

# 喀斯特石漠化生态治理技术集成及其多尺度综合配置

柯奇画<sup>1</sup>, 张科利<sup>1</sup>, 王爱娟<sup>2</sup>, 何江湖<sup>1</sup>, 张思琪<sup>1</sup>

(1.北京师范大学 地理科学学部 地理学院 地表过程与资源生态  
国家重点实验室, 北京 100875; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100055)

**摘要:** [目的] 构建石漠化治理技术库体系及其综合配置方法, 旨在为今后石漠化治理提供参考依据。[方法] 通过查阅大量文献资料, 以水土保持综合治理为导向, 对现有石漠化治理技术和模式进行系统总结。[结果] 构建了一个能满足不同石漠化土地类型和不同尺度石漠化治理需要的石漠化治理技术库体系。并提出了一套可在不同治理背景下快速筛选和多尺度优化配置石漠化治理技术的方法。此外, 还对一些石漠化治理相关的重要概念进行了厘清和界定。[结论] 新时代的石漠化治理是一条将石漠化治理融入地区绿色高质量发展, 以高质量生态建设保障高质量发展的道路。因此, 石漠化治理没有万能公式, 任何方案均需结合治理区的立地条件和区域社会经济条件来确定和细化。

**关键词:** 石漠化治理; 治理技术库; 喀斯特地区; 技术配置; 不同空间尺度

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2021)06-0237-12

**中图分类号:** X171.1, S157.1

**文献参数:** 柯奇画, 张科利, 王爱娟, 等. 喀斯特石漠化生态治理技术集成及其多尺度综合配置[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 237-248. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.031; Ke Qihua, Zhang Keli, Wang Aijuan, et al. Database construction and multi-scale integrated arrangement of eco-technology for combating karst rocky desertification [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 237-248.

## Database Construction and Multi-scale Integrated Arrangement of Eco-technology for Combating Karst Rocky Desertification

Ke Qihua<sup>1</sup>, Zhang Keli<sup>1</sup>, Wang Aijuan<sup>2</sup>, He Jianghu<sup>1</sup>, Zhang Siqi<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China)

**Abstract:** [Objective] A database and an arrangement strategy of rocky desertification control technologies were constructed to provide references for the future control of karst rocky desertification. [Methods] Based on a large number of references, and followed the orientation of soil and water conservation, the existing techniques and modes for rocky desertification combating were systematically summarized. [Results] A database system for rocky desertification control technologies, which met the need of control at different land types and at different scales, was constructed. Furthermore, a set of methods for fast selection and multi-scale arrangement of optimal technologies under different control backgrounds were proposed. Meanwhile, some vital concepts related to rocky desertification control were clarified. [Conclusion] Rocky desertification control in the new era is a path to integrate rocky desertification control into regional green development, and to ensure high-quality development with high-quality ecological construction. Thus there is no universal formula for rocky desertification control, and any control scheme should be determined and refined based on the site conditions and regional socio-economic conditions of the target area.

**Keywords:** rocky desertification control; eco-technology database; karst region; treatment arrangement; different spatial scales

收稿日期: 2021-08-10

修回日期: 2021-09-06

**资助项目:** 国家自然科学基金重点项目“西南黄壤区不同尺度土壤侵蚀与泥沙运移规律耦合关系”(41730748); 国家重点研发计划项目“生态治理与生态文明建设生态技术筛选、配置与试验示范”(2016YFC0503705); 国家重点研发计划项目“近年来国家重大生态工程关键技术评估”(2016YFC0503704)

