

黄丽芳, 覃星铭, 胡宝清, 等. 桂西南石漠化综合治理效益评价及其耦合协调关系[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 126-136, 208.

DOI: 10.11932/karst2023y028

# 桂西南石漠化综合治理效益评价及其耦合协调关系

黄丽芳<sup>1,2</sup>, 覃星铭<sup>1,3</sup>, 胡宝清<sup>1,2</sup>, 黄思敏<sup>1,2</sup>, 韦雯雯<sup>1</sup>,  
张礼黎<sup>1</sup>, 陈思琦<sup>1,2</sup>, 赖茹芸<sup>1,2</sup>, 陈汉唐<sup>1,2</sup>

(1. 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西南宁 530001; 2. 南宁师范大学地理科学与规划学院, 广西南宁 530001; 3. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西桂林 541004)

**摘要:**为探究国家启动石漠化综合治理试点工程以来的成效, 基于县域尺度, 通过构建指标体系综合评估2010、2015和2020年桂西南石漠化治理的生态、经济和社会效益变化情况, 并利用耦合协调度模型探究各县(区)石漠化治理效益间的耦合协调程度, 以解析影响耦合协调性提升的限制因素。结果表明: (1) 2010—2020年间桂西南石漠化治理效益指数排序为: 生态效益>社会效益>经济效益, 其中生态效益提升幅度最大, 社会效益缓慢增长, 经济效益提升速度有所降低, 总体呈良性发展态势; (2) 研究区石漠化治理成效状况存在差异, 西北部及中部区域保持较高生态效益, 而经济效益和社会效益较高值区主要分布在东南部“强首府战略”背景下的南宁市主城区及所辖宾阳县、横州市等区域; (3) “生态—经济—社会”效益三者耦合协调度均值在0.47~0.51之间, 处于濒临失调和勉强协调状态; 2020年各县(区)石漠化治理效益的耦合协调关系表现出不同程度的滞后现象, 经济、社会效益滞后是制约石漠化治理效益耦合协调提升的关键因子。在后续的石漠化治理中, 既要注重生态环境保护, 也要加快经济社会高质量发展。

**关键词:** 县域尺度; 石漠化治理效益; 耦合协调性; 限制因素; 桂西南

**创新点:** 从生态、经济、社会三重视角综合考量桂西南经过系列退耕还林、土地整治等石漠化治理成效, 并进一步探究了石漠化治理中生态保护和经济社会发展的协调状况。

中图分类号: K903 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)01-0126-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

石漠化是我国西南喀斯特地区重要的生态问题, 在喀斯特脆弱生境条件和人类不合理的经济活动叠加作用下表现出植被退化、基岩裸露、水土流失等一系列土地退化问题<sup>[1-3]</sup>, 其制约着区域社会发展, 受到国家、社会各界的广泛关注<sup>[4-5]</sup>。自国家“十

五”规划纲要明确提出“加快推进黔桂滇喀斯特石漠化的综合治理”以来, 石漠化治理被列为国家生态建设保护的重大项目。2008年国务院批复了《喀斯特地区石漠化综合治理规划大纲》(2006-2015年), 开展了第一期石漠化治理试点工程。为巩固一期工程成果, 2016年国家印发《喀斯特地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》(2016-2020), 进一

基金项目: 国家自然科学基金项目(42362031); 广西自然科学基金面上项目(2023GXNSFAA026440); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2021KY0388); 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金(KDL202104); 大学生创新训练项目(202210603070、3241)

第一作者简介: 黄丽芳(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事岩溶环境研究。E-mail: hlf123202204@163.com。

通信作者: 覃星铭(1983—), 男, 高级工程师, 硕士研究生导师, 主要从事岩溶水土研究。E-mail: qxm212@nnnu.edu.cn。

收稿日期: 2022-09-21

步开展石漠化治理工作。在国家政策支持下,各地在石漠化治理过程中探索出一系列治理模式并取得了阶段性成效<sup>[6-7]</sup>,如何对治理成效进行量化显得尤为重要<sup>[8-9]</sup>。国内专家学者对此展开了深入研究,研究内容上从生态效益<sup>[10-12]</sup>、经济效益<sup>[13-14]</sup>、社会效益<sup>[15]</sup>的单项研究转向治理效益的综合研究<sup>[16-17]</sup>,这些方面的效益需要通过若干不同指标来体现,其中生态效益的研究成果最多,涉及水土保持效益<sup>[18]</sup>、碳汇效益<sup>[19-20]</sup>、土地质量效益<sup>[21]</sup>等。其评价方法上多采用模糊综合评价法<sup>[22]</sup>、灰色关联度法<sup>[23]</sup>、TOPSIS 法<sup>[24]</sup>等,而工作区选择上以石漠化治理试点区为主,大部分研究集中于贵州省<sup>[25]</sup>、云南省<sup>[26]</sup>,而对桂西南地区的研究关注相对较少,且石漠化治理各效益间的耦合关系尚不清晰。总体而言,石漠化综合治理效益的评估进展相对滞后,目前尚未形成广泛认可的指标体系与量化方法,还需要探索成熟的综合评价指标与模型对治理成效进行科学评价。

由于受喀斯特地表—地下双层地质结构以及人类活动的双重影响,桂西南石漠化问题突出。在国家政策支持下,桂西南全面实施石漠化治理工程,统筹推进石漠化治理与脱贫攻坚。基于此,为客观评价桂西南石漠化治理成效,本文以县域为基本单元,

从生态、经济及社会视角构建石漠化综合治理效益评价指标体系,分析 2010、2015、2020 年桂西南各县(区)的石漠化治理成效状况,通过耦合协调度模型对生态、经济和社会效益进行耦合协调度测算,探究限制耦合协调性提升的影响因素,以为石漠化综合治理效益评价提供研究方法,为“十四五”期间石漠化综合治理政策和措施调整提供科学依据。

## 1 研究区概况

桂西南位于广西西南部、珠江中上游,涉及南宁市、百色市、崇左市,共 31 个县(市、区)(图 1),国土面积约 75 635 km<sup>2</sup>,其中喀斯特面积占 40% 左右。其地势由西北向东南降低,西靠云贵高原的伸延区,北接广西中部弧形山地,南靠十万大山。受南亚热带季风气候的影响,区域内降水较集中但分布不均,存在着明显的干湿季节。同时,受喀斯特地表—地下双层地质结构以及人类活动的影响,区域自然生态环境脆弱,旱涝灾害频发,水土流失和石漠化问题严重,社会经济发展相对滞后,属于“老、少、边、山、穷”区域。由于区域人口不断增加,人均耕地不足,土地产出率低,人地矛盾十分突出,普遍存在毁林开

