



移动阅读

张景华, 张建龙, 欧阳渊, 等, 2024. 基于形成机理的石漠化敏感性评价: 以贵州省黔西县为例[J]. 沉积与特提斯地质, 44(1): 162–171. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005)

ZHANG J H, ZHANG J L, OUYANG Y, et al., 2024. Sensitivity evaluation of Karst rock desertification based on its formation mechanism: A case study of Qianxi County in Guizhou Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 162–171. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.07005)

基于形成机理的石漠化敏感性评价：以贵州省黔西县为例

张景华, 张建龙*, 欧阳渊, 高 慧, 刘 洪, 刘小霞

(中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218)

摘要: 在遥感解译和野外调查基础上, 通过分析石漠化的成因与形成机理, 找出影响石漠化敏感性的主要自然因素, 选取年降雨量、坡度、岩性组合、土壤质地和植被覆盖度 5 个指标, 在 GIS 的支持下, 采用改进的层次分析法, 开展了黔西县石漠化敏感性评价。结果表明: 黔西县石漠化仍然处于较为敏感状态, 中度、高度和极敏感区域的面积合计为 1176.39 km², 占 46.97%, 发生石漠化可能性依然存在; 中度、高度和极敏感区主要分布于洪水—仁和、定新—重新、五里—沙井和钟山—铁石—素朴等区域, 与石漠化土地的分布区域一致; 绝大部分石漠化高度敏感区和极敏感区分布在三叠系碳酸盐岩地层中, 嘉陵江组是敏感性最高的地层单元; 通过综合研究石漠化各相关因素的作用机理和内在联系及继承关系来比较各相关因素的重要性, 可以替代专家调查表方法, 来降低层次分析法的随意性和主观性。

关键词: 石漠化; 形成机理; 改进层次分析法; 敏感性评价; 贵州省; 黔西县

中图分类号: X826

文献标识码: A

Sensitivity evaluation of Karst rock desertification based on its formation mechanism: A case study of Qianxi County in Guizhou Province

ZHANG Jinghua, ZHANG Jianlong*, OUYANG Yuan, GAO Hui, LIU Hong, LIU Xiaoxia

(Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China)

Abstract: Based on remote sensing interpretation and field investigation, this paper analyzes the causes and formation mechanisms of rocky desertification, aiming to identify the impact of key natural factors on the sensitivity of Karst rock desertification. The annual rainfall, slope, lithology, soil texture, and vegetation coverage are selected as indicators for evaluating the sensitivity of Karst rock desertification. The sensitivity evaluation of Karst rock desertification is carried out by using improved analytic hierarchy process, with the support of GIS, in Qianxi County, Guizhou Province. The results reveal that Karst rock desertification remains sensitive, with the total area of moderate, strong, and extremely high sensitivity amounting to 1176.39 km², representing 46.97% of the studied areas, and the possibility of Karst rock desertification still exists. The moderate, strong and extremely sensitive areas are mainly distributed in Hongshui-Renhe, Dingxin-Chongxin, Wuli-Shajing and Zhongshan-Tieshi-Supu, which are consistent with the distribution pattern of rocky desertification land. Most of the strong sensitive and extremely sensitive areas of rocky desertification

收稿日期: 2021-04-09; 改回日期: 2021-07-21; 责任编辑: 郭秀梅

作者简介: 张景华(1978—), 男, 正高级工程师, 主要从事遥感与生态地质研究。E-mail: zjinghua@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 张建龙(1964—), 男, 教授级高工, 主要从事遥感和地理信息系统方面的工作。E-mail: zhangjianlong@mail.cgs.gov.cn

资助项目: 中国地质调查局项目(121201010000150002, DD20190542); “广东省地质勘查与城市地质专项”([2021]-3, [2022]-21); “广东省第三次全国土壤普查全省土壤母质图制作”(GPCGD232200FG056F); “宁夏生态地质调查示范项目”(NXCZ20220201)

are distributed in the Triassic carbonate strata, and the Jialingjiang Formation is the most sensitive stratigraphic unit. Through comprehensively studying the mechanism of various related factors of rock desertification and comparing the importance of each related factor based on their internal relationships and inheritance relationships, we can replace expert questionnaire methods to reduce the arbitrariness and subjectivity of the analytic hierarchy process.

Key words: Karst rock desertification; formation mechanism; improved analytic hierarchy process; sensitivity evaluation; Guizhou Province; Qianxi County

0 引言

石漠化(Karst rocky desertification),即喀斯特石漠化,是指在脆弱生态环境下,由于人为破坏造成植被持续退化和丧失,从而导致水土流失,碳酸盐岩大面积裸露,呈现出类似荒漠化景观的土地退化过程(王世杰, 2002; Li et al., 2009)。自从作为一种生态环境问题被提出来之后(LeGrand, 1973),石漠化就一直备受关注。石漠化敏感性指在自然状况下发生石漠化的可能性大小,石漠化敏感性评价是为了识别容易形成石漠化的区域,评价石漠化对人类活动响应的敏感程度。许多学者在西南地区开展了一些石漠化敏感性评价(肖荣波等, 2005; 李阳兵等, 2007; 安宏锋等, 2010; 赖长鸿等, 2013; 李威等, 2014; 马士彬等, 2016),取得了有益的成果。然而,这些研究都是基于省(直辖市)一级政区开展的,对于县一级政区开展的石漠化敏感性评价则很少,其成果难以适用于县级行政区域的石漠化防治。笔者以贵州省黔西县为研究区,在遥感解译、野外调查和样品测试等基础上,分析影响黔西县石漠化敏感性的主要自然因素,总结石漠化的成因与形成机理,筛选评价指标。在GIS的支持下,采用改进的层次分析法(Analytic Hierarchy Process, 简称AHP)评价黔西县石漠化敏感性,并分析其空间分异特征,以期为黔西县石漠化防治提供科学依据。

1 研究区概况

黔西县位于贵州省毕节地区东南部,乌江支流鸭池河左岸、六广河的西北岸,地理坐标:东经 $105^{\circ}47' \sim 106^{\circ}26'$,北纬 $26^{\circ}45' \sim 27^{\circ}20'$,面积 $2\,504.56\text{ km}^2$,县城距省会贵阳118 km,距毕节市117 km(图1b)。黔西县西北高、东南低,最高峰小双山海拔1821 m,最低点海拔704 m,平均海拔1250 m;属中亚热带湿润季风气候区,四季分明,水热同季,雨量较为充沛,多年平均气温 13.8°C ,多年平均降水量958.74 mm。黔西县是典型的喀斯

