>[15]</sup>。李阳兵利用 SPOT、ALOS、aerial 影像的不同表征特征提取了后寨河流域石漠化 1963 年至 2010 年的石漠化时空演变及其驱动因子,得出石漠化的发育受坡度及其与居民地距离的影响<sup>[16]</sup>。许尔琪通过研究喀斯特石漠化发育演替,提出 SDKRD 模型,并模拟了长顺县 2010 年至 2030 年的石漠化图<sup>[17]</sup>。这些研究在石漠化发育、演变机理揭示方面取得了显著进展,然而这些研究多是对 21 世纪初之前的石漠化时空分布研究,对新世纪开展石漠化治理前后的石漠化时空演变情况研究还比较缺乏,无法满足石漠化治理措施效果评估,为了对石漠化综合监测、治理提供及时、有效的信息反馈,急需开展石漠化治理前后综合对比研究,对石漠化发育、演变情况进行统计,同时对其时空演变机理进行探索。

此外,为了实现喀斯特石漠化防、治有效结合,从其驱动因素上提供有效治理措施建议,很多学者开展了石漠化驱动因素的研究,如涂杰楠利用 GF-1 影像提取了南洞地下河流域南部的石漠化空间分布,并分析了该区域石漠化分布与其岩性、坡度、坡向、高程四个方面的相关关系,得出石漠化在低海拔、缓坡度和纯碳酸盐岩中较为发育,同时指出人类活动与石漠化之间具有明显的相关性<sup>[18]</sup>。杨奇勇通过对广西平果县果化镇生态示范区的石漠化空间变异特征分析,得出影响石漠化指数的主要是气候、岩性、地形等内在因子<sup>[19]</sup>。此外,盛茂银另辟蹊径对喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质的变化规律进行研究,得出不同石漠化程度的土壤理化性质存在显著差异,为从微观角度揭示石漠化演替提供了思路<sup>[20]</sup>。上述研究在石漠化的驱动因子、内在因子方面取得了很多有意义的成果,然而,这些研究主要是针对石漠化的驱动因子、内在因子,对石漠化的表征因子研究相对较少,为了从表征因子、驱动因子等多角度揭示石漠化发育、演变原因,迫切需要开展石漠化与表征因子、驱动因子的综合研究,进而实现石漠化发育、演变的综合防范和有针对性地治理。

本文针对上述石漠化研究中存在的问题,参考以往研究,选取评价效果比较好的植被覆盖度、岩石裸露率作为评价因子,旨在以后寨河流域的石漠化信息提取的基础上,探索在石漠化治理实施前后研究区域的石漠化时空演变情况,揭示石漠化的发育与其关键驱动因子坡度的关系,并探讨石漠化的分布与其表征因子地表反照率的相关关系。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区

为详细分析喀斯特小流域石漠化时空特征,本文选取后寨河小流域(26°13'N—26°15'N,105°41'E—105°43'E)作为研究区域,如图1,该流域位于黔中高原西部长江和珠江的分水岭地区,海拔在1223.4—1567.4 m之间,属于高原型喀斯特小流域,流域面积为81 km<sup>2</sup>。该流域<sup>[16-21]</sup>地势东南高、西北低,地形起伏度较大,属于高丘陵地带,主要有峰丛-洼地和峰林-盆地两种地貌类型,流域东部和东北部主要为峰丛-洼地,流域西部和西北部主要为峰林-盆地。流域内土地利用类型较多,主要包括有林地、灌木林地、水田、旱地、建设用地、未利用地和水域等类型,上游以林地为主,中下游以耕地为主。综合以上特征,该区域为典型喀斯特小流域,对其石漠化信息提取方法及时空演变的研究有利于喀斯特石漠化监测与治理。

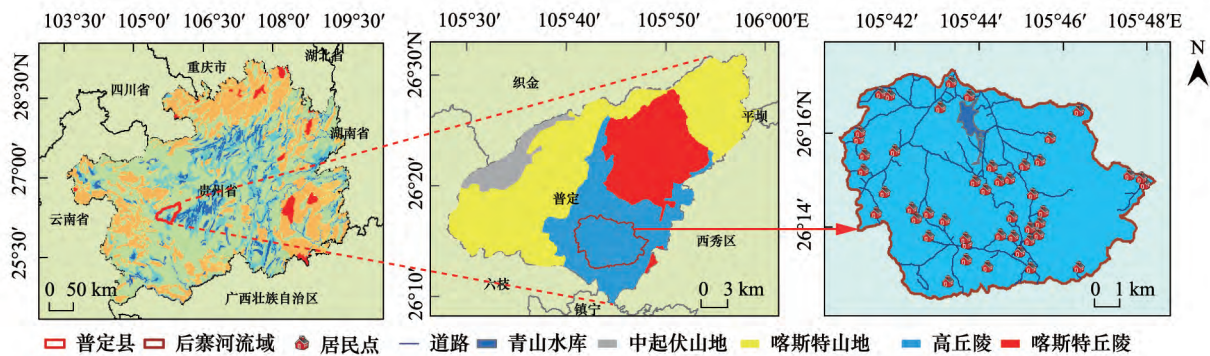


图1 研究区位置及区域内地貌类型和居民地分布

Fig.1 The location of the study area and the geomorphological types and distribution of residential areas in the study area

### 1.2 数据来源与处理

本文利用地理空间数据云平台上提供的 landsat 数据反演研究区 2005 年、2010 年和 2015 年石漠化相关数据。选取影像成像时间为 10 月份,这是因为该时间段降雨较少,影像云量较低,而且贵州省多数植被为常绿作物,并不会严重影响植被覆盖度的提取。其中 2005 年、2010 年的是 landsat TM 数据,2015 年的是 landsat OLI 数据,影像编号为: LT51270422005282BJC03,LT51280422010303BKT00,LC81280422015301LGN00,2005 年、2010 年、2015 年影像数据获取日期分别为 10 月 09 日、10 月 30 日、10 月 28 日。为了对提取结果进行人工目视解译、校正,本文选取 GF-1 和 IRS-P6 数据作为精度验证,GF-1 数据来源于中国资源卫星应用中心陆地观测卫星数据服务平台,IRS-P6 数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所“对地观测数据共享计划”的对外门户网站数据共享网。同时,为保证分辨率一致,本文坡度数据是由 30 m 的 DEM 数据提取所得,该数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台。此外,贵州省地貌图、岩性图以及用来作精度验证的石漠化数据分别来源于中国科学院资源环境科学数据中心、喀斯特科学数据中心、贵州省林业厅,所有数据均在通过辐射校正、几何校正等预处理后进行该研究区域石漠化相关信息提取。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 建设用地与道路提取

建设用地为人类主要活动范围,虽然在提取岩石裸露率时,建设用地岩石裸露率值较高,但是并不能将其作为石漠化发育区域,如果未将其剔除将发生石漠化误提。本文分别利用归一化差值建筑指数 NDBI、建筑用地指数 IBI 等<sup>[22-24]</sup>进行了研究区建筑用地提取,发现 IBI 指数方法提取效果较好,在结合影像色彩、纹理特征以及高清影像的基础上,通过人工目视解译对研究区域的建设用地和道路信息也进行了提取,提取结果如图 2,在 2005 年至 2015 年阶段研究区域建设用地的分布呈现由分散到集中的趋势,面积也逐年增加。