**第一作者:** 柯奇画(1993—), 女(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: qihuake@mail.bnu.edu.cn。

**通讯作者:** 张科利(1962—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀相关研究。Email: keli@bnu.edu.cn。

广义石漠化类型中,当属喀斯特石漠化分布最广,对区域内外乃至整个国家可持续发展的影响最大,引起的关注最多。而无论是从全球范围,还是从中国的情况来看,中国西南地区都是喀斯特面积最大、喀斯特地貌发育最强烈、石漠化问题最严重的地区,也是研究和防治石漠化的重点区域<sup>[1]</sup>。喀斯特石漠化,是指在脆弱的喀斯特生态系统中,人类不合理活动干扰引起植被破坏、水土流失,基岩大面积裸露或地表石砾堆积的土地退化现象和过程<sup>[2]</sup>。由此可见,石漠化的本质是地表植被破坏后水土流失长期作用的结果,水土流失是石漠化过程中某一阶段作用强度的体现,二者在成因上存在因果关系<sup>[3]</sup>。因此,石漠化治理的核心是土地石漠化地区的水土流失的治理,而从水土保持角度把握石漠化治理的方向则尤为重要。

石漠化治理是一个非常复杂的国际性的难题。其中,国外喀斯特石漠化地区的人口负担和经济压力较轻,石漠化问题并未引起广泛关注,针对石漠化治理的技术成果报道几乎没有。国外喀斯特地区的生态治理并非以石漠化治理为中心,而是关注对喀斯特景观资源和生态系统的保护<sup>[4-5]</sup>。例如,在美国<sup>[6]</sup>、英国<sup>[7]</sup>、意大利<sup>[8]</sup>、挪威<sup>[9]</sup>、斯洛文尼亚<sup>[10]</sup>、菲律宾<sup>[11]</sup>和伯利兹等<sup>[12]</sup>国家,喀斯特地区的生态治理多从政策和管理的层面上强调减少人类干扰和对生态系统和自然资源的保护,主要包括建立保护区进行自然封育<sup>[13]</sup>、对喀斯特洞穴<sup>[14]</sup>、地下水资源<sup>[15]</sup>和生物多样性<sup>[16]</sup>的保护,以及发展生态旅游业等<sup>[17]</sup>策略。而中国西南喀斯特地区人地矛盾突出,在“人多钱少、山多地少、石多土少”的背景下,石漠化治理需求紧迫、难度大、任务重,引起国内学术界和国家政府的高度重视<sup>[1]</sup>。自 1989 年以来,中国就西南喀斯特区石漠化相关问题开展了诸多工作,先后实施了长珠防护林建设<sup>[18-19]</sup>、天然林保护<sup>[20]</sup>、退耕还林(草)等<sup>[21]</sup>林业重点生态工程、异地扶贫搬迁<sup>[22]</sup>、石漠化综合治理工程<sup>[23]</sup>、坡耕地水土流失综合治理试点工程等<sup>[24]</sup>一系列国家重大生态工程,从不同角度对喀斯特石漠化进行治理。经过几十年的不断探索和实践,中国科研人员 and 广大喀斯特地区干部群众已经积累了大量的石漠化治理技术和方法<sup>[25-31]</sup>。在国际专利检索分析平台 INNOGRAPHY 上对喀斯特石漠化地区生态治理技术和模式的发明专利进行了搜索和统计。结果显示,2003—2020 年期间,全球针对石漠化地区生态环境问题公开的中英文发明专利共有 447 项,且均为中国专利。由此可见,中国不仅在石漠化研究中处于领先地位<sup>[32]</sup>,还在全球石漠化生态治理技术和模式的研发中起着中流砥柱的重要作用。但针对石漠化

治理技术目前依然缺乏全面系统的总结,适用于不同治理背景下的石漠化治理技术配置体系也尚未确立,这将严重影响治理措施配置效益的发挥和后续治理质量的提高。而且最新监测结果显示<sup>[33]</sup>,中国喀斯特地区生态状况依然十分脆弱,石漠化防治形势仍很严峻,防治工作任重道远。因此,构建全面、系统、能适应不同治理需要的石漠化治理技术库,形成适用于不同治理背景下的石漠化治理技术配置体系,对于提高石漠化治理成效、推动中国生态文明建设和绿色高质量发展具有重要意义。

