

# 漓江东岸冠岩地下河流域果园石漠化 分布特征及其演变规律

李航<sup>1,2,3</sup>, 罗为群<sup>1,2,3</sup>, 张谭锋<sup>1,2,3</sup>, 涂纯<sup>1,2,3</sup>

(1.中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2.广西平果喀斯特生态系统  
国家野外科学观测研究站/百色平果喀斯特生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;  
3.自然资源部 广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

**摘要:** [目的] 分析漓江东岸冠岩地下河流域 2010—2020 年的土地利用以及果园石漠化演变过程, 探究果园石漠化景观格局分布特征与内在演变规律, 为该区乃至漓江流域生态保护修复与景观资源可持续利用提供地质依据与决策建议。[方法] 以冠岩地下河流域土地利用类型以及石漠化为研究对象, 基于第二次、第三次全国土地调查数据以及遥感影像数据, 运用 GIS 技术平台和面积转移矩阵模型分析研究区果园石漠化演变规律。[结果] ①冠岩地下河流域土地利用以耕地、果园、林地为主, 其中耕地与草地面积呈现减少趋势, 果园、林地、水域以及其他用地呈现增加趋势。②2010—2020 年, 冠岩地下河流域果园石漠化面积减少 1.34 km<sup>2</sup>, 减少比例为 7.90%, 果园石漠化状况整体表现出持续向好的良好态势, 但中度石漠化与重度石漠化面积呈增加趋势, 其中非石漠化转变为石漠化的面积 1.51 km<sup>2</sup>。③结合冠岩地下河流域 2010—2020 年果园石漠化演变过程, 10 a 间果园石漠化改善面积为 1.79 km<sup>2</sup>, 恶化面积为 1.78 km<sup>2</sup>。[结论] 流域内果园石漠化总体呈现出积极改善的趋势, 但局部区域存在石漠化恶化扩张或新增石漠化现象, 主要表现为果园本身以及部分林地发生石漠化蔓延。因而冠岩地下河流域后期生态环境恢复与保护的重点应是加强现有果园的科学种植与管理, 逐步恢复灌木林等植被, 大力发展林下复合经营种植模式, 在现有石漠化治理措施基础之上防止果园石漠化进一步恶化。

**关键词:** 果园石漠化; 土地利用; 转移矩阵; 石漠化演变; 冠岩地下河流域; 漓江

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0073-08

中图分类号: X171.1

**文献参数:** 李航, 罗为群, 张谭锋, 等. 漓江东岸冠岩地下河流域果园石漠化分布特征及其演变规律[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 73-80. Li Hang, Luo Weiqun, Zhang Tanfeng, et al. Distribution and evolution of orchard rocky desertification in Guanyan underground river basin along eastern bank of Lijiang River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 73-80. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.009; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.009.

## Distribution and evolution of orchard rocky desertification in Guanyan underground river basin along eastern bank of Lijiang River

Li Hang<sup>1,2,3</sup>, Luo Weiqun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tanfeng<sup>1,2,3</sup>, Tu Chun<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin,

Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research

Station/Pingguo Baise, Karst Ecosystem, Guangxi Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406,

China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics Ministry of Natural Resources, Guangxi/International Research Center on Karst Under the Auspices of United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** [Objective] The land use and the evolution process of orchard rocky desertification in Guanyan underground river basin along the eastern bank of Lijiang River from 2010 to 2020 were analyzed, and the distribution characteristics and internal evolution law of orchard rocky desertification landscape pattern were

收稿日期: 2024-08-29

修回日期: 2024-12-04

采用日期: 2024-12-04

资助项目: 国家重点研发计划课题“峰丛洼地关键带水土资源生态调控技术”(2022YFF1300702); 桂林市重大专项计划“漓江核心区喀斯特石漠化修复及特色药业关键技术研究及示范”(20220102-1); 中国地质调查局项目(DD20190502, DD20230453); 2023 年创新平台和人才计划“气候变化条件下典型岩溶区土壤固碳效率提升关键技术研究”(20230116-3)

第一作者: 李航(1995—), 男(汉族), 河北省保定市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事岩溶生态地质研究工作。Email: 1992815456@qq.com。

通信作者: 罗为群(1980—), 男(汉族), 湖南省衡阳市人, 硕士, 研究员, 主要从事岩溶生态地质与石漠化治理工作。Email: 125639802@qq.com。

explored, so as to provide geological basis and decision-making suggestions for ecological protection and restoration and sustainable utilization of landscape resources in this area and even in Lijiang River basin. [Methods] Taking the land use type and rocky desertification in Guanyan underground river basin as the research object, based on the second and third national land survey data and remote sensing image data, the GIS technology platform and area transfer matrix model were used to analyze the evolution law of orchard rocky desertification in the study area. [Results] ① Cultivated land, orchards, and forest land were the main land uses in the underground river basin. The areas of cultivated land and grassland decreased, while the areas of orchard, forest land, water, and other land increased. ② The area of rocky desertification in orchards in the Guanyan underground river basin decreased by 1.34 km<sup>2</sup> from 2010 to 2020, a reduction of 7.90%. Overall, the rocky desertification was continuously decreasing in the orchards. However, the areas affected by moderate and severe rocky desertification increased. A total of 1.51 km<sup>2</sup> of nonrocky desertification area transformed into rocky desertification. ③ In a 1.79 km<sup>2</sup> area, the orchard rocky desertification decreased; however, the desertification worsened in a 1.78 km<sup>2</sup> area from 2010 to 2020. [Conclusion] Overall, the rocky desertification in orchards within the watershed was decreases. However, rocky desertification was increasing and expanding to some new areas, which mainly manifested as the spread of rocky desertification in the orchard and in some forested areas. Therefore, the focus of ecological environmental restoration and protection in the underground Guanyan river basin should be on strengthening the scientific planting and management of existing orchards, gradually restoring shrubs and other vegetation, vigorously developing agroforestry planting methods, and preventing further increases in rocky desertification through the application of on existing rocky desertification control measures.