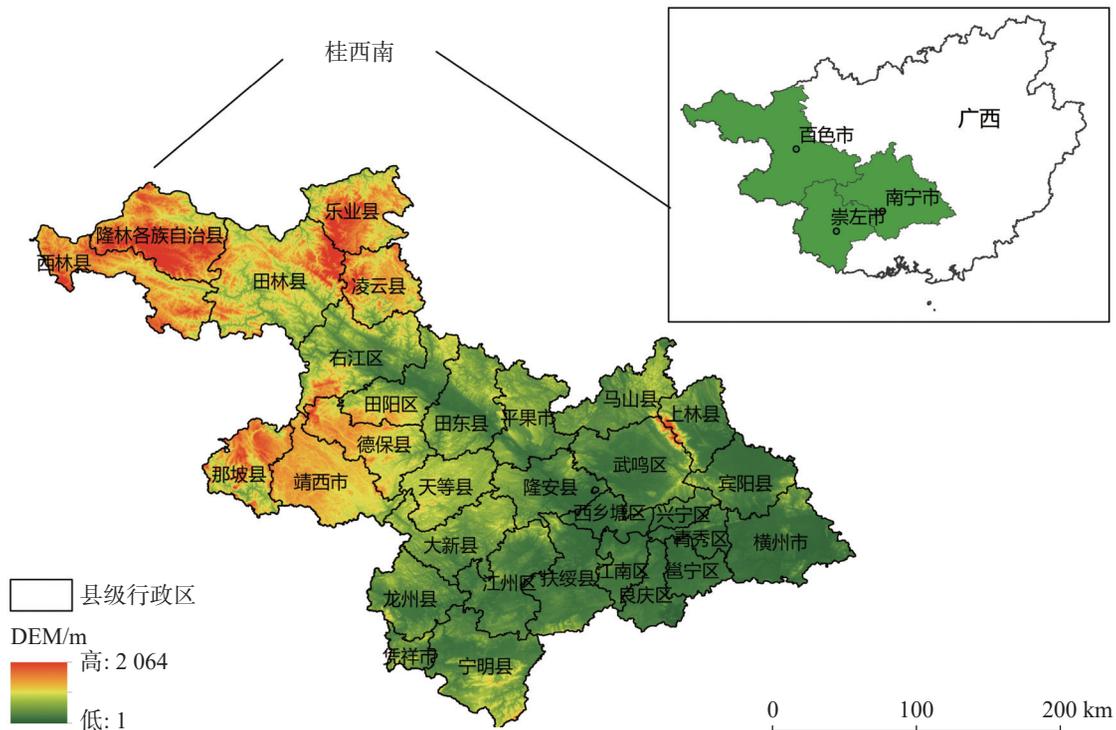


图 1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Geographical map of the study area

垦、过度樵采等破坏生态环境的行为。《广西壮族自治区喀斯特地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划》将研究区划定为桂西南峰丛洼地治理区,并从构建生态屏障、保护生物多样性、加大水土资源保护力度、提高水土资源综合利用能力等方面开展了石漠化综合治理工作。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

本文以桂西南 31 个县级行政区域作为基础研究单元,涉及的生态、经济、社会效益指标主要包括 2010、2015、2020 年的社会统计数据、多源遥感数据。社会统计数据均来源《广西统计年鉴》、《百色年鉴》、《南宁年鉴》、《崇左年鉴》、《中国统计年鉴》、《中国县域统计年鉴》;多源遥感数据来源于地理空间数据云、中国科学院资源环境科学与数据中心。通过插值法补齐个别数据缺失的情况。

### 2.2 评价指标构建

在总结前人已有研究成果基础上<sup>[27-28]</sup>,结合桂西南的实际情况,从生态、经济、社会 3 个层面构建桂西南石漠化综合治理效益指标体系,并通过熵值法计算指标权重(表 1)。其中,采用能表征固土保肥、光合作用、生物多样性保护等方面生态效益的植被覆盖度、植物净初级生产力、生物丰度指数、土地垦殖率、土地利用强度 5 个指标,阐述通过林草植被恢复和土壤治理后生态系统所产生的生态服务价值。选取人均 GDP、经济密度、农林牧渔业生产总值等 6 个指标,表示石漠化综合治理后农业结构的调整、土地利用率的变化等方面带来的单位收益和人均收入的变化等经济效益。社会效益层面选取农村居民可支配收入、公路密度等 6 个指标,阐述通过喀斯特环境开发治理,控制水土流失,改善当地的生态环境,加强当地基础设施建设,满足人民生活需求,促进当地社会发展状况。

### 2.3 分析指标

#### 2.3.1 无量纲化模型

因为不同数据的属性、量纲不同,不能直接应用<sup>[29]</sup>,因此采用无量纲化模型对其进行规范化处理,公式如下:

表 1 桂西南石漠化综合治理效益评价指标体系及权重  
Table 1 Evaluation index system and weight of comprehensive control of rocky desertification in southwest Guangxi

系统层	指标层	指标属性	权重
生态效益	植被覆盖度	+	0.1404
	植物净初级生产力	+	0.1864
	生物丰度指数	+	0.1860
	土地垦殖率	-	0.2029
	土地利用强度	+	0.2844
经济效益	人均GDP	+	0.1331
	经济密度	+	0.3096
	农林牧渔业生产总值	+	0.1035
	第一产业增加值	+	0.1036
	第二产业增加值	+	0.1386
	第三产业增加值	+	0.2089
社会效益	农村居民可支配收入	+	0.0748
	公路密度	+	0.0553
	居民储蓄存款	+	0.1276
	普通中小学生人口数	+	0.0906
	拥有医疗卫生床位数	+	0.2357
	社会消费品零售额	+	0.4160

$$\text{正向指标: } X'_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} + 0.0001 \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } X'_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} + 0.0001 \quad (2)$$

式中:  $X'_i$  为指标  $i$  的标准化值;  $X_i$  为指标  $i$  的初始值;  $X_{\min}$  为指标  $i$  的最小值;  $X_{\max}$  为指标  $i$  的最大值。

#### 2.3.2 综合评价指数

熵值法能有效判断所选取的指标对评价的影响程度<sup>[30]</sup>,因此采用熵值法确定权重,在此基础上通过综合评价指数计算桂西南 31 个县(区)的石漠化治理生态、经济及社会效益,通过 ArcGIS 的自然间断法将桂西南石漠化综合治理效益计算结果分为低值、较低值、中值、较高值、高值状态共 5 级,并进行可视化表达。计算公式如下:

$$W_j = \frac{1 - e_i}{\sum_{j=1}^n 1 - e_i} \quad (3)$$

$$U = \sum_{j=1}^n (W_j \times X'_{ij}) \quad (4)$$

式中:  $e_i = -\frac{1}{\ln \cdot m} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}$ ;  $P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}}$ ;  $W_i$  代表权

重;  $U$ 代表石漠化治理各效益;  $e_i$ 代表熵值;  $P_{ij}$ 是第  $j$ 项指标  $i$  样本占该指标的比重。

### 2.3.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型能反映不同系统之间的协调发展程度<sup>[31]</sup>,为探究石漠化治理中生态保护和经济社会发展的协调状况,本文引入耦合协调度模型对三个子系统的治理效益进行耦合协调分析,计算公示如下:

$$C = \left\{ \frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{[(U_1 + U_2 + U_3)/3]^3} \right\}^{1/3} \quad (5)$$

$$T = 1/3 \times U_1 + 1/3 \times U_2 + 1/3 \times U_3 \quad (6)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (7)$$