## 1 石漠化治理重要概念和范畴的界定

无论是构建系统、科学的石漠化生态治理技术库体系,还是针对石漠化地区生态治理提出有效的技术配置建议,首先都需要明确相关的概念和范畴。

### 1.1 石漠化地区的生态治理与石漠化生态治理

石漠化地区的生态治理(ecological restoration in rocky desertification region)是指针对石漠化地区的生态环境问题的治理,包括水土流失治理、石漠化治理、地面塌陷防治、大气污染治理、地下水污染的治理、生物多样性保护、绿色生产、垃圾处理等<sup>[4]</sup>。

石漠化生态治理(eco-control of rocky desertification)是针对石漠化问题的治理,也称石漠化治理,是石漠化地区生态重建的基础。石漠化生态治理的直接途径主要有水土保持(包括植被恢复、坡改梯等)、水利建设与水资源开发、土地复垦等,间接途径则包括农村能源结构调整、生态移民和产业升级等<sup>[34]</sup>。

### 1.2 石漠化生态治理技术、措施、模式、范式、样板、策略

石漠化生态治理技术(rocky desertification control eco-technology)也称石漠化治理技术,指的是有关石漠化治理的各种方法和手段,如根灌技术<sup>[35]</sup>、籐冠技术<sup>[36]</sup>、苔藓—石斛—桑树生态系统治理技术<sup>[37]</sup>。

石漠化治理措施(rocky desertification control measure)是对某类石漠化治理技术的总称,如生物措施、工程措施和耕作措施<sup>[38]</sup>。

石漠化治理模式(rocky desertification control mode)是对多种石漠化治理技术的组合和配置,如广西马山弄拉的“山顶封,山坡林、竹、药,山脚果、药、草,地上粮,低洼桑”的立体复合农林模式<sup>[39]</sup>。

石漠化治理范式(rocky desertification control pattern)是对同类石漠化治理模式的高度总结,如林下经济<sup>[40]</sup>、“种—养—沼/肥”循环经济<sup>[41]</sup>。

石漠化治理样板 (rocky desertification control model) 指某种治理模式在某一地区的应用获得了成功,成为某地区石漠化治理的推广示范典型,如贵州的“顶坛模式”<sup>[42]</sup>,广西的“古周模式”等<sup>[43]</sup>。

石漠化治理策略 (rocky desertification control strategy) 指采取一些政策上的、管理上的措施来治理石漠化,如生态移民<sup>[44]</sup>、全面封禁<sup>[45]</sup>。

## 2 石漠化生态治理技术库的构建

### 2.1 资料来源

本研究石漠化生态治理技术库构建所用的背景资料来源广泛,包括:713 篇与石漠化地区生态治理相关的期刊、会议、学位论文、报纸和科技成果等形式的文献,15 本相关图书<sup>[46-60]</sup>,8 项行业或国家标准、规范和规程<sup>[61-68]</sup>,8 项石漠化地区发展与生态治理相关的规划<sup>[69-76]</sup>;加之前述的 447 项相关专利,各类相关资料共计 1 191 项。其中,文献数据来源于国内外六大权威期刊论文数据库,中文数据库包括知网、万方和维普,英文数据库则包括 Web of Science,Elsevier SD 和 Engineering Village。通过高级检索式,对每个数据库中与石漠化治理技术有关的文献进行了检索,检索日期为 2020 年 1 月 6 日。其中,以知网为例的检索式为:TI=(‘石漠化 /NEAR 5 治理’) AND TKA=(‘技术’+‘措施’+‘模式’+‘对策’+‘经验’)。由于检索的目的是收集与石漠化治理方法有关的资料,因此在下载文献时排除了与治理技术模式无关的部分文献。

### 2.2 构建思路

(1) 以水土资源为核心。水和土是人类赖以生存的物质基础。土壤侵蚀造成水土流失,是当今世界面临的主要环境问题之一<sup>[77]</sup>。在本就缺水少土的西南喀斯特地区,水土资源的流失是导致石漠化的直接原因<sup>[78]</sup>。因此,石漠化治理技术库的构建应围绕水土资源保持和水土资源保护为核心来展开。其中,水土资源保持技术是以水土保持的 3 大措施<sup>[38]</sup>(即生物措施、工程措施和耕作措施)为参考,分为生物技术,工程技术和耕作技术。水土资源保护技术则是针对石漠化地区水资源缺乏和土壤贫瘠现状,分为节水技术和培土技术。因此,将石漠化治理技术分为生物技术、工程技术、耕作技术、节水技术和培土技术 5 大类,作为技术库中的一级分类。