**Keywords:** rocky desertification of orchards; land use; transfer matrix; rocky desertification evolution; Guanyan underground river basin; Lijiang River

岩溶石漠化概念(rock desertification)是用来描述岩溶地区的植被与土壤转变成几乎无植被与土壤覆盖、岩石逐步裸露的岩溶景观过程<sup>[1-3]</sup>。碳酸盐岩的低成土率和高渗透性使得中国西南地区变成一个生态系统极易遭受破坏的脆弱环境<sup>[4]</sup>,大大增加了石漠化的发生概率。石漠化使得岩溶区土层变薄、基岩暴露,土地与生态资源禀赋发生逆向演变,特别是受降雨径流等岩溶系统水文特征变化影响,直接导致旱涝灾害加剧、农作物减产,对当地的生态环境和社会经济产生了不可估量的负面影响,严重影响着中国西南岩溶区的生态安全<sup>[5-7]</sup>。

漓江位于广西壮族自治区的东北部,属于珠江流域西江一级水系桂江重要支流,其流域是中国南方生态屏障的重要组成部分,对于维持区域水文循环、保护生物多样性以及提供生态服务价值等方面具有重大意义。长期以来,由于气候变化以及人类对自然资源的不合理利用致使漓江流域发生了不同程度石漠化,并引发了岩溶区水土流失严重、土地贫瘠退化等一系列生态环境问题,严重影响着桂林市可持续发展议程示范区的建设进程。特别是2003年桂林被原农业部列入“赣南—湘南—桂北”全国柑橘优势产业带以来,桂林市的农业种植结构经历了显著调整。到2012年,桂林市柑橘总面积达到了 $9.63 \times 10^4 \text{ hm}^2$ <sup>[8]</sup>。

大量果园开发改变了土地利用格局,导致土壤质量退化,水资源压力增加,间接加剧了石漠化进程,带来生态系统稳定性下降的长期风险。漓江流域石漠化一直以来是众多学者的研究重点,在以往的研究中大多学者主要对漓江流域石漠化空间分布、驱动因子、生态质量现状及其治理对策展开探索与讨论,但是对于桂林沙糖橘等果园产业兴起对漓江流域土地利用演变过程以及石漠化影响机制尚不明确<sup>[9-12]</sup>。冠岩地下河流域作为漓江流域的典型代表,兼具岩溶区与非岩溶区、明暗流交替等特点,是研究漓江流域石漠化景观格局其时空动态变化机理的理想示范区域。因此,本文针对以往研究中存在的上述问题,选取漓江东岸冠岩地下河流域为研究区,对冠岩地下河流域近10 a来的土地利用以及果园石漠化演变过程进行定量分析,明确研究区果园石漠化景观格局分布特征和演变规律,以期为该区域乃至漓江流域生态保护修复与景观资源可持续利用提供地质依据与决策建议。

## 1 研究区概况

冠岩地下河流域位于桂林市雁山区草坪回族乡与灵川县潮田乡交界处(图1),地理坐标为 $25^{\circ}00' - 25^{\circ}07' \text{ N}$ ,  $110^{\circ}26' - 110^{\circ}36' \text{ E}$ ,西起发源于灵川县海洋山的东麓,在灵川县南圩村穿岩进入地下,途经小河

里 700 m 明流,至草坪回族乡东南约 1 km 处的冠岩流入漓江<sup>[13]</sup>。冠岩地下河洞穴系统全长 12 km,流域面积 123.57 km<sup>2</sup>,其中岩溶区面积 84.60 km<sup>2</sup>,是桂林地区最大的一条地下河洞穴系统。流域内岩溶作用十分强烈,表层溶隙、溶穴和溶沟等发育,区域内发育较多落水洞、天窗、洞穴。地貌为峰丛洼地、峰丛

谷地地貌,地势东北高、西南低。受亚热带季风大气环流影响,降雨充沛,雨热同期,但月均分配差异悬殊,夏季湿热多雨,秋季少雨干燥,四季分明<sup>[14]</sup>。截止到 2020 年,冠岩地下河流域石漠化面积 23.70 km<sup>2</sup>,且呈现集中连片分布,调查结果显示,冠岩地下河流域石漠化石以陡坡开垦耕种为主要成因。