特山地县,碳酸盐岩分布面积 $2\,261.09\text{ km}^2$,占县域面积的90.28%(图1a),石漠化较为发育,局部地区还十分严重,境内喀斯特山区的生态环境较为脆弱。

2 石漠化影响因素与形成机理

2.1 石漠化影响因素

石漠化的形成既有自然因素又有人为因素,自然因素提供了石漠化发生的各种自然背景环境,而不合理人类活动是其主要诱因,二者共同作用促使石漠化形成(王瑞江等, 2001; 路洪海和冯绍国, 2002; 王世杰等, 2003; 苏维词等, 2006)。综合笔者在黔西县开展石漠化遥感调查所取得的认识并结合前人研究,黔西县石漠化的成因主要与自然因素和人为因素有关,其中自然因素主要包括气象、地形地貌、地质环境、土壤、植被等,人为因素主要为不合理的人类活动。由于石漠化敏感性指在自然状况下发生石漠化的可能性大小,因此,本研究在进行石漠化敏感性评价时,不考虑人为因素,只分析自然因素对石漠化敏感性的影响。

2.1.1 气象

降水是土壤侵蚀的重要外营力,与水土流失关系密切。黔西县属中亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 13.8°C ,多年平均降水量958.738 mm,年日照时数为1348.9 h,多年平均相对湿度80%,气候温和、雨热同季,气象条件有利于石漠化的形成。黔西县降雨集中于四月至十月,占全年降水量的88.82%,暴雨及连续暴雨较多,导致溅蚀、面蚀、细沟侵蚀都比较强烈,陡峻处裸露的地表土壤容易被雨水带走,造成基岩裸露,形成石漠化。

2.1.2 地形地貌

李阳兵等(2007)认为石漠化从本质上来讲是喀斯特地区的成土速率远小于水土流失的速率造成的。黔西县岩溶地貌十分发育,总面积 $2\,042.73\text{ km}^2$,占全县面积的81.56%,形成了地势高差悬殊、坡度较陡、山地多平地少的峰丛沟谷、峰丛洼地、溶丘洼地、溶丘谷地交错镶嵌的地貌形态,在这种

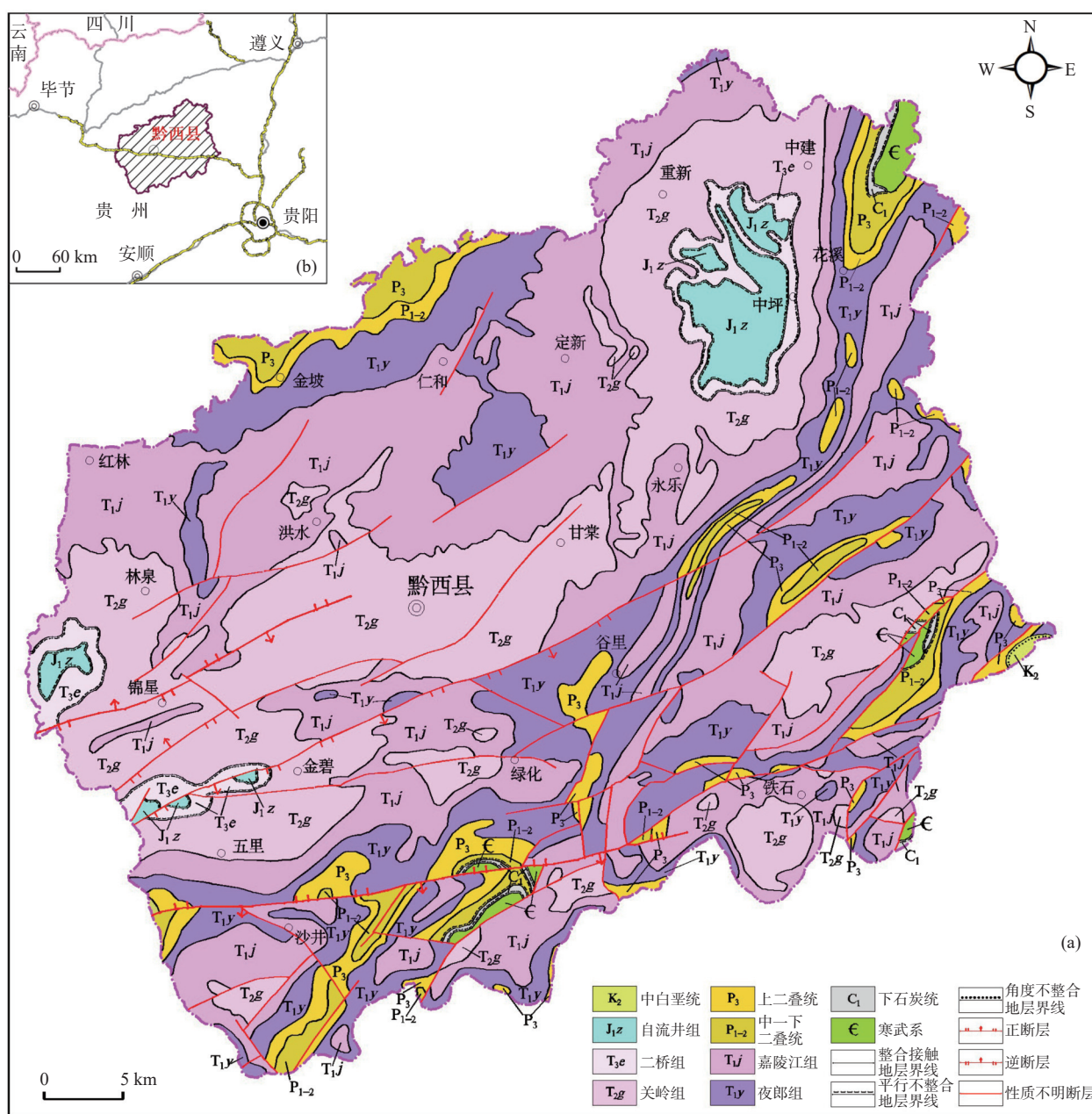


图1 黔西县地质简图 (a) 和地理位置简图 (b)

Fig. 1 Geological map (a) and geographical location map (b) of Qianxi County

地貌形态下,容易发生石漠化。通过将坡度图与石漠化分布图进行空间分析,发现黔西县石漠化与喀斯特山区的坡度整体呈正相关,坡度越陡,石漠化发生率越高,且大部分石漠化土地分布于 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 的喀斯特山区,说明坡度是影响黔西县石漠化敏感性的主要地形因素之一。

