

南太行地区(河南境内)石漠化分级评价及演进过程研究

褚加计¹, 金中昊^{2,3}, 史起飞^{2,3}, 宁立波^{2,3*}

(1. 河南省自然资源监测和国土整治院, 河南 郑州 450016;

2. 中国地质大学(武汉) 环境学院, 湖北 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉) 高寒干旱区矿山地质环境修复研究生联合培养基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以南太行地区为例,采用遥感解译技术,选取植被、土被和基岩裸露率三个评价因子,构建适用于该区域的石漠化分级标准,开展该区域石漠化问题的研究。结果显示:(1)通过缨帽变换的第二分量(绿度指数)进行验证,证实由植被、土被和基岩裸露率三个因子构建的北方地区石漠化分级标准合理、可行;(2)1995—2020年研究区域的石漠化问题呈现出前8 a快速恶化,后25 a缓慢改善的态势;石漠化区域高度集中于研究区的东南部、南部及西北部,这些区域多临近农田、城镇与矿区且受人类生产建设活动的干扰强烈;而无石漠化区域多集中于研究区西北部及北部边界局部地带;(3)地质环境与人类活动相互作用、相互促进,导致区内土地生产力退化、植被生存环境恶化及水土涵养能力下降,反过来促进土壤侵蚀、碳酸盐岩溶蚀与侵蚀的恶性循环,推动石漠化问题的持续发展。

关键词: 南太行地区; 石漠化; 分级评价标准; 时空演进

中图分类号: P51

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Classification and evaluation of rocky desertification and evolution process in South Taihang Area

CHU Jiayi¹, JIN Zhonghao^{2,3}, SHI Qifei^{2,3}, NING Libo^{2,3*}

(1. Henan Provincial Institute of Natural Resources Monitoring and Land Improvement, Zhengzhou 450016, China;

2. College of Environment, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

3. Joint Training Base for Post-Graduate Students of Mining Geological Environment Restoration in Cold and Arid Areas, China University of Geosciences (Wuhan), Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking the southern Taihang Mountains area as an example, remote sensing interpretation technology was adopted, three evaluation factors (vegetation, soil cover, and bedrock exposure rate) were selected, a rocky desertification classification standard suitable for this region was established, and research on the rocky desertification issue in the area was carried out. The results showed that: (1) Verification was conducted using the second component (greenness index) of the tasseled cap transformation, which confirmed that the rocky desertification classification standard for northern China constructed based on the three factors (vegetation, soil cover, and bedrock exposure rate) was reasonable and feasible; (2) From 1995 to 2020, the rocky desertification in the study area showed a trend where it deteriorated rapidly in the first 8 years and improved slowly in the subsequent 25 years; The rocky desertification areas were highly concentrated in the southeast, south, and northwest parts of the study area. Most of these areas were adjacent to farmland, towns, and mining areas, and were strongly disturbed

收稿日期: 2023-12-20; 修回日期: 2024-04-29; * 通信联系人, E-mail: ninglibo200294@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972001)

作者简介: 褚加计(1979—), 男, 河南周口人, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境地质方面的研究。

引用格式: 褚加计, 金中昊, 史起飞, 等. 南太行地区(河南境内)石漠化分级评价及演进过程研究[J]. 信阳师范大学学报(自然科学版), 2026, 39(1): 139-149.

CHU Jiayi, JIN Zhonghao, SHI Qifei, et al. Classification and evaluation of rocky desertification and evolution process in South Taihang Area[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 139-149.

by human production and construction activities; In contrast, areas without rocky desertification were mostly concentrated in the northwest part of the study area and some local areas along the northern border; (3) The geological environment and human activities interacted with and promoted each other, which led to the degradation of land productivity, the deterioration of the vegetation living environment, and the decline of water and soil conservation capacity in the area. In turn, this promoted a vicious cycle of soil erosion, carbonate rock dissolution, and erosion, driving the continuous development of the rocky desertification problem.

Key words: south Taihang area; degree of rocky desertification; grading evaluation standard; space-time evolution

0 引言

石漠化是一种岩石裸露的土地退化过程,属于典型的地质生态灾害类型^[1-2]。我国西南地区喀斯特石漠化问题严重,具有强度高、分布广、危害大的特点,已引起政府和学者的广泛关注。目前,在石漠化的成因探究、分级评价以及监测防治等方面取得诸多成果^[3-6]。西南地区石漠化等级多以植被覆盖度、基岩裸露率、土层厚度、地形坡度及植被种类等为分级指标^[7],分级阈值易受地域尺度、分级目标及遥感影像解译方法的影响^[8-9]。熊康宁等^[10-11]主张依据植被覆盖率、岩石裸露率、平均土厚和植被类型四个因子将喀斯特土地石漠化程度划分为轻、中和重三个等级。安霞霞^[12]选取植被覆盖度、土层厚度、基岩裸露率及植被类型四个指标,结合层次分析法与熵值法确定指标权重,进而将关岭布依族苗族自治县石漠化程度划分为轻度、中度、重度和极重度四个等级。针对重庆市喀斯特地区石漠化分级研究,朱林富^[13]先通过地质数据确定石漠化潜在发生区域,再选取植被覆盖度、岩石裸露率、坡度以及土地利用类型四项指标构建评价体系,最终实现该区域石漠化“无、轻度、中度、重度和极重度”五级划分。多数文献在分级时,以植被因子、基岩裸露因子、土壤厚度、地形坡度等为分级指标^[14-15]。其中小区域被划分为4~5级,大区域则被划分为3~4级^[16],且不同研究的分级阈值存在差异,主要跟研究的地域尺度、分级目标及研究方法有关^[17]。综合现有研究成果来看,已有研究针对喀斯特石漠化构建的分级体系简洁明确,为西南岩溶区土地石漠化治理起到了积极的作用。我国北方地区石漠化程度与危害虽不及西南岩溶区严峻,但这一差异也导致针对北方地区石漠化的认识、分级、监测与防治尚未形成成熟的研究体系。北方可溶岩地区生态地质环境脆弱,夏季温热多雨、冬季寒冷干燥、土层厚度较