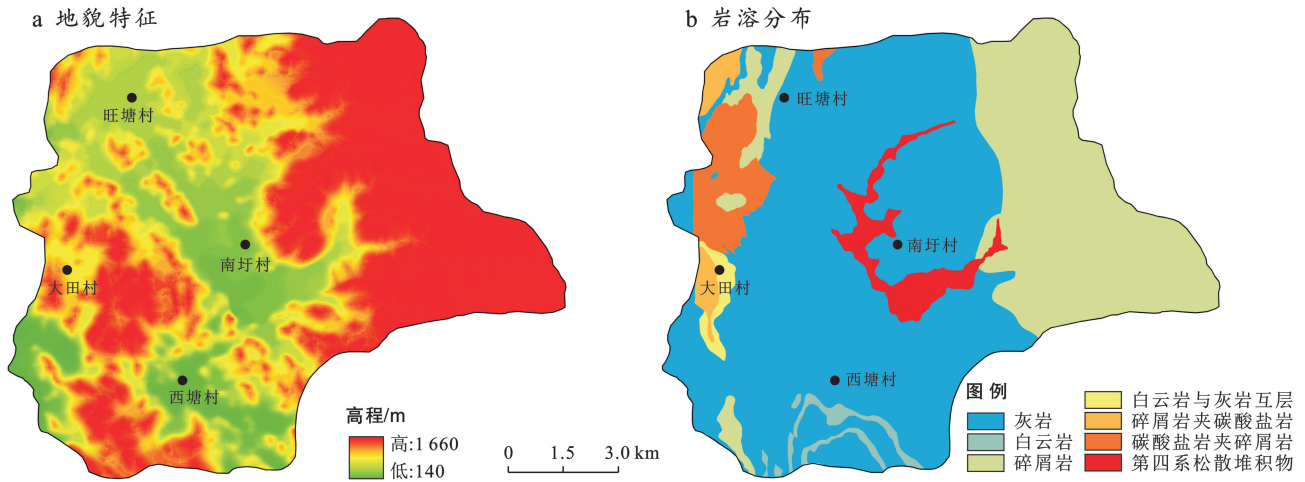


图 1 冠岩地下河流域地貌特征与岩溶区分布

Fig.1 Geomorphological characteristics and karst area distribution of Guanyan underground river basin

## 2 研究方法

### 2.1 数据收集与处理

(1) 土地利用类型数据获取。2010,2020 年土地利用类型数据基于桂林市自然资源局提供的第二次全国土地调查、第三次全国土地调查成果,通过 GIS 数据空间技术分析平台(投影变换、裁剪、相交、字段融合与分区统计)进行处理获取,同时为了突出果园地与石漠化空间分布的相互关系,共将研究区土地利用方式分为耕地、草地、果园地(以下简称果园)、林地、水域以及其他用地(含建筑用地等)6 个主要类型,最终获得冠岩地下河流域 2 期土地利用类型数据。

(2) 果园石漠化分布数据获取。2010 年石漠化分布数据年基于 Landsat-7 遥感影像数据解译,2020 年石漠化分布数据基于 Landsat-8 遥感影像数据解译。具体方法:根据岩溶区碳酸盐岩的光谱信息在短红外波段的差异性<sup>[15-16]</sup>,基于像元二分模型通过 NDVI 值进行波段计算得到归一化岩石指数(NDRI),进而计算得到岩石裸露率<sup>[17-18]</sup>。特别注意的是,由于受研究区范围以及自然、人为背景的差异影响,同时依据得到的岩石裸露率和植被覆盖度计算结果,通过实地考察验证发现存在植被覆盖率较高的果园部分退耕,果园下部次生灌木发育较好的情况,故针对以上区域本文将将其作为非石漠化区域,同时结

合根据参考以往分级标准<sup>[19-20]</sup>(表 1),最终得到冠岩地下河流域 2 期石漠化分布数据。

表 1 冠岩地下河流域石漠化程度分级划分标准  
Table 1 Classification standards of rocky desertification degree in Guanyan underground river basin

岩石裸露率/%	植被覆盖率/%			
	(0,30]	(30,50]	(50,70]	(70,100]
(0,30]	非石漠化	非石漠化	非石漠化	非石漠化
(30,50]	轻度石漠化	轻度石漠化	轻度石漠化	—
(50,70]	中度石漠化	中度石漠化	—	—
(70,100]	重度石漠化	—	—	—

### 2.2 土地利用及果园石漠化动态变化速率

土地利用及石漠化变化速率是指在一定时期内,土地利用方式及石漠化演变的速度,其大小程度反映了一种土地利用类型或者石漠化在该地区的变化发展机制,能够有效查明土地利用类型/石漠化演变差异以及预测土地利用类型/石漠化的未来变化趋势<sup>[21-23]</sup>。其数学表达式为:

$$K = \frac{S_a - S_b}{S_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:K 为某一个土地利用及石漠化类型动态变化速率;|K|绝对值大小反映出土地利用及石漠化类型的变化趋势的快慢程度;S<sub>a</sub> 为某一段时期内初始的面积;S<sub>b</sub> 为某一段时期内末期的面积;T 为该时间段的年数。

### 2.3 面积转移矩阵构建

在一定时期内,果园石漠化的演变方向与土地利用方式转变过程纷繁错杂,且具有空间异质性。面积转移矩阵是描述系统状态转移的矩阵,能够全面地反映出—个区域土地利用类型/石漠化的转出转入面积和转移方向,定量分析土地利用及石漠化的转变过程和机制,预测未来土地利用及石漠化变化的可能趋势<sup>[24-25]</sup>。其公式为:

$$S_{mn} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1k} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{k1} & S_{k2} & \cdots & S_{kk} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $S$  为土地利用类型/石漠化面积; $m, n$  表示从前期  $m$  (土地利用类型/石漠化面积) 转移到末期  $n$  (土地利用类型/石漠化面积) 的类型或等级; $k$  为土地利用类型/石漠化程度等级类型数。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用及石漠化程度等级时空分布特征

冠岩地下河流域 2010—2020 年 10 a 土地利用方式演变如表 2 所示,林地在 2010—2020 年 10 a 间面积占比最大,是研究区中重要的土地利用类型;耕地与草地面积呈现减少趋势,果园、水域、林地以及其他用地呈现增加趋势。根据 6 种土地利用类型面积变化数据可知,10 a 间,草地与耕地面积分别减少 9.08, 4.64 km<sup>2</sup>,其中草地的动态变化度最大,为 -7.08%,其次为耕地,动态变化度为 -4.72%。除耕地、草地的动态度为负值外,其余地类动态度均为正值,变化面积最大的是林地 (7.12 km<sup>2</sup>),其次为果园 (5.64 km<sup>2</sup>),其中果园变化速度相对最快 (3.36%),仅次于其他用地的变化速度 (3.89%)。此外水域以及其他用地整体分别增加 0.28, 0.72 km<sup>2</sup>,动态度变化度分别为 2.31%, 3.89%,说明人为活动深刻影响着土地利用方式演变的进程。