2.1.3 地质环境

与石漠化有关的地质环境背景条件,主要包括地质构造、地层岩性等(李瑞玲等, 2003; 单洋天, 2006; 谭秋等, 2009; 白晓永等, 2010; 张信宝等,

2013; 刘洪等, 2020; 张腾蛟等, 2020; 张景华等, 2021a; 张晓博等, 2023)。

地质构造对黔西县石漠化的影响主要表现在两个方面,一是新近纪以来的构造运动造就了地势高差悬殊的各种地貌形态,二是区域构造控制了碳酸盐岩的分布、地貌和岩溶作用的发育,也就是说构造并不直接影响黔西县石漠化形成与演化,而是通过控制地貌、碳酸盐岩的分布间接影响石漠化过程(张景华等, 2018)。黔西县碳酸盐岩占县域面积的 90.28%,形成各种岩溶地貌,为石漠化的发育

提供了物质基础和发育空间。通过空间分析,黔西县纯碳酸盐岩的石漠化发生率远高于不纯碳酸盐岩,且碳酸盐岩越纯,石漠化发生率越高,以灰岩夹白云岩的石漠化发生率最高,因此,岩性是影响黔西县石漠化敏感性的主要地质因素。

2.1.4 土壤流失

石漠化的形成过程,就是植被退化、水土流失的过程,就土壤流失而言,碳酸盐岩区的土壤允许流失量远低于非碳酸盐岩区。当其他因素不变时,土壤允许流失量主要与成土速率和土壤可蚀性有关,成土速率决定了碳酸盐岩风化成土的快慢,土壤可蚀性则决定了碳酸盐岩形成的土壤能在原地留存多少。

在溶蚀速率一定的情况下,碳酸盐岩成土的快慢,主要取决于其酸不溶物的含量(王世杰等, 1999; 蒋忠诚等, 2008)。通过测试,黔西县碳酸盐岩中的酸不溶物含量最小为 0.89%、最大为 20.69%,平均为 5.00%(表 1)。据白占国等(1998)研究,贵州省碳酸盐岩的溶蚀速率为 0.036~0.076 mm/a,据此溶蚀速率,按酸不溶物平均含量 5.00% 计算,即便是假设不存在剥蚀的理想状况下,黔西县碳酸盐岩区形成 1 cm 厚的土层,最快需要 2 632 a、最慢需要 5 556 a,若考虑剥蚀率,则所需时间更长。因此,黔西县碳酸盐岩成壤率极低,岩溶石山区的土壤一旦流失,基本不可能再生,成土速率对土壤允许流失量的影响可以忽略不计。

由于成土速率的影响可以忽略不计,黔西县碳酸盐岩区的土壤允许流失量只与土壤可蚀性有关。有学者研究后认为贵州省喀斯特山区土壤物理性质是影响土壤抗蚀性能的内在因素(徐燕和龙健, 2005),贵州省喀斯特地区原状土的土壤可蚀性 K 值与土壤质地和有机质含量关系密切(高华端和李锐, 2007)。考虑到大量测量土壤有机质含量的难度,且土壤质地作为土壤的一项重要物理性质,与土壤可蚀性关系密切,笔者使用土壤质地来表征土壤的可蚀性,作为石漠化敏感性评价的土壤流失指标。

2.1.5 植被

植被是减弱土壤侵蚀、防止水土流失的一个重要因素。李会等(2013)通过对贵州省安顺市陈旗小流域不同土地利用方式下的喀斯特土壤抗蚀性进行研究,认为不同植被类型和土地利用方式,会影响土壤的抗蚀性指标,导致土壤抗蚀性发生变化。由于溶蚀裂隙、洼地、漏斗、落水洞发育,黔

表 1 黔西县碳酸盐岩酸不溶物含量统计
Table 1 Content of acid insoluble residues in carbonate rocks of Qianxi County

样品编号	采样地层	岩性	酸不溶物含量
H001	嘉陵江组	白云质灰岩	5.48%
H002	嘉陵江组	生物碎屑灰岩	1.09%
H003	嘉陵江组	灰岩	3.30%
H004	嘉陵江组	灰岩	1.40%
H005	嘉陵江组	灰岩	3.36%
H006	嘉陵江组	灰质白云岩	2.19%
H007	嘉陵江组	灰质白云岩	2.45%
H008	嘉陵江组	灰岩	3.29%
H009	嘉陵江组	灰岩	2.85%
H010	嘉陵江组	灰岩	3.54%
H011	嘉陵江组	灰岩	3.93%
H012	嘉陵江组	灰岩	1.74%
H013	嘉陵江组	灰岩	2.47%
H014	嘉陵江组	灰岩	5.76%
H015	嘉陵江组	灰岩	1.39%
H016	嘉陵江组	灰岩	4.71%
H017	嘉陵江组	灰岩	4.33%
H018	嘉陵江组	灰岩	4.28%
H019	嘉陵江组	灰岩	1.18%
H020	关岭组	泥质白云岩	8.27%
H021	关岭组	泥质灰岩	14.63%
H022	关岭组	灰岩	1.87%
H023	关岭组	泥质白云岩	8.73%
H024	夜郎组二段	灰岩	2.65%
H025	嘉陵江组	灰岩	0.89%
H026	关岭组	泥质白云岩	8.41%
H027	关岭组	泥质白云岩	7.98%
H028	嘉陵江组	灰岩	2.00%
H030	嘉陵江组	灰岩	2.86%
H032	夜郎组二段	泥质灰岩	10.71%
H033	夜郎组二段	灰岩	2.37%
H034	关岭组	泥质白云岩	15.68%
H035	关岭组	灰岩	3.33%
H036	关岭组	灰岩	5.78%
H037	嘉陵江组	灰岩	1.36%
H038	关岭组	泥质白云岩	8.09%
H039	关岭组	砂质白云岩	20.69%
平均值			5.00%

西县碳酸盐岩区雨水和地表水容易通过地下通道漏失,石漠化地区缺水、少土,植被生长缓慢,森林难以恢复,导致植被覆盖率低,水土流失严重,而植被破坏和退化进一步加剧了土壤侵蚀和基岩裸露,从而进一步促进了石漠化的形成。基于像元二分