薄,在自然和人为因素的共同影响下生态环境极易受损,对区域生态安全构成严重威胁^[18]。加之学术界对北方石漠化问题的关注度不足,防治形势十分严峻。

石漠化的形成,是地层岩性、植被长势、地形坡度、气候条件等自然因素与人类活动长期叠加作用的结果,石漠化等级划分应优先以其实际发育结果及核心表征因素为依据。本文以南太行地区为研究对象,探究适用于北方地区的石漠化评价指标与分级标准,旨在为北方石漠化的监测、防治提供科学参考。

1 研究区概况与遥感数据来源

1.1 研究区概况

南太行地区位于中原腹地,本研究的核心区域涵盖辉县市、卫辉市及凤泉区,总面积约1100 km²。研究区地形整体呈西北高、东南低的倾斜态势,地貌上横跨我国的第二和第三阶梯,属于西部山地与东部平原的过渡地带,可见多种地貌类型。依据地貌单元与形态特征,地貌可划分为山地、丘陵、山间盆地及平原等(图1)。

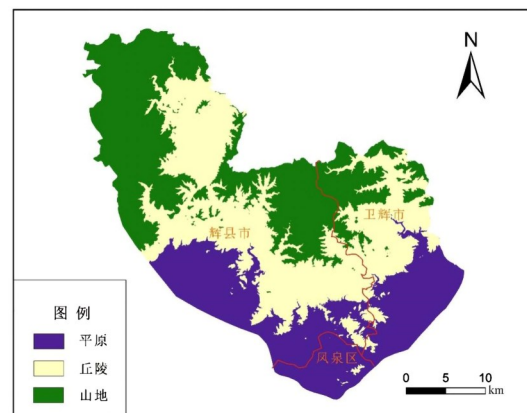


图1 研究区地形地貌图

Fig. 1 Topographic and geomorphic map of the study area

研究区岩性以片麻岩类、碳酸盐岩类为主, 土壤以褐土为主, 且土层厚度较薄, 属于中度土壤侵蚀区, 亦是华北地区土壤侵蚀最为严重的区域^[20]。气候隶属暖温带半湿润区, 气候特征表现为四季分明、冬寒夏热、秋凉春早, 年平均气温介于15~17℃, 年总降水量为573.1~756.3 mm; 其中6月—9月降水量最为集中, 约480 mm, 占全年总降水量的72%, 且该时段多出现暴雨天气, 形成雨热同季与强降雨集中的气候特点^[21]。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 数据来源

从美国地质勘探局网站 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 选取 1987 年、1995 年、2009 年和 2020 年共 4 期跨度为 33 a 的遥感影像作为研究数据, 对应的条带号为 124, 行编号为 35。所选影像均摄于夏秋时节无云或少云时段, 时相相近、纹理清晰、色彩明亮和成像质量较好, 满足研究的分析需求。各期遥感影像详细信息如表 1 所示。

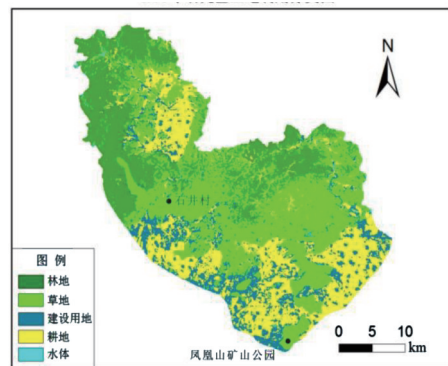
表 1 各期遥感数据参数

Tab. 1 Remote sensing data parameters of each period

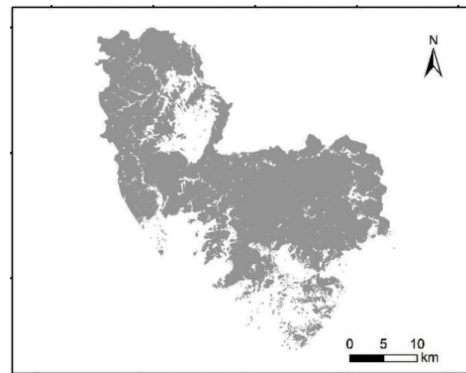
时间	卫星	传感器	空间分辨率/m	云量/%
1987-09-17	Landsat-5	TM	30	2.0
1995-07-05	Landsat-5	TM	30	0.0
2009-08-13	Landsat-5	TM	30	4.2
2020-08-26	Landsat-8	OLI_TIRS	30	0.5

1.2.2 遥感图像预处理

影像预处理主要包括: ①坐标系选取: 由于 Landsat-5 和 Landsat-8 数据的投影坐标系不同, 因此需统一坐标系, 依靠 Arcgis 10.2 软件投影与变换工具对数据进行坐标变换, 选取 WGS_1984_UTM_Zone_49N 坐标系; ②辐射定标和大气校正; ③监督分类提取山区范围: 由于石漠化只存在于基岩山区, 因此需要提取山区边界, 采用基于 ENVI 5.3 软件中支持向量机分类方法与目视解译相结合的方法进行解译, 同时借助 Google Earth 和 DEM 数据对解译后的结果进行检查校正, 提高分类精度^[22] (图 2); ④裁剪: 通过 ENVI 5.3 软件的 Submit data from ROI 工具进行各期影像的裁剪工作。由于 TM 传感器 4、3、2 波段组合、OLI 传感器 5、4、3 波段组合可突显植被长势特征, 预处理结果由 4、3、2 波段组合呈现, 其中红色区域为植被长势良好的区域 (图 3)。



(a) 研究区监督分类结果



(b) 山区范围

图 2 监督分类提取山区边界结果

Fig. 2 Results of mountain boundary extraction via supervised classification

2 研究方法

2.1 石漠化等级划分标准

北方半湿润地区与南方湿润地区的气候虽具有雨热同季、降水集中的共性, 但北方地区的降水集中时段、降雨量和平均温度明显低于南方, 且北方地区干湿季节分明, 易引发旱涝频繁, 导致植被生长缓慢, 绝对生长量低, 群落结构简单, 水土保持与成土能力有限。因此, 在构建北方地区石漠化等级评价标准时, 指标的筛选与区间划分需遵循可操作性、地域性及系统性原则^[23]。

