

涂纯, 罗为群, 蒋忠诚, 等. 可持续发展实验区石漠化时空演变及其驱动机制研究——以广西恭城县为例[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 114-125.

DOI: [10.11932/karst2023y039](https://doi.org/10.11932/karst2023y039)

可持续发展实验区石漠化时空演变及其驱动机制研究 ——以广西恭城县为例

涂纯^{1,2,3}, 罗为群^{1,2,3}, 蒋忠诚^{1,2,3}, 刘绍华^{1,2,3}, 胡兆鑫^{1,2,3},
汤庆佳^{1,2,3}, 吴泽燕^{1,2,3}, 张标¹

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 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, 广西 平果 531406; 3. 贵州省交通规划
勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 西南喀斯特地区是我国实施可持续发展战略的重要地区, 同时也是生态环境极为脆弱、石漠化集中分布的地区, 但有关可持续发展实验区石漠化的内在演化机制研究还较少涉及。以广西恭城县国家可持续发展实验区为例, 利用2000年、2005年、2010年、2015年和2021年遥感影像为数据源, 采用人机交互解译法进行石漠化信息提取, 定量分析了恭城县石漠化的时空演变规律及其成因机制。结果显示, 恭城县石漠化主要经历了2000—2005加速恶化、2005—2015年快速改善和2015—2021年缓慢恶化三个阶段, 石漠化总面积在88.96~229.55 km²; 2000—2005年, 恭城县石漠化表现为无石漠化向轻度和中度石漠化转移, 2005—2021年呈逆向改善。西岭镇、莲花镇、平安镇是石漠化发生的主要地区, 占全县石漠化总面积的55.47%~61.31%。灰岩区发生的石漠化面积为104.03 km², 占石漠化总面积的72.91%; 园地内发生的石漠化面积为56.26 km², 占比为38.12%。结果表明: 灰岩区强烈的岩溶作用, 以及长期种植的单一经济果林遭大面积砍伐, 是导致近年恭城县石漠化加重的主要原因。

关键词: 恭城县; 石漠化; 时空演变格局; 不同岩性; 不同土地利用类型

创新点: 揭示了典型可持续发展实验区长时间序列下石漠化的时空演变规律, 及不同岩性和土地利用转变对石漠化演化的内在驱动机制, 为国家可持续发展实验区的石漠化综合治理提供科学依据。

中图分类号: X171.1; F124.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2024) 01-0114-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国可持续发展实验区开始于1986年, 是针对我国经济快速发展、生态环境逐步恶化而开展的一

项地方试点工作, 其主要目标是依靠科技进步、机制创新和制度建设, 探索不同类型地区的经济、社会和资源环境协调发展的机制和模式, 为其他地区实施可持续发展战略提供示范样板和引领作用^[1-2]。西南

资助项目: 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA20161004-3); 国家重点研发计划项目(2019YFC0507504); 中国地质调查项目(DD20230453, DD20190502)

第一作者简介: 涂纯(1986—), 男, 博士, 研究方向: 岩溶生态系统服务功能评估。E-mail: tuc.13b@igsnr.ac.cn。

通信作者: 罗为群(1980—)男, 硕士, 研究员, 主要从事岩溶区生态修复及国土空间规划研究。E-mail: lweiqun@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2022-12-07

喀斯特地区是我国开展可持续发展试验示范的重要地区,这些地区大多生态环境脆弱、社会经济发展相对滞后,是我国石漠化集中分布区^[3-4]。自“十五”计划明确提出“推进黔、滇、桂岩溶地区石漠化综合治理”以来,西南喀斯特地区相继建立了多个可持续发展实验区,形成了生态农业循环、水源地保护、特色生态旅游等多种可持续发展模式^[2,5-7],石漠化问题得到显著改善,有效提升了该地区社会经济和生态环境水平。然而,这些可持续发展实验区石漠化时空演变的内在驱动机制研究还较少涉及。目前研究认为,石漠化是在自然因素叠加人类活动导致的土地退化过程^[8],自然因素主要是地质条件制约下,尤其是纯碳酸盐岩背景下的岩溶生态系统成土物质和成土速率严重受限,导致石漠化发生^[9];人为因素包括陡坡耕种、砍伐、放牧等人类活动导致的土地利用变化,加剧水土流失和岩石裸露,最终形成石漠化。李瑞玲等^[10]研究发现,贵州石漠化与岩性具有明显相关性,石漠化分布区主要以灰岩为主;张信宝等^[11]认为,贵州石漠化的空间差异与喀斯特地貌类型密切相关,但人为活动导致的森林植被破坏是贵州石漠化的主要驱动力;王茜等^[3]分析了不同土地利用类型下石漠化的时空演变规律,认为退耕还林等生态治理工程对土地利用的改变,能有效改善云南广南县的石漠化状况;而王正雄等^[12]认为,岩性与土地利用类型、坡度共同驱动岩溶槽谷区石漠化形成。因此,通过地质条件和土地方式转变的耦合研究来揭示石漠化的演化过程和内在驱动机制,有助于明确可持续发展实验区石漠化治理的方向和途径。

广西恭城瑶族自治县作为“国家级可持续发展试验区”和“国家可持续发展议程创新示范先行区”,同时也是桂林岩溶景观资源保育和特色生态农业协调发展的重要地区。过去30年来,按照“养殖—沼气—种植”三位一体的发展模式,恭城县成功打造了“恭城月柿”、“恭城桃花节”等多个生态产业品牌。然而,由于长期在岩溶地区种植桃、李等单一经济果林,目前恭城县出现岩溶景观资源退化、石漠化加重、农产品生态经济效益衰减等问题,对恭城县的生态安全和社会经济发展提出了挑战。因此,本研究基于2000—2021年多期遥感影像、区域地质调查和国土调查等数据,分析了恭城县石漠化的时空演变格局,探讨不同岩性和土地利用转变对石漠化演化的内在驱动机制,为恭城县乃至其他国家可持续发展实验区

的石漠化治理与社会经济协同发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

恭城瑶族自治县(110°36′~110°10′E, 24°37′~25°17′N)位于广西桂林市东南部,地处广西和湖南交界处(图1),全县国土面积2 139.33 km²^[13];地形以山地、丘陵为主,全县东、西、北三面为中低山环抱,中间为南北走向的河谷走廊;据1:20万区域地质调查资料显示,恭城县裸露碳酸盐岩面积为490.02 km²,占该县国土面积的22.47%。恭城县气候属中亚热带季风气候,多年平均气温为20.0℃,年平均降水量为1 517.50 mm,年平均日照时数为1 479.40 h^[14]。2020年,恭城县常住人口245 432人,其中城镇人口81 521人,农村人口163 911人,城镇化率33.22%。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及处理