模型(李苗苗, 2003)和归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)计算黔西县植被覆盖度,并根据覆盖度大小分为裸地(<10%)、低覆盖(10%~30%)、中低覆盖(30%~45%)、中覆盖(45%~60%)和高覆盖(>60%)五级,获得植被覆盖度图,然后对植被覆盖度图与石漠化分布图进行空间分析,获得石漠化发生率与植被覆盖度之间的关系。黔西县石漠化发生率以裸地最高,达到17.92%,从裸地到低覆盖,石漠化发生率出现急剧下降,降到1.52%,然后从低覆盖到高覆盖,石漠化发生率呈现缓慢下降,从1.52%依次降为1.30%、0.94%、0.27%,随着植被覆盖度增加,石漠化发生率减少(图2)。因此,植被覆盖度也是影响黔西县石漠化敏感性的主要自然因素之一。

2.2 石漠化形成机理

黔西县石漠化与植被覆盖度呈负相关关系,植被覆盖度越高,石漠化越不发育,反之亦然;岩性是石漠化发生的物质基础,只有可溶性的碳酸盐岩才能发生石漠化,碳酸盐岩越纯、石漠化越发育;地形坡度是影响石漠化的重要因素,二者总体上呈正

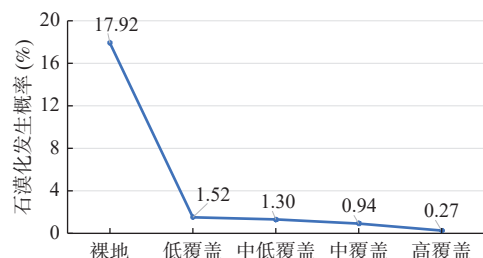


图2 石漠化发生率与植被覆盖度关系

Fig. 2 Relationship between Karst rock desertification incidence and vegetation fraction

相关关系,坡度越大、石漠化越发育;地表土壤厚度直接反映石漠化的发育程度,土壤流失是石漠化的最直接的体现;降水通过控制土壤侵蚀影响石漠化发育与演化;人类不合理的活动是石漠化形成的主要诱因。因此,黔西县石漠化的形成机理可以归纳为,由于人类不合理的活动,导致碳酸盐岩地区的植被退化乃至完全破坏后,在坡度较大的区域,土壤侵蚀强烈,土壤逐渐流失殆尽,基岩裸露,形成石漠化景观。

3 研究方法

3.1 评价指标与分级

根据黔西县石漠化敏感性的主要影响因素及其形成机理,选择年降雨量、坡度、岩性组合、土壤质地、植被覆盖度作为黔西县石漠化敏感性的评价指标,并参考《生态功能区划暂行规程》(中华人民共和国环境保护部, 2017)的有关规定,确定了黔西县石漠化敏感性的评价指标(表2)。

3.2 数据来源与单因子敏感性评价

本研究所使用的数据包括黔西县行政区图、黔西县年降雨量等值线图、黔西县DEM、黔西县地质图、黔西县土壤质地图和黔西县植被覆盖度图,并对获取的各类数据进行处理,统一转换为Gauss Kruger投影,为单因子和综合评价做好准备。

在地理信息系统中,以黔西县行政区图、年降雨量等值线图、DEM、地质图、土壤质地图和植被覆盖度图为基础数据,按表2中的分级标准进行分级赋值,然后转为栅格图像,分别得到黔西县石漠化年降雨量、坡度、岩性、土壤质地和植被覆盖度5个单因子敏感性评价图。

表2 黔西县石漠化敏感性评价指标

Table 2 Indicators of sensitivity evaluation of Karst rock desertification in Qianxi County

分级	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
年降雨量	< 400 mm	400~800 mm	800~1 500 mm	1 500~2 000 mm	> 2 000 mm
坡度	0~5°	5°~15°	15°~25°	25°~35°	> 35°
岩性组合	非可溶性岩石	不纯碳酸盐岩	白云岩夹灰岩	灰岩、白云岩	灰岩夹白云岩
土壤质地	石砾、沙	粗砂土、细砂土、黏土	面砂土、壤土	砂壤土、粉黏土、壤黏土	砂粉土、粉土
植被覆盖度	高覆盖 (> 60%)	中高覆盖 (45%~60%)	中低覆盖 (30%~45%)	低覆盖 (10%~30%)	裸地 (< 10%)
分级赋值 (C)	1	3	5	7	9
分级标准 (SS)	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0	6.0~8.0	> 8.0

3.3 权重计算与综合评价

从单因子分析得出的石漠化敏感性,只反映了某一因素的作用程度,要将石漠化敏感性的区域差异综合地反映出来,还需要进行石漠化敏感性综合评价。由于各因素对石漠化的影响不同,在综合评价时应当赋予不同的权重进行加权评价,本次研究,在 GIS 的支持下,采用改进的层次分析法评价黔西县石漠化敏感性。

层次分析法是一种定性与定量相结合的决策分析方法,常被运用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂决策问题,在生态环境和资源环境评价领域应用十分广泛(王尧等, 2019; 张茂省等, 2019; 郑续等, 2020; 张景华等, 2021b)。由于层次分析法存在着较大的随意性,为了克服这一问题,往往需要多部门、多领域的专家共同会商、集体决定,通常采用发放和回收专家调查表的方法来比较各因素的重要程度(徐建华, 2014),然而实际操作中,这种方法依然存在着较大的局限性。首先,为了保证专家意见具有一定的代表性和普遍性,需要向各行业专家发放大量的调查表,有时甚至达到数百份,导致实际操作极为困难;其次,发放与回收的调查表不成比例,由于各种因素,大量发放的调查表,实际回收的却往往寥寥无几,导致样本数量不够,失去了统计意义;再次,由于调查表是向各行业专家发放的,而专家感兴趣的是其所从事行业内的的问题,造成了专家对其所从事行业问题的重要性的偏好,从而加大了主观性。

3.3.1 层次分析法改进

针对上述问题,本次研究在构建判断矩阵时,结合对于各个因素之间的重要程度的判断,提出了在调查的基础上,通过综合研究各相关因素(评价指标)的作用机理和内在联系及继承关系来比较各相关因素重要性的方法,从而最大限度降低主观性。通过对影响黔西县石漠化的 5 个因素及其作用机理进行分析,对各个因素进行两两比较,预判其相对重要性,构建判断矩阵,然后计算判断矩阵的随机一致性比例,通过分析随机一致性比例、各因素的权重及排序来确定判断矩阵是否构建合理,验证预判是否合理。