以生态基准面理论为依据, 将土地退化前与气候生物带相适配的森林景观设定为初始面, 将极端退化的石漠化土地设定为终极面^[17]。在参考已有文献关于岩溶石漠化分级方法及指标体系评价结果的基础上, 充分考虑研究区地形地貌复杂、水土流失严重、可溶岩大范围出露、土层较薄, 基岩山区多由植被、裸土和裸岩三类要素构成的实际情况, 选取能够系统性表征基岩山区景观的植

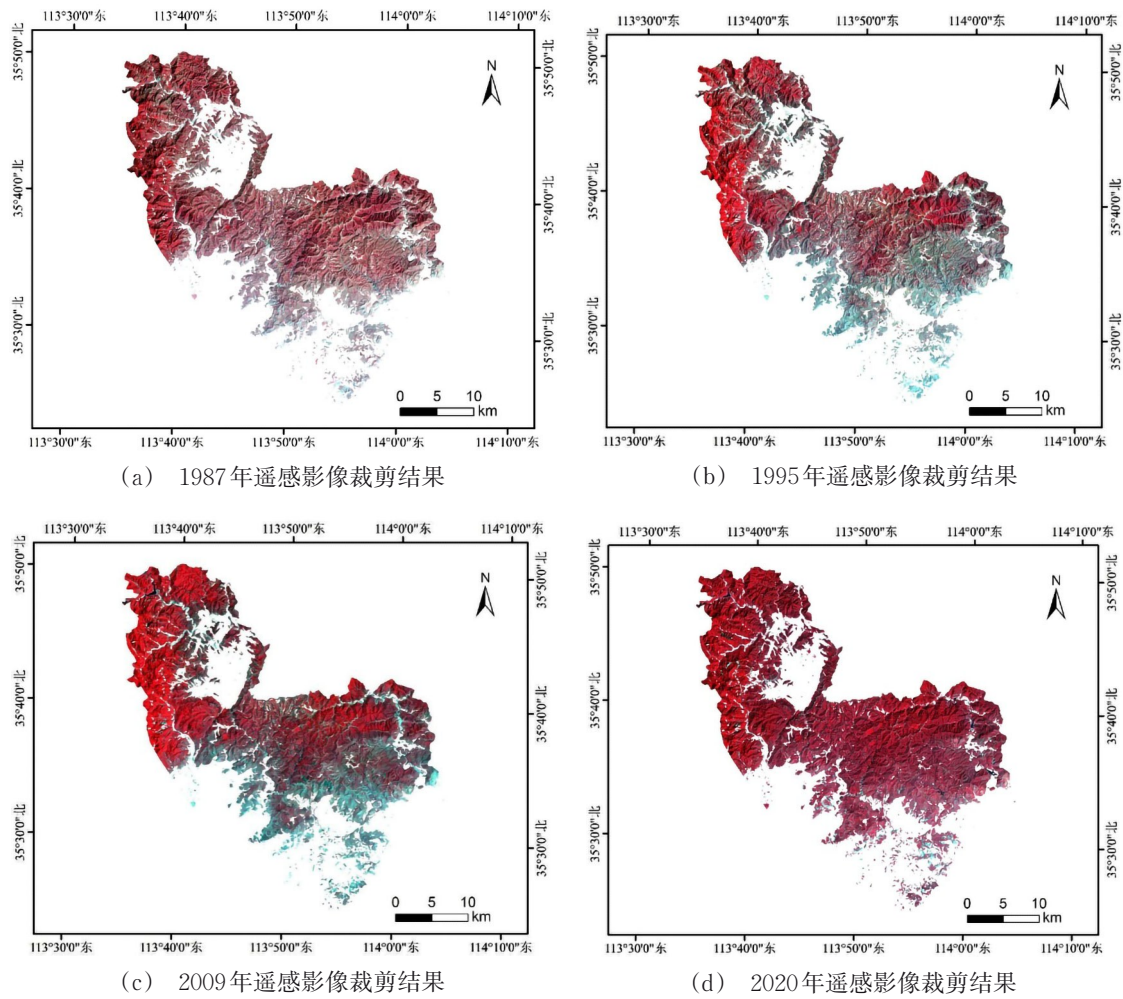


图 3 各期遥感影像预处理结果

Fig. 3 Preprocessing results of multi-temporal remote sensing images

被、土被、基岩裸露三个因素,作为石漠化信息提取的主要因子。结合野外实地调查数据和遥感解译结果,将研究区石漠化程度划分为无、轻度、中度、重度和极重度石漠化 5 个等级。其中,无石漠化区域的分级区间参考熊康宁等^[23]针对非纯碳酸盐岩地区石漠化程度划分结果,其余石漠化等级的区间则通过等间距法划分,如表 2 所示。

表 2 研究区石漠化程度分级标准

Tab. 2 Classification standard of rocky desertification degree in study area

石漠化程度	基岩裸露率/%	(植被+土被)覆盖率/%
无石漠化	[0, 40)	[60, +∞)
轻度石漠化	[40, 55)	[45, 60)
中度石漠化	[55, 70)	[30, 45)
重度石漠化	[70, 85)	[15, 30)
极重度石漠化	[85, 100)	[0, 15)

同时,为验证石漠化分级结果的科学性与合理性,进一步提取各石漠化等级的空间区域范围,统计各区域范围内遥感数据经过缨帽变换的第二分量^[24](绿度指数,受绿色植被种类、植被数量、植被叶面积指数的影响非常大)的均值,其变化趋势如图 4 所示。