本研究使用的遥感影像来源于 Google Earth

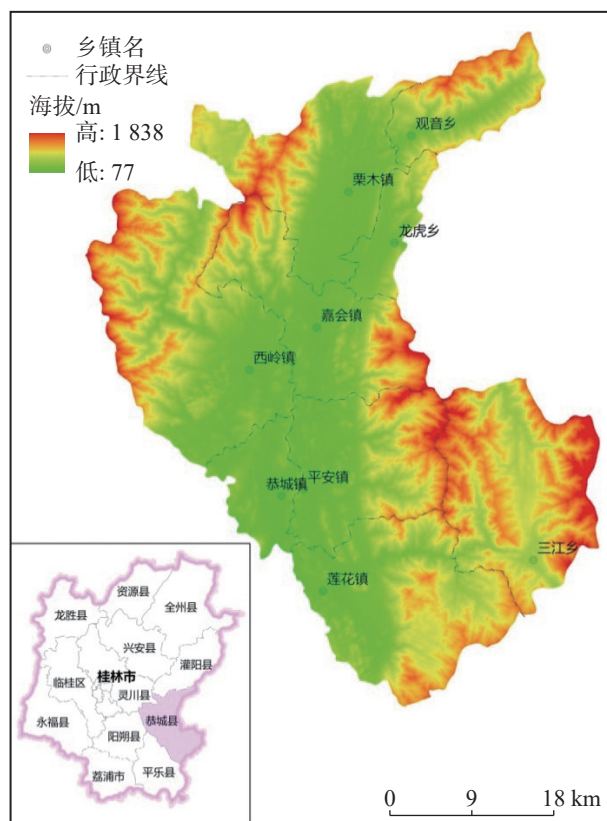


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

Engine 云平台, 获取的 Landsat5 TM 影像时间为 2000 年 12 月、2005 年 11 月和 2010 年 11 月, Landsat8 OLI 影像时间为 2015 年 12 月和 2021 年 1 月, 影像空间分辨率为 30 m; 影像数据通过辐射定标、大气校正、几何校正、图像增强等预处理。使用 1:20 万区域地质图提取的恭城县裸露型碳酸盐数据, 确定出恭城县岩溶区范围; 土地利用数据来源于桂林市第二次土地调查和第三次国土调查; 统计数据来源于《恭城县统计年鉴(2013-2021)》, 并用《桂林经济社会统计年鉴》和《桂林年鉴》进行补充。

1.2.2 石漠化遥感解译及其等级划分

本研究采用人机交互的方法进行石漠化遥感解译, 根据遥感影像的光谱、纹理、色调及形状等特征, 建立石漠化遥感解译判读标志。通过波段运算提取恭城县归一化植被指数和归一化岩石指数, 进一步计算植被覆盖率和基岩裸露率进行石漠化信息提取^[15]。其中植被覆盖率计算公式如下:

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

式中: FVC 为植被覆盖率; $NDVI$ 为混合像元归一化植被指数; $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的 $NDVI$ 值; $NDVI_{soil}$ 为裸土(无植被)像元的 $NDVI$ 值。本文依据经验, 将累计百分比为 5% 对应的像元值为 $NDVI_{soil}$, 累计百分比为 95% 对应的像元值为 $NDVI_{veg}$ 。

基岩裸露率通过归一化岩石指数进行计算, 公式如下:

$$F_r = \frac{NDRI - NDRI_0}{NDRI_r + NDRI_0}$$

式中: F_r 为基岩裸露率; $NDRI$ 为混合像元归一化岩石指数; $NDRI_0$ 为无基岩裸露像元的 $NDRI$ 值; $NDRI_r$ 为基岩全覆盖像元的 $NDRI$ 值。本文依据经验, 将累计百分比为 1% 对应的像元值为 $NDRI_0$, 累计百分比为 99% 对应的像元值为 $NDRI_r$ 。

目前石漠化等级存在众多划分方法, 主要依据基岩裸露、植被和土被覆盖条件、坡度、土壤厚度等因素进行石漠化分级划分^[3, 15-17]。例如, 熊康宁等^[18-19]综合基岩裸露率、土被覆盖率、坡度、植被+土被覆盖率、平均土壤厚度等指标, 将石漠化划分为无明显石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化; 而宋同清等^[20]结合岩石裸露率和植被覆盖率、王茜等^[3]根据岩石裸露率、植被+土被

覆盖率, 将石漠化划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化。本研究结合实际情况, 选择植被覆盖率、基岩裸露率作为研究区石漠化分级指标, 将恭城县石漠化划分为无石漠化、潜在石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化 5 个等级, 其中石漠化面积为轻度、中度、重度石漠化面积之和^[21-22](表 1)。

1.2.3 石漠化面积转移矩阵构建

石漠化面积转移矩阵表示不同时期同一区域石漠化的具体流向与转入/转出面积, 用于分析不同等级石漠化的相互转化关系^[17, 23]。计算公式如下:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & P_{nn} \end{bmatrix}$$

式中: P_{ij} 为面积转移矩阵; n 为石漠化类型数; i, j 分别为起始年和终止年的等级序号。

2 结果与分析

2.1 恭城县石漠化时空变化特征分析

2.1.1 石漠化时间变化特征分析

2000—2021 年, 恭城县石漠化总面积经历了显著增加、逐步改善、缓慢恶化的演变阶段(图 2, 表 1)。2000—2005 年, 石漠化总面积由 2000 年的 99.81 km² 增加至 2005 年的 229.55 km², 5 年间增加了 129.74 km², 主要原因是恭城县实施的石山绿化、退耕还林等工程都在 2000 年前后, 石漠化治理处于探索阶段, 技术和经验不足; 而且人为耕作导致的石漠化问题又在加剧, 所以石漠化总面积处于显著增加阶段。2005—2010 年, 恭城县石漠化总面积减少至 2010 年的 197.62 km², 5 年间减少了 31.93 km², 期间恭城县全面实施封山育林和退耕还林等工程, 石漠化处于缓慢改善阶段, 但总体形势仍然严峻。2010—2015 年, 恭城县石漠化总面积降低至 2015 年的 88.96 km², 这一时期恭城县进一步实施石漠化综合治理造林、珠江流域防护林工程造林和退耕还林等一系列措施, 积累了丰富的石漠化治理经验和技能, 恭城县石漠化进入快速改善期。2015—2021 年, 恭城县石漠化总面积缓慢上升至 97.51 km², 呈小幅恶化态势。

表 1 恭城县石漠化等级划分及遥感影像判读标志
Table 1 Rocky desertification grade and interpretation signs of remote sensing image in Gongcheng county

石漠化等级	植被覆盖率/%	基岩裸露率/%	Landsat遥感影像判读标志	野外照片
无石漠化	>70	<20		
潜在石漠化	50~70	20~30		
轻度石漠化	35~50	30~50		
中度石漠化	20~35	50~70		
重度石漠化	<20	>70		