式中:  $C$ 为耦合度;  $T$ 为各子系统的综合协调指数;  $D$ 为耦合协调度。参考已有研究成果<sup>[32]</sup>,将石漠化治理“生态—经济—社会”效益耦合协调度( $D$ )的取值范围和等级评判标准进行划分(表 2):

表 2 耦合协调度等级划分  
Table 2 Grade division of coupling and coordination

取值范围	耦合协调度	取值范围	耦合协调度
$0.00 < D \leq 0.10$	极度失调	$0.50 < D \leq 0.60$	勉强协调
$0.10 < D \leq 0.20$	严重失调	$0.60 < D \leq 0.70$	初级协调
$0.20 < D \leq 0.30$	中度失调	$0.70 < D \leq 0.80$	中级协调
$0.30 < D \leq 0.40$	轻度失调	$0.80 < D \leq 0.90$	良好协调
$0.40 < D \leq 0.50$	濒临失调	$0.90 < D \leq 1.00$	优质协调

## 3 结果与分析

### 3.1 效益评价及时空变化特征

从图 2 中可知,桂西南石漠化治理效益总体上呈良性发展态势,但不同时期三种效益存在较大的差异。2010 年桂西南地区生态效益突出,经济效益次之,社会效益最低;2015—2020 年,生态治理成效依旧显著,社会效益在缓慢提升,表明自开展石漠化综合治理工程,区域生态、经济、社会状况均得到一定程度改善,尤其是生态环境得到明显改善,表明通过人工造林、退耕还林、生态补偿等多种综合治理举措并行,森林植被覆盖得到提升。相对来说经济效益的提升有所下降,表明石漠化治理成效还有很大的提升空间,在后续治理中应注意提高当地的经

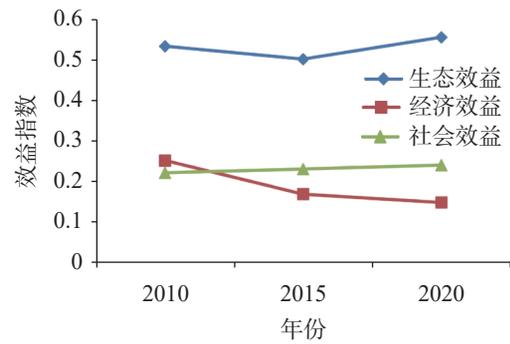


图 2 2010—2020 年桂西南石漠化治理效益变化趋势  
Fig. 2 Benefit variation of rocky desertification control in southwest Guangxi from 2010 to 2020

济水平。整体上,生态效益>社会效益>经济效益,生态成效较为明显。

#### 3.1.1 生态效益

2010—2020 年桂西南各县(区)生态环境得到不同程度的改善,在空间上总体呈现“西北部高、东南部低”的特征(图 3),西北部及中部区域的生态效益较东南部好。2010—2015 年,田东、田阳、平果、天等、马山等县(区)通过实施封山育林、草地建设、改良种畜等措施进行石漠化治理,缓解了当地的人地矛盾,生态效益处于中值区。2016—2020 年,那坡县、靖西市、德保县以及天等县、大新县、江州区、扶绥县治理区构建生态屏障,保护生物多样性,加大水土资源保护力度,提高水土资源综合利用能力,除江州区外其他县(区)的生态治理成效均处于较高值区。上林县、马山县、武鸣治理区通过加强水土流失治理,合理利用土地资源,推进农业综合产业开发,改善区域生态环境,但武鸣区的治理成效并不理想,这可能与城市发展有关。田阳区、田东县、平果市、隆林县、田林县、凌云县、乐业县治理区推进土地资源保护,配套农田基础设施,有效解决区域生产生活缺水问题,结合易地扶贫搬迁与扶贫产业开发,整体上取得的治理成效较好。平果市后期治理生态成效有所降低可能与强调铝产业相关工业发展有关。东南部由于城市化较高,生态环境本就脆弱,加之经济快速发展、工业化程度高、人口增长和城镇扩张,造成城市用地紧张、环境风险加剧等一系列问题,治理效益在短期内无法快速提升,其所带来的生态效益变化并不明显。整体上桂西南石漠化治理取得较好的生态成效,但也面临着石漠化治理成效维护困难等方面的严重挑战。

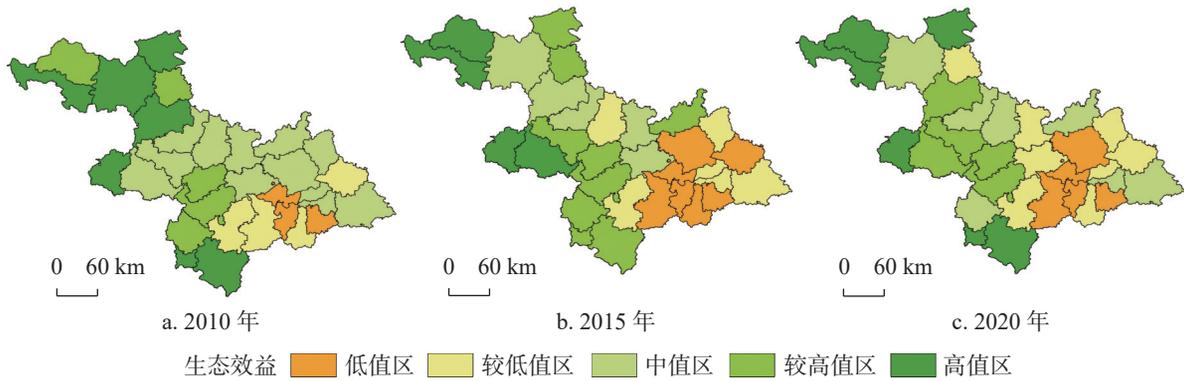


图3 2010—2020年桂西南石漠化治理生态效益空间格局演变

Fig. 3 Spatial evolution of ecological benefits of rocky desertification control in southwest Guangxi from 2010 to 2020

3.1.2 经济效益

2010—2020年桂西南石漠化治理经济效益提升整体上缓慢下降,呈“西北低、东南高”的空间分布格局(图4)。2010—2020年经济效益较高值以上主要分布在东南部“强战略首府”背景下的南宁县(区)附近,由于地理位置优越,基础设施完善,就业机会多,具有产业吸引优势,通过转移就业、异地搬迁、发展产业等治理措施,可为附近贫困地区提供就业机会,促进经济发展;相对来说南宁市的马山、上林、隆安的经济效益则相对较低,马山在石漠化治理过程中发展一系列药材、水果、经济林等基地,但所带来的经济成效并不理想,这可能与当地经济发展基础有关。位于西北部大石山区的西林、田林等县(区)长期处在经济效益低值区,在石漠化治理中西林县种植砂糖橘、板栗、花椒等经济作物,但由于地理位置、资源条件、交通等方面的限制导致经济发展以内驱为主,对外开放程度低,发展速度缓慢,经济收益提升不明显。田阳、平果、大新、宾阳、横州市等县(区)长期处于中水平经济发展状态,较西北部的