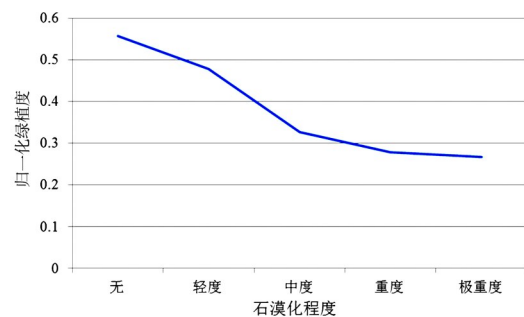


图 4 绿度指数随石漠化程度变化趋势

Fig. 4 Variation trend of green degree index with rocky desertification degree

从图4的绿色指数变化趋势可明确看出:随着石漠化程度的逐步加剧,研究区绿色值整体呈现持续下降趋势。在轻度、中度和重度石漠化阶段,绿色值下降幅度显著,表明该阶段区域植被覆盖度快速退化;进入重度和极重度阶段后,绿色值下降趋势减缓,表明该阶段水土流失与植被退化较为严重,形成土壤流失殆尽,稀疏灌草丛零星分布,基岩大面积裸露的类荒漠化景观^[25],与已有研究针对岩溶地区石漠化退化阶段的研究结论相符,证实分级标准合理且可行。

2.2 石漠化信息提取方法

(1) 植被覆盖度(VFC)的计算

地表植被可直接反映生态系统的整体质量,而植被指数则为量化表征地表植被状况提供了直观、高效的度量手段。针对不同研究对象与应用场景,学术界已构建多种植被指数体系,如归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)、土壤调节指数(SAVI)等。其中NDVI是目前应用最广泛的植被指数之一,与叶面指数、植物生物量及植被覆盖度均存在密切相关性^[26]。

本研究选择归一化植被指数(NDVI)来估算研究区植被的覆盖度,其计算公式为:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R), \quad (1)$$

式中:NDVI为归一化植被指数;NIR为遥感影像的近红外波段; R 为红波段。取NDVI的[5%, 95%]为置信区间,利用式(2)计算研究区域的植被覆盖度:

$$VFC = \frac{NDVI - NDVI_{5\%}}{NDVI_{95\%} - NDVI_{5\%}}, \quad (2)$$

式中:VFC为植被覆盖度;NDVI_{5%}为NDVI中累计占比为5%的像元值,NDVI_{95%}为NDVI中累计占比为95%的像元值。

(2) 裸土覆盖度(GRABS)的计算

缨帽变换是遥感影像特征提取与压缩的核心技术,其原理是通过正交变换对影像原始数据进行线性重组的同时降低数据维度。变换后生成的前三个分量被标准化定义为“亮度”、“绿色”与“湿度”,分别反映了土壤岩石、植被、土壤和植被中的水分信息。“亮度”和“绿色”指数可用于评价裸土与植被的覆盖及分布特征,通过二者的线性组合构建裸土植被指数(GRABS),有效反映土壤的裸露程度^[27]。具体计算公式如下:

$$GRABS = VI - 0.09178BI + 5.58959, \quad (3)$$

式中:VI和BI分别为缨帽变换的绿色指数和土壤亮度指数。

Landsat TM与Landsat OLI的VI与BI的求解如下:

$$VI_{TM} = (-0.2848B_1 - 0.2435B_2 - 0.5436B_3 + 0.7243B_4 + 0.084B_5 - 0.18B_7), \quad (4)$$

$$BI_{TM} = (0.3037B_1 + 0.2793B_2 + 0.4743B_3 + 0.5585B_4 + 0.5082B_5 + 0.1863B_7), \quad (5)$$

式中: B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 和 B_7 分别为Landsat TM影像的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、中红外波段一及中红外波段二。

$$VI_{OLI} = (-0.2941B_2 - 0.243B_3 - 0.5424B_4 + 0.7276B_5 + 0.0713B_6 - 0.1608B_7), \quad (6)$$

$$BI_{OLI} = (0.3029B_2 + 0.2786B_3 + 0.4733B_4 + 0.5599B_5 + 0.508B_6 + 0.1872B_7), \quad (7)$$

式中: B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 、 B_6 和 B_7 分别为Landsat OLI影像的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、中红外波段一及中红外波段二。

(3) 基岩裸露率(BER)计算

基岩山区的地表景观构成具有显著一致性,主要由植被、裸土与裸岩三类景观组成,据此得到基岩裸露率(BER)的计算公式如下:

$$BER = (1 - (VFC + GRABS)) \times 100\%, \quad (8)$$

式中:VFC为植被覆盖度,GRABS为裸土覆盖度。

3 石漠化分级评价结果及时空演变分析

3.1 分级评价

鉴于石漠化的发生具有严格的地理限定性,仅分布于基岩山区,采用监督分类和DEM数据相结合的技术方法,提取研究区的山区空间范围,对1987—2020年石漠化区域的时空变化特征开展解译研究,充分结合研究区的实际情况,依据植被、土被和岩石裸露率将石漠化程度划分为极重度、重度、中度、轻度和无石漠化5个等级。

通过上述方法,获取了研究区1987、1995、2009及2020年4个关键时期的石漠化空间分布数据(如图5所示)。结合图2和表3可知:1987年研究区以无石漠化和轻度石漠化为主,总面积约为583.9 km²,占比约为79%;石漠化区域集中分布于除北部、西部以外的大部分区域,且以轻度石漠化为主。1995年研究区石漠化程度显著加剧,虽然石漠化区域整体范围无明显扩张,但中度及以上石漠化区域面积达419.2 km²,占比升至57%;石漠化土地由点状向面状扩张明显,重度石漠化土地

以片状形态分布于研究区南部城镇周边。2009 年研究区以无石漠化和轻度石漠化为主,面积约为 641.6 km²,占整个区域的 86.4%;无石漠化区域扩展趋势明显,西北和北部区域植被生长良好。

2020 年研究区石漠化状况呈现由面状向点状的改善特征,无石漠化区域大范围扩张,石漠化区域仅余 76.7 km²,占比降至 10.3%,以轻度类型为主,呈点状零星分布于南部、西北部靠近城镇区域。