#### 1.3.2 耕地提取

在该研究区范围内耕地主要以水田为主,通过实地考察和参考以往研究,坡耕地可能发生石漠化,而比较

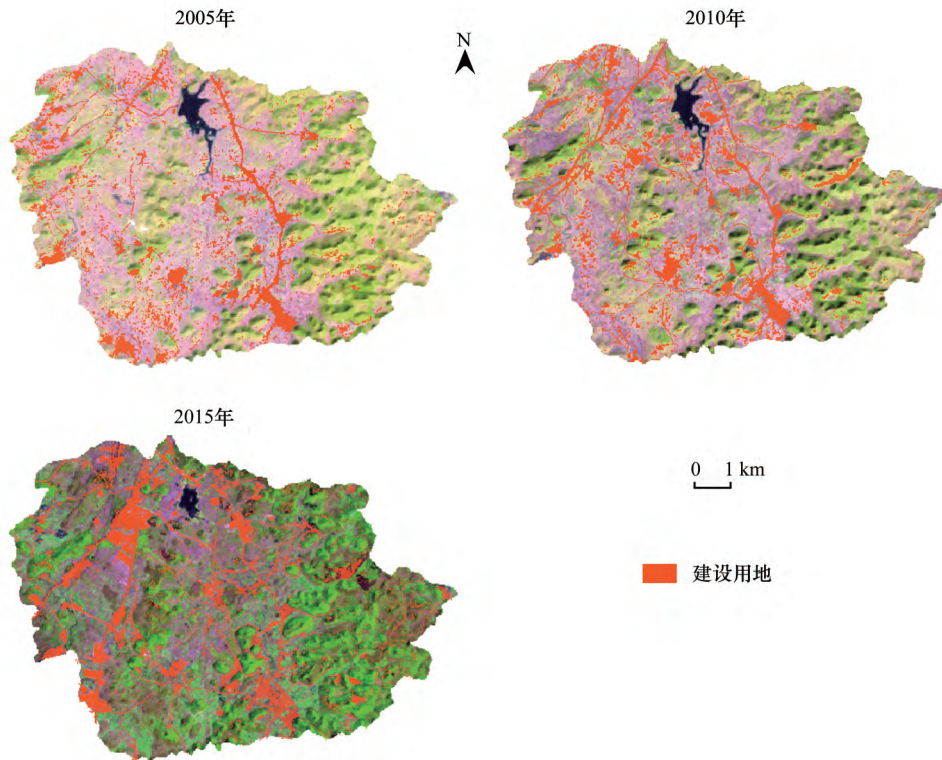


图2 建设用地(含道路信息)空间分布图

Fig.2 The spatial distribution map of construction Land ( including road information)

平坦区域的耕地因其大部分区域具有土壤,只在边界有很少的岩石裸露,因此本文未将平坦区域的耕地作为石漠化发生区域。为准确提取石漠化信息,本文提取了耕地信息(不含坡耕地),并将其作为 IKRD 区域,在提取耕地时本文利用监督分类 SVM( Support Vector Machine) 方法对研究区 Landsat 影像进行解译<sup>[25]</sup>,并结合高清影像对解译后的土地利用信息进行人工目视解译,提取了研究区域的耕地(由于坡耕地存在石漠化可能性,本文完成耕地提取之后,根据耕地所在位置,将坡耕地进行剔除),具体分布如图 3。2005 年与 2010 年人口分布比较分散,耕地面积也相对分散,在 2010 年该区域实行退耕还林之后,而且随着城市化的推进,该区域人口聚集程度增高,耕地分布也更加集中,此外,通过对比建设用地和耕地分布,发现建设用地周边分布耕地较多。

### 1.3.3 水系提取

由于石漠化的发生绝不可能发育在水体上,因此利用遥感影像进行石漠化提取,应根据不同的地形地貌条件准确提取水体。根据毕海芸的论述从整体来说,目前提取水体信息多是基于影像光谱特性的提取方法:阈值法、多波段谱间关系法、水体指数法,通过对比分析,毕海芸发现多波段谱间关系法在地形起伏较大的山地地区能够将水体和阴影很好的区分开来<sup>[26-27]</sup>,由于后寨河地区地表起伏较大,本文基于多波段谱间关系法对后寨河地区水体进行提取,提取结果如图 4。

### 1.3.4 人工目视判读与验证

本文选取 2005 年、2010 年 IRS-P6 多光谱传感器 LISS-3 所获取的空间分辨率为 23.5 米的多光谱影像,以及 2015 年 GF-1 所获取的空间分辨率为 16 米的影像对上述 IKRD 的区域,即建设用地、道路、耕地、水系进行目视判读与人工验证,对碎小图斑误判修改,最终形成石漠化 IKRD 分布范围,如图 5( IKRD 范围的底图为 Landsat 影像,对照影像为 IRS-P6 和 GF-1 高分辨率影像)。

### 1.3.5 石漠化信息提取

针对石漠化信息的提取有很多研究,其中大部分研究通过对植被覆盖度、岩石裸露率、岩性、坡度等进行

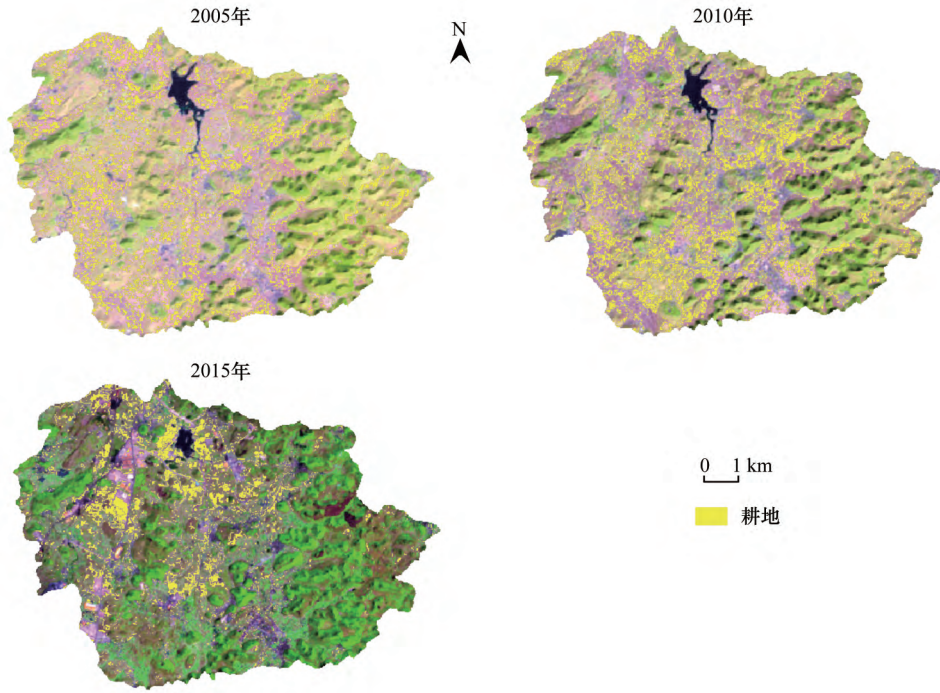


图3 耕地(除坡耕地)空间分布图

Fig.3 The spatial distribution map of Cultivated Land ( except sloping farmland)

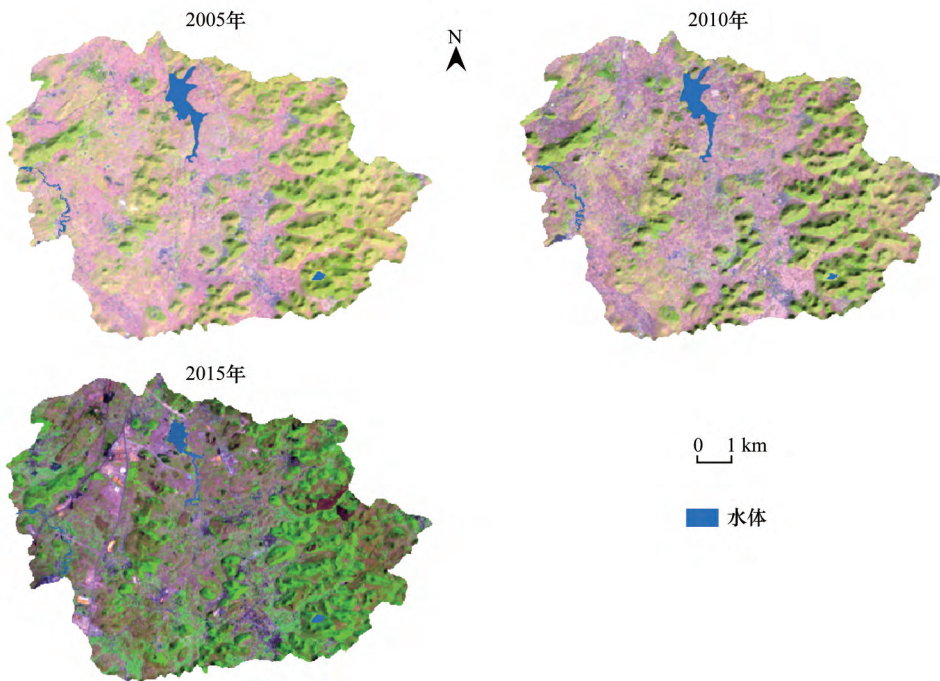


图4 水体空间分布图

Fig.4 The spatial distribution map of water body

石漠化分类分级。本文参考以往研究 选取植被覆盖度与岩石裸露率作为石漠化信息提取表征因子进行石漠化信息提取。

植被覆盖度计算:

对于植被覆盖度( Fractional Vegetation Cover ,FVC) 的计算 ,目前主要是利用的有像元二分模型 本文利用

<http://www.ecologica.cn>

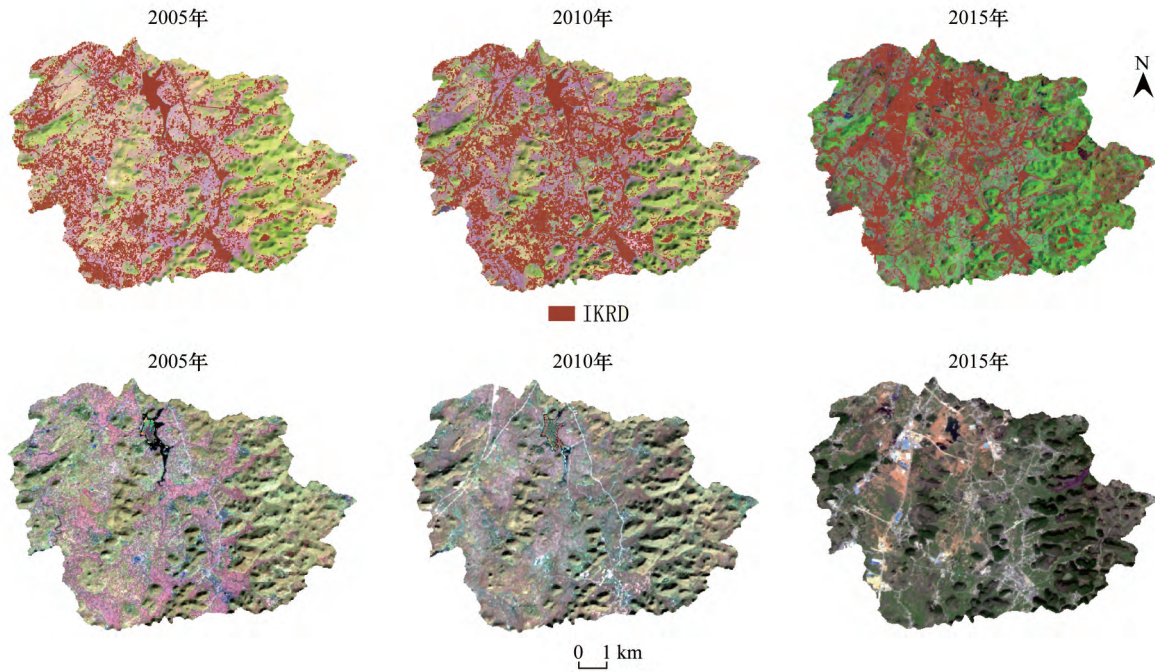


图5 IKRD 的空间分布及与高清影像对比图

Fig.5 The spatial distribution map of IKRD and its contrast with high definition images

图中 IKRD: 不可能发生喀斯特石漠化, Impossible to develop karst rocky desertification

基于归一化植被指数的像元二分模型对研究区的植被覆盖度进行了估算, 归一化植被指数与植被覆盖度计算公式分别为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

根据以往研究,  $NDVI_{soil}$  与  $NDVI_{veg}$  可以参考使用一定置信度范围内的归一化植被指数的最小值与最大值<sup>[28]</sup>, 本文取归一化植被指数累计频率为 5% 的为  $NDVI_{soil}$ , 取累计频率为 95% 的为  $NDVI_{veg}$ 。提取结果如图 6, 可以发现植被覆盖度较低区域含有建设用地、水体、耕地以及石漠化区域等。

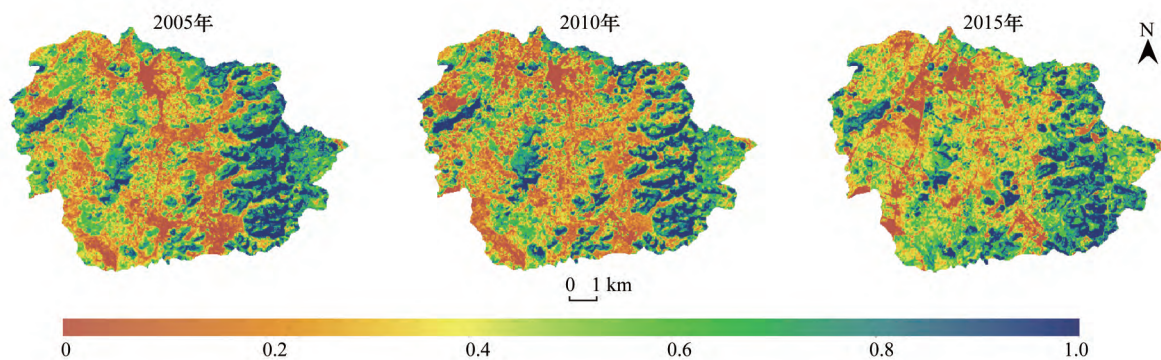


图6 植被覆盖度空间分布图

Fig.6 Fractional vegetation cover map

岩石裸露率计算:

对于岩石裸露率, 本文利用基于 NDRI 的像元二分模型<sup>[12]</sup>进行计算, 对于 NDRI 的计算公式为:

<http://www.ecologica.cn>

$$NDRI = (TM7 - TM4) / (TM7 + TM4)$$

$$f_r = (NDRI - NDRI_0) / (NDRI_r - NDRI_0)$$

根据以往研究本文选取置信度为 95% ,即取累计频率为 5%和 95%的 NBRI 为  $NDRI_0$  与  $NDRI_r$ 。具体提取结果如图 7 对比上述建设用地、耕地提取信息及高清影像 ,可以发现岩石裸露率较高区域主要为建设用地、耕地及石漠化区域 ,而岩石裸露率低的区域主要为水体和植被较高区域。

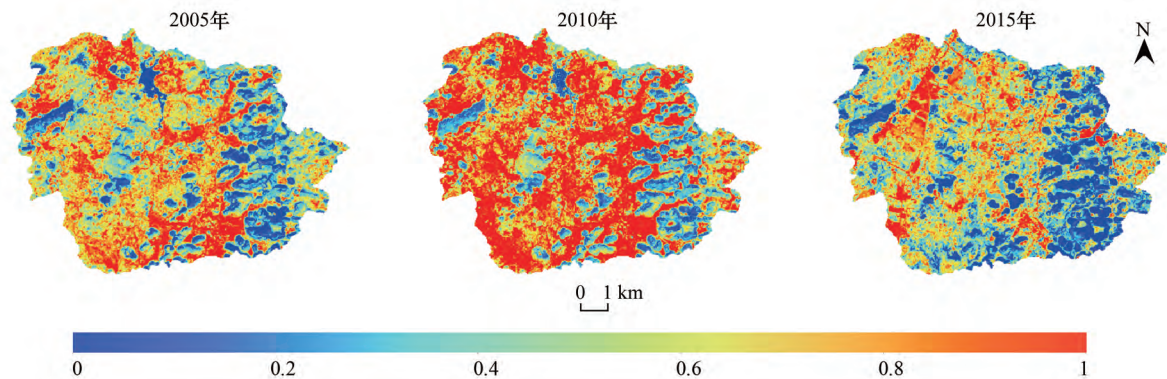


图 7 岩石裸露率空间分布图

Fig.7 The spatial distribution map of rock exposure rate

目前由于研究区覆盖范围、基岩组分以及自然、人为背景的差异 ,使得石漠化分级方案并不统一。现有的分级方法主要依据景观指标或生态基准面理论进行 ,划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化等 ,其中各等级所选取的评价指标及其阈值也不尽相同<sup>[5]</sup>。由于岩石裸露率和植被覆盖度的计算结果 ,在空间上并不是绝对的相反 ,通过实地考察 ,发现存在植被覆盖度较高区域(如一些山林) ,植被下岩石裸露比较严重 ,这是由于喀斯特特殊的岩性使得岩石凹槽处、缝隙处存在土壤堆积 ,植物得以生长。对于上述这些区域由于植被覆盖度较高 ,本文将其作为潜在、轻度石漠化发生区域。本文根据以往分类等级标准 ,选取的石漠化分类等级参照标准如表 1<sup>[12-13,18-19,29]</sup>。