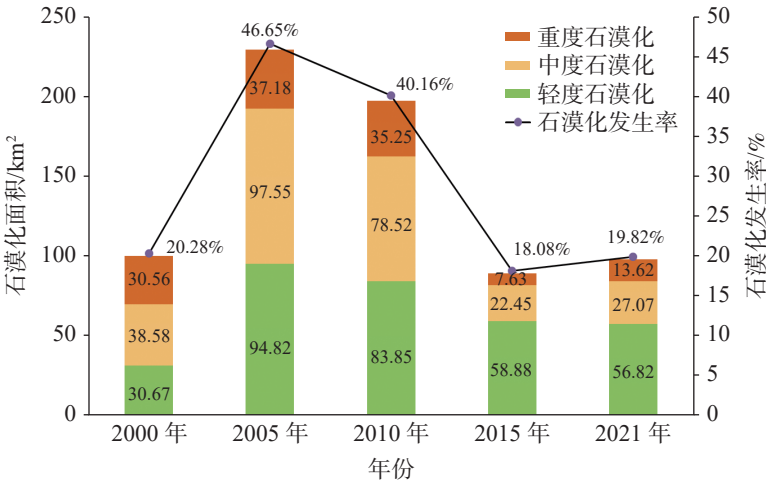


图 2 2000—2021 年恭城县轻度、中度、重度石漠化面积及石漠化发生率演变图
Fig. 2 Variation of mild, intermediate and severe rocky desertification areas and their incidence rate in Gongcheng county from 2000 to 2021

分析不同等级石漠化的演变规律显示(表 2), 恭城县轻度和中度石漠化的变化幅度最大。2000—2005 年, 轻度和中度石漠化分别增加了 64.15 km² 和 58.97 km², 其动态度显著高于其他等级石漠化。2005—2021 年, 轻度、中度和重度石漠化总体呈减

少趋势, 但轻度石漠化占石漠化总面积的比例增大, 由 2005 年的 41.31% 升至 2021 年的 58.27%, 表明在实施一系列石漠化治理工程措施后, 重度和中度石漠化逐步改善, 转变为轻度石漠化占主导; 2010—2015 年, 潜在石漠化动态度达到 24.40%, 显示了恭

表 2 恭城县 2000—2021 年石漠化面积变化表
Table 2 Variation of rocky desertification areas in Gongcheng county from 2000 to 2021

石漠化等级	面积/km ²					2000—2005年	
	2000年	2005年	2010年	2015年	2021年	变化面积/km ²	动态度/%
无石漠化	392.23	262.49	294.42	403.08	394.53	-129.74	-6.62
潜在石漠化	374.34	218.83	255.35	316.35	349.55	25.77	28.81
轻度石漠化	30.67	94.82	83.85	58.88	56.82	64.15	41.83
中度石漠化	38.58	97.55	78.52	22.45	27.07	58.97	30.57
重度石漠化	30.56	37.18	35.25	7.63	13.62	6.62	4.33
石漠化合计	99.81	229.55	197.62	88.96	97.51	129.74	26.00

石漠化等级	2005—2010年		2010—2015年		2015—2021年	
	变化面积/km ²	动态度/%	变化面积/km ²	动态度/%	变化面积/km ²	动态度/%
无石漠化	31.93	2.43	108.66	7.38	-8.55	-0.35
潜在石漠化	-4.59	-2.10	47.66	24.40	-41.75	-8.02
轻度石漠化	-10.97	-2.31	-24.97	-5.96	-2.06	-0.58
中度石漠化	-19.03	-3.90	-56.07	-14.28	4.62	3.43
重度石漠化	-1.93	-1.04	-27.62	-15.67	5.99	13.08
石漠化合计	-31.93	-2.78	-108.66	-11.00	8.55	1.60

城县石漠化治理效果进一步增强;但在 2015—2021 年,恭城县石漠化呈小幅增加,主要来自中度和重度石漠化,其中重度石漠化动态变化幅度达到 13.08%,高于其他等级石漠化变化幅度。

2.1.2 石漠化转移过程分析

为揭示不同等级石漠化转移的方向和规模,对 5 期恭城县石漠化的转移矩阵进行了分析。结果显示(图 3),2000—2005 年,恭城县石漠化的转移方向主要表现为无石漠化向高等级石漠化转移,其中无石漠化向轻度和重度石漠化分别转移了 65.08 km² 和 65.12 km²,分别占该时期石漠化增加面积的 50.16% 和 50.19%,石漠化呈加剧趋势。2005—2015 年主要表现为轻度和中度石漠化向低等级石漠化转移,其中 2005—2010 年,轻度和中度石漠化向无石漠化分别转移了 24.89 km² 和 28.44 km²,2010—2015 年分别转移了 32.04 km² 和 39.67 km²,表明恭城县在 2015 年前实施的一系列措施极大改善了石漠化问题。2015—2021 年,恭城县石漠化表现为低等级和向高等级石漠化小幅转移,其中无石漠化向轻度、中度和重度石漠化共转移 32.48 km²,表明恭城县石漠化近 5 年呈现轻度恶化。

2.1.3 石漠化的空间分布特征分析

恭城县石漠化的空间分布呈现出南多北少,集

中连片于中部和西南部的峰丛洼地、岩溶峰林和岩溶缓丘平原等地区。研究时段内,西岭镇、莲花镇、平安镇是石漠化发生的主要地区,其面积占全县石漠化总面积的 55.47%~61.31%;尤其是西岭镇石漠化最为严重,占比达 23.27%~27.00%。从不同等级石漠化的空间分布来看,轻度石漠化主要分布在西岭镇南部、平安镇和嘉会镇的西部、恭城镇的东部和西部地区;中度和重度石漠化分布呈零星分布,相对集中在西岭镇南部地区,其中西岭镇重度石漠化占恭城县重度石漠化总面积的 29.78%~37.21%。从 2005—2015 年石漠化的演变过程来看,石漠化改善较为显著的地区主要在西岭镇、栗木镇、平安镇和嘉会镇;而在 2015—2021 年,石漠化面积出现一定程度恶化,集中分布在嘉会镇、栗木镇和平安镇;调查显示,这些地区过去由于长期种植桃、李等经济果林,近年来因产量下降,经济果林遭大面积砍伐,导致石漠化问题加剧。因此,恭城县石漠化治理应侧重对中西部地区开展整治(图 4,图 5)。

2.2 不同岩性区石漠化分布特征

岩性与石漠化的分布有密切关系。分析显示,2000—2021 年恭城县石漠化主要发生在灰岩区和白云岩与灰岩互层区(表 3),其面积分别占恭城县石漠化总面积的 71.42%~75.85% 和 16.96%~21.86%,其余岩性区发生石漠化的面积小于 12 km²。总体上,各