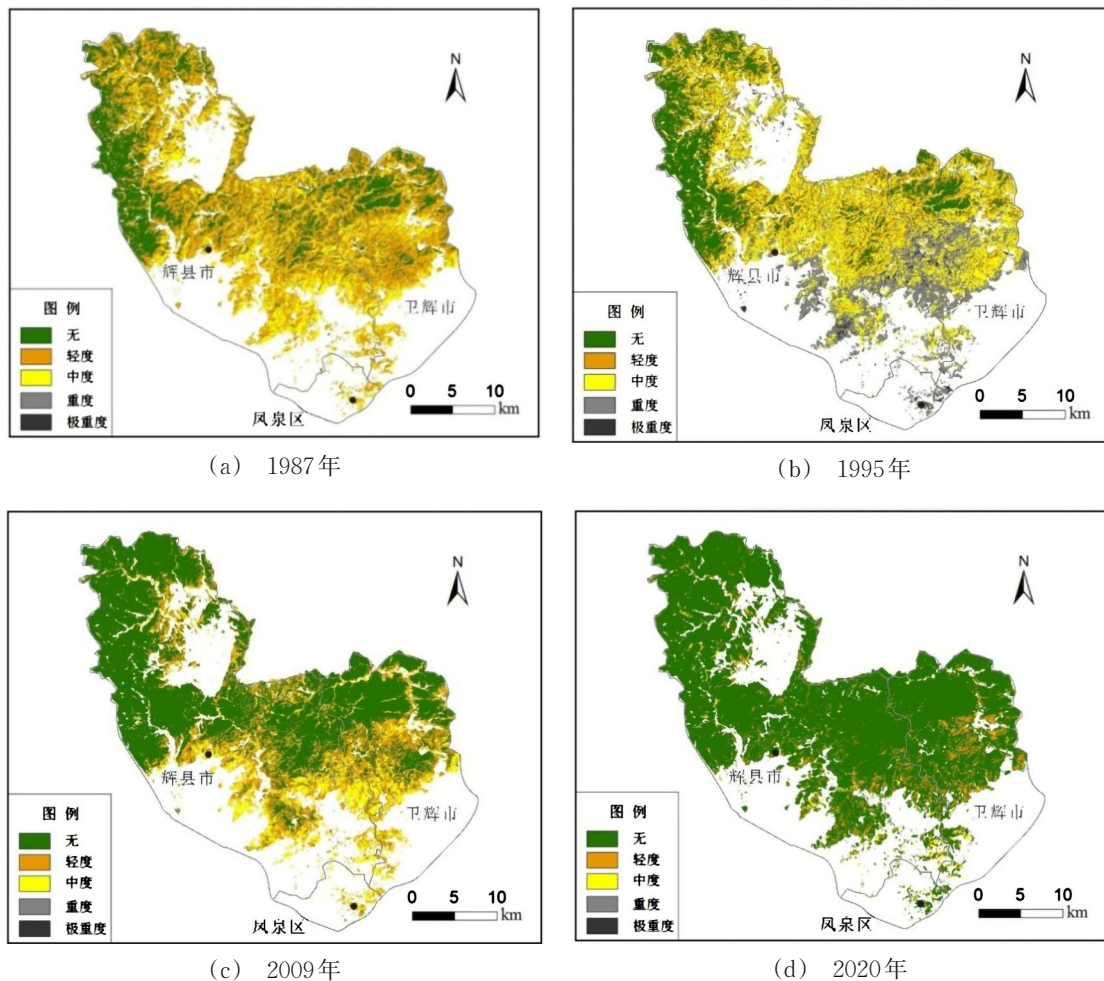


图 5 1987、1995、2009 和 2020 年石漠化程度分级结果图

Fig. 5 Classification results of rocky desertification degree in 1987, 1995, 2009 and 2020

表 3 1987、1995、2009 和 2020 年不同程度石漠化面积及占比统计表

Tab. 3 Statistics of the area and proportion of rocky desertification in 1987, 1995, 2009 and 2020

石漠化程度	1987		1995		2009		2020	
	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%	面积 /km ²	占比 /%
无	198.2	26.7	166.6	22.1	448.4	60.4	665.5	89.7
轻度	385.7	52.0	166.3	22.1	193.2	26.0	66.0	8.9
中度	156.6	21.1	221.7	30.3	95.0	12.8	9.4	1.3
重度	1.5	0.2	187.1	25.6	5.4	0.7	1.2	0.2
极重度	0.2	0.02	10.4	1.4	0.1	0.01	0.1	0.01

在 1987—2020 年间,研究区内各等级石漠化面积均发生显著的变化,具体占比演变特征如表 3 所示:1987 年极重度、重度、中度、轻度和无石漠化

的面积占比依次为 0.02%、0.2%、21.1%、52.0% 和 26.7%;到 1995 年,各等级占比转变为 1.4%、25.6%、30.3%、22.1% 和 22.1%;2009 年进一步演

变为 0.02%、0.7%、12.8%、26.0% 和 60.4%；至 2020 年,各等级占比最终变为 0.01%、0.2%、1.3%、8.9% 和 89.7%。四个时期不同程度的石漠化面积及占比由大到小依次为:轻度>无>中度>重度>极重度;中度>重度>轻度=无>极重度;无>轻度>中度>重度>极重度;无>轻度>中度>重度>极重度。

总体来看,1987—2020 年间研究区内无石漠化区域面积增长显著,轻度与中度石漠化区域面积降幅较大,极重度、重度石漠化区域虽变幅明显,但因变化量较小,对整体分布特征影响有限。可见,轻度石漠化与无石漠化区域的面积变化是影响研究区石漠化分布特征的主导因素。具体而言,1987—1995 年约有 250 km² 的无石漠化、轻度石漠化区域向中度、重度、极重度石漠化转变,反映该时段研究区土地持续退化趋势;而 1995—2009 年约 350 km² 的中度、重度、极重度石漠化区域逆转为无石漠化、轻度石漠化;2009—2020 年约 200 km² 的不同程度石漠化区域进一步转变为无石漠化。上述数据表明,1995—2020 年研究区石漠