表 1 石漠化分类等级标准

Table 1 The classification criteria for karst rocky desertification

植被覆盖度 Fractional vegetation cover/%	岩石裸露率 Rock exposure rate/%				
	<20	20—30	31—50	51—70	>71
>70	NKRD	NKRD	PKRD	PKRD	PKRD
51—70	NKRD	PKRD	PKRD	PKRD	LKRD
36—50	PKRD	PKRD	LKRD	LKRD	LKRD
21—35	PKRD	PKRD	LKRD	MKRD	MKRD
<20	PKRD	PKRD	LKRD	MKRD	SKRD

NKRD: 无石漠化 ,No karst rocky desertification; PKRD: 潜在石漠化 ,Potential karst rocky desertification; LKRD: 轻度石漠化 ,Light karst rocky desertification; MKRD: 中度石漠化: Moderate karst rocky desertification; SKRD: 重度石漠化 ,Severe karst rocky desertification

## 2 结果与分析

### 2.1 石漠化空间分布情况

通过上述方法 ,本文获取了后寨河 2005 年、2010 年、2015 年石漠化分布图 ,如图 8 所示 ,通过叠加建设用地、耕地、水系 ,可以发现石漠化发生的区域主要分布于人类活动区域周边 ,这主要是受人为活动影响 ,如耕作区域变化、修建房屋、基础设施建造及植被破坏等的影响 ,在时空上整体呈现东部和中部石漠化发育严重 ,而且在 2005 年至 2010 年时间石漠化面积处于增加状态 ,其石漠化程度也在加重 ,在 2010 年之后由于退耕还林



等一系列石漠化治理措施的实施,研究区域石漠化面积有大幅度减少,而且石漠化程度也处于降低状态。

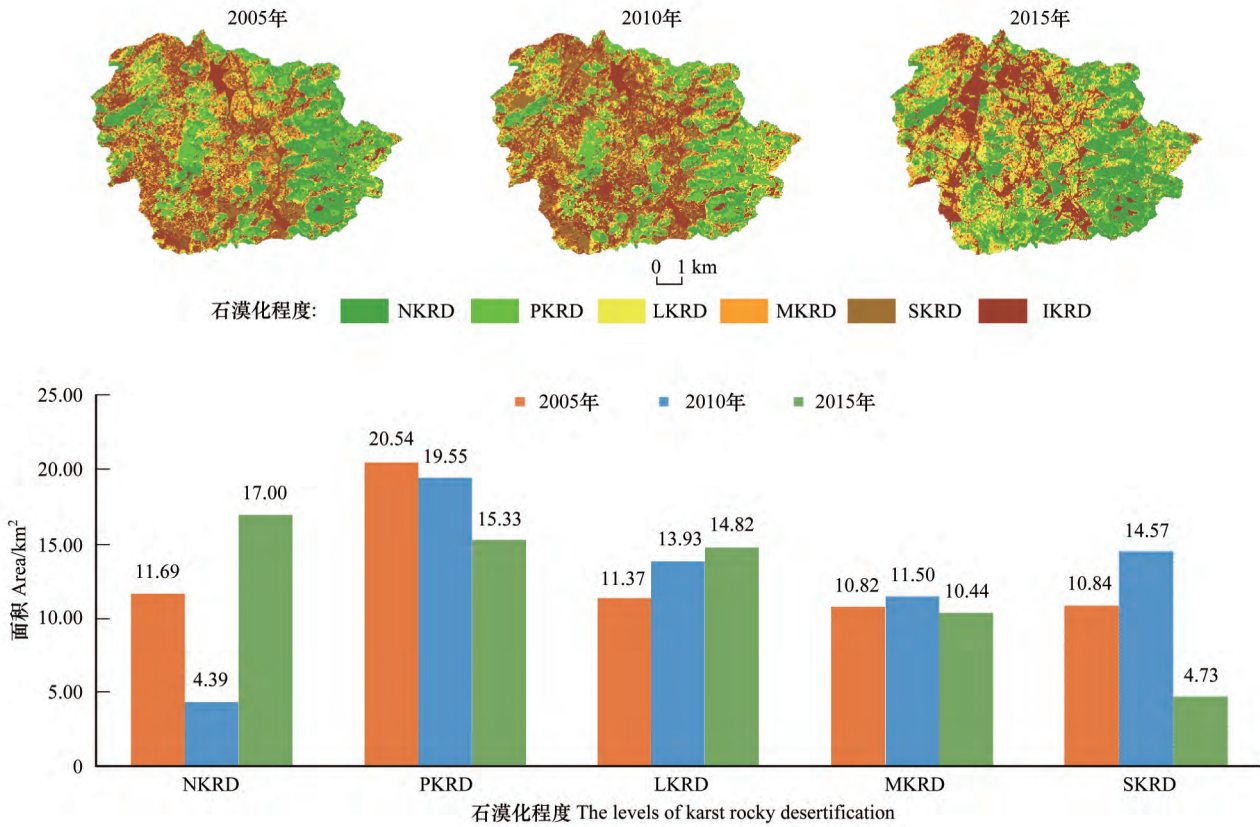


图 8 石漠化空间分布及不同等级石漠化面积统计图

Fig.8 The spatial Distribution map of karst rocky desertification and their area statistics at different levels

图中,IKRD: 不可能发生喀斯特石漠化,Impossible to develop karst rocky desertification; NKRD: 无石漠化, No karst rocky desertification; PKRD: 潜在石漠化, Potential karst rocky desertification; LKRD: 轻度石漠化, Light karst rocky desertification; MKRD: 中度石漠化, Moderate karst rocky desertification; SKRD: 重度石漠化, Severe karst rocky desertification

通过图 8 可以看出,在后寨河流域,石漠化在 2005 年至 2010 年间一直处于加重状态,而且重度石漠化面积增加过多,增加了约 4.19 km²,石漠化分布面积总量在 2005—2010 年间由 41.85 km² 增加至 46.38 km²,后经过退耕还林等石漠化治理,石漠化情况总体好转,2010 年至 2015 年间,重度石漠化面积减少很多,至

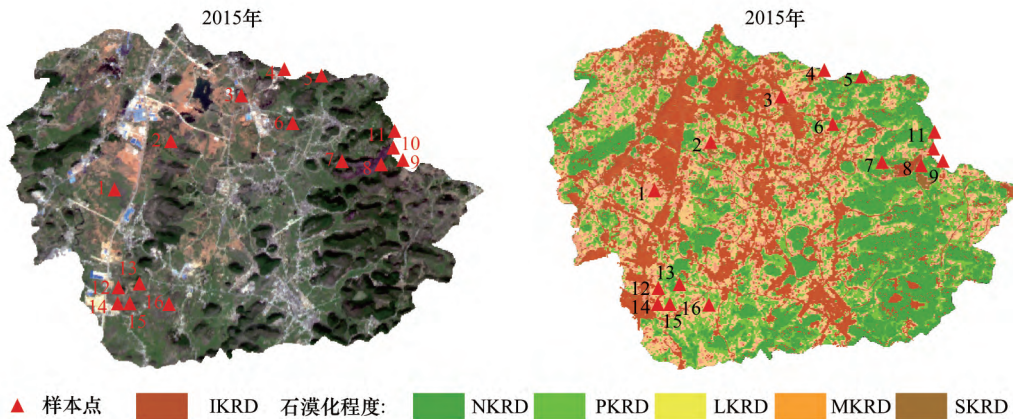


图 9 样本点空间分布及其所在位置石漠化模拟值

Fig.9 The spatial distribution of sample points and the karst rocky desertification simulation value of sample points' location