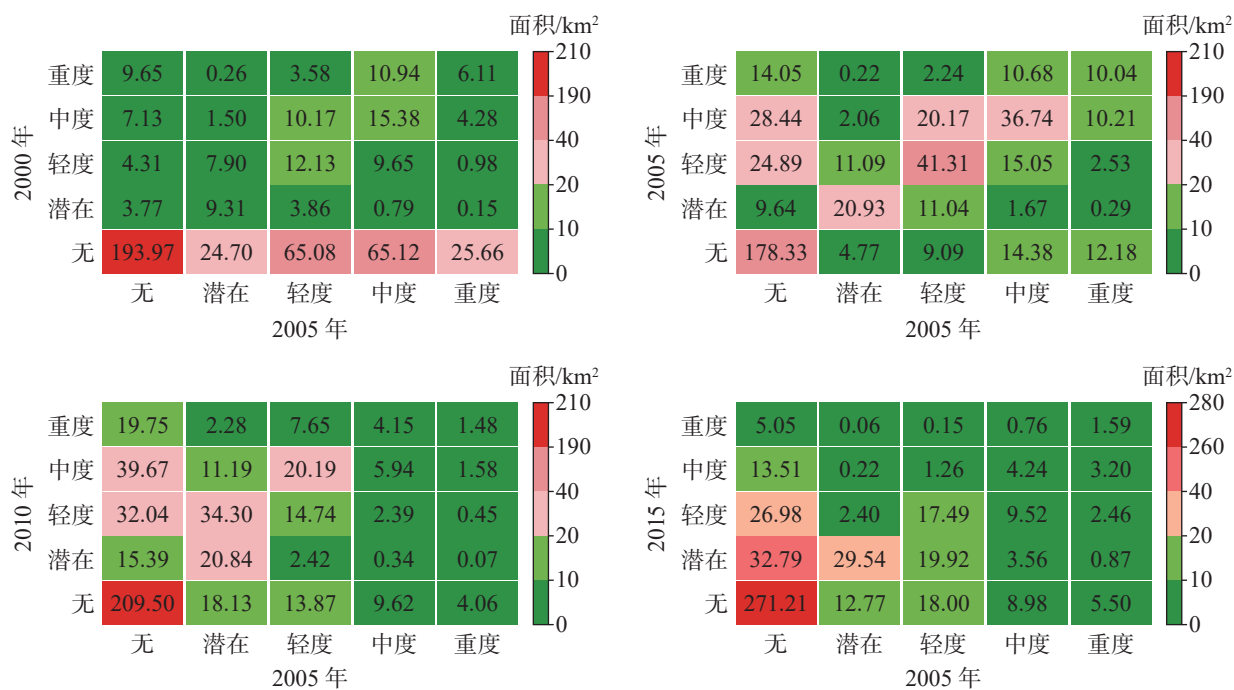


图 3 2000–2021 年恭城县不同石漠化等级转移矩阵图

Fig. 3 Transfer matrix of different rocky desertification grades in Gongcheng county from 2000 to 2021

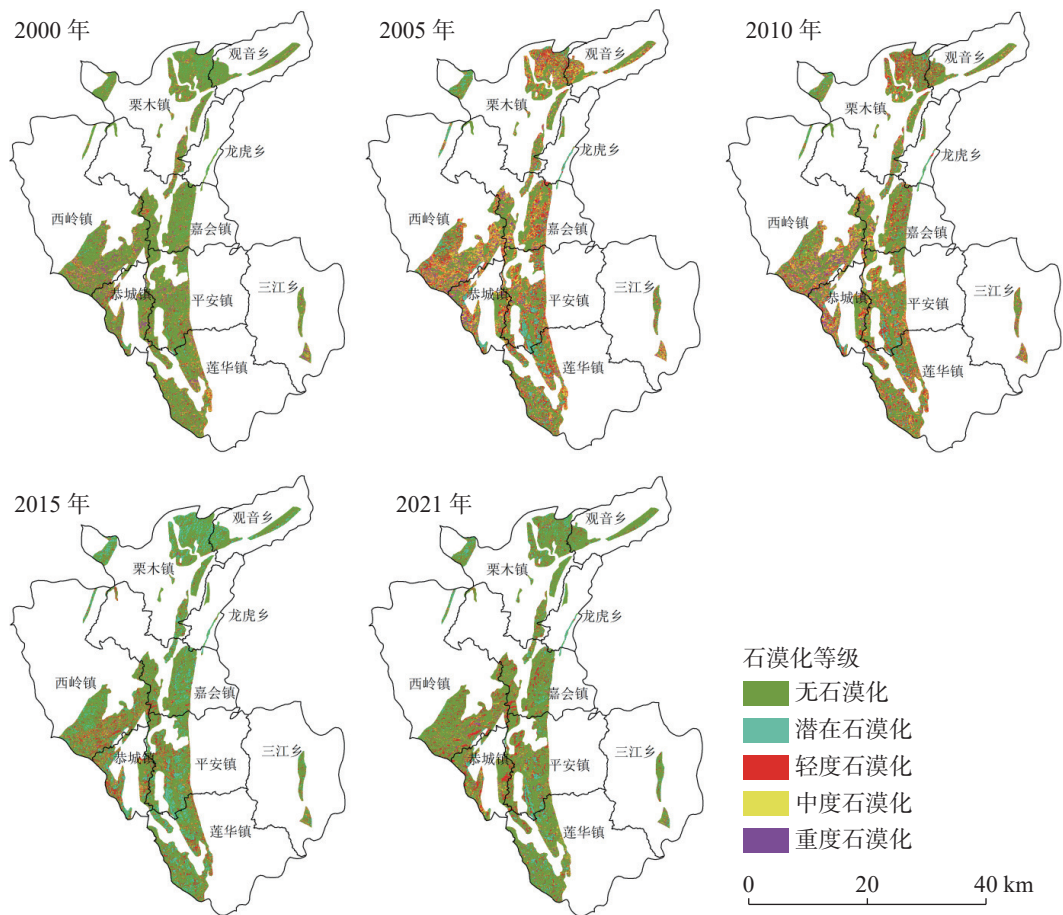


图 4 2000—2021 年恭城县石漠化分布图

Fig. 4 Distribution of rocky desertification in Gongcheng county from 2000 to 2021