化状况经历了“先恶化、后改善”的演变过程。

3.2 石漠化时空演进

在石漠化等级划分的基础上,利用 ArcGIS10.2 软件对研究区不同时段石漠化状况进行差值变化的监测(见图 6 和表 4)。结果显示,研究区石漠化动态变化可划分为 9 种类型,即 4 种改善类别(用+1 级、+2 级、+3 级、+4 表示)、4 种退化类别(用-1 级、-2 级、-3 级、-4 级表示)、1 种稳定类别(用 0 级表示)。

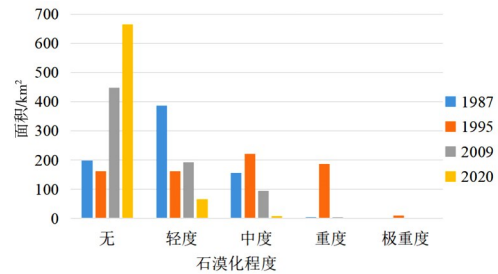


图 6 1987—2020 年研究区不同程度石漠化面积柱状图

Fig. 6 Histogram of rocky desertification area of different degrees in the study area from 1987 to 2020

表 4 1987—2020 年研究区石漠化动态变化统计表

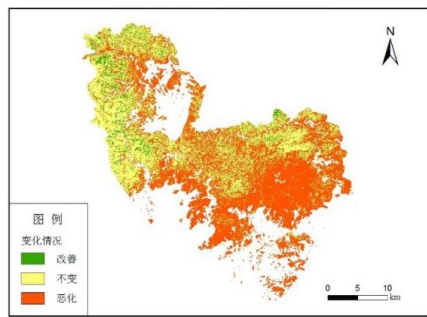
Tab. 4 Statistical table of dynamic change of stony desertification in the study area from 1987 to 2020

石漠化演变程度	极差	1987—1995		1995—2009		2009—2020		
		面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	
改善	+4	0.02	0.002	0.41	0.06	0.10	0.01	
	+3	0.08	0.01	24.33	3.28	3.00	0.40	
	+2	0.60	0.08	211.92	28.56	62.93	8.48	
	+1	42.10	5.67	312.49	42.11	191.26	25.77	
不变	+0	280.65	37.82	189.97	25.60	471.98	63.60	
	退化	-1	298.63	40.24	2.66	0.36	10.97	1.48
		-2	111.90	15.08	0.28	0.04	1.63	0.22
		-3	7.81	1.05	0.06	0.01	0.22	0.03
-4		0.33	0.04	0.001	0.000 1	0.03	0.004	

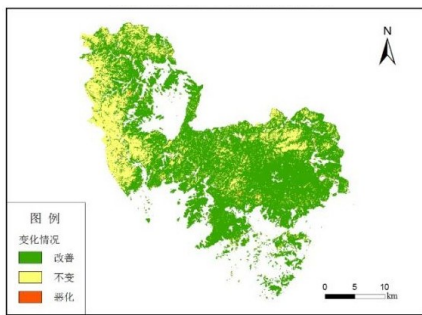
1987—1995 年,研究区石漠化问题加剧,严重石漠化面积达 481.67 km²,占区域总面积的 56.41%。其中,以恶化 1 个等级(-1 级)和 2 个等级(-2 级)为主,对应面积分别为 298.63 km²、111.9 km²,主要分布在西北部、南部人类活动强度较高的区域,如靠城镇、农田、风景区与矿区周边以及南部植被长势较差的低海拔山地。石漠化程度基本不变的区域面积为 280.65 km²,占比 37.82%,多集中于西部和北部高海拔区域,该区域

人类活动影响较弱,植被茂盛且物种丰富。石漠化改善区域的面积仅为 42.8 km²,占比 5.76%,在西北部零星分布,且以改善 1 个等级(+1 级)为主(见图 7—图 8)。

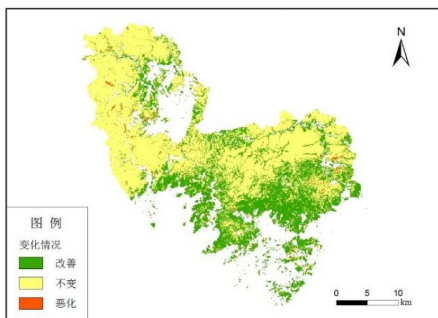
1995—2009 年,石漠化改善效果明显,74.01% 的石漠化区域得到改善,对应面积 549.15 km²。其中,以改善 1 个等级(+1 级)和 2 个等级(+2 级)为主,面积分别为 312.49 km² 和 211.92 km²,分布于除西北部、北部植被长势茂盛区域外



(a) 1987—1995年动态变化



(b) 1995—2009年动态变化



(c) 2009—2020年动态变化

图 7 1987—2020年研究区石漠化动态监测图

Fig. 7 Dynamic monitoring map of rocky desertification in the study area from 1987 to 2020

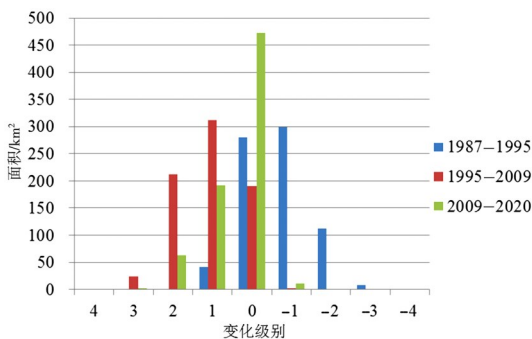


图 8 1987—2020年研究区石漠化动态变化柱状图

Fig. 8 Histogram of dynamic change of rocky desertification in the study area from 1987 to 2020

的大部分区域。石漠化程度基本不变的区域面积为 189.97 km^2 , 占比 25.6% , 分布与 1987—1995 年一致, 集中在西部和北部高海拔、低人类活动干扰区域。石漠化恶化区域面积仅 3 km^2 , 占比 0.41% , 呈零星分布, 且以恶化 1 个等级 (-1 级) 为主。