首先,植被持续退化乃至丧失是石漠化的初始演化阶段,只有植被遭受破坏后,石漠化才开始形成,因此,对于石漠化来说,植被覆盖度最为重要。事实上,实地调查也支持这一判断,在黔西县,即便

是纯碳酸盐岩的陡坡地带,只要植被覆盖良好,也未发生石漠化。其次,岩性是石漠化发生的物质基础,碳酸盐岩越纯、石漠化越发育,因此,对于石漠化来说,岩性是第二重要的。再次,其他条件一致的情况下,坡度越陡、土壤侵蚀越强烈,因此,坡度比土壤质地重要一点,坡度是第三重要因素。最后,黔西县土壤侵蚀的面积达到 892.62 km²,占县域面积的 35.64%,且石漠化是土壤侵蚀、流失后才最终形成,而黔西县降雨等值线区间在 900 mm~1 100 mm,各地差别不大。因此,土壤质地与年降雨量相较,土壤质地是第四重要因素,年降雨量为第五重要因素。由此,完成了各个因素重要性的预判。

3.3.2 权重计算

基于上述分析与预判,构建了黔西县石漠化敏感性评价的判断矩阵,并计算判断矩阵的随机一致性比例、各因素的权重及排序(表 3)。

经计算, $\lambda=5.306\ 8$ 、 $CI=0.076\ 7$ 、 $RI=1.12$ 、 $CR=0.068\ 5<0.10$,判断矩阵的随机一致性比例小于 0.10,表明预判构建的判断矩阵具有令人满意的随机一致性。5 个单因子敏感性权重排序依次为植被覆盖度、岩性、坡度、土壤质地、年降雨量,权重分配较合理,计算出来的排序与预判一致,表明预判构建的判断矩阵是合理的。

3.3.3 综合性评价

在地理信息系统中,把 5 个石漠化单因子敏感性评价图分别赋以上述计算出来的权重,按照式(1)进行计算,得出黔西县石漠化单因子敏感性综合指数,然后按照表 2 的石漠化敏感性分级标准(SS)进行分级,得到黔西县石漠化敏感性综合评价图(图 3)。

表 3 判断矩阵与层次排序
Table 3 Judgment matrix and hierarchical sorting

A	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	W	排序
D ₁	1	1/3	1/5	1/3	1/7	0.046 4	5
D ₂	3	1	1/3	3	1/3	0.155 1	3
D ₃	5	3	1	3	1/3	0.264 2	2
D ₄	3	1/3	1/3	1	1/3	0.098 5	4
D ₅	7	3	3	3	1	0.435 9	1

注: A表示总目标——黔西县石漠化敏感性; D₁表示年降雨量单因子敏感性; D₂表示坡度单因子敏感性; D₃表示岩性单因子敏感性; D₄表示土壤质地单因子敏感性; D₅表示植被覆盖度单因子敏感性; W表示计算出来的权重。

$$SS_j = \sum_{i=1}^5 C_{(i,j)} W_i \quad (1)$$

式(1)中, SS_j 为 j 空间单元石漠化敏感性, $C_{(i,j)}$ 为 i 因子 j 空间单元敏感性等级分值, W_i 为 i 因子敏感性权重。

4 结果分析

4.1 石漠化敏感性分析

黔西县石漠化敏感性分为不敏感、轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 5 个等级(表 4)。其中, 不敏感区的面积为 118.78 km², 占 4.74%; 轻度敏感区的面积为 1209.39 km², 占 48.29%; 中度敏感区的面积为 866.34 km², 占 34.59%; 高度敏感区的面积为 303.65 km², 占 12.12%; 极敏感区的面积为 6.40 km², 占 0.26%。整体来看, 黔西县石漠化仍然

表 4 黔西县石漠化敏感性统计

Table 4 The areas and their percentages of each Karst rock desertification sensitivity class in Qianxi County

石漠化敏感性	面积/km ²	百分比/%
不敏感	118.78	4.74
轻度敏感	1209.39	48.29
中度敏感	866.34	34.59
高度敏感	303.65	12.12
极敏感	6.40	0.26

图例

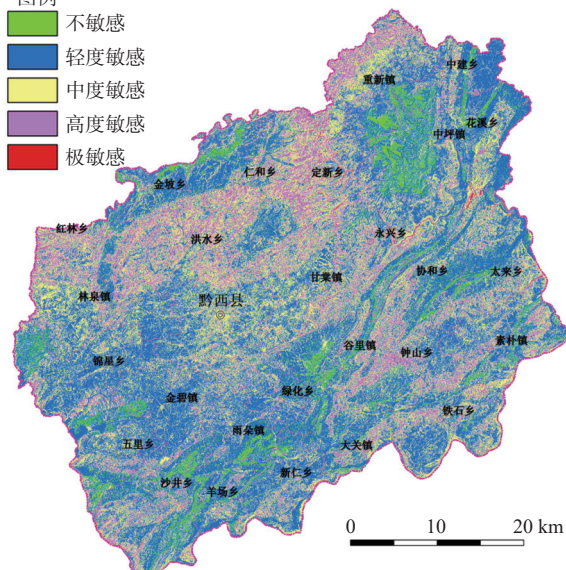
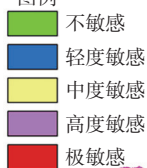


图 3 黔西县石漠化敏感性评价图

Fig. 3 The map of Karst rocky desertification sensitivity evaluation in Qianxi County

处于较为敏感状态, 中度敏感、高度敏感和极敏感区域的面积合计为 1176.39 km², 占 46.97%, 接近县域面积的一半, 发生石漠化的可能性依然存在。

4.2 敏感性空间分布特征

从敏感性分异来说, 全县只有小部分为石漠化不敏感地区, 大部分则为石漠化不同程度敏感, 部分地区石漠化敏感程度依旧很高, 不能放松对石漠化的防治。石漠化中度敏感、高度敏感和极敏感的区域主要分布于县域北部的洪水—仁和—定新—重新一带、西南部的五里—沙井一带和东南部的钟山—铁石—素朴一带(图 3), 而石漠化土地主要集中分布在北部的仁和—定新一带、西南部的五里—沙井一带和东南部的铁石—素朴一带(图 4)。石漠化中度敏感、高度敏感和极敏感的区域与石漠化土地分布区域基本一致, 说明评价结果较为准确。