隆林、西林等县(区)经济状况稍好,在林业部等其他部门指导下,田阳县种植吊丝竹、平果市种植火龙果等经济价值较高的果树、崇左市种植珍贵树种、横州市发展茉莉花茶产业,林果业成为当地收入的有效途径。宾阳县建立八仙岩国家石漠公园、大新县打造德天瀑布旅游业,旅游业的发展增加了当地农民收入。位于西南部边境地区的龙州、凭祥、宁明县在2020年经济效益状况有所下降,这可能与2020年新冠疫情有关,其对当地农产品及经济林果对外销售、人员境外务工等产生一定影响。总体上,西北部区石漠化治理所带来的经济成效并不理想,改善这些低经济水平县(区)是提高桂西南喀斯特整体经济效益水平的关键。石漠化治理不仅是生态环境的治理,同时也是经济产业的调整和投资,通过利用喀斯特地区的特点和资源,推动喀斯特区衍生产业的发展。

3.1.3 社会效益

2010、2015、2020桂西南石漠化治理社会效益平均值分别为0.221、0.230、0.240,呈小幅增长趋势,

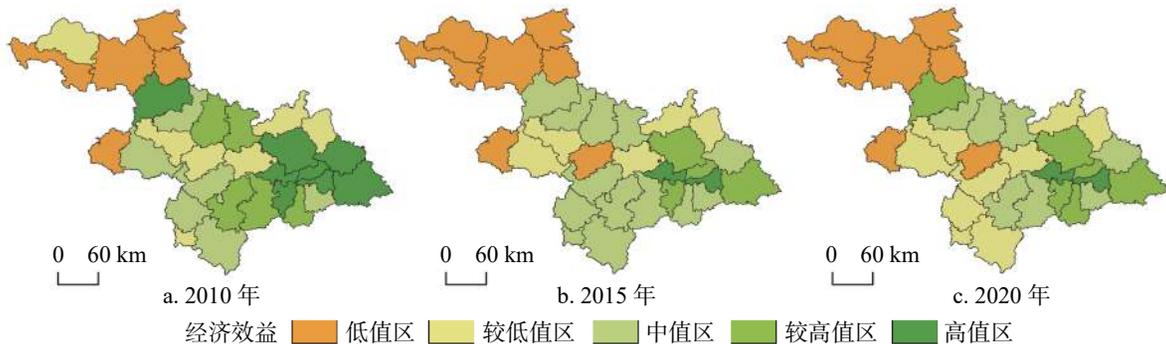


图4 2010—2020年桂西南石漠化治理经济效益空间格局演变

Fig. 4 Spatial evolution of economic benefits of rocky desertification control in southwest Guangxi from 2010 to 2020

说明石漠化治理提高了人民的生活水平。空间上呈现出“东南高、西北低”的分布特征(图5),2010年石漠化治理社会效益较高值区主要集中在南宁和百色的部分地区,如武鸣区、宾阳县、右江区等显著高于其他县(区),其余21个县(区)的社会效益处于中值及以下状态。2015年西部及中部县(区)的社会效益低值及较低值区面积扩大,由10个县(区)增至16个,德保县由较低社会效益状态转为低社会效益状态,凭祥、宁明、天等、隆安、马山、上林、田阳7个县(区)的社会效益由中值变为较低值区。2020年相对于2010年高值社会效益区域仍保持在高水平状态,而田林、德保两县由低社会效益转为较低社会效益状态。平果市长期处于中值社会效益状态,在治理中开展以坡改梯为主的土地整治、修建表层喀

斯特泉、改造田间道路、修建大量沼气池等,土地粮食产量提高,人民生活水平有所改善。总体上社会效益在缓慢增长,西北部社会状况改善明显、西南部稳定增长,其原因主要是在石漠化治理中,建设灌溉饮水和沼气池、修建道路等工程,解决了生产生活用水和能源问题,提高了交通运输业发展。林草植被等工程的实施,带动了林果业及畜牧业相关产业的发展,促进当地剩余劳动力就业。结合喀斯特资源发展旅游业等一系列措施,带动了当地特色产业、加工业、道路以及商贸物流的发展,使得人们的生活环境得到了很大程度的改善。但西北部个别县(区)治理的社会成效并不理想,这可能与自身区位条件封闭有关,后续需要优化西北部的治理措施。

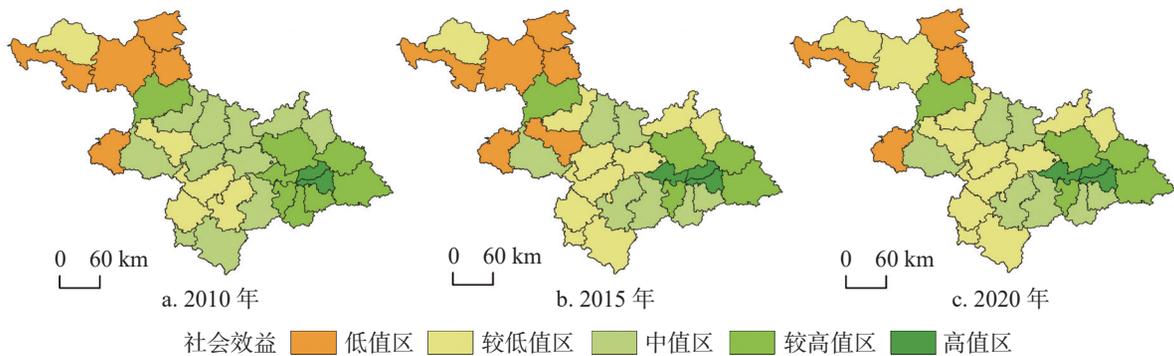


图5 2010—2020年桂西南石漠化治理社会效益空间格局演变

Fig. 5 Spatial evolution of social benefits of rocky desertification control in southwest Guangxi from 2010 to 2020

### 3.2 耦合协调关系变化

2010、2015、2020年桂西南石漠化治理效益耦合协调度均值分别为0.51、0.47、0.48,大体上呈先下降后缓慢上升趋势(图6),处于濒临失调和勉强协调状态。整体上石漠化治理中生态改善和经济、社会发展的协调度较差,各效益间的关系尚未达到合理协调优化,桂西南应充分考虑区域特征,加大调节力度,在坚持生态保护优先的同时推进经济社会发展,提升石漠化综合治理效益。

从区域差异看(图7),桂西南各县(区)耦合协调度以中度失调、勉强协调等7种状态为主,其研究区东南部石漠化治理效益耦合协调性优于西部区域,这与东南部经济社会发展水平较高有一定关系。2010年,西林县、乐业县等17个县(区)耦合协调度为失调状态,说明这些县(区)的生态环境治理状况

和经济、社会发展之间存在一定程度的相互制约关系,三者间的关系没有达到合理优质优化。而青秀区等14个县(区)耦合协调度呈现协调状态。2015年,靖西、田东、平果、宁明、扶绥、良庆7个县(区)耦合协调关系由勉强协调转为濒临失调状态,协调状态的县(区)在显著减少,这些县(区)由于地处大石山区,对外开放程度低,经济、社会效益提升不明显,加上石漠化生态治理周期长,其成果难以维护,使得耦合协调水平偏低。2020年,相对于2015年变化不大,仅个别县(区)耦合协调状态有所变化,良庆区、右江区分别向勉强协调及初级协调状态演化,协调发展势头好转,西乡塘区、青秀区仍处于中级协调、良好协调状态。总体上来说,石漠化治理中生态环境改善和经济社会发展尚未达到优质互动,仍需进一步探寻生态环境改善推动经济社会发展的