2015 年只剩 38.29 km<sup>2</sup>, 而轻度石漠化相比较 2010 年有较大增长、中度石漠化略有增长, 这是由于对重度石漠化的治理使得程度较低的石漠化面积增加所造成的。

综合考虑数据可获取性和验证结果准确性, 本文对 2015 年研究区石漠化模拟值准确性进行验证, 由于实地采样数据量较少, 因而只进行石漠化模拟值和实际值的一致性评价, 具体样本点空间分布和样本点位置石漠化模拟值情况如图 9。通过对比分析研究区域 2015 年石漠化的模拟值与实际值(实际值来源于贵州省林业厅, 为人工采样的点状数据), 发现石漠化模拟值的精度为 75%, 存在样本点号为 3、10、13、14 的四个点模拟值与实际值不符合, 其中样本点 3 将石漠化程度高估, 样本点 10、13 和 14 将石漠化程度低估, 具体如表 2。通过对比发现该方法对石漠化的模拟监测值大部分可靠, 而且部分模拟值与实际值虽存在差别, 但差别不是特别大, 综合考虑该方法数据获取简单、研究便捷且排除人为因素等特点, 该方法在进行石漠化大范围监测时具有快速、高效的优点。

表 2 各样本点处石漠化等级模拟值与实际值对照表

Table 2 The comparisons between simulated and actual values of karst rocky desertification level at each sample point

样本点 Sample point	石漠化等级模拟值 The simulated value of KRD level	石漠化等级实际值 The simulated value of KRD level	样本点 Sample point	石漠化等级模拟值 The simulated value of KRD level	石漠化等级实际值 The simulated value of KRD level
1	MKRD	MKRD	9	SKRD	SKRD
2	MKRD	MKRD	10	MKRD	SKRD
3	MKRD	LKRD	11	PKRD	PKRD
4	LKRD	LKRD	12	LKRD	LKRD
5	PKRD	PKRD	13	NKRD	PKRD
6	LKRD	LKRD	14	MKRD	LKRD
7	PKRD	PKRD	15	LKRD	LKRD
8	SKRD	SKRD	16	LKRD	LKRD

## 2.2 石漠化空间演变趋势

2005 年至 2010 年与 2010 年至 2015 年石漠化演变情况及演变强度分布格局如图 10, 可以看出 2005 年至 2015 年后寨河流域石漠化程度整体上呈现逐渐变好的趋势, 通过统计发现: (1) 2005 年至 2010 年后寨河流域石漠化程度整体在恶化, 在后寨河流域西南部分和中部极少区域石漠化程度有所减轻, 其余区域基本未发生变化, 而在 2010 年至 2015 年后寨河流域石漠化程度大部分区域都呈减轻状态, 而且石漠化程度减轻强度较大, 尤其是在南侧大部分区域石漠化程度都呈减轻状态, 且强度较大。(2) 2005 年至 2010 年后寨河流域石漠化程度减轻的面积为 4.23 km<sup>2</sup>, 约占 8.3%, 石漠化程度未发生变化的面积为 25.736 km<sup>2</sup>, 约占 50.7%, 石漠化程度加重的面积为 20.81 km<sup>2</sup>, 约占 41%。(3) 2010 年至 2015 年后寨河流域石漠化程度减轻的面积为 31.87 km<sup>2</sup>, 约占 57.6%, 石漠化程度未发生变化的面积为 16.57 km<sup>2</sup>, 约占 30%, 石漠化程度加重的面积为 6.85 km<sup>2</sup>, 约占 12.4%。

通过图 11 可以发现, 2005 年至 2010 年研究区石漠化程度保持不变的主要是潜在石漠化和重度石漠化, 有 11.09 km<sup>2</sup> 的潜在石漠化、5.18 km<sup>2</sup> 的重度石漠化程度未发生变化, 石漠化程度好转的面积都较小, 而石漠化恶化的面积相比前者较大, 而 2010 年至 2015 年石漠化程度好转的面积较多, 其中由潜在石漠化转变为无石漠化的有 9.21 km<sup>2</sup>, 而且由高程度石漠化演变为低程度石漠化的面积远比由低程度石漠化演变为高程度石漠化的面积多。

## 2.3 石漠化分布与地表反射率之间的响应关系分析

地表反照率是遥感影像获取地物特征的一个很重要的表征参数, 是地球表面对于太阳光辐射反射能力的衡量标准, 地表反照率在时间和空间上的变化既受到自然过程的影响也受到人类活动的影响, 是全球变化的指示因子<sup>[30]</sup>。考虑到植被覆盖度、岩石裸露率等已经作为常见石漠化反演表征因子, 本文在以往研究基础上

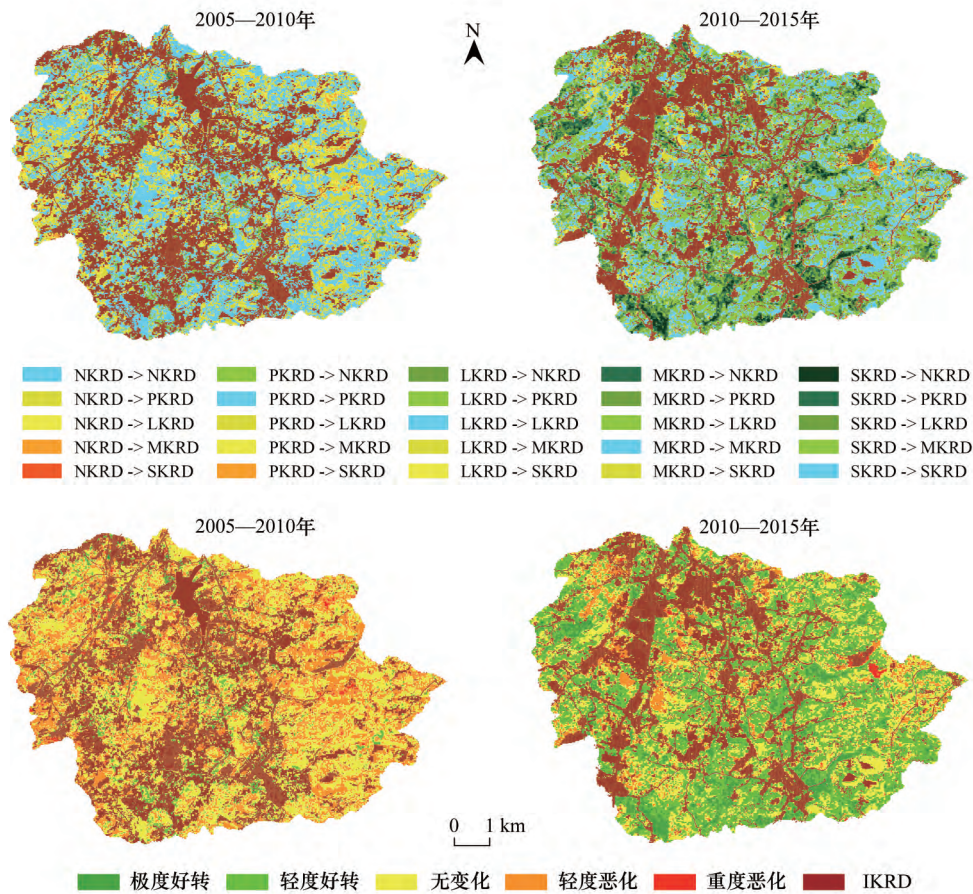


图 10 石漠化等级演变及其演变强度空间分布

Fig.10 The spatial distribution map of karst rocky desertification level evolution and its evolution intensity