(2) 以功能为导向。根据以上 5 个 I 级分类技术,对现有海量资料中的石漠化治理方法与手段进行分类整合。在此基础上,以功能为导向,根据治理需求和技术特性,在每个 I 级分类技术下进一步划分 II 级分类技术。石漠化治理的对象主要是人为干扰形成的石漠化坡面,主要包括坡地农耕活动,牧伐樵采活动,开发建设活动这 3 大类活动不合理所导致的石漠化<sup>[79]</sup>。因此,需要治理的石漠化土地类型主要包括:坡耕地,林草荒地,开发建设用地。为了满足不同类型石漠化土地的治理需要,在划分 II 级技术时,会考虑其对不同石漠化土地类型的适宜度。石漠化生态治理技术库体系中每个 II 级分类对不同石漠化土地类型的适宜度如图 1 所示。

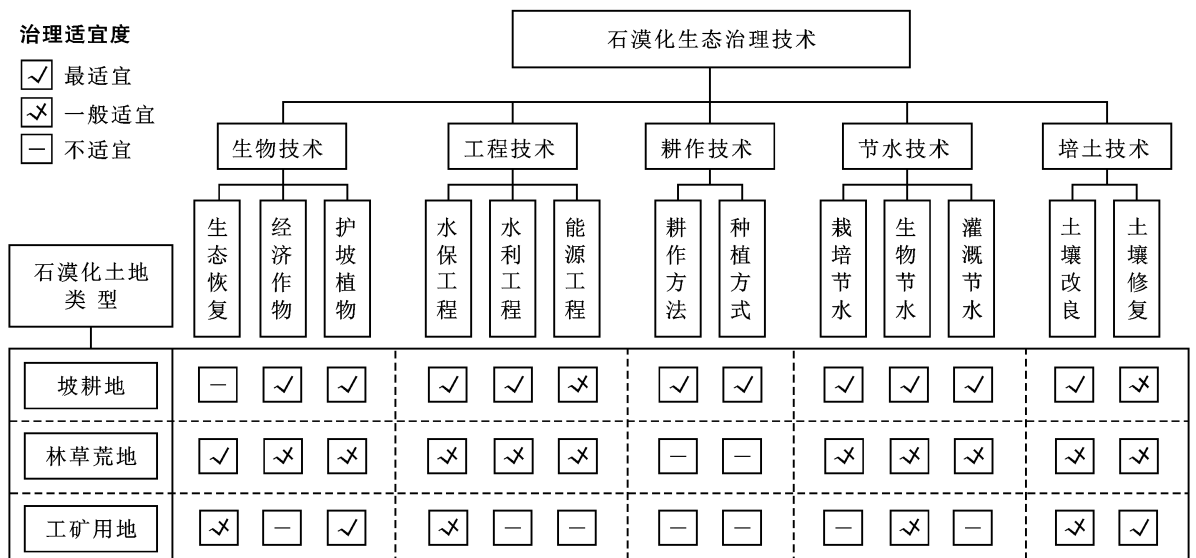


图 1 石漠化生态治理技术对不同石漠化土地类型的适宜度



(3) 以逻辑关系为线索。为了满足不同尺度(即坡面、小流域、区域尺度)石漠化治理的需要,在以上Ⅱ级分类技术的基础上进一步向下划分。以逻辑为线索,由大到小,由粗到细,层层递进,最终构建的石漠化生态治理技术库是一个具有层次性的多级分类系统。前Ⅳ级构成石漠化生态治理技术框架(图 2 左侧),主要包括:5 个Ⅰ级分类,13 个Ⅱ级分类,31 个Ⅲ级分类,87 个Ⅳ级分类。技术库体系的底层由Ⅴ级分类和Ⅵ级分类组成,共包含 1 125 项具体的单项技术。其中,Ⅰ和Ⅱ级技术对应区域尺度的治理,Ⅲ和Ⅳ级技术对应小流域尺度的治理,Ⅴ和Ⅵ级技术对应坡面尺度具体的治理。此外,技术库底层附带有技术手册,提供单项技术的详细说明,并对适用条件、技术特点或注意事项进行总结,在此不做具体展示。