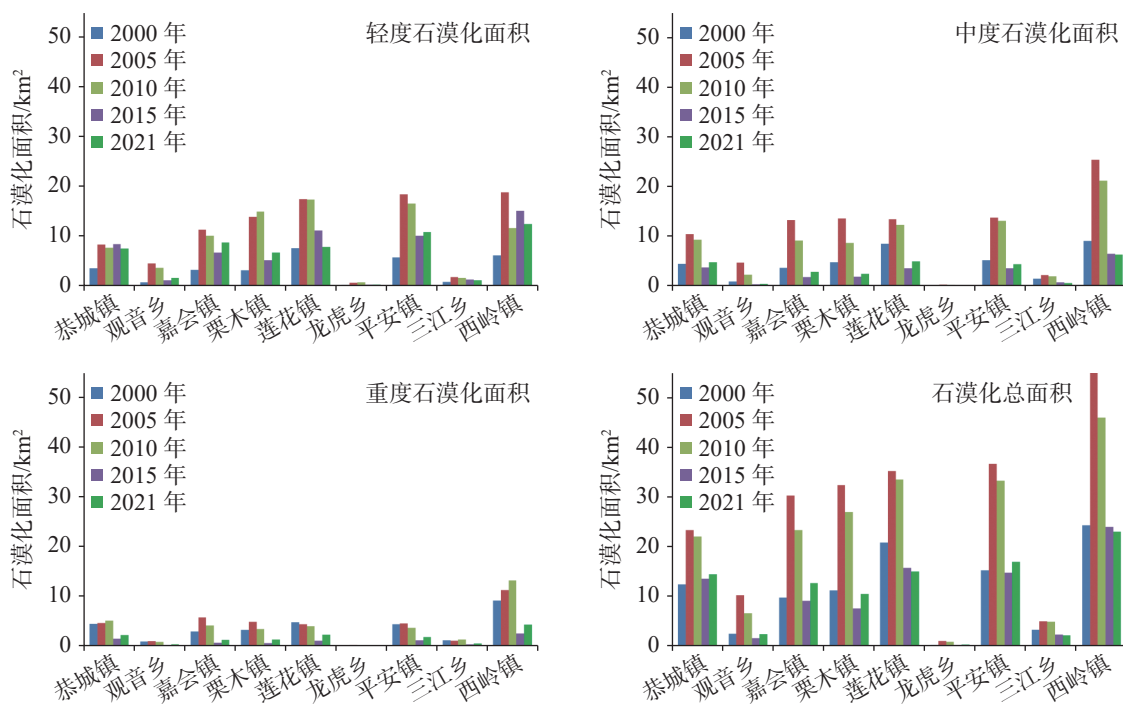


图 5 2000—2021 年恭城县各乡镇不同等级石漠化面积统计图

Fig. 5 Statistics of rocky desertification areas in different towns of Gongcheng county from 2000 to 2021

岩性区发育的石漠化主要以轻度为主,但灰岩区发生的轻度和重度石漠化面积最大,其中 2005 年石漠化较为严重时,灰岩区发生的中度石漠化面积为 72.17 km^2 ,占灰岩区石漠化总面积的 43.88%;随着石漠化治理的持续推进,2015—2021 年,灰岩区石漠化转变为轻度和潜在石漠化主导。除 2000 年外,白云岩与灰岩互层区发生的石漠化主要以轻度为主,但面积在 $5.96\sim 23.66 \text{ km}^2$,远低于灰岩区。

2.3 不同土地利用类型区石漠化分布特征

根据第二、三次国土调查数据与 2010 年、2021 年石漠化数据的叠加分析(表 4),发现恭城县石漠化主要分布在园地和灌木林地,其石漠化面积分别为 $35.03\sim 77.48 \text{ km}^2$ 和 $31.07\sim 61.60 \text{ km}^2$,分别占石漠化总面积的 35.92%~39.21% 和 31.7%~31.86%;其他土地类型区发生的石漠化面积占比均小于 10%,但灌木林地、草地和其他林地石漠化发生率均超过 20%。

从不同等级石漠化的分布特征来看,园地和耕地发生的石漠化主要以中度为主,在 2010 年分别占园地和耕地石漠化总面积的 44.11% 和 45.41%;虽然随着恭城县石漠化治理工程的推进总体有所改善,但在 2021 年园地和耕地发生石漠化的面积仍然较

高,表明耕地和园地内频繁的人为活动是石漠化加剧的主要原因。其他土地利用类型区发生的石漠化主要以轻度为主;在 2010 年,有林地、其他林地、灌木地和草地发生的轻度石漠化占各类型区石漠化总面积的比例都超过 51%,到 2021 年,该比例提升至 72% 以上,显示人为活动干扰较少的土地利用类型区,石漠化改善更为明显。

3 讨 论

本研究显示 2000—2021 年恭城县石漠化经历加速恶化、快速改善、缓慢恶化的演变阶段,其中 2005 年石漠化达到峰值后总体呈改善趋势,研究结果与西南其他地区石漠化演变特征基本一致^[20, 24-27]。上世纪 80 年代以来,恭城县开始探索生态立县的发展思路,并在 1995 年确立了“养殖—沼气—种植”三位一体的发展模式——“恭城模式”^[28-29],以月柿、柑橘、桃、李等水果种植业为核心的生态产业发展被逐步确立。2001 年,恭城县被列为国家可持续发展实验区,水果种植面积逐年扩大。统计数据显示,2000—2005 年,恭城县果园种植面积由 2.05 万 hm^2 增加至 2005 年的 2.58 万 hm^2 ,加之该时期石漠化治理处于探索阶段,人类活动频繁,石漠化呈日益加重

表 3 恭城县 2000—2021 年不同岩性区石漠化分布面积
Table 3 Distribution of rocky desertification in different lithologic areas in Gongcheng county from 2000 to 2021

岩性类型	年份	不同等级石漠化面积/km ²					石漠化面积/km ²
		无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化	
灰岩	2000	262.55	9.17	20.87	27.12	23.29	71.28
	2005	154.71	23.89	63.34	72.17	28.94	164.45
	2010	177.25	22.51	56.59	58.92	27.77	143.28
	2015	219.87	55.91	44.20	17.05	5.94	67.19
	2021	243.34	25.65	42.69	20.63	10.63	73.96
白云岩与灰岩互层	2000	84.65	6.28	5.96	8.06	5.40	19.42
	2005	48.88	11.25	23.66	19.84	6.69	50.19
	2010	61.19	9.81	18.62	14.49	6.18	39.29
	2015	73.96	21.34	9.96	3.84	1.28	15.09
	2021	81.76	11.82	10.35	4.27	2.20	16.82
灰岩夹白云岩	2000	23.63	2.07	2.92	1.84	1.48	6.23
	2005	13.37	7.23	6.37	3.82	1.22	11.41
	2010	14.53	5.51	6.87	3.96	1.12	11.94
	2015	19.06	7.95	3.49	1.11	0.32	4.92
	2021	20.80	6.02	3.23	1.32	0.57	5.12
碳酸盐岩夹碎屑岩	2000	1.53	0.24	0.01	0.00	0.00	0.02
	2005	0.49	1.00	0.23	0.02	0.00	0.25
	2010	0.75	0.77	0.24	0.02	0.00	0.26
	2015	0.87	0.83	0.08	0.00	0.00	0.08
	2021	0.56	1.13	0.10	0.00	0.00	0.10
碳酸盐岩与碎屑岩互层	2000	1.97	0.12	0.92	1.56	0.38	2.86
	2005	1.38	0.30	1.22	1.69	0.34	3.25
	2010	1.63	0.47	1.54	1.13	0.18	2.85
	2015	2.59	0.69	1.16	0.45	0.09	1.69
	2021	3.10	0.36	0.45	0.84	0.22	1.51