2009—2020 年, 研究区大部分区域石漠化程度保持稳定, 仅小部分区域持续改善。其中, 34.66% 的石漠化区域得到改善, 面积约为 257.29 km^2 , 以改善 1 个等级 (+1 级) 和 2 个等级 (+2 级) 为主, 对应面积分别为 191.26 km^2 和 62.93 km^2 , 分布在西北部、南部人类活动强度较高的区域 (如城镇、农田、风景区和矿区等) 以及南部植被长势较差的低海拔山地。石漠化程度基本不变的区域面积为 471.98 km^2 , 占比 63.6% , 多集中于西部和北部低人类活动干扰区域。石漠化恶化的面积仅为 12.85 km^2 , 占比 1.73% , 零星分布在高海拔工程建设项目附近, 以恶化 1 个等级 (-1 级) 为主, 对应面积 10.97 km^2 。

从地质学角度看, 石漠化是埋藏碳酸盐岩在水蚀与重力作用下, 表层土壤持续侵蚀, 形成裸露或半裸露的石芽、溶沟、角石和少土多石、严酷生境的土地退化过程。从生态学的角度看, 石漠化是土壤水分、养分与植物生长之间的自然平衡被打破, 生态环境向更低级阶段演化的过程^[28]。降雨 (尤其是暴雨) 时, 裸露、半裸露的土壤层受雨滴击溅和流水冲刷, 结构遭受侵蚀破坏, 部分土壤沿坡面流失并在坡脚或沟谷堆积; 部分土壤颗粒、溶蚀物质及风化壳物质通过坡面垂直或倾斜运动, 流入岩溶裂隙与溶沟, 最终流失于岩溶水系统, 促使埋藏、半埋藏的碳酸盐岩, 在水蚀及重力作用下, 形成裸露、半裸露的石芽、溶沟、角石等少土多石的石漠化景观。

在石漠化发展过程中, 植被系统退化会导致土壤淋失量增加, 加剧氮、磷、钾等养分在淋溶作用下的流失。同时, 森林环境的消失会使生物种类与数量急剧减少, 不仅导致生物富集作用减弱, 还会延缓母岩矿化速率, 降低土壤养分含量, 影响地表植被的生长, 进一步导致水土流失、土壤侵蚀、碳酸盐岩溶蚀, 加速了石漠化的步伐。

研究区地形起伏显著, 属半湿润气候区, 年降水量 $500 \sim 800 \text{ mm}$, 且集中于 7—9 月。区域内山区以石灰岩等可溶性岩石为主, 易于发生溶蚀。同时, 地表上覆土厚度较薄 ($0 \sim 35 \text{ cm}$), 在集中降

雨季节极易引发水土流失,导致土体受到侵蚀进一步变薄。非雨季时期,研究区气候寒冷干燥,且长期受季风影响,风速可达5 m/s,使得土壤长期处于干燥状态,成土作用微弱。这种恶劣气候条件叠加贫瘠的岩石母质,给植物生长带来极为不利的环境;此外,人口集中、经济落后、生态保护意识薄弱而采取的不合理生产生活方式(如滥垦滥伐、滥挖滥采等)较为普遍。在上述自然驱动因素与人为驱动因素的共同作用下,地表植被遭到破坏,进而加剧土壤侵蚀与碳酸盐岩溶蚀、侵蚀过程。二者呈现“相互作用、相互促进”的关联,引发土地生产力退化、植被生存环境恶化、植被退化、水土涵养能力下降的连锁反应;而这些变化又会加剧土壤侵蚀与碳酸盐岩溶蚀,形成恶性循环,最终导致石漠化的产生,加剧其发展态势。

4 结论与讨论

以北方南太行地区为对象,通过遥感技术确定石漠化等级划分标准,开展石漠化信息提取,分析不同时期、不同程度的石漠化时空分布特征,研究结果如下:

(1)研究基于生态基准面理论,遵循分级评价的可操作性、系统性、地域性等原则,结合研究区的实际情况与基岩山区的景观类型,选取植被覆盖度、裸土覆盖度、基岩裸露率三个核心因子提取石漠化信息,并建立区域石漠化分级评价标准,经

原始数据缨帽变换后的第二分量(绿度分量)验证,该分级标准具备合理性与可行性。

(2)近33年来(1987—2020年),该地区石漠化呈现“先恶化、后改善”的阶段特征:1987—1995年石漠化问题快速加剧,1995—2020年则进入缓慢改善阶段。空间分布上,石漠化区域集中于研究区东南部、南部及西北部等靠近农田、城镇、矿区等人类活动强度高的区域。受水土流失影响,土壤养分流失严重,植物覆盖度低且物种单一,多形成稀疏灌草地与大面积岩石裸露景观;无石漠化区域则主要分布于研究区西北部及北部边界局部区域,该区域植物覆盖度高,物种多样性丰富,具有较强的水源涵养与土壤保持功能。

总之,研究区内石漠化的形成与加剧是自然脆弱背景与人类活动干扰共同作用的结果。一方面,区域内碳酸盐岩广泛分布、土层浅薄、地表起伏大,构成了易发生石漠化的脆弱地质环境基底。另一方面,雨季降水集中且多暴雨且非雨季气候寒冷干燥的自然条件,叠加滥挖乱采、滥垦滥伐的不合理人类活动,共同导致地表植被破坏,继而加重土壤侵蚀与碳酸盐岩溶蚀过程,二者形成相互作用、相互促进的关联,导致土地生产力退化、植被生存环境恶化的连锁反应,最终形成土壤侵蚀与碳酸盐岩溶蚀的恶性循环,推动石漠化的形成与加剧。

参考文献:

- [1] YUAN Daoxian. Rock desertification in the subtropical Karst of south China [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997, 108: 81-90.
- [2] 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 & Development, 2013, 24(1): 47-56.
- [3] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.
YAO Yonghui. Progress and prospect of Karst rocky desertification research in southwest China [J]. Progress in Geography, 2014, 33(1): 76-84.
- [4] 唐荣彬, 黄桂云, 邱利文, 等. 西南喀斯特不同生境石漠化程度划分方法研究 [J]. 地球与环境, 2023, 51(4): 441-454.
TANG Rongbin, HUANG Guiyun, QIU Liwen, et al. A new classification method of rocky desertification degree in different Karst habitats of southwest China [J]. Earth and Environment, 2023, 51(4): 441-454.
- [5] 陈永华, 熊康宁, 池永宽. 我国南方喀斯特石漠化治理进展 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(1): 17-21.
CHEN Yonghua, XIONG Kangning, CHI Yongkuan. Process of rocky desertification control in Karst area of southern China [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(1): 17-21.
- [6] 常君雪, 帅红. 洞庭湖生态经济区典型城市生态空间识别研究 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2021, 44(1): 30-40.
CHANG Junxue, SHUAI Hong. Study on the identification of typical urban ecological space in Dongting lake