冠岩地下河流域 2010, 2020 年 2 期石漠化分布数据如图 2 所示。冠岩地下河流域果园石漠化面积减少 1.34 km<sup>2</sup>,果园石漠化状况整体呈现出持续改善的良好态势,说明过去 10 a 间研究区内所采取的石漠化防治措施有效地减缓了石漠化进一步恶化的进程,石漠化治理取得了较大成效。在 10 a 间,轻度石漠化 (-1.92%) 的动态度均呈负值,中度石漠化 (5.71%) 与重度石漠化 (726.7%) 的动态度呈正值,果园非石漠化区面积呈现增加趋势。其中轻度石漠化区域面积呈减少趋势,减少面积 0.46 km<sup>2</sup>,占总体变化面积的 8.58%;非石漠化区面积呈现增加趋势,增

加面积为 2.89 km<sup>2</sup>,占总体变化面积的 53.92%;中度石漠化区域面积与重度石漠化面积呈增加趋势,中度石漠化区域的面积增加 0.92 km<sup>2</sup>,占总体变化面积的 17.16%;重度石漠化区域面积增加 1.09 km<sup>2</sup>,占总体变化面积的 20.34%。值得注意的是,虽然 10 a 间冠岩地下河流域果园石漠化面积有所减少,但中度石漠化与重度石漠化的面积均呈增加趋势,局部区域存在石漠化恶化扩张或新增石漠化现象,需进一步研究果园石漠化的内在演变规律。

表 2 冠岩地下河流域 2010—2020 年土地利用类型面积变化及其动态度

Table 2 Changing areas and dynamic degree of land use types in Guanyan underground river basin from 2010 to 2020

类型	面积/km <sup>2</sup>		2010—2020 年	
	2010 年	2020 年	变化面积/km <sup>2</sup>	动态度/%
耕地	9.83	5.19	-4.64	-4.72
草地	12.82	3.74	-9.08	-7.08
果园	16.80	22.44	5.64	3.36
林地	81.07	88.19	7.12	0.88
水域	1.21	1.49	0.28	2.31
其他用地	1.85	2.57	0.72	3.89

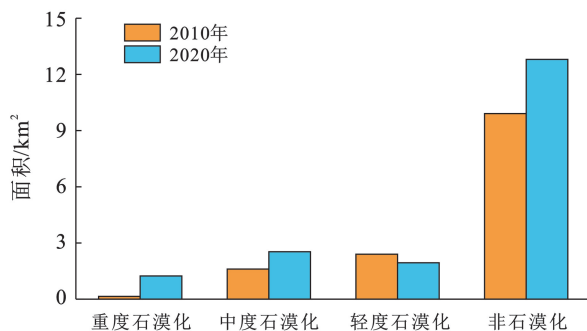


图 2 冠岩地下河流域 2010—2020 年不同果园石漠化等级面积分布

Fig.2 Distribution of rocky desertification grade area of different orchards in Guanyan underground river basin from 2010 to 2020

### 3.2 土地利用及石漠化等级面积转移矩阵

根据冠岩地下河流域 2010, 2020 年石漠化等级分布数据构建果园石漠化面积转移矩阵。由图 3 可知,10 a 间,非石漠化转变为石漠化的面积 1.51 km<sup>2</sup>,其中转变为重度石漠化的面积为 0.30 km<sup>2</sup>,转变为中度石漠化的面积为 0.74 km<sup>2</sup>,转变为轻度石漠化的面积 0.47 km<sup>2</sup>;轻度石漠化转变为中度石漠化的面积 0.21 km<sup>2</sup>,转变为重度石漠化的面积为 0.04 km<sup>2</sup>,转变为非石漠化的面积(减少面积)为 0.98 km<sup>2</sup>;中度石漠化转变为重度石漠化的面积为 0.06 km<sup>2</sup>,石漠化改善面积为 0.41 km<sup>2</sup>,转变为非石漠化的面积为 0.58 km<sup>2</sup>;重度石漠化改善面积 0.04 km<sup>2</sup>,转变为非石漠化的面积为 0.05 km<sup>2</sup>。总的来看,2010—2020 年

中度和重度石漠化区域面积的增加由非石漠化区转化而来,这可能是非石漠化局部地区生态环境恶化,导致了果园石漠化进一步恶化扩张。

根据冠岩地下河流域 2010,2020 年土地利用方式数据构建土地利用面积转移矩阵。由表 3 可知,10 a 间,冠岩地下河流域土地利用方式主要表现为耕地、草地面积减少,果园、林地面积增加,建设用地与水域面积基本保持不变。其中草地面积减少 9.06 km<sup>2</sup>,主要转变为林地 7.56 km<sup>2</sup>,转变为果园 1.54 km<sup>2</sup>;耕地面积减少 4.64 km<sup>2</sup>,主要转变为果园 3.67 km<sup>2</sup>,转变为林地 1.06 km<sup>2</sup>;果园面积增加 5.63 km<sup>2</sup>,主要由林地 (5.37 km<sup>2</sup>)、耕地(3.67 km<sup>2</sup>)和草地(1.54 km<sup>2</sup>)转化而来;林地面积增加 7.06 km<sup>2</sup>,主要由草地(7.56 km<sup>2</sup>)、果园(4.40 km<sup>2</sup>)和耕地(1.06 km<sup>2</sup>)转化而来。结合冠岩地下河流域果园石漠化面积转移矩阵,果园中度和重度石漠化区域面积的增加与耕地、草地面积减少密切相关,同时果园面积的增加大部分由林地转化而来,需特别注意冠岩地下河流域的林地植被变化,加