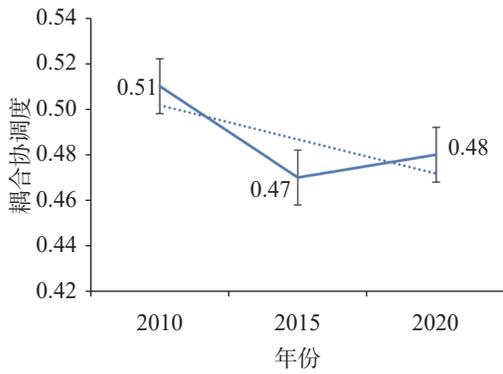


图6 2010—2020年桂西南石漠化治理“生态-经济-社会”效益耦合协调度变化

Fig. 6 Variation of the coupling and coordination degree of "ecological-economic-social" benefits of rocky desertification control in southwest Guangxi from 2010 to 2020

最佳路径, 提高耦合协调度低迷的局面, 从而获得生态效益、经济效益和社会效益的双赢。

### 3.3 耦合协调性提升的限制因素

以2020年为实证, 进一步识别影响各县(区)石漠化治理效益耦合协调性提升的限制因素。由表3可知, 桂西南石漠化治理效益耦合协调关系滞后类型划分为: 6个生态效益滞后型、13个经济社会效益滞后型、9个全面滞后型, 说明桂西南石漠化治理综合效益耦合协调关系主要受复合因素影响, 经济、社

会效益滞后是制约石漠化治理效益耦合协调提升的关键因子, 应注意加强利于经济、社会发展的治理措施。

#### 3.3.1 单一因素影响型

兴宁区、江南区、西乡塘区等6个县(区)属于生态效益滞后型县区, 其隶属于首府南宁市, 经济、社会发展迅速, 第二产业比例仍比较大, 生态环境脆弱。早期城市发展过程中吸引企业投资, 工业化、城市化发展, 人口增长, 创造巨大经济、社会效益的同时对区域的生态环境造成了巨大的影响, 环境问题凸显。尽管对环境进行了治理, 由于人口多治理难度大, 生态效益在短期内无法快速提升, 因而所带来的生态效益并不明显, 具体表现为植被覆盖率低、植物净初级生产力差。

#### 3.3.2 复合因素影响型

(1)经济、社会效益滞后分布范围最广, 集中分布在马山县、德保县、靖西市等13个县(区), 其中大部分地处桂西南西部边远地区, 喀斯特地貌发育, 水土资源调蓄能力差、交通等基础设施不完善等条件制约区域发展, 对外交流能力弱; 常年以老少人口居多, 以农耕为生, 依赖土地资源, 第二、三产业发展较

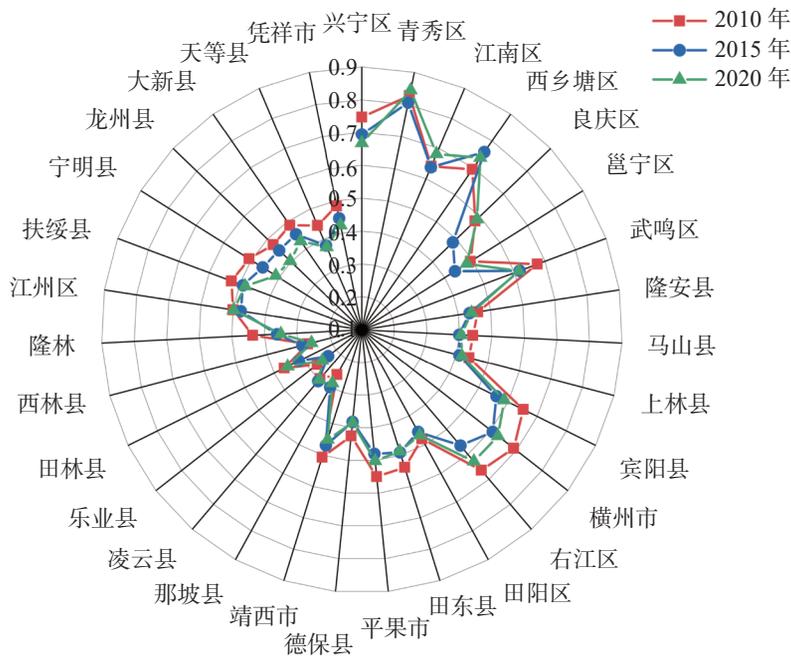


图7 桂西南各县(区)石漠化治理的“生态-经济-社会”效益耦合协调度

Fig. 7 Coupling and coordination degree of "ecological-economic-social" benefits of rocky desertification control in counties/districts of southwest Guangxi

表 3 桂西南石漠化治理各效益间耦合协调关系滞后类型划分  
Table 3 Classification of lagging types of coupling and coordination relationship among various benefits of rocky desertification control in southwest Guangxi

类型划分	影响因素	分类依据	2020年包含的区域
单一因素影响型	生态效益滞后	$U_1 < \bar{U}_1, U_2 > \bar{U}_2, U_3 > \bar{U}_3$	兴宁区、江南区、西乡塘区、良庆区、武鸣区、宾阳县
	经济、社会效益滞后	$U_1 > \bar{U}_1, U_2 < \bar{U}_2, U_3 < \bar{U}_3$	马山县、德保县、靖西市、那坡县、乐业县、田林县、西林县、隆林县、宁明县、龙州县、大新县、天等县、凭祥市
复合因素影响型	全面滞后	$U_1 < \bar{U}_1, U_2 < \bar{U}_2, U_3 < \bar{U}_3$	邕宁区、隆安县、上林县、田阳区、田东县、平果市、凌云县、江州区、扶绥县

注:  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  分别表示研究区相应年份石漠化治理的生态、经济、社会效益;  $\bar{U}_1$ 、 $\bar{U}_2$ 、 $\bar{U}_3$  分别表示研究区相应年份石漠化治理的生态、经济、社会效益平均值。

Note:  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  respectively represent the ecological, economic and social benefits of rocky desertification control in the corresponding years in the study area.  $\bar{U}_1$ 、 $\bar{U}_2$ 、 $\bar{U}_3$  respectively represent the average value of ecological, economic and social benefits of rocky desertification control in the corresponding years in the study area.