(4) 以区域特点为依据。喀斯特地区水土流失和石漠化治理具有其特殊性,普遍面临缺水少土,坡陡石多,植被恢复困难,旱涝频发的自然环境,以及传统种植业为主的产业结构和人多地少,缺粮少钱,饮水灌溉困难的社会经济背景。因此,在构建石漠化治理技术库时,选取了大量具有区域特点或符合区域治理需求的技术,如经济林草类技术中的香料和中药材,抗旱植物,穴状种植,落水洞治理和洼地排水系统等等。

### 3 石漠化生态治理技术的综合配置

#### 3.1 石漠化治理背景现状类型划分

西南喀斯特区石漠化地块散布在 6 省 1 区 1 市 457 个县<sup>[33]</sup>,区域地貌类型多样,气候特征多变;人口密度和人均耕地空间分布不均,社会经济发展水平参差不齐,交通条件差异巨大。由于上述这些差异性的客观存在,即使石漠化程度相同的地块,当其位于的不同自然环境和社会经济条件下时,需要采取不同对策和模式来实施治理。因此,为了做到精准和高效治理,需要将石漠化治理背景现状进行分类。选取了石漠化程度、交通条件、人均耕地和坡面位置这 4 个划分依据,以刻画石漠化治理区的自然和社会经济条件。①石漠化程度。可反映石漠化条件。建议采用石块出露度指标评判,<10%时,属于无石漠化,10%~30%为潜在石漠化,30%~50%时为轻度石漠化,50%~70%时为中度石漠化,>70%时则属重度石漠化<sup>[59-80]</sup>。②交通条件。可反映社会环境条件。分为好和差两个级别,具体评判指标和标准可根据治理区的实际情况而定。建议根据距离高速公路的远近来区分,例如,如果距离高速路车程小于 3 h,就属于交通条件好;否则就属于差。③人均耕地。可反映土地

承载力的剩余潜力。可分为富余和不足两种情况。如果人均耕地面积大于区域平均水平,就属于富余Ⅰ级;如果当地人均耕地面积小于区域平均水平,则属于不足Ⅰ级。在石漠化最为严重的滇桂黔石漠化片区,人均耕地面积仅为 667 m<sup>2</sup><sup>[81]</sup>。因此建议以 667 m<sup>2</sup>(约 1/15 hm<sup>2</sup>)为界,将人均耕地面积<667 m<sup>2</sup>的划归为不足,人均耕地面积≥667 m<sup>2</sup>的归为富余级别。④坡面位置。可反映石漠化治理的地形条件。分为坡上、坡中和坡下 3 个坡位。结合地表过程物质运移规律和地形学原理,得到一般情况下不同坡位的立地条件详见表 1。

以上 4 个划分依据不同水平的各种组合,能够通过逐级制约、层层分解的方式,将石漠化治理背景现状划分为 36 个基本类型。针对每一个基本类型,提出一种最佳治理模式或一系列的技术集群,实现治理的因地制宜和效益最大化。

表 1 不同坡位地段的立地条件对比

立地条件	坡上	坡中	坡下
侵蚀特征	侵蚀较弱	侵蚀较强	以堆积过程为主
土壤厚度	中	薄	厚
水分条件	差	中	好
总体坡度	较陡	陡	缓
运输条件	困难	一般	便捷

注:坡下部位包括洼地底部、山麓和山坡下部;坡上部位包括山顶和山坡上部。以上结果为普遍规律,非确定性规律。

#### 3.2 石漠化治理技术与治理背景现状类型的正向匹配

基于集成的石漠化治理技术库,根据每一项Ⅳ级分