表 4 2010—2021 年恭城县不同土地利用类型区石漠化面积统计表
Table 4 Statistic of rocky desertification area in different land use types in Gongcheng county from 2010 to 2021

岩性类型	年份	不同等级石漠化面积/km ²					石漠化面积/km ²	石漠化发生率/%
		无石漠化	潜在石漠化	轻度石漠化	中度石漠化	重度石漠化		
耕地	2010	19.45	0.25	1.31	3.56	2.97	7.84	28.48
	2021	23.28	0.48	1.00	1.48	1.27	3.75	13.62
有林地	2010	17.81	12.91	11.23	4.90	1.48	17.60	36.42
	2021	22.66	14.88	7.97	2.29	0.67	10.93	22.54
灌木林地	2010	53.62	13.68	32.08	22.58	6.94	61.60	47.79
	2021	82.24	15.57	24.32	5.37	1.39	31.07	24.11
园地	2010	115.72	5.67	24.61	34.18	18.69	77.48	38.96
	2021	157.92	5.93	13.51	13.79	7.72	35.03	17.61
其他林地	2010	5.68	3.44	4.40	2.28	0.60	7.27	44.36
	2021	8.36	4.59	2.53	0.73	0.19	3.45	21.05
草地	2010	7.90	1.68	4.57	3.23	1.08	8.89	48.13
	2021	12.56	2.19	2.84	0.66	0.20	3.69	20.03
其他用地	2010	35.17	1.43	5.66	7.78	3.49	16.93	31.62
	2021	42.53	1.35	4.66	2.74	2.19	9.59	17.93

趋势。2008 年以后,石漠化综合治理一期和二期工程相继实施^[25,30],结合已有的珠江流域防护林、退耕还林还草等一系列工程措施和政策干预,石漠化治理效果逐步凸显,2015 年石漠化问题逐步改善,石漠化等级整体上由高等级向低等级转移,并表现为轻度石漠化为主,充分说明石漠化治理强力推动了恭城县区域生态环境重建。

2021 年恭城县石漠化呈现一定程度的恶化趋势,通过对该时期土地利用类型与石漠化数据叠加分析,发现园地是恭城县石漠化发生的主要土地利用类型区;统计数据显示,2017 年恭城县果园种植面积 3.25 万 hm^2 ,之后逐步下降至 2019 年的 2.17 万 hm^2 ,2 年内减少了 33.23%;同时,恭城县石漠化主要发生在纯灰岩区,而灰岩区果园面积达到 141.93 km^2 ,占恭城县喀斯特面积 28.85%,进一步揭示了纯灰岩区经济果林种植更易发生石漠化。这一结果与贵州等西南地区的研究一致^[31-32]。灰岩主要成分为可溶性极强的方解石,其含量越高,溶蚀作用越强;而且纯灰岩残留物极少,成土速率十分缓慢^[10,33]。苏维词^[33]认为,贵州灰岩区每形成 1 cm 厚的风化土层需要 4 000~8 500 年,较非岩溶区慢 10~80 倍。纯灰岩区土壤稀薄,且零星分布在石沟、石槽等负地形中,生态环境极为脆弱。过去二十年,恭城县开展石漠化治理和生态产业协调发展,在西岭镇、莲花镇、平安镇等纯灰岩地区种植了大量的桃、李等经济果林,但近年来经济果林产量持续下降,农户大量砍伐经济果林导致基岩裸露,石漠化加重。因此,恭城县应在西岭镇、莲花镇、平安镇等岩溶作用强烈的喀斯特地区及时实施生态环境治理工程,并考虑扩展岩溶适生植物种植,配套形成立体经济种植模式^[34-35],总体提升该地区岩溶生态系统稳定性,实现可持续发展实验区生态环境与区域社会经济协同发展。

4 结 论

本研究利用遥感影像提取的 2000—2021 年 5 期恭城县石漠化信息,并结合土地利用和碳酸盐岩数据,分析了恭城县石漠化的演化过程及其驱动机制。得出以下结论:

(1)恭城县石漠化主要经历了 2000—2005 年加速恶化、2005—2015 年快速改善和 2015—2021 年缓慢恶化三个阶段;2005 年石漠化面积达到峰值后

总体呈改善趋势;2005—2021 年,石漠化等级整体由高等级向低等级转移,轻度和潜在石漠化占恭城县石漠化总面积的比例逐年增加,表明恭城县石漠化总体趋于改善。

(2)恭城县石漠化在空间上呈现由北向南发展的格局,其中西岭镇的石漠化最为严重,其次为莲花镇和平安镇;在石漠化相对严重的 2005 和 2010 年,西岭镇石漠化主要以中度石漠化为主,其他年份轻度石漠化占主导。

(3)恭城县石漠化主要发生在灰岩区,尤其是灰岩岩性较为发育的果园地,主要原因是纯灰岩岩溶作用强烈、水土流失/漏失严重、成土物质及其速率先天不足;加上这些地区长期种植桃、李等单一经济果林,果树品质下降,大量果树近年来遭受砍伐,造成石漠化程度加剧。因此,后期应考虑在恭城县西岭镇、莲花镇和平安镇等岩溶发育地区,构建立体生态种植模式,推动生态产业、石漠化治理与社会经济协同持续发展。

参考文献

- [1] 孙新章. 国家可持续发展实验区建设的回顾与展望[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(1):10-15.
SUN Xinzhang. Retrospect and prospect of national sustainable development pilot zones[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(1):10-15.
- [2] 黎永生, 史绍亮, 吕旷, 彭小玉, 倪海明. 广西可持续发展实验区建设现状和发展前景[J]. 大众科技, 2018, 20(7): 150-153.
LI Yongsheng, SHI Shaoliang, LYU Kuang, PENG Xiaoyu, NI Haiming. The current situation and development prospects of experimentation area for sustainable development in Guangxi[J]. Popular Science & Technology, 2018, 20(7): 150-153.
- [3] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 李思楠, 苗培培. 滇东南喀斯特区域石漠化时空格局演变研究: 以广南县为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 707-717.
WANG Qian, ZHAO Xiaqing, PU Junwei, LI Sinan, MIAO Peipei. Study on temporal and spatial pattern evolution of karst rocky desertification region of southeast Yunnan: A case study of Guangnan county[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 707-717.
- [4] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132(1): 1-12.
- [5] 杨照, 朱明, 陈伟忠, 翟志芬, 孟蕾, 陈霞. 农业可持续发展现状与发展模式研究: 基于 44 个国家可持续发展实验区的数据[J]. 生态经济, 2018, 34(12): 54-57.
YANG Zhao, ZHU Ming, CHEN Weizhong, ZHAI Zhifen,