慢, 在经济发展受限制的同时也影响社会发展。

(2) 邕宁区、隆安县、上林县等 9 个县(区)属于全面滞后型。邕宁区虽隶属市区, 但其经济重心都在以青秀区为核心的区域, 产业吸引力度弱, 基础配套措施落后, 加强先前城市发展遗留下来的环境问题没有得到很好解决, 造成生态、经济、社会的落后。其他县(区)山地多平地少的自然条件在经济发展中并不占优势, 水土流失等生态问题又突出, 虽对石漠化进行治理, 但由于城市发展引发的其他问题, 整体上导致治理效益的提升不明显。

## 4 讨 论

石漠化综合治理是通过各项生物、工程等措施的实施达到改善当地生态环境和生产生活条件的目的。在国家大力推进西南喀斯特石漠化综合治理的背景下, 桂西南地区统筹推进林草植被保护和建设等重点任务, 其脆弱的自然环境得以改善, 经济社会得到发展, 人民生活水平得到提高。这与现有的研究结果相似, 其中王钰<sup>[33]</sup>通过调查统计对贵州省石漠化综合治理工程进行成效分析, 证明治理工程的实施在改善生态环境的同时, 有力地带动了区域经济社会发展。肖林颖等<sup>[34]</sup>研究中发现云南省建水县经石漠化综合治理后, 其生态、经济、社会及综合成效均呈出上升的趋势, 且存在正向可持续性。由此可见, 石漠化治理在改善生态环境的同时能促进经济、社会的发展。此外, 桂西南石漠化治理生态成效明显, 已有研究表明广西生态改善指数良好, 在林草植被等工程下广西石漠化问题得到改善<sup>[35]</sup>; 穆洪

晓<sup>[28]</sup>运用聚类等方法对云南省三光小流域进行效益评价中发现生态效益的提升最为显著, 表明国家启动石漠化治理工程有效遏制了水土流失等问题, 显著改善了当地的生态环境。随着可持续发展的建设步伐, 生态环境受到高度重视, 生态效益成为效益体系的主体, 而经济、社会效益会逐渐成为生态效益的补充和实现形式<sup>[22]</sup>。

针对各县(区)石漠化治理不同效益滞后型本文建议以下优化措施: 首先, 兴宁区等 6 个生态效益滞后型地区应当识别生态红线, 注重生态环境保护, 推进绿色清洁生产, 转化经济发展方式, 加强对生态环境治理的投入, 实现区域生态与经济协调可持续发展; 其次, 德保县等 13 个经济社会效益滞后型地区, 要加强对基础设施等要素的投入能力, 以区域服务功能提升兼顾居民收入水平提高为目标, 加强石漠化治理特色经济物种的选育, 充分利用当地的喀斯特资源重点发展有地域特色和市场需求的产业, 如喀斯特生态旅游、喀斯特山区特有中药材及绿色无公害农副产品的生产、加工、销售等, 以提升当地发展能力; 最后, 凌云县等 9 个全面滞后型地区应根据区域差异, 将生态修复工程与区域产业发展特色、生态产业等有机结合, 开展区域生态系统评估, 增强喀斯特生态系统服务功能, 增强地区可持续发展后劲。

桂西南石漠化治理虽取得一定成效, 但治理成果需要长时间检验, 而本研究时间尺度较短, 缺乏对更长时间序列进行探讨; 其次, 在权重确定上没有结合主观分析法, 仅使用客观的熵值法, 在后续

的研究中应加以注意。

## 5 结 论

(1)2010—2020年间桂西南石漠化治理效益指数排序为:生态效益>社会效益>经济效益,其中生态效益提升幅度最大,社会效益在缓慢增长,经济效益提升速度有所降低,总体上呈良性发展态势,区域生态环境、经济、社会状况得到一定程度改善。

(2)10年间桂西南各县(区)石漠化治理成效状况存在差异,西北部及中部区域保持较高的生态效益,而经济效益和社会效益较高值区则主要分布在东南部“强首府战略”背景下的南宁市主城区及所辖宾阳县、横州市等区域,石漠化治理效果还有很大提升空间,东南部区域应加强生态环境保护、西北部区域应提高经济社会发展水平。

(3)研究区内“生态—经济—社会”效益三者耦合协调度均值在0.47~0.51之间,处于濒临失调和勉强协调状态;2020年各县(区)石漠化治理效益的耦合协调关系表现出不同程度的滞后现象,经济、社会效益滞后是制约石漠化治理效益耦合协调提升的关键因子,在石漠化治理中经济、社会发展水平滞后于生态治理,在后续石漠化治理工作中,既要注重生态环境保护,也要加快经济、社会高质量发展。

## 参考文献

- [1] 邓艳,曹建华,蒋忠诚,周晓东,岳祥飞.西南岩溶石漠化综合治理水-土-植被关键技术进展与建议[J].中国岩溶,2016,35(5):476-485.  
DENG Yan, CAO Jianhua, JIANG Zhongcheng, ZHOU Xiaodong, YUE Xiangfei. Advancement in key technologies for comprehensive treatment of water, soil and vegetation resources in karst rocky desertification areas[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 476-485.
- [2] Ma Tianshu, Deng Xiangwen, Chen Liang, Xiang Wenhua. The soil properties and their effects on plant diversity in different degrees of rocky desertification[J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139667.
- [3] 陈彦君,赵筱青,普军伟,石小倩,冯严,周世杰.滇东南喀斯特山区石漠化程度与坡位因子的关联机制研究[J/OL].中国岩溶[2022-4-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.2022.0414.1805.002.html>.  
CHEN Yanjun, ZHAO Xiaqing, PU Junwei, SHI Xiaoqian, FENG Yan, ZHOU Shijie. Study on correlation mechanism between rocky desertification degree and slope position factors in karst mountainous area of southeast Yunnan[J]. Carsologica Sinica[2022-04-16]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.2022.0414.1805.002.html>.
- [4] 吴协保.继续推进岩溶地区石漠化综合治理二期工程的现实意义[J].中国岩溶,2016,35(5):469-475.  
WU Xiebao. Realistic significance of carrying forward the project phase II for comprehensive treatment of rocky desertification in China[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 469-475.
- [5] 王克林,岳跃民,陈洪松,吴协保,肖峻,祁向坤,张伟,杜虎.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.  
WANG Kelin, YUE Yuemin, CHEN Hongsong, WU Xiebao, XIAO Jun, QI Xiangkun, ZHANG Wei, DU Hu. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [6] 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].中国岩溶,2015,34(2):98-100.  
YUAN Daoxian. Scientific innovation in karst resources and environment research field of China[J]. Carsologica Sinica, 2015, 34(2): 98-100.
- [7] 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 21<sup>st</sup> century[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(5): 461-468.
- [8] 左太安,张凤太,于世杰,黎娇,樊昊,叶丹.中国岩溶地区石漠化贫困问题研究进展[J].中国岩溶,2022,41(6):915-927.  
ZUO Taian, ZHANG Fengtai, YU Shijie, LI Jiao, FAN Hao, YE Dan. A study on poverty caused by rocky desertification in karst areas of China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(6): 915-927.
- [9] 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 southwestern China: Achievements, problems, and countermeasures[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(1): 37-42.
- [10] Wu Zhigao, Zhu Dayun, Xiong Kangning, Wang Xingfu. Dynamics of landscape ecological quality based on benefit evaluation coupled with the rocky desertification control in South China karst[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108870.
- [11] Zhang Shiwen, Wang Yan, Wang Xuehua, Wu Yang, Li Chengrong, Zhang Chao, Yin Yuhang. Ecological quality evolution and its driving factors in Yunnan karst rocky desertification areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 16904.
- [12] 伏文兵,严友进,李华林,林桂桓,胡刚,黄朝海.岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(7):146-156.  
FU Wenbing, YAN Youjin, LI Hualin, LIN Zhihuan, HU Gang, HUANG Chaohai. Evaluation of ecological benefits of compre-