将石漠化敏感性评价结果转换成矢量, 然后与地层单元进行空间相交分析。结果显示, 三叠系夜郎组(T_3y)、嘉陵江组(T_2j)和关岭组(T_2g)3 套碳酸盐岩地层中集中了 297.78 km² 的高度敏感和极敏感区, 占高度敏感和极敏感区总面积的 96.04%。其中又以嘉陵江组(T_2j)最多, 为 221.01 km², 占 71.28%, 其次为关岭组(T_2g)和夜郎组(T_3y), 分别为 44.58 km²、32.19 km², 分别占 14.38%、10.38%。绝大部分石漠化高度敏感和极敏感区分布在三叠系碳酸

图例

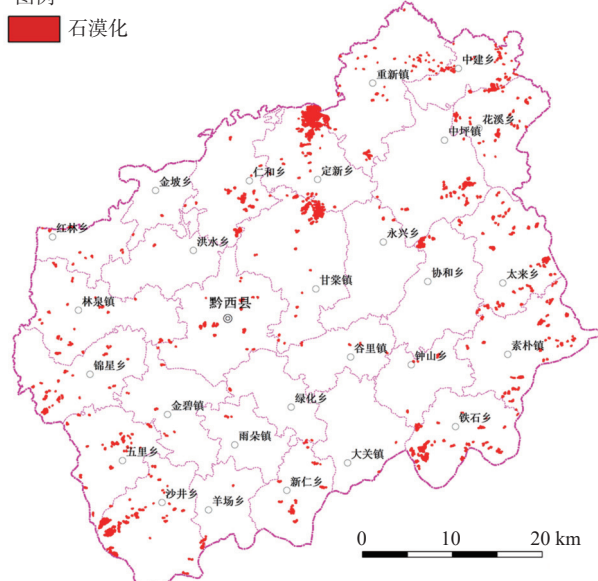


图 4 黔西县石漠化分布图

Fig. 4 The map of Karst rocky desertification in Qianxi County

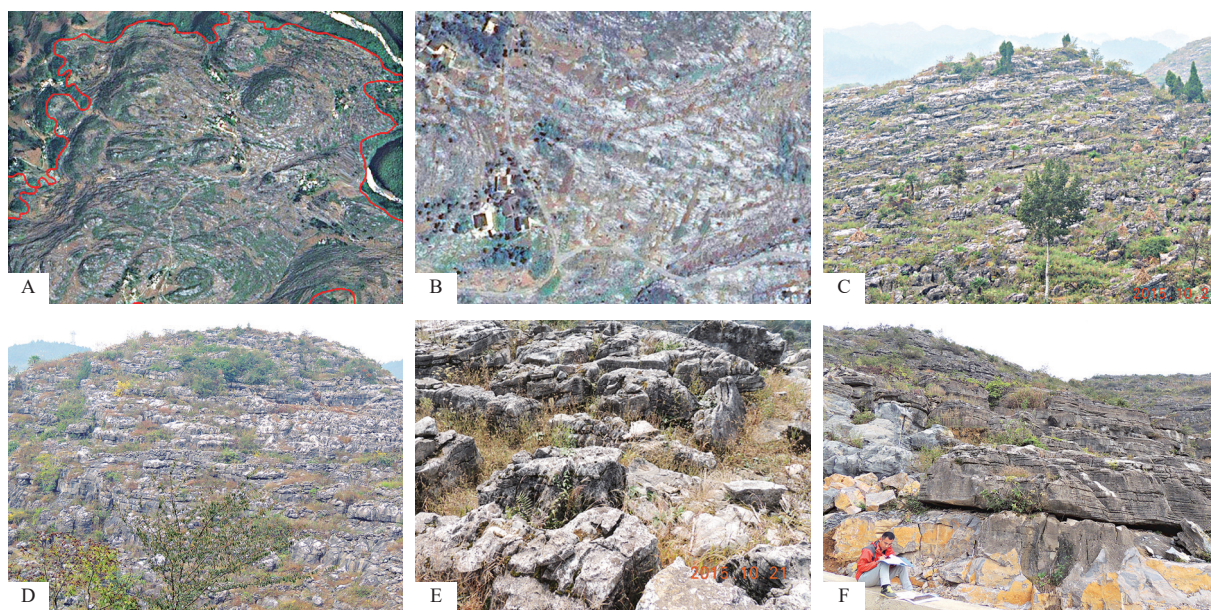


图5 黔西县定新乡一带石漠化遥感影像和照片

Fig. 5 Images of Karst rock desertification in Dingxin of Qianxi County

盐岩地层中,表明在黔西县三叠系碳酸盐岩地层的石漠化敏感程度高,而嘉陵江组(T_j)则是石漠化敏感性最高的地层单元。

黔西县北部定新乡一带,嘉陵江组(T_j)碳酸盐岩分布广、纯度高,形成了峰丛沟谷、峰丛洼地等岩溶地貌形态,石漠化最为发育(图5),也是黔西县石漠化最为敏感的地区。定新乡一带石漠化集中连片发生,以中度—重度石漠化为主,在SPOT6遥感影像图上影像特征清晰显著,表现为峰丛洼地、峰丛谷地等岩溶地貌特征,沟谷多为干谷,色调复杂,但以灰色、灰褐色、灰白色为主间杂浅绿色、绿色、灰绿色,见有大量灰色、灰白色斑点或小斑块(图5a),在高分辨率遥感影像图上的影像特征尤为显著(图5b)。由于植被覆盖度极差,土壤侵蚀强烈,水土流失严重,基岩大量裸露,土壤厚度极薄、横向不连续,仅在石沟、石缝中残存少量土壤,生态环境恶劣(图5c-f)。

5 结论

(1)影响黔西县石漠化敏感性的主要自然因素为降水、坡度、岩性、土壤质地和植被覆盖度,人类不合理的活动,导致碳酸盐岩地区的植被退化乃至完全破坏,在坡度较陡的区域,土壤侵蚀强烈,水土流失严重,土壤逐渐流失殆尽之后,基岩裸露,形成石漠化景观。

(2)黔西县石漠化仍然处于较为敏感状态,中

度、高度和极敏感区域的面积合计为 $1\,176.39\text{ km}^2$,占46.97%,接近县域面积的一半,发生石漠化的可能性依然存在,中度、高度和极敏感区主要分布在洪水—仁和、定新—重新、五里—沙井和钟山—铁石—素朴等区域。