- ecological economic zone[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, 44(1): 30-40.
- [7] 戴全厚, 严友进. 西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 1-10.
DAI Quanhou, YAN Youjin. Research progress of Karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 1-10.
- [8] 关刚. 广东省阳山县石漠化遥感监测及成因分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
GUAN Gang. Remote sensing monitoring and cause analysis of rocky desertification in Yangshan County, Guangdong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [9] 皇甫江云. 西南岩溶地区草地石漠化动态监测与评价研究: 以贵州省晴隆县为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
HUANG PU Jiangyun. Dynamic monitoring and evaluation of grassland rocky desertification in Karst region in the southwest: In a case of Qinglong County, Guizhou Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [10] 熊康宁, 赖佳丽, 张俞, 等. 喀斯特地区不同等级石漠化金银花有效成分及其与土壤养分的关系研究[J]. 中华中医药杂志, 2021, 36(6): 3142-3146.
XIONG Kangning, LAI Jiali, ZHANG Yu, et al. Study on the effective components of honeysuckle bud and flower in different grades of rocky desertification in Karst area and their relationship with soil nutrients [J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2021, 36(6): 3142-3146.
- [11] 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[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
XIONG Kangning, LI Jin, LONG Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating Karst rocky desertification[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 878-888.
- [12] 安霞霞. 喀斯特山区石漠化多源高分遥感定量评估[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2018.
AN Xiaxia. Rocky desertification of Karst mountain multi-source high remote sensing quantitative evaluation [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2018.
- [13] 朱林富. 基于MODIS数据的植被覆盖度时空变化及石漠化监测研究[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
ZHU Linfu. Research on spatiotemporal changes of vegetation coverage and monitoring of rocky desertification based on MODIS data[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [14] 张文源, 王百田. 贵州喀斯特石漠化分类分级探讨[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015(2): 148-154.
ZHANG Wenyuan, WANG Baitian. Discussion on classification and gradation of Karst rocky desertification in Guizhou province[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition), 2015(2): 148-154.
- [15] ZHANG Zhiming, OUYANG Zhiyun, XIAO Yi, et al. Using principal component analysis and annual seasonal trend analysis to assess Karst rocky desertification in southwestern China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(6): 269.
- [16] YUAN Ling, GAN Shu, YUAN Xiping, et al. Karst rocky desertification dynamic monitoring analysis based on remote sensing for a typical mountain area in southeast of Yunnan province [C]//Geo-Spatial Knowledge and Intelligence, Singapore, 2017: 466-476.
- [17] DOU Hongtao, ZHEN Lin, LI Haiping. Spatial distribution characteristics of rocky desertification in Qiandongnan prefecture of Guizhou province[J]. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(4): 422-432.
- [18] 李智佩. 中国北方荒漠化形成发展的地质环境研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
LI Zhipei. Researches on geological environment of the formation and development of desertification in northern China [D]. Xi'an: Northwestern University, 2006.
- [19] 王世杰, 李阳兵. 生态建设中的喀斯特石漠化分级问题[J]. 中国岩溶, 2005, 24(3): 192-195.
WANG Shijie, LI Yangbing. Discussion on the classification of Karst rocky desertification in ecological constructions [J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(3): 192-195.
- [20] 徐恒力. 环境地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
XU Hengli. Environmental geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [21] 刘爽. 基于GIS的新乡市百泉公园雨水管理策略研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2018.
LIU Shuang. Study on storm water management strategy of Baiquan park in Xinxiang based on GIS [D]. Suzhou: Suzhou University, 2018.
- [22] 李生永, 李昂, 王磊, 等. 基于遥感的纸坊沟流域土地利用时空变化分析[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2020, 43(6): 8-14.

- LI Shengyong, LI Ang, WANG Lei, et al. Spatial-temporal change analysis of land use in Zhifanggou watershed based on remote sensing[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2020, 43(6): 8-14.
- [23] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
XIONG Kangning, LI Ping, ZHOU Zhongfa, et al. Remote sensing GIS typical study on Karst rock desertification: A case study of Guizhou province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [24] 盛莉,黄敬峰.一种基于缨帽变换的遥感影像处理方法:CN201110194663.8[P].2011-07-12.
SHENG Li, HUANG Jingfeng. A remote sensing image processing method based on tassle hat transformation: CN201110194663.8[P]. 2011-07-12.
- [25] 李森,魏兴琥,黄金国,等.中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程[J].中国沙漠,2007,27(6):918-926.
LI Sen, WEI Xinghu, HUANG Jinguo, et al. Cause and processes of rocky desertification lands in Karst areas of south China[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(6): 918-926.
- [26] 李丽,童立强,李小慧.基于植被覆盖度的石漠化遥感信息提取方法研究[J].国土资源遥感,2010(2):59-62.
LI Li, TONG Liqiang, LI Xiaohui. The remote sensing information extraction method based on vegetation coverage [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010(2): 59-62.
- [27] 杨存建,刘纪远,张增祥,等.遥感和GIS支持下的中国退耕还林还草决策分析[J].遥感学报,2002,6(3):205-211.
YANG Cunjian, LIU Jiyuan, ZHANG Zengxiang, et al. Decision-marking on returning the dry upland to forest or grass land with support of GIS and remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(3): 205-211.
- [28] 况顺达.贵州马别河流域岩溶石漠化遥感评价及其形成机理研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.
KUANG Shunda. Study on the remote sensing evaluation and forming mechanism of Karst rocky desertification in the mabie-river watershed of Guizhou Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2007.

责任编辑:陈松楠