- hensive management of rocky desertification in karst trough valleys[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(7): 146-156.
- [13] Cheng Fang, Lu Hongfang, Ren Hai, Zhou Lang, Zhang Linhai, Li Jie, Lu Xingjiang, Huang Dewu, Zhao Dan. Integrated energy and economic evaluation of three typical rocky desertification control modes in karst areas of Guizhou Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1104-1128.
- [14] 庞娟, 冉瑞平. 石漠化综合治理促进了当地经济发展吗?: 基于广西县域面板数据的DID实证研究[J]. *资源科学*, 2019, 41(1): 196-206.
- PANG Juan, RAN Ruiping. Does the Rocky Desertification Control Project promote county economic development?: An empirical analysis based on DID methods using 88 counties' panel data of Guangxi[J]. *Resources Science*, 2019, 41(1): 196-206.
- [15] 程富东, 张曦, 戴全厚, 喻理飞, 粟海军, 梁家伟. 石漠化治理区社会经济效益定量评价: 以贵州省六枝特区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 24-28.
- CHENG Fudong, ZHANG Xi, DAI Quanhou, YU Lifei, SU Haijun, LIANG Jiawei. Quantitative evaluation of social and economic benefits in the rocky desertified management district: A case study in Liuzhi special region, Guizhou Province[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3): 24-28.
- [16] 施金谷. 毕节市石漠化综合治理效益评价与对策分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- SHI Jingu. Evaluation of the benefits and countermeasures of comprehensive rock desertification management in Bijie City[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [17] 程汉亭, 刘国道, 董荣书, 王晓敏, 李勤奋, 周小慧, 张显波. 基于果园牧草间作的石漠化综合治理效益评价: 以贵州省兴义市为例[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(2): 210-219.
- CHENG Hanting, LIU Guodao, DONG Rongshu, WANG Xiaomin, LI Qinfen, ZHOU Xiaohui, ZHANG Xianbo. Evaluation of rocky desertification comprehensive control based on orchard intercropped by herbage: A case study of the Xingyi City, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(2): 210-219.
- [18] 黑志辉. 云南石漠化小流域水土保持综合治理效益分析: 以官麦地小流域为例[J]. *环境生态学*, 2022, 4(8): 14-20.
- HEI Zhihui. Research of rocky desertification small watershed comprehensive management efficiency analysis in Yunnan: Taking Guanmaididi small watershed[J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(8): 14-20.
- [19] 曾发明, 吴泽燕, 章程, 杨奇勇. 峰丛洼地区石漠化治理的碳汇研究进展[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(1): 67-73.
- ZENG Faming, WU Zeyan, ZHANG Cheng, YANG Qiyong. Carbon sink in rocky desertification restoration, Southwest China: A case of the peak-cluster depression areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(1): 67-73.
- [20] 刘九缠, 孙玉川, 沈立成, 唐廉, 刘宇坤, 游贤慧. 石漠化治理对土壤中CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>变化特征及碳汇效应的影响[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(5): 733-741.
- LIU Jiuchan, SUN Yuchuan, SHEN Licheng, TANG Lian, LIU Ningkun, YOU Xianhui. Effects of rocky desertification control on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> variation and carbon sink in soil[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(5): 733-741.
- [21] 孙建, 刘子琦, 朱大运, 李渊, 李开萍, 王进. 石漠化治理区不同生态恢复模式土壤质量评价[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 222-228.
- SUN Jian, LIU Ziqi, ZHU Dayun, LI Yuan, LI Kaiping, WANG Jin. Evaluation on soil qualities of different ecological restoration models in rocky desertification control area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(5): 222-228.
- [22] 杜雪莲, 王世杰, 熊强辉, 彭韬, 程安云, 张林, 蔡先立. 基于模糊综合评价法的小流域喀斯特石漠化治理综合效益评价: 以贵州省普定县陈家寨小流域为例[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 586-593.
- DU Xuelian, WANG Shijie, XIONG Qianghui, PENG Tao, CHENG Anyun, ZHANG Lin, CAI Xianli. Evaluation on effect of small catchment comprehensive control in karst rocky desertification areas based on fuzzy comprehensive evaluation method: A case study of the Chenjiashai catchment in Puding county, Guizhou Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 586-593.
- [23] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 赵文君, 侯娜, 张喜. 喀斯特地区石漠化综合治理生态效益指标体系构建及评价: 以杠寨小流域为例[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(10): 95-101, 106.
- WU Peng, ZHU Jun, CUI Yingchun, ZHAO Wenjun, HOU Na, ZHANG Xi. Construction of eco-efficiency index system for preventing and controlling rocky desertification in Gangzhai karst small watershed, Kaiyang, Guizhou and system evaluation[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(10): 95-101, 106.
- [24] 丁新辉, 刘孝盈, 刘广全. 基于改进TOPSIS法的南方岩溶区石漠化生态治理模式评价[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(2): 54-58, 20.
- DING Xinhui, LIU Xiaoying, LIU Guangquan. Evaluation of rocky desertification ecological control technology in the southern karst area based on TOPSIS method[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(2): 54-58, 20.
- [25] 杨昌红, 马士彬, 高南, 杨雪萃. 基于NDVI喀斯特石漠化治理效果评价[J]. *安徽农学通报*, 2022, 28(3): 144-150.
- YANG Changhong, MA Shibin, GAO Nan, YANG Xuecui. Evaluation on the effect of karst rocky desertification control based on NDVI[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2022, 28(3): 144-150.
- [26] 赵磊磊, 雷艳娇, 陈俊松, 朱仕荣, 周建洪, 唐芳林, 蓝芙宁, 曹建华. 云南红河州石漠化演变过程及其综合治理成效[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(5): 704-712.
- ZHAO Leilei, LEI Yanjiao, CHEN Junsong, ZHU Shirong, ZHOU Jianhong, TANG Fanglin, LAN Fulin, CAO Jianhua. Evolution process and comprehensive control of rocky desertification in Honghe state, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5): 704-712.
- [27] 熊强辉. 喀斯特石漠化区综合治理效益评价[D]. 贵阳: 贵州财经大学, 2015.
- XIONG Qianghui. Evaluation of the benefits of integrated management of karst stone desertification areas[D]. Guizhou:

- Guizhou University of Finance & Economics, 2015.
- [28] 穆洪晓. 西南喀斯特地区石漠化综合治理效益评价及典型案例研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.  
MU Hongxiao. Evaluation of the benefits of integrated rock desertification management in southwestern karst areas and a typical case study[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019..
- [29] 张泽, 胡宝清, 丘海红, 邓雁菲. 桂西南喀斯特—北部湾海岸带生态环境脆弱性时空分异与驱动机制研究[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(3): 456-466.  
ZHANG Ze, HU Baoqing, QIU Haihong, DENG Yanfei. Spatio-temporal differentiation and driving mechanism of ecological environment vulnerability in southwest Guangxi karst-Beibu gulf coastal zone[J]. Journal of Geo-information Science, 2021, 23(3): 456-466.
- [30] 周作江, 周国华, 唐承丽, 陈绛. 环长株潭城市群土地集约利用时空演变研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 89-93.  
ZHOU Zuojiang, ZHOU Guohua, TANG Chengli, CHEN Jiang. Research on the spatial-temporal evolution of intensive land utilization for city group around Chang-Zhu-Tan City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 89-93.
- [31] 蔡勃伟, 邢祖哥, 周进, 黄耿志. 珠三角城市经济升级与社会升级的耦合协调关系及其影响因素[J]. 热带地理, 2022, 42(8): 1228-1240.  
CAI Bowei, XING Zuge, ZHOU Jin, HUANG Gengzhi. The coupling coordination relationship between economic upgrading and social upgrading in the cities of the Pearl River Delta and its influencing factors[J]. Tropical Geography, 2022, 42(8): 1228-1240.
- [32] 廖估慧, 彭贤伟, 王权, 简萍, 吴清婷. 海峡西岸城市群城市土地利用效益评价及其耦合协调关系研究[J]. 世界地理研究, 2021, 30(3): 556-566.  
LIAO Jihui, PENG Xianwei, WANG Quan, JIAN Ping, WU Qingting. Study on the coupling and coordination relationship of urban land use benefit in urban agglomeration on the west coast of Taiwan Strait[J]. World Regional Studies, 2021, 30(3): 556-566.
- [33] 王钰. 贵州省石漠化综合治理试点工程效益评价[J]. 中国水土保持, 2015(4): 57-59.  
WANG Yu. Evaluation on the benefit of the pilot project of comprehensive control of rocky desertification in Guizhou Province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(4): 57-59.
- [34] 肖林颖, 吴秀芹, 周金星, 肖桂英. 岩溶断陷盆地典型县域石漠化治理综合效益评价: 以云南建水县为例[J]. 地球学报, 2021, 42(3): 444-450.  
XIAO Linying, WU Xiuqin, ZHOU Jinxing, XIAO Guiying. Comprehensive benefit evaluation of rocky desertification control in the typical county of karst fault basin: A case study of Jianshui county, Yunnan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(3): 444-450.
- [35] 袁琳, 张雷. 治理“地球之癌”广西领先全国2005年以来石漠化土地面积净减84.6万公顷[J]. 广西林业, 2019(1): 3.

## Benefit evaluation of comprehensive control of rocky desertification in Southwest Guangxi and the coupling and coordination relationship

HUANG Lifang<sup>1,2</sup>, QIN Xingming<sup>1,3</sup>, HU Baoqing<sup>1,2</sup>, HUANG Simin<sup>1,2</sup>, WEI Wenwen<sup>1</sup>,  
ZHANG Lili<sup>1</sup>, CHEN Siqi<sup>1,2</sup>, LAI Ruyun<sup>1,2</sup>, CHEN Hantang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Resource Use in Beibu Gulf, Ministry of Education/Guangxi Key Laboratory of Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China; 2. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China; 3. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification of Ministry of Natural Resources, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Exploring the effectiveness of the pilot project on comprehensive control of rock desertification since its launch by China's government is of great significance for regional sustainable development. Jointly affected by the karst surface-underground geological structure and human activities, the natural ecological environment is fragile in southwest Guangxi, with frequent droughts and floods, severe soil erosion and rock desertification. Consequently, the socio-economic development in this region is relatively lagging behind. With the support of national policies, southwest Guangxi has been comprehensively carrying out projects of controlling rocky desertification, promoting the control of rocky desertification and poverty alleviation in a coordinated manner. According to "Thirteenth Five-Year Plan for Comprehensive Control of Rocky Desertification in Karst Areas of Guangxi Zhuang Autonomous Region", southwest Guangxi is designated as an area for the control of cluster-peak depression, in which comprehensive control of rocky desertification has been carried out in terms of building ecological barriers, protecting biodiversity, and promoting the protection and the comprehensive utilization of water and soil resources. In order to further investigate the effectiveness of controlling rocky desertification in cluster-peak depression of southwest Guangxi, this study

(下转第 208 页)

the physical exploration. Based on the correction of the data from the borehole, the parameter of geological radar,  $V$ , is taken to be  $0.060 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$  which is applicable to the study area.

The study results indicate that Biyun lake belongs to the oblique tectonic basin, where leakage points and underground river pipes are mainly developed close to the axis of the Babu compound oblique, along the lithological interface of three sections of greystone and the second section of the mudstone of Jialingjiang Group. The mudstone constitutes a water separating plate of the karst leakage zone. After lake water seeps along the zone, it flows northwest, and is discharged in the end at the outlet of the Babu underground river. In addition, the leakage of Biyun lake is mainly of the karst pipeline type. The karst leakage zone is located at the measuring point of 540 m, with a 40-meter-deep of karst pipeline; therefore, the leakage section is relatively narrow, and it is feasible to plug the leakage by grouting. The drilling test results confirm the reliability of the technical method used in karst areas, which is combined by hydrogeological investigation, tracer test and physical exploration, because this method can well determine the direction of the leakage channel and the location of the leakage zone, and thus providing guidance on the leakage control of lakes or reservoirs in karst areas.

**Key words** Biyun lake, karst leakage, hydrogeology, leakage channel, geophysical exploration technology

(编辑 张玲)

(上接第 136 页)

constructed an index system for evaluating the benefit of rocky desertification control from ecological, economic and social perspectives, and analyzed the effectiveness of the control in each county/district of southwest Guangxi in 2010, 2015 and 2020 by this index system.

The results show that, (1) Benefit indexes of rocky desertification control in southwest Guangxi during 2010–2020 are ranked as follows: ecological benefit > social benefit > economic benefit. Among these indexes, the ecological benefit increased the most; social benefit grew slowly; economic benefit increased at a lower rate. The regional ecological environment and socio-economic conditions have been improved to a certain extent, showing overall benign development. (2) Counties/districts of southwest Guangxi have experienced differences in the effectiveness of rocky desertification control over the past 10 years. The northwestern and central regions have been maintaining high ecological benefits, while the areas with high economic and social benefits are mainly located in the main urban area of Nanning City and the areas under the jurisdiction of Binyang county and Hengzhou City in the southeast under the context of the "strong capital strategy", indicating that there is still much room for improvement in the effectiveness of rocky desertification control. As a result, the southeastern region should strengthen ecological and environmental protection, while the northwestern region should improve its socio-economic development. (3) The average values of the coupling and coordination degree of "ecological–economic–social" benefits are between 0.47 and 0.51, which is on the verge of disorder and barely coordinated state. The coupling and coordination relationship among the benefits of rocky desertification control in each county/district in 2020 showed lagged effects in different degrees, and the lagged economic and social benefits are the key factors limiting the effects of rocky desertification control. This indicates that the level of socio-economic development lags behind ecological governance in the control of rocky desertification. In the subsequent control of rocky desertification, it is necessary for us to focus on ecological and environmental protection and to accelerate high-quality socio-economic development as well.

**Key words** at a scale of county/district, benefits of rocky desertification control, coupling and coordination, limiting factor, southwest Guangxi

(编辑 黄晨晖)