(3)黔西县三叠系碳酸盐岩地层的石漠化敏感程度高,绝大部分石漠化高度敏感和极敏感区分布在三叠系碳酸盐岩地层中,嘉陵江组是石漠化敏感性最高的地层单元。

(4)在遥感解译和野外调查的基础上,通过综合研究石漠化各相关因素的作用机理和内在联系及继承关系来比较各相关因素的重要性,可以替代专家调查表方法,来降低层次分析法的随意性和主观性,可在实际应用中获得较好的效果。

References

- An H F, An Y L, Yuan S C, et al., 2010. The dynamic change and simulation and prediction of sensitivity of the Karst rocky desertification of Guizhou[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 26 (13): 388 – 395 (in Chinese with English abstract).
- Bai X Y, Wang S J, Chen Q W, et al., 2010. Constrains of lithological background of carbonate rock on spatio-temporal evolution of Karst rocky desertification land[J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 35 (4): 691 – 696 (in Chinese with English abstract).
- Bai Z G, Wan G J, 1998. Study on watershed erosion rate and its environmental effects in Guizhou Karst region[J]. Journal of Soil

- Erosion and Soil and Water Conservation, 4 (1) : 1 – 7+46 (in Chinese with English abstract).
- Gao H D, Li R, 2007. Erodibility of original soil in Karst area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 5 (5) : 1 – 4 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Z C, Cao J H, Yang D S, et al., 2008. Current status and comprehensive countermeasures of soil erosion for Karst rocky desertification areas in the Southwestern China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 6 (1) : 37 – 42 (in Chinese with English abstract).
- LeGrand H E, 1973. Hydrological and ecological problems of Karst regions: hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems[J]. *Science*, (179) : 859 – 864.
- Li Y B, Shao J A, Yang H, et al., 2009. The relations between land use and Karst rocky desertification in a typical Karst area, China[J]. *Environmental Geology*, (57) : 621 – 627.
- Li H, Zhou Y C, Liu J, et al., 2013. Responses of Karst soil anti-erodibility to different land use types[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 13 (5) : 16 – 23 (in Chinese with English abstract).
- Liu H, Huang H X, Ouyang Y, et al., 2020. Soil's geologic investigation in Daliangshan, Xichang, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (1) : 91 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Li M M, 2003. The Method of Vegetation Fraction Estimation by Remote Sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Li R L, Wang S J, Zhou D Q, et al., 2003. The correlation between rock desertification and lithology in Karst area of Guizhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 58 (2) : 314 – 320 (in Chinese with English abstract).
- Li W, Li Y C, Tang Y J, 2014. Sensitivity assessment of Karst rocky desertification and its spatial differentiation characteristics based on GIS and RS —A case study of Guizhou Province[J]. *Resource Development & Market*, 30 (11) : 1334 – 1338 (in Chinese with English abstract).
- Li Y B, Shao J A, Wang S J, et al., 2007. Assessment of soil erosion sensitivity based on the characteristics of Karst ecosystem[J]. *Journal of Mountain Science*, 25 (6) : 671 – 677 (in Chinese with English abstract).
- Lu H H, Feng S G, 2002. Causes of the rocky desertification in Guizhou Karst areas[J]. *Journal of Sichuan Teachers College (Natural Science)*, 23 (2) : 189 – 192 (in Chinese with English abstract).
- Ma S B, An Y L, Yang G B, et al., 2016. The analysis of the difference vegetation variation and driver factors on NDVI Change in Karst region: a case on Guizhou[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25 (7) : 1106 – 1114 (in Chinese with English abstract).
- Lai C H, Qin J Z, Zhang W, et al., 2013. Assessment on sensitivity and spatial distributed characteristics of Karst rocky desertification in Sichuan Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 20 (4) : 99 – 104 (in Chinese with English abstract).
- Shan Y T, 2006. Karst rocky desertification and analysis on the geological factors in Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 25 (2) : 163 – 167 (in Chinese with English abstract).
- Su W C, Yang H, Li Q, et al., 2006. Rocky land desertification and its controlling measurements in the Karst mountainous region, Southwest of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 37 (3) : 447 – 451 (in Chinese with English abstract).
- Tan Q, Li Y B, Yang X Y, 2009. Lithological difference in rocky desertification for homogenous carbonate areas in Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29 (3) : 393 – 398 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, Ji H B, Ouyang Z Y, et al., 1999. Preliminary Study on weathering and pedogenesis of carbonate rock[J]. *Science in China (series D)*, 29 (5) : 442 – 449 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, 2002. Concept deduction and its connotation of Karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 21 (2) : 101 – 105 (in Chinese with English abstract).
- Wang S J, Li Y B, Li R L, 2003. Karst rocky desertification: formation background, evolution and comprehensive taming[J]. *Quaternary Sciences*, 23 (6) : 657 – 666 (in Chinese with English abstract).
- Wang R J, Yao C H, Jiang Z C, et al., 2001. Characteristics, formation, and control of rocky desertification in Liupanshui City, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 20 (1) : 211 – 216 (in Chinese with English abstract).
- Xiao R B, Ouyang Z Y, Wang X K, et al., 2005. Sensitivity of rocky desertification and its spatial distribution in southwestern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 24 (5) : 551 – 554 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Zhang M S, Yang J F, 2019. Evaluation research on the fragility of geological environment in China[J]. *Northwestern Geology*, 52 (2) : 199 – 206 (in Chinese with English abstract).
- Xu J H, 2014. Quantitative geography (second edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 234 – 239 (in Chinese with English abstract).
- Xu Y, Long J, 2005. Effect of soil physical properties on soil erosion in Guizhou Karst mountainous region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19 (1) : 157 – 159+175 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Gao H, Ouyang Y, et al., 2018. Sensitivity evaluation of soil erosion in Qianxi county of Guizhou province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 16 (2) : 88 – 94 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Ouyang Y, Chen Y Z, et al., 2021a. Land suitability evaluation of agricultural industrial park based on UAV remote sensing in Zhaojue County of Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 48 (6) : 1710 – 1719 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J H, Ouyang Y, Liu H, et al., 2021b. Eco-geological vulnerability assessment based on major controlling factors: a case study of Xichang City, Sichuan Province[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 33 (4) : 181 – 191 (in Chinese with English abstract).
- Zhang M S, Wang Y, Xue Q, 2019. Evaluation resource environment carrying capacity: Theoretical method and practice[J]. *Northwestern Geology*, 52 (2) : 1 – 11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T J, Liu H, Ouyang Y, et al., 2020. A preliminary discussion on the physical and chemical characteristics and main controlling factors of soil and parent material in the middle and high mountain