大对已损害林地的修复力度,改善局部区域生态环境,防止林地进一步遭受到破坏。

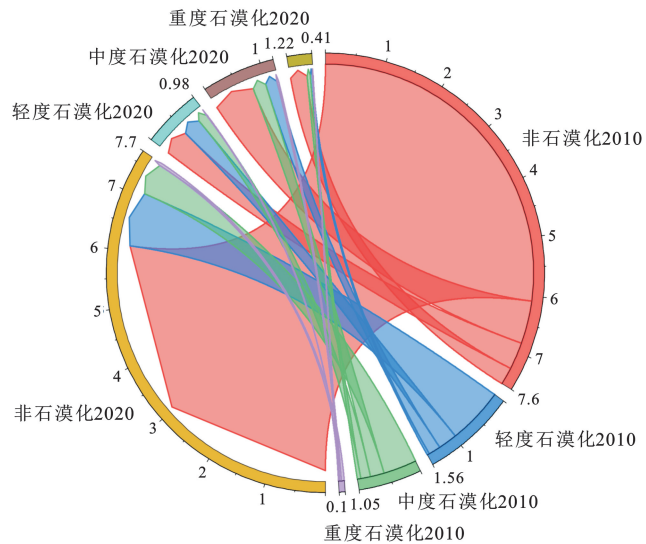


图 3 2010—2020 年研究区不同石漠化等级变化弦图  
Fig.3 Chord diagram of change of different rocky desertification grades in study area from 2010 to 2020

表 3 冠岩地下河流域 2010—2020 年土地利用类型面积转移矩阵

Table 3 Area transfer matrix of land use types in Guanyan underground river basin from 2010 to 2020 km<sup>2</sup>

项目	2021 年面积						总计	
	草地	耕地	果园	建设用地	林地	水域		
2010 年面积	草地	3.57	0.02	1.54	0.05	7.56	0.02	12.76
	耕地	0.01	4.52	3.67	0.36	1.06	0.20	9.83
	果园	0.01	0.26	11.59	0.43	4.40	0.09	16.78
	建设用地	0.00	0.09	0.14	1.38	0.22	0.01	1.84
	林地	0.11	0.26	5.37	0.33	74.70	0.15	80.92
	水域	0.01	0.05	0.09	0.02	0.04	1.00	1.21
	总计	3.71	5.19	22.41	2.57	87.98	1.49	123.34

### 3.3 果园石漠化分布演变特征

结合 2010—2020 年冠岩地下河流域果园石漠化的演变过程,通过统计分析得到冠岩地下河流域果园石漠化改善面积为 1.79 km<sup>2</sup>,恶化面积为 1.78 km<sup>2</sup>,基本未变面积(即原有石漠化面积)为 0.58 km<sup>2</sup>。由其他土地利用类型开垦新增果园和原有果园的石漠化改善的面积略大于恶化的面积,表明冠岩地下河流域果园石漠化总体向改善方向良好发展,但治理形势依然严峻(图 4)。

3.3.1 冠岩地下河流域果园石漠化演变特征 分析冠岩地下河流域果园石漠化的改善演变特征可以发现,从 2010—2020 年,果园石漠化改善较好的区域主要集中在冠岩地下河流域旺塘村一大田村以及南圩村一大田村一带,其中果园石漠化轻度改善面积为 0.20 km<sup>2</sup>,占总体改善面积的 11.12%;果园石漠化较好改善面积为 1.59 km<sup>2</sup>,占总体改善面积的 88.87%。

通过对其他土地利用类型开垦新增果园和原有果园对石漠化的正向演变(改善)统计分析,果园石漠化的改善主要与果园自身以及林地(灌木林等)的保护密切相关,主要体现在相关国家石漠化治理政策的大力实施下,果园逐步退耕退种,转化为其他土地利用类型,并通过人工育林+自然恢复的方式,有效控制了石漠化景观的蔓延。

#### 3.3.2 冠岩地下河流域果园石漠化恶化演变特征

由图 4 可知,2010—2020 年果园石漠化恶化较差的区域主要集中在冠岩地下河流域西塘村周围以及旺塘村东北部地区,其中果园石漠化轻度恶化面积为 0.74 km<sup>2</sup>,占总体恶化面积的 41.31%;严重恶化面积为 1.04 km<sup>2</sup>,占总体恶化面积的 58.69%。通过对其他土地利用类型开垦新增果园和原有果园对石漠化的逆向演变(恶化)分析,果园石漠化的恶化主要与果园自身的破坏有关,主要表现在生产力低下,农业结

构不合理背景下,由于毁地开荒等不合理的土地利用活动,致使原有灌木林地、有林地受到严重毁林开荒破坏,同时原有果园长期耕种导致果园产出率逐年降低,土壤肥力下降,在降雨或径流等运移力的作用下,土被流失,加速了石漠化的发展进程。

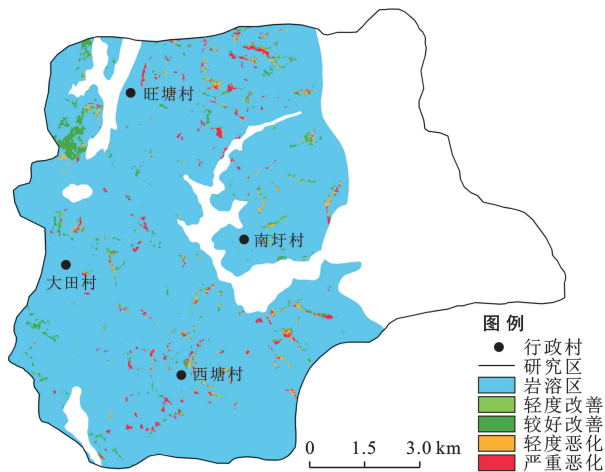


图 4 2010—2020 年研究区果园石漠化的空间分布演变  
Fig.4 Spatial distribution evolution of orchard rocky desertification in study area from 2010 to 2020