- MENG Lei, CHEN Xia, Research on the current situation and development model of agricultural sustainable development: Based on data from 44 national sustainable development pilot zones[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(12): 54-57.
- [6] 安和平, 李蓓, 王润成. 加快毕节国家可持续发展实验区生态安全屏障建设的思考[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21: 371-375.
- AN Heping, LI Bei, WANG Runcheng. Thoughts on accelerating the construction of ecological safety barrier in Bijie national sustainable development experimental zone[J]. *China population, Resources and Environment*, 2011, 21: 371-375..
- [7] 王贵辉, 史琳, 宋微. 中国可持续发展实验区建设展望[J]. *决策与信息*, 2019, 26(12): 73-79.
- WANG Guihui, SHI Lin, SONG Wei. Prospects for the construction of sustainable development experimental zone in China[J]. *Decision and Information*, 2019, 26(12): 73-79.
- [8] 曹建华, 袁道先, 童立强. 中国西南岩溶生态系统特征与石漠化综合治理对策[J]. *草业科学*, 2008, 25(9): 40-50.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, TONG Liqiang. Features of karst ecosystem and integrating measure for rock desertification in Southwest China[J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(9): 40-50.
- [9] 曹建华, 袁道先, 章程, 蒋忠诚. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. *地球与环境*, 2004, 32(1): 1-8.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng. Karst ecosystem constrained by geological conditions in Southwest China[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 1-8.
- [10] 李瑞玲, 王世杰, 周德全, 张殿发, 李凤全, 周忠发, 熊康宁. 贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 314-320.
- LI Ruiling, WANG Shijie, ZHOU Dequan, ZHANG Dianfa, LI Fengquan, ZHOU Zhongfa, XIONG Kangning. The correlation between rock desertification and lithology in karst area of Guizhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 314-320.
- [11] 张信宝, 王世杰, 白晓永, 陈伟燕, 张思屿. 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*, 2013, 41(1): 1-6.
- ZHANG Xinbao, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, CHEN Weiyan, ZHANG Siyu. Relationships between the spatial distribution of karst land desertification and geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(1): 1-6.
- [12] 王正雄, 蒋勇军, 张远瞩, 段世辉, 刘九缠, 曾泽, 曾思博. 基于GIS与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 1025-1039.
- WANG Zhengxiong, JIANG Yongjun, ZHANG Yuanzhu, DUAN Shihui, LIU Jiuchan, ZENG Ze, ZENG Sibao. Spatial distribution and driving factors of karst rocky desertification based on GIS and geodetectors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [13] 桂良英. 恭城瑶族自治县人居环境适宜性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- GUI Liangying. Suitability of human settlement in the Gongcheng Yao Autonomous County[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [14] 严春梅, 庞传伟, 唐小琴, 严启兴, 邓树荣. 1971—2020年恭城县气候变化特征分析[J]. *农业灾害研究*, 2021, 11(4): 28-30.
- YAN Chunmei, PANG Chuanwei, TANG Xiaoqin, YAN Qixing, DENG Shurong. Climate change characteristics analysis of Gongcheng county from 1971 to 2020[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2021, 11(4): 28-30.
- [15] 孙耀鹏, 周忠发, 赵宇鸾, 方敏, 吴跃. 喀斯特山区土地利用演变与石漠化分布格局[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(1): 311-318.
- SUN Yaopeng, ZHOU Zhongfa, ZHAO Yuluan, FANG Min, WU Yue. Evolution and distribution pattern of land use and rocky desertification in karst mountainous area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1): 311-318.
- [16] 吴跃, 周忠发, 赵馨, 但雨生, 黄登红. 基于遥感计算云平台高原山区植被覆盖时空演变研究: 以贵州省为例[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(2): 196-205.
- WU Yue, ZHOU Zhongfa, ZHAO Xin, DAN Yusheng, HUANG Denghong. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in plateau mountainous areas based on remote sensing cloud computing platform: A case study of Guizhou Province[J]. *Carso-logica Sinica*, 2020, 39(2): 196-205.
- [17] 徐红枫, 王妍, 刘云根, 肖羽芯, 黎舟. 基于Google Earth Engine的典型峰丛洼地石漠化时空演变与驱动因子分析: 以西畴县为例[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 407-414.
- XU Hongfeng, WANG Yan, LIU Yungen, XIAO Yuxin, LI Zhou. Analysis of the spatial and temporal evolution and driving factors of rocky desertification in typical cluster depression areas in the past 30 years based on Google Earth Engine: Taking Xichou county as an example[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 407-414.
- [18] 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.
- [19] 熊康宁, 黎平, 周忠发, 安裕伦, 吕涛, 蓝安军. 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: 30-39.
- [20] 宋同清, 彭晚霞, 杜虎, 王克林, 曾馥平. 中国西南喀斯特石漠化时空演变特征、发生机制与调控对策[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- SONG Tongqing, PENG Wanxia, DU Hu, WANG Kelin, ZENG Fuping. Occurrence, spatial-temporal dynamics and regulation strategies of karst rocky desertification in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [21] 蒋忠诚, 罗为群, 童立强, 程洋, 杨奇勇, 吴泽燕, 梁建宏. 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, CHENG Yang, YANG Qiyong, WU Zeyan, LIANG Jianhong. 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.
- [22] 史迎春, 舒英格. 喀斯特石漠化时空变化特征及驱动因子分析: 以贵州晴隆县为例[J]. 林业资源管理, 2017, 11(1): 135-143, 152.
- SHI Yingchun, SHU Yingge. Analysis on karst rocky desertification temporal and spatial variation characteristics and driving factors: A case study of Qinglong county of Guizhou Province[J]. Forest Resources Management, 2017, 11(1): 135-143, 152.
- [23] 田湘云, 张超, 陈棋, 史小蓉, 王妍. 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, 14(1): 61-69.
- TIAN Xiangyun, ZHANG Chao, CHEN Qi, SHI Xiaorong, WANG Yan. Influence of land use on landscape pattern evolution of rocky desertification in karst areas of Yunnan, China[J]. Forest Resources Management, 2022, 14(1): 61-69.
- [24] 罗旭玲, 王世杰, 白晓永, 谭秋, 冉晨, 陈欢, 习慧鹏, 陈飞, 操玥, 吴路华, 李汇文, 钟昕. 西南喀斯特地区石漠化时空演变过程分析[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 680-693.
- LUO Xuling, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, TAN Qiu, Ran Chen, CHEN Huan, XI Huipeng, CHEN Fei, CAO Yue, WU Luhua, LI Huiwen, ZHONG Xin. Analysis on the spatio-temporal evolution process of rocky desertification in southwest karst area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 680-693.
- [25] 余梦, 李阳兵, 罗光杰. 中国西南岩溶山地石漠化演变趋势[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4267-4283.
- YU Meng, LI Yangbing, LUO Guangjie. The evolution of karst rocky desertification in karst mountain, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4267-4283.
- [26] 刘威. 广西桂林市岩溶地区石漠化土地动态变化研究及预测[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- LIU Wei. Study and prediction on land dynamic change of karst rocky desertification in Guilin, Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [27] 朱柏露, 杨奇勇, 谢运球, 邓艳, 唐梅蓉, 刘大存, 曾红春. 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, DENG Yan, TANG Meirong, LIU Dachun, ZENG Hongchun. 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.
- [28] 周游游, 方德满, 周书祥, 蔡荣娟, 胡大胜. 岩溶丘陵区的生态农业模式、建设途径与效益分析: 以广西恭城县为例[J]. 中国岩溶, 2006, 25(3): 228-233.
- ZHOU Youyou, FANG Deman, ZHOU Shuxiang, CAI Rongjuan, HU Dasheng. Approaches for developing eco-agriculture and its benefits and models in karst hilly area: A case study in Gongcheng county, Guangxi[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(3): 228-233.
- [29] 谢雨萍. “恭城模式”对构建农村和谐社会的启示[J]. 社会科学家, 2005, 114(4): 55-57.
- XIE Yuping. The enlightenment of "Gongcheng Model" to the construction of rural harmonious society[J]. Social Scientist, 2005, 114(4): 55-57.
- [30] 但新球, 白建华, 吴协保, 吴照柏. 石漠化综合治理二期工程总体思路研究[J]. 中南林业调查规划, 2015, 34(3): 62-66.
- DAN Xinqiu, BAI Jianhua, WU Xiebao, WU Zhaobai. Research on the general idea of the second phase of the rocky desertification comprehensive treatment project[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2015, 34(3): 62-66.
- [31] 吕文丽. 地质环境对滇东南岩溶石漠化发育的影响[J]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- LYU Wenli. Influence of geological environment on the development of karst rocky desertification in southeast Yunnan Province[J]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2014.
- [32] 彭睿文, 罗娅, 陈起伟, 李永垚. 石漠化治理区小尺度土地利用变化及其驱动机制分析: 以花江石漠化治理区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 2073-2082.
- PENG Ruiwen, LUO Ya, CHEN Qiwei, LI Yongyao. Land use change and its driving mechanism in small-scale rocky desertification control area: Take the Huajiang rocky desertification control area as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(12): 2073-2082.
- [33] 苏维词. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- SU Weici. Controlling model for rocky desertification of karst mountainous region and its preventing strategy in southwest, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- [34] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 杨奇勇, 覃星铭, 喻崎雯. 广西岩溶区的水土流失特点及其防治[J]. 广西科学, 2018, 25(5): 449-455.
- JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, DENG Yan, YANG Qiyong, QIN Xingming, YU Qiwen. Features and treatment of soil erosion in karst areas of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5): 449-455.
- [35] 肖华, 熊康宁, 张浩, 张乾柱. 喀斯特石漠化治理模式研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 330-334.
- XIAO Hua, XIONG Kangning, ZHANG Hao, ZHANG Qianzhu. Research progress for karst rocky desertification control models[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(3): 330-334.