- area——Take Xichang as an example[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (1): 106 – 114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X B, Wang S J, Bai X Y, et al., 2013. Relationships between the spatial distribution of Karst land desertification and geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 41 (1): 1 – 6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X B, Zhou P, Zhang K, et al., 2023. Evaluation method of geological hazard susceptibility: A case study on GIS and CF-Logistic regression model in Huangzhong, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (4): 797 – 807 (in Chinese with English abstract).
- Zheng X, Miao J X, Wang D, et al., 2020. Suitability evaluation and functional division of land space development in the high-incidence area of geological hazards in the middle and upper reaches of the Yellow River: A case study of Yanchuan County, Shannxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 53 (2): 289 – 297 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Tentative specification of ecological function regionalization [EB/OL]. [2017-04-12]. http://sts.mep.gov.cn/stbh/stglq/200308/t20030815_90755.shtml (in Chinese).
- ## 附中文参考文献
- 安宏锋, 安裕伦, 袁士聪, 等, 2010. 贵州省石漠化敏感性的动态演变与模拟预测[J]. *中国农学通报*, 26 (13): 388 – 395.
- 白晓永, 王世杰, 陈起伟, 等, 2010. 贵州碳酸盐岩性基底对土地石漠化时空演变的控制[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 35 (4): 691 – 696.
- 白占国, 万国江, 1998. 贵州碳酸盐岩区域的侵蚀速率及环境效应研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 4 (1): 1 – 7+46.
- 高华端, 李锐, 2007. 喀斯特地区原状土的可蚀性[J]. *中国水土保持科学*, 5 (5): 1 – 4.
- 蒋忠诚, 曹建华, 杨德生, 等, 2008. 西南岩溶石漠化区水土流失现状与综合防治对策[J]. *中国水土保持科学*, 6 (1): 37 – 42.
- 李会, 周运超, 刘娟, 等, 2013. 喀斯特土壤抗蚀性对不同土地利用方式的响应[J]. *中国水土保持科学*, 13 (5): 16 – 23.
- 刘洪, 黄瀚霄, 欧阳渊, 等, 2020. 基于地质建造的土壤地质调查及应用前景分析——以大凉山区西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (1): 91 – 105.
- 李苗苗, 2003. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院.
- 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 等, 2003. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关性分析[J]. *地理学报*, 58 (2): 314 – 320.
- 李威, 李月臣, 唐谊娟, 2014. 基于 GIS 和 RS 的石漠化敏感性评价及空间分异特征——以贵州省为例[J]. *资源开发与市场*, 30 (11): 1334 – 1338.
- 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等, 2007. 基于岩溶生态系统特性的水土流失敏感性评价[J]. *山地学报*, 25 (6): 671 – 677.
- 路洪海, 冯绍国, 2002. 贵州喀斯特地区石漠化成因分析[J]. *四川师范学院学报 (自然科学版)*, 23 (2): 189 – 192.
- 马士彬, 安裕伦, 杨广斌, 等, 2016. 喀斯特地区不同植被类型 NDVI 变化及驱动因素分析——以贵州为例[J]. *生态环境学报*, 25 (7): 1106 – 1114.
- 赖长鸿, 覃家作, 张文, 等, 2013. 四川省石漠化敏感性评价及其空间分布特征[J]. *水土保持研究*, 20 (4): 99 – 104.
- 单洋天, 2006. 我国西南岩溶石漠化及其地质影响因素分析[J]. *中国岩溶*, 25 (2): 163 – 167.
- 苏维词, 杨华, 李晴, 等, 2006. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. *土壤通报*, 37 (3): 447 – 451.
- 谭秋, 李阳兵, 杨晓英, 2009. 贵州连续性碳酸盐岩地区石漠化的岩性差异[J]. *矿物学报*, 29 (3): 393 – 398.
- 王世杰, 季宏兵, 欧阳自远, 等, 1999. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. *中国科学 (D 辑)*, 29 (5): 442 – 449.
- 王世杰, 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. *中国岩溶*, 21 (2): 101 – 105.
- 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲, 2003. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 23 (6): 657 – 666.
- 王瑞江, 姚长宏, 蒋忠诚, 等, 2001. 贵州六盘水石漠化的特点、成因与防治[J]. *中国岩溶*, 20 (1): 211 – 216.
- 肖荣波, 欧阳志云, 王效科, 等, 2005. 中国西南地区石漠化敏感性评价及其空间分析[J]. *生态学杂志*, 24 (5): 551 – 554.
- 王尧, 张茂省, 杨建锋, 2019. 中国地质环境脆弱性评价[J]. *西北地质*, 52 (2): 199 – 206.
- 徐建华, 2014. 计量地理学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 234 – 239.
- 徐燕, 龙健, 2005. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 19 (1): 157 – 159+175.
- 张景华, 高慧, 欧阳渊, 等, 2018. 贵州省黔西县土壤侵蚀敏感性评价[J]. *中国水土保持科学*, 16 (2): 88 – 94.
- 张景华, 欧阳渊, 陈远智, 等, 2021a. 基于无人机遥感的四川省昭觉县农业产业园土地适宜性评价[J]. *中国地质*, 48 (6): 1710 – 1719.
- 张景华, 欧阳渊, 刘洪, 等, 2021b. 基于主控要素的生态地质脆弱性评价——以四川省西昌市为例[J]. *自然资源遥感*, 33 (4): 181 – 191.
- 张茂省, 王尧, 薛强, 2019. 资源环境承载力评价理论方法与实践[J]. *西北地质*, 52 (2): 1 – 11.
- 张腾蛟, 刘洪, 欧阳渊, 等, 2020. 中高山区土壤成土母质理化特征及主控因素初探——以西昌市为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (1): 106 – 114.
- 张信宝, 王世杰, 白晓永, 等, 2013. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系[J]. *地球与环境*, 41 (1): 1 – 6.
- 张晓博, 周萍, 张焜, 等, 2023. 基于 GIS 和 CF-Logistic 回归模型地质灾害易发性评价——以青海湟中县为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 43 (4): 797 – 807.
- 郑续, 苗俊霞, 王东, 等, 2020. 黄河中上游地质灾害高发县国土空间适宜性评价及功能分区——以陕西省延川县为例[J]. *西北地质*, 53 (2): 289 – 297.
- 中华人民共和国环境保护部. 生态功能区划暂行规程. [EB/OL]. [2017-04-12]. http://sts.mep.gov.cn/stbh/stglq/200308/t20030815_90755.shtml.