将地表反照率作为新的表征因子引入,并对地表反照率与石漠化之间的响应关系进行分析。以往研究发现对于植被覆盖度不高,而岩石裸露的区域,太阳光反射能量同比过高,地表反照率值也相应过高,因此本文通过对研究区地表反射率与石漠化的差异分布分析,获取石漠化与地表反照率的相关关系,为后续研究奠定基础。

考虑到日间影像地表反照率表征比较明显,本文选取 2015 年 11 月 2 日日间影像并根据 TM 影像经验公式计算获得地表反照率,同时与同期石漠化分布进行对比。为了更清楚地分析地表反照率与石漠化分布的关系,本文首先对地表反照率数据按照 1/2 标准差进行分级,将地表反照率分为了 12 级,同时提取了不同地表反照率等级上的石漠化的分布面积(由于无石漠化并不算石漠化发生区域,所以本文统计的是潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化、重度石漠化在各地表反照率范围内的面积占比)。如图 12,研究结果表明石漠化主要发生于地表反照率为 0.12—0.21 之间,而且在发生石漠化区域随着地表反照率增加潜在石漠化、轻度石漠化发生率增高,而中度石漠化、重度石漠化发生率降低,表明石漠化与地表反照率之间存在着一定关系,因此可以在以后的研究中将地表反照率作为石漠化遥感解译的辅助手段。

### 2.4 石漠化空间分布与坡度之间的响应关系分析

在以往对石漠化的研究中,有将坡度作为石漠化提取的一个因子,也有将坡度作为石漠化的驱动因子对石漠化与坡度之间的关系进行研究的,本文结合前人研究从石漠化表征特征,即岩石裸露率高、植被覆盖度低出发,将坡度作为石漠化的驱动因子对后寨河流域石漠化与坡度的空间分布进行研究。通过对 DEM 数据进行坡度提取,并对坡度数据按照 1/2 标准差进行分级,将坡度分为了 10 个等级范围。同时,本文提取了不同坡度等级上的石漠化的分布面积及其占比,如图 13,结果表明石漠化主要发生于坡度为 2°—22°之间,在该范围内石漠化面积占总石漠化面积的 86.11%,而且在发生石漠化区域随着坡度增加潜在石漠化、重度石漠化发

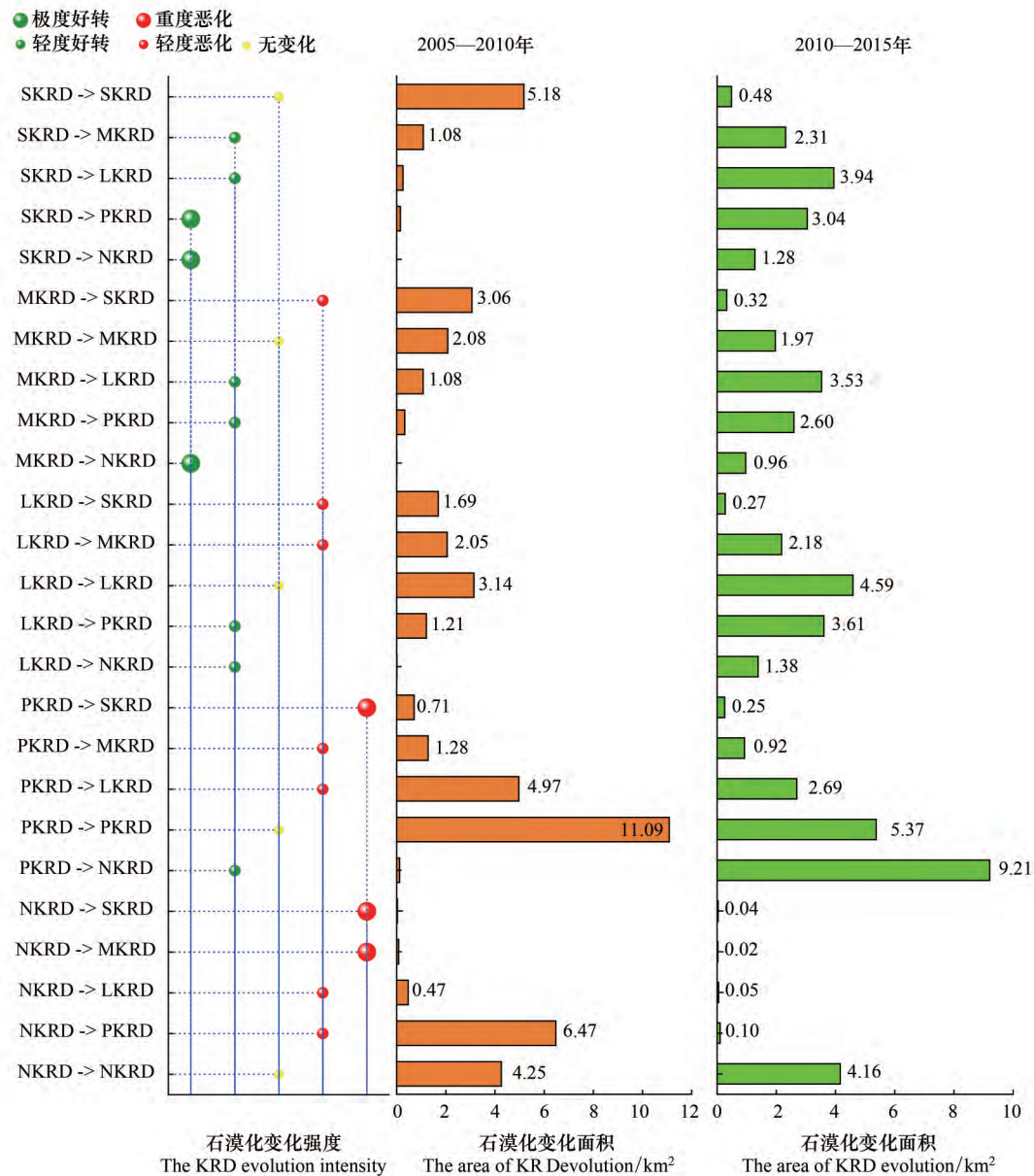


图 11 石漠化等级演变及其演变强度面积统计图

Fig.11 The area statistical map of karst rocky desertification level evolution and its evolution intensity

生率增高,而轻度石漠化和中度石漠化发生率降低。结合研究区石漠化分布图、居民地分布图,可以发现轻度和中度石漠化主要受人为活动的影响;在坡度较缓、居民地较多和人为干扰较多的区域,轻度、中度石漠化面积在同坡度范围内石漠化程度占比较高,随着坡度的增加人为活动降低,轻度和中度石漠化面积占比降低。同时,可以发现潜在和重度石漠化除了受人为活动影响,还明显受坡度影响,而且随坡度增加潜在和重度石漠化在同坡度范围内的石漠化程度占比都明显增加。

同时,在对后寨河流域 2010 年之前的石漠化研究中发现<sup>[16]</sup>,在 2010 年之前石漠化在坡度大于 25° 范围内轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化在该坡度范围内的面积占比较高,而且随时间的增长呈下降趋势。结合本文研究,在贵州省一系列石漠化治理措施的实施下可以发现该研究区石漠化分布已由之前的高坡度范围石漠化占比较高转化为低坡度范围石漠化占比较高,同时石漠化的总面积也在降低,因而在石漠化治理的过程中,在石漠化总量减少的同时,需要对中低坡度范围内的石漠化治理进一步加强。