Study on spatiotemporal evolution of rocky desertification in the pilot zone for sustainable development: A case study of Gongcheng county

TU Chun^{1,2,3}, LUO Weiqun^{1,2,3}, JIANG Zhongcheng^{1,2,3}, LIU Shaohua^{1,2,3}, HU Zhaoxin^{1,2,3},
TANG Qingjia^{1,2,3}, WU Zeyan^{1,2,3}, ZHANG Biao¹

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/Institute of Karst Geology, CAGS, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Guizhou Transportation Planning Survey & Design Academe Co. Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract The karst area in Southwest China is an important region for the implementation of sustainable development strategies in China, as well as an area with extremely fragile ecological environment and concentrated distribution of rocky desertification. As a "National Pilot Zone for Sustainable Development" and "National Pilot Demonstration Zone for the Innovative Sustainable Development Agenda", Gongcheng Yao autonomous county of Guangxi is an important demonstration area for the coordinated development of karst landscape resource conservation and special ecological agriculture. Therefore, exploring the spatiotemporal evolution and the driving mechanism of rocky desertification in this area can provide an important scientific basis for the comprehensive management of rocky desertification, and the protection and restoration of karst ecosystem in China's pilot zones for sustainable development. Based on remote sensing images of Landsat series satellite from 2000, 2005, 2010, 2015, and 2021, this study extracted information on rocky desertification by the interpretation of human-computer interaction, and quantitatively analyzed the spatiotemporal evolution law of rocky desertification in Gongcheng county. Meanwhile, by combining data of carbonate rock and land use, this study revealed the inherent driving mechanisms of geological conditions and land use changes about the evolution of rocky desertification in Gongcheng county.

The study results show that the rocky desertification in Gongcheng county experienced three stages: accelerated deterioration from 2000 to 2005, rapid improvement from 2005 to 2015 and slow deterioration from 2015 to 2021. The total area of rocky desertification ranged from 88.96–229.55 km². From 2000 to 2005, the rocky desertification in Gongcheng county shifted from no rocky desertification to mild and intermediate rock desertification, and reversely, it showed improvement from 2005 to 2021. The rocky desertification presented a spatial pattern of development from north to south in Gongcheng county. Xiling town, Lianhua town and Ping'an town were the main areas where rocky desertification occurred, accounting for 55.47%–61.31% of the total rocky desertification area of the county. In 2005 and 2010, when the rocky desertification was relatively severe, it was mainly at a moderate level in Xiling town, while it was mainly at a mild level in other years. In addition, the rocky desertification of Gongcheng county mainly occurred in the limestone area, accounted for 71.42%–75.85% of the total rocky desertification area of this county. But the rocky desertification area in orchards and shrub land accounted for 35.92%–39.21% and 31.77%–31.86% of the county's total area, respectively. The study results indicate that there exist strong karstification, severe soil erosion/leakage, and insufficient materials and slow rates of soil forming due to the wide distribution of pure limestone in Gongcheng county. Besides, the long-term cultivation of single economic fruit forests such as peaches and plums in orchards has led to a decline in fruit tree quality, and a large number of fruit trees have been cut down in recent years, resulting in an exacerbation of rocky desertification. Therefore, the local authority in Gongcheng county should consider constructing three-dimensional ecological planting model in the karst areas such as Xiling town, Lianhua town and Ping'an town during the comprehensive treatment of rocky desertification, so as to promote the coordinated and sustainable development of ecological industry, rocky desertification control and social economy.

Key words Gongcheng county, rocky desertification, spatiotemporal evolution pattern, lithologic difference, land use type

(编辑 张 玲)