## 4 讨论

### 4.1 果园石漠化现状成因分析

根据 2020 年重点石漠化区 1:50 000 生态地质调查结果,冠岩地下河流域石漠化发生率为 27.94%,以轻、中度石漠化为主。其中果园石漠化发生率为 27.14%,空间上呈集中连片分布,主要集中在坡度  $8^{\circ}\sim 25^{\circ}$  的灵川县潮田乡深井村和阳朔县西塘村一带。长期以来,研究区内以砂糖橘等经济果林为主的单

一化种植模式显著削弱了土壤的生态功能,长期耕作使土壤表层疏松、有机质含量降低,抗侵蚀能力减弱。同时,扩张性开垦行为破坏了原有自然植被,导致土壤裸露,植被根系固定土壤的功能减弱,水土流失严重,进一步加剧了石漠化的风险<sup>[26]</sup>。从空间特征看,石漠化分布与坡度存在显著相关性,坡度增加不仅加剧降雨冲刷,还放大了土壤侵蚀强度和植被退化的累积效应,使石漠化呈集中连片分布的趋势,特别是坡度  $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$  区域石漠化率高达 31.5%,成为流域内石漠化发生的重点区域。这种果园石漠化现象反映了人为土地利用方式与自然地貌条件之间的不平衡性,忽视了生态环境承载力以及土壤、植被和水文系统之间的协同关系。在坡度较大的区域,耕作强度高和前期植被破坏显著加重地表侵蚀,同时表层土壤疏松薄弱使得雨水在地表停留时间短,水资源利用效率低下,导致生态系统功能削弱,土壤与周边植被稳定性大幅下降,削弱水源涵养功能,石漠化加重趋势愈加明显,严重威胁流域生态系统的稳定性与可持续性。

### 4.2 果园石漠化空间分布演变分析

冠岩地下河流域近 10 a 果园石漠化各等级中,除轻度石漠化区域面积动态度为减少外,其余石漠化等级动态度均为增加,尤其是中度石漠化与重度石漠化面积呈现局部地区加重趋势。由图 5 可知,冠岩地下河流域石漠化加剧主要是因为西南地区干旱以及桂林砂糖橘爆发式发展,毁地开荒等不合理的土地利用活动,干扰了原有土地利用类型的自然生态系统自身顺向演替的能力,导致土壤滞留水枯竭,土壤侵蚀严重,岩石逐步裸露,导致石漠化加重。

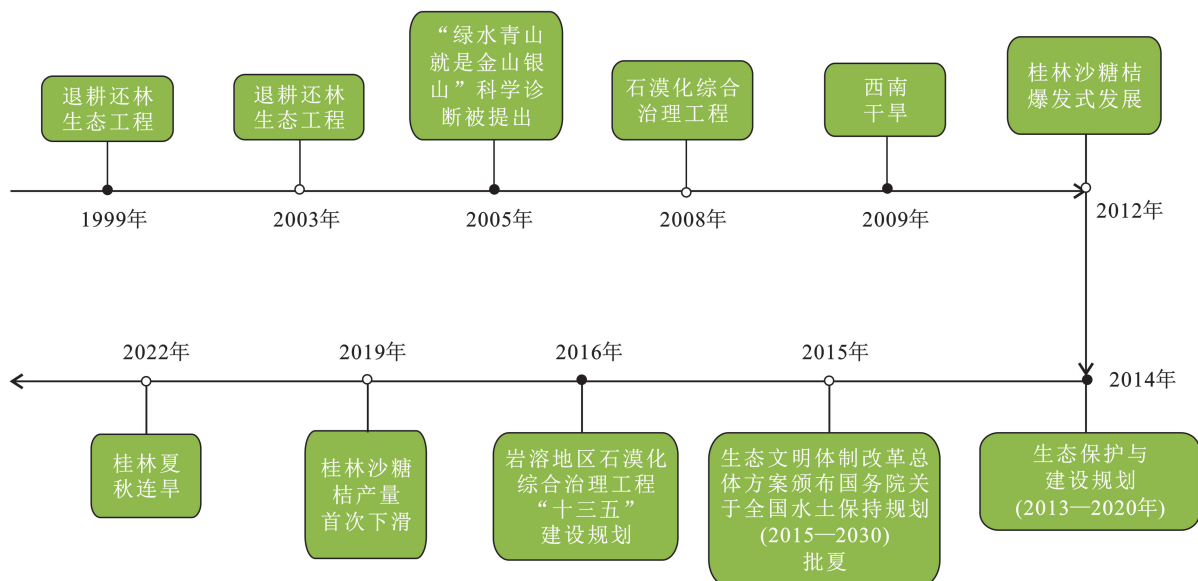


图 5 近 20 a 来影响研究区果园石漠化演变的关键因素时间轴

Fig.5 Timeline of key factors affecting evolution of rocky desertification in orchards of study area in past 20 years

在 2010—2020 年,果园石漠化等级程度总体为改善趋势,一方面,由于封山育林、退耕还林还草工程等生态修复政策的大力实施,有效地遏制了水土以及土壤肥力的进一步流失,石漠化得到了极有效的治理,岩溶区生态环境得到了较好的改善<sup>[27-28]</sup>;另一方面,由于生态移民措施实施以及社会经济的快速发展,缓解了原有的人地矛盾,减轻了土地生产压力,加上在石漠化地区大力发展复合经营种植经济模式,间接延缓了石漠化发展进程<sup>[29-30]</sup>。

## 5 结论

(1) 冠岩地下河流域土地利用以耕地、果园、林地、草地为主,在 2010—2020 年期间,林地面积占比最大,是研究区中重要的土地利用类型;耕地与草地面积呈现减少趋势,果园、林地、水域以及其他用地呈现增加趋势。此外建筑用地等其他用地动态变化度为 3.89%,说明人为活动深刻影响着土地利用方式演变的进程。