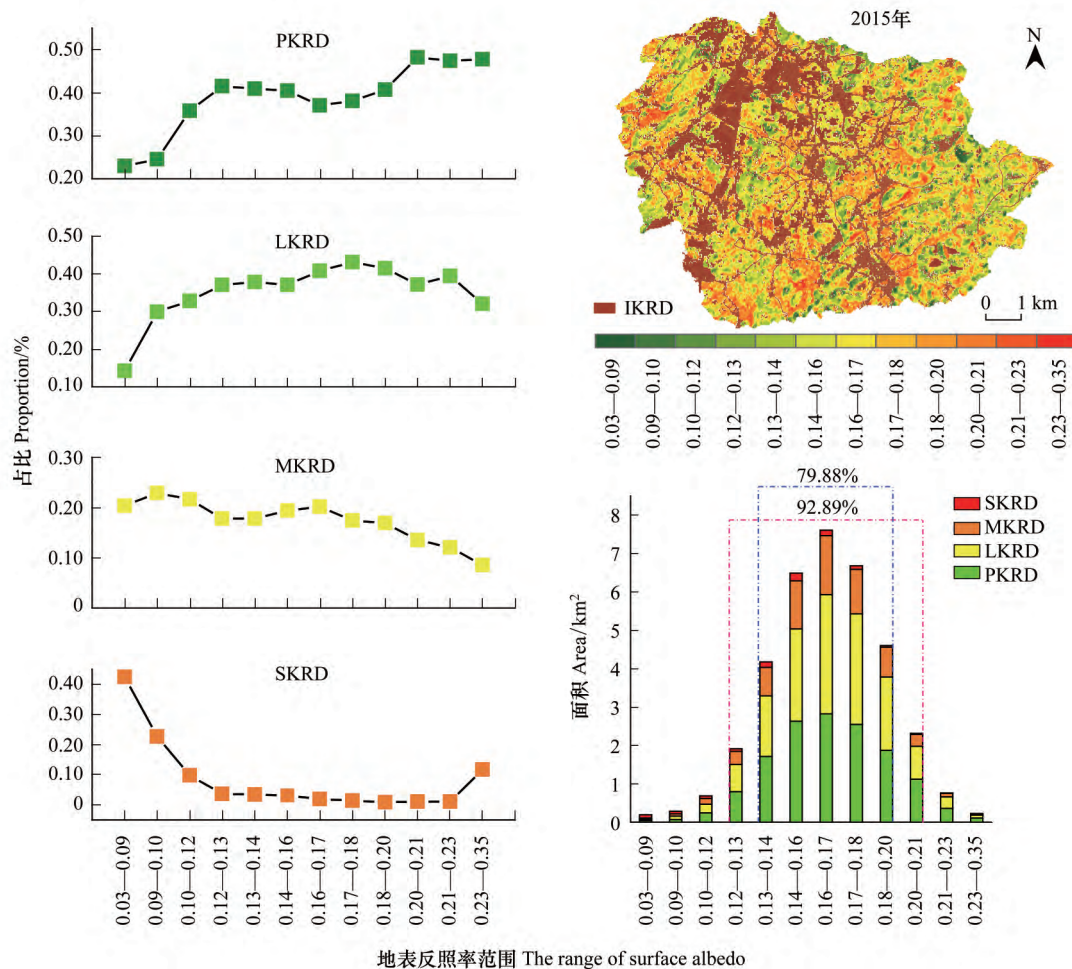


图 12 地表反照率空间分布及各地表反照率范围内石漠化等级分布图

Fig.12 The spatial distribution map of surface albedo and the distribution of karst rocky desertification level in each range of surface albedo

其中图左为各地表反照率范围内各石漠化等级面积占比图, 图右为地表反照率重分类空间分布图和各地表反照率范围内各石漠化等级面积统计图

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

由于影像空间分辨率原因, 利用 TM 影像识别小流域石漠化主要分布信息尚可, 但是如若需要获取石漠化高空间分辨率分布仍需要考虑使用高清影像, 如 SPOT 影像、Quikbird 影像和 GF 影像等。而对于石漠化表征因子、驱动因子, 通过实地考察发现喀斯特地区地貌构造单元较为复杂, 不能对所有的石漠化区域的表征因子和驱动因子进行统一划定, 需要根据研究区域地质地貌背景进行相关研究。同时喀斯特复杂多样的地质、地貌等地表环境以及多云雨的气象条件, 对于遥感影像的拍摄效果以及提取结果都会存在影响, 而且即便使用高分辨率影像进行石漠化信息提取, 单一像元中的地物混合现象都十分严重, 因而利用遥感影像提取石漠化信息目前只是在宏观上反映石漠化的分布趋势, 而定量化的研究尚存在不确定性。

除上述客观因素外, 石漠化提取方法、研究重心也是差异化的, 在后续研究中应该需要关注。本文选取 NDVI 和 NDRI 的经验公式来计算研究区石漠化, 是考虑该方法可以部分排除遥感解译分类过程中的主观因素, 具有快速高效的优点, 便于大范围快速检测石漠化, 且在精度上满足研究需求, 而且本文主要为揭示研究区石漠化的时空演变规律, 同时探索该区域石漠化分布与其关键表征因子(地表反照率)、驱动因子(坡度)之

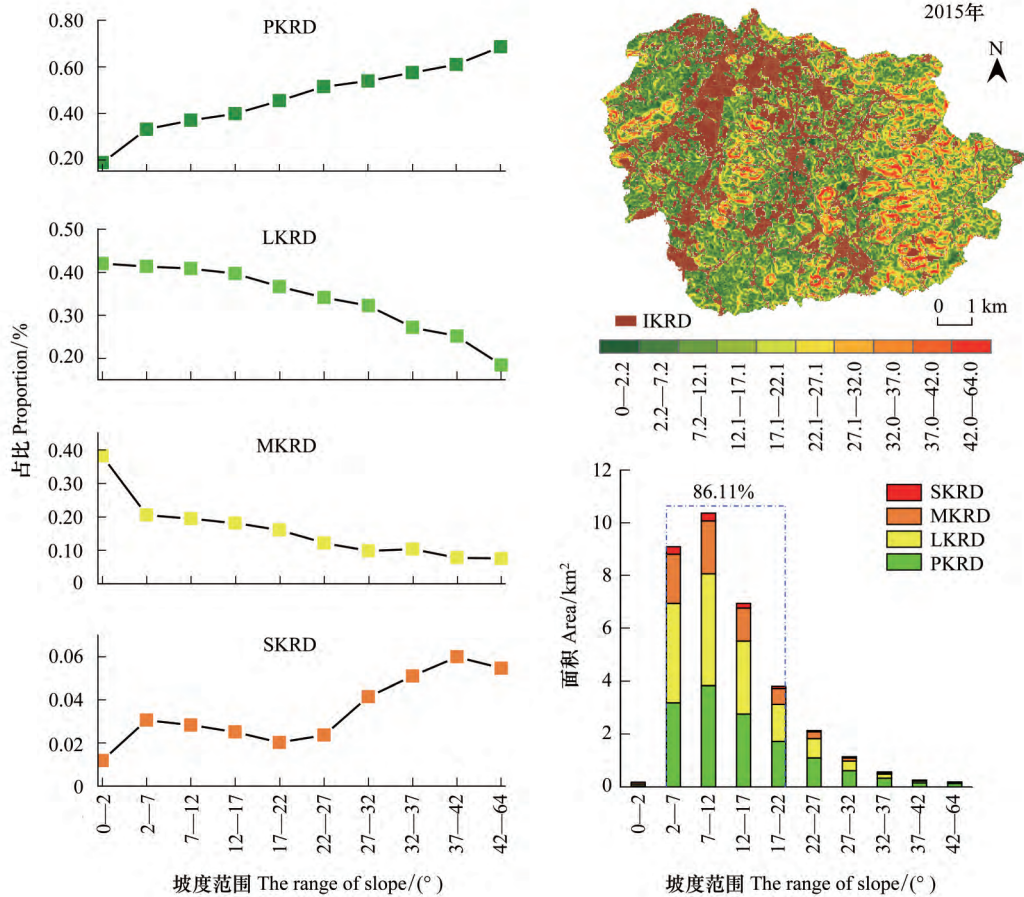


图 13 坡度空间分布及各坡度范围内石漠化等级分布图

Fig.13 The spatial distribution map of slope and the distribution of karst rocky desertification level in each range of slope