(2) 2010—2020 年 10 a 间,冠岩地下河流域果园石漠化面积减少 1.34 km<sup>2</sup>,减少比例为 7.90%,果园石漠化总体呈现出积极改善的趋势,但中度石漠化与重度石漠化面积均呈增加趋势,其中非石漠化转变为石漠化的面积 1.51 km<sup>2</sup>,需重点关注非石漠化区的果园种植管理,不同果园石漠化发生程度由于存在空间异质性,与时间推移以及土地利用类型转变有着密切联系。

(3) 研究区果园石漠化现状表明果园本身以及部分林地发生石漠化蔓延现象,2010—2020 年冠岩地下河流域果园石漠化改善面积为 1.79 km<sup>2</sup>,恶化面积为 1.78 km<sup>2</sup>,基本未变面积(即原有石漠化面积)为 0.58 km<sup>2</sup>,由其他土地利用类型开垦新增果园和原有果园的石漠化改善的面积略大于恶化的面积,这很大一部分原因在于研究区粗放式的种植模式,致使研究区果园处于边耕种边退耕的状态,石漠化处于边改善边恶化的循环状态。因而冠岩地下河流域后期生态环境恢复与保护的重点应是加强现有果园的科学种植与管理,逐步恢复灌木林等植被,大力发展林下复合经营种植模式,在现有石漠化治理措施基础之上防止果园石漠化进一步恶化。

## 参考文献 (References)

[1] Yuan Daoxian. Rock desertification in the subtropical Karst of South China [J]. *Ztschrift Fur Geomorphologie*, 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[J].中国岩溶,2002,21(2):101-105.

Wang Shijie. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification [J]. *Carsologica Sinica*, 2002, 21(2):101-105.

[3] 袁道先,蒋勇军,沈立成,等.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016.

Yuan Daoxian, Jiang Yongjun, Shen Licheng, et al. *Modern Karstology* [M]. Beijing: Science Press, 2016.

[4] Jiang Zhongcheng, Lian Yanqing, Qin Xiaoqun. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration [J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 132:1-12.

[5] Wang Shijie, Liu Qiming, Zhang Dianfa. Karst rocky desertification in Southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2):115-121.

[6] 王世杰.喀斯特石漠化:中国西南最严重的生态地质环境问题[J].矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):120-126.

Wang Shijie. The most serious eco-geologically environmental problem in South Western China: Karst rocky desertification [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2):120-126.

[7] Dai Quanhong, Peng Xudong, Yang Zhi, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the karst rocky desertification area [J]. *CATENA*, 2017, 152:218-226.

[8] 谢运球,陈羽,唐秀观.漓江流域果园表土有机氯、磷农药残留及其风险分析[J].中国岩溶,2015,34(4):325-330.

Xie Yunqiu, Chen Yu, Tang Xiuguan. Organochlorine and organophosphorus pesticide residuals in the top soils from typical orchards and their risk evaluation in the Lijiang River watershed [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4):325-330.

[9] 蒋忠诚,罗为群,童立强,等.21世纪西南岩溶石漠化演变特点及影响因素[J].中国岩溶,2016,35(5):461-468.

Jiang Zhongcheng, Luo Weiqun, Tong Liqiang, et al. Evolution features of rocky desertification and influence factors in karst areas of Southwest China in the 21st century [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5):461-468.

[10] 蔡厚军.桂林地区沙糖橘产业发展可行性分析[J].南方农机,2020,51(5):84.

Cai Houjun. Feasibility analysis of sugar orange industry development in Guilin [J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2020, 51(5):84.

[11] 朱柏露,杨奇勇,谢运球,等.漓江流域土地石漠化空间分布及驱动因子分析[J].广西师范大学学报(自然科学版),2021,39(3):139-150.

Zhu Bailu, Yang Qiyong, Xie Yunqiu, et al. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification in Lijiang River basin [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39

- (3):139-150.
- [12] 江凡. 桂林漓江流域生态环境现状分析及修复治理研究[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(5):115-117.  
Jiang Fan. Analysis and restoration on ecological environment status of Lijiang River basin in Guilin City [J]. Resource Information and Engineering, 2021, 36(5):115-117.
- [13] 张任. 冠岩洞穴特征与游览开发设计研究[J]. 中国岩溶, 1999, 18(1):73-79.  
Zhang Ren. Characteristics and tourism exploitation planning of Guanyan cave [J]. Carsologica Sinica, 1999, 18(1):73-79.
- [14] 马艳芹. 广西灵川县稻田耕作制度调查与模式优化研究[D]. 江西 南昌: 江西农业大学, 2014.  
Ma Yanqin. The investigation of farming system and the research on model optimization about paddy fields in Lingchuan County of Guangxi [D]. Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University, 2014.
- [15] Huang Qihao, Cai Yunlong. Mapping Karst rock in Southwest China [J]. Mountain Research and Development, 2009, 29(1):14-20.
- [16] 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.
- [17] 王明明, 王世杰, 白晓永, 等. 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[J]. 生态学报, 2019, 39(16):6083-6097.  
Wang Mingming, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Evolution characteristics of karst rocky desertification in typical small watershed and the key characterization factor and driving factor [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16):6083-6097.
- [18] 牛潜, 周旭, 张继, 等. 喀斯特山地城市生态系统弹性变化分析: 以贵阳市区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3):722-730.  
Niu Qian, Zhou Xu, Zhang Ji, et al. Evolution of ecosystem resilience in mountainous cities of karst: Taking Guiyang urban area as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3):722-730.
- [19] Bai Xiaoyong, Wang Shijie, Xiong Kangning. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification land: Indications for restoration strategies [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(1):47-56.
- [20] 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 等. 基于地统计学和遥感的岩溶区石漠化空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4):243-247.  
Yang Qiyong, Jiang Zhongcheng, Ma Zulu, et al. Spatial variability of karst rock desertification based on geostatistics and remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4):243-247.
- [21] 田湘云, 张超, 陈棋, 等. 云南省岩溶地区土地利用对石漠化景观格局演变的影响分析[J]. 林业资源管理, 2022(1):61-69.  
Tian Xiangyun, Zhang Chao, Chen Qi, et al. Influence of land use on landscape pattern evolution of rocky desertification in karst areas of Yunnan, China [J]. Forest Resources Management, 2022(1):61-69.
- [22] Sharif Joorabian Shooshtari, Tatiana Silva, Behnaz Raheli Namin, et al. Land use and cover change assessment and dynamic spatial modeling in the Ghara-Su basin, Northeastern Iran [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2020, 48(1):81-95.
- [23] 刘盛和, 何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型[J]. 自然资源学报, 2002, 17(5):533-540.  
Liu Shenghe, He Shujin. A spatial analysis model for measuring the rate of land use change [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(5):533-540.
- [24] 蒙正永, 谢刚, 陈阳, 等. 贵州岩溶地区石漠化现状与动态变化研究: 以平塘县为例[J]. 中国水土保持, 2020(4):53-56.  
Meng Zhengyong, Xie Gang, Chen Yang, et al. Present situation and dynamic variation of rocky desertification in karst area of Guizhou [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(4):53-56.
- [25] 田光进, 张增祥, 王长有, 等. 基于遥感与 GIS 的海口市土地利用结构动态变化研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6):543-546.  
Tian Guangjin, Zhang Zengxiang, Wang Changyou, et al. Dynamic change of land-use structure in Haikou by remote sensing and GIS [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(6):543-546.
- [26] 种国双, 海月, 郑华, 等. 中国西南喀斯特石漠化治理现状及对策[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11):38-43.  
Chong Guoshuang, Hai Yue, Zheng Hua, et al. Current situation and measures of karst rocky desertification control in Southwest China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11):38-43.
- [27] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16):5798-5808.  
Du Wenpeng, Yan Huimin, Zhen Lin, et al. The experience and practice of desertification control in karst region of Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16):5798-5808.

- 125(1):e2019JF005329.
- [15] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M] // Mckee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1979.
- [16] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. Geological Society of America Bulletin, 1914, 25(1): 655-744.
- [17] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments [J]. Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [18] 王涛. 兰新高铁戈壁大风区风沙灾害形成机理及防治研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.  
Wang Tao. Study on formation mechanism and prevention of sandstorm disaster in Gobi windy area of Lanzhou-Xinjiang high-speed railway [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [19] 张宏川, 杨爱军, 武开平. 兰新线玉门段防护体系经济效益分析[J]. 中国沙漠, 1998, 18(4): 390-393.  
Zhang Hongchuan, Yang Aijun, Wu Kaiping. The economic effect of railway's protecting system at Yumen section of Lanzhou Xinjiang railway [J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(4): 390-393.
- [20] 王伟, 宋彦宏. 和田—若羌铁路戈壁盐碱区高立式“Z”字形沙障配置的风洞试验[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 50-56.  
Wang Wei, Song Yanhong. Wind tunnel experimental study on actual setup of upright Z-shaped sand barriers in Gobi saline zone along Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 50-56.
- [21] 丁雪宁, 和田—若羌铁路大风沙区绿化林带配置的风洞模拟试验[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 257-264.  
Ding Xuening. Wind tunnel simulation experiments on configuration of railway green belts in intensely blown sand areas of Hetian-Ruoqiang railway [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 257-264.
- [22] Wang Tao, Qu Jianjun, Tan Lihai. Aeolian sediment transport over sandy Gobi: Field studies in the Nanhu Gobi along the Hami-Lop Nor railway [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(1): 125-134.
- [23] 丁录胜. 格库铁路芦苇把栅栏和大网格防沙体系防护效益[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 42-50.  
Ding Lusheng. Observation and numerical simulation of the protective effect of the reed-bundle sand control system along the Golmud-Korla railway [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 42-50.

(上接第 80 页)

- [28] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策[J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.  
Chen Hongsong, Yue Yuemin, Wang Kelin. Comprehensive control on rocky desertification in karst regions of south Western China: Achievements, problems, and countermeasures [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 37-42.
- [29] 史敏莉, 罗为群, 林佳欣, 等. 岩溶石山火龙果不同套种模式对土壤水稳性团聚体的影响[J]. 现代园艺, 2023(9): 59-60.  
Shi Minli, Luo Weiqun, Lin Jiaxin, et al. Effects of different intercropping patterns of pitaya on soil water-stable aggregates in karst rocky mountain [J]. Contemporary Horticulture, 2023(9): 59-60.
- [30] 卢玉鹏, 高柱, 张小丽, 等. 果园生态系统复合经营的开展模式及生态机制综述[J]. 中国果树, 2021(12): 9-15.  
Lu Yupeng, Gao Zhu, Zhang Xiaoli, et al. Review on the development model and ecological mechanism of compound management of orchard ecosystem [J]. China Fruits, 2021(12): 9-15.

(上接第 90 页)

- [30] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 157-162.  
He Tengbing, Dong Lingling, Liu Yuansheng, et al. Change of physical-chemical properties and heavy mental element in soil from different parent material/rock [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 157-162.
- [31] 何园球. 红壤质量演变与调控[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
He Yuanqiu. Evolvement and Regulation of Red Soil Quality [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [32] 田培, 刘嘉欣, 曲丽莉. 土壤可蚀性研究进展与展望[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2024, 58(5): 561-570.  
Tian Pei, Liu Jiaxin, Qu Lili. Research progress and prospects on soil erodibility [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2024, 58(5): 561-570.