其中图左为各坡度范围内各石漠化等级面积占比图, 图右为坡度重分类空间分布图和各坡度范围内各石漠化等级面积统计图

间的关系。但是该方法也存在一定的问题,在 NDRI 经验公式的机理揭示及验证方面还需进一步研究,该经验公式更多的是反映植被的“绿度”信息,能够表达植被的生长状况,而对石漠化信息还包括基岩裸露、土被和干枯植被等多种地表要素信息提取效果尚未有效验证,后续研究可以用高分辨率影像及实地考察等进一步验证 NDRI 来计算岩石裸露率,同时需要在光谱学上深入探索该公式在石漠化解译中的机理。除此之外,本文选取 Landsat 数据计算 2005 年、2010 年、2015 年研究区域石漠化信息,而 GF 卫星于 2013 年发射并投入运行,而且 GF-1 数据与 Landsat 数据波段范围不太一致,所以本文只选取 GF-1 影像进行 IKRD 范围提取的验证工作,并未建立 GF-1 影像等的 NDRI 提取经验公式,在以后的研究中可以考虑建立高分辨率影像、高光谱影像的地表反照率提取方法。同时本文通过研究发现在中低坡度范围石漠化的占比逐渐增加,而该坡度范围内居民地分布较为广泛,人为活动对石漠化的影响明显,因而在后续研究中应逐渐增加人为活动对石漠化影响的研究。

### 3.2 结论

本文得到以下结论:后寨河流域在 2005 年至 2015 年期间石漠化程度与分布面积都呈现先增加后减少的趋势,2010 年为转折点,这是由于 2002 年 1 月国务院确定退耕还林工程,而贵州 2008 年至 2010 年开始实施石漠化综合治理工程,在退耕还林还草等石漠化治理措施实施之后后寨河流域石漠化情况得到明显改善。通过分析,石漠化发生区域均为人为活动附近区域(建设用地、耕地),由于受人类活动的影响(如基础设施建造、植被砍伐等)造成了植被覆盖降低、岩石裸露并进而发育了石漠化。除此之外,对后寨河流域,本文通过研究发现石漠化发育区域主要发生于  $2^{\circ}$ — $22^{\circ}$  的中等坡度和地表反照率为 0.12—0.21 之间,随着坡度增加潜

在石漠化、重度石漠化发生率增高,轻度石漠化和中度石漠化发生率降低,而随着地表反照率增加潜在石漠化、轻度石漠化发生率增高,中度石漠化、重度石漠化发生率降低。可以发现,石漠化的分布与其地表反照率具有一定关系,因此可以考虑将地表反照率作为石漠化提取的表征因子,同时,石漠化的驱动因素坡度与人为活动会协同控制和影响石漠化的分布。

本研究发后寨河区域石漠化分布随贵州省石漠化治理措施的实施,在面积和石漠化程度上都得到了极大地减少和改善,同时石漠化的分布也呈现从高坡度范围面积占比过高转变为低坡度范围面积占比过高的趋势,这主要是受到石漠化总面积减少、高坡度范围石漠化面积减少、低坡度范围石漠化面积变化较少的共同影响,因而在石漠化的治理过程中,应逐渐加强中低坡度范围内的石漠化的治理。与此同时,在中低坡度范围且人类活动影响比较强烈的区域,受人类不合理土地利用方式的影响,发生了轻度、中度石漠化,在后续石漠化治理的过程中,应对人类活动影响石漠化的机制进行探索,进而对石漠化的治理进行全面的防控、监测和治理。

#### 参考文献(References):

- [1] Yuan D X. Rock desertification in the subtropical Karst of South China. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.*, 1997, 108: 81-90.
- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. *中国岩溶*, 2002, 21(2): 101-105.
- [3] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.
- [4] 李阳兵, 白晓永, 邱兴春, 周国富, 兰安军, 周绪, 熊康宁. 喀斯特石漠化与土地利用相关性研究. *资源科学*, 2006, 28(2): 67-73.
- [5] 姚远. 喀斯特石漠化遥感信息提取方法综述. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(12): 64-67.
- [6] 陈起伟, 兰安军, 熊康宁, 肖时珍, 王俊, 熊娟. 基于遥感光谱特征的喀斯特石漠化信息提取. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 21(4): 82-87.
- [7] 吴风志, 白开梅. 基于 OLI 数据的云南禄劝县石漠化敏感性评价. *测绘与空间地理信息*, 2017, 40(11): 83-86, 89-89.
- [8] 夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 石漠化程度遥感信息提取方法研究. *遥感学报*, 2006, 10(4): 469-474.
- [9] Huang Q H, Cai Y L. Mapping karst rock in Southwest China. *Mountain Research and Development*, 2009, 29(1): 14-20.
- [10] 张晓伦, 甘淑. 基于 NDRI 像元二分模型的石漠化信息提取研究. *新技术新工艺*, 2014, (1): 72-75.
- [11] 岳跃民, 张兵, 王克林, 李儒, 刘波, 张明阳. 石漠化遥感评价因子提取研究. *遥感学报*, 2011, 15(04): 722-736.
- [12] 涂杰楠, 杨亮, 梁丽新, 董立强, 郭兆成, 刘婷, 贺鹏. 基于 RapidEye 遥感影像的比值密度分割法在岩溶石漠化调查中的应用——以云南鹤庆县为例. *中国岩溶*, 2015, 34(3): 298-307.
- [13] 朱大运, 熊康宁, 肖华, 蓝家程. 基于植被指数的 GF-1 与 Landsat-OLI 石漠化识别能力对比评价. *自然资源学报*, 2016, 31(11): 1949-1957.
- [14] 岳跃民, 王克林, 张兵, 刘波, 陈洪松, 张明阳. 喀斯特石漠化信息遥感提取的不确定性. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 266-274.
- [15] 董立强. 西南岩溶石山地区石漠化信息自动提取技术研究. *国土资源遥感*, 2003, (4): 35-38.
- [16] Li Y B, Xie J, Luo G J, Yang H, Wang S J. The evolution of a karst rocky desertification land ecosystem and its driving forces in the Houzhaihe Area, China. *Open Journal of Ecology*, 2015, 5(10): 501-512.
- [17] Xu E Q, Zhang H Q. A spatial simulation model for karst rocky desertification combining top-down and bottom-up approaches. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3390-3404.
- [18] 涂杰楠, 董立强, 王珊珊, 郭兆成, 贺鹏, 马祖陆. 南洞地下河流域南部岩溶石漠化空间分布特征分析. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 566-573.
- [19] 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 罗为群, 尹辉, 喻琦雯, 李文军. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 243-247.
- [20] Sheng M Y, Xiong K N, Wang L J, Li X N, Li R, Tian X J. Response of soil physical and chemical properties to Rocky desertification succession in South China Karst. *Carbonates and Evaporites*, 2018, 33(1): 15-28.
- [21] 薛显武, 陈喜, 张志才, 秦年秀. 基于地形因子特征值的喀斯特流域地貌类型判别. *中国岩溶*, 2009, 28(2): 175-180.
- [22] 朱钟正, 陈玉福, 朱文泉, 郑周涛. 适用于多目标遥感自动解译的最佳专题指数筛选. *遥感技术与应用*, 2017, 32(3): 564-574.
- [23] 查勇, 倪绍祥, 杨山. 一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法. *遥感学报*, 2003, 7(1): 37-40.
- [24] Xu H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [25] 李丹, 梁欣, 孙丽娜, 刘洋, 宋以健. 基于多时相遥感影像的耕地利用信息提取研究. *现代测绘*, 2018, 41(4): 21-24.
- [26] 毕海芸, 王思远, 曾江源, 赵岩, 王辉, 殷慧. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析. *遥感信息*, 2012, 27(5): 77-82.
- [27] 丁凤. 基于新型水体指数(NWI)进行水体信息提取的实验研究. *测绘科学*, 2009, 34(4): 155-157.
- [28] 吕丹红, 姜琦刚, 王德军, 葛锦涛. Landsat 数据的植被覆盖估算和景观格局分析. *测绘科学*, 2018, 43(11): 157-164.
- [29] Bai X Y, Wang S J, Xiong K N. Assessing spatial-temporal evolution processes of Karst rocky desertification land: indications for restoration strategies. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(1): 47-56.
- [30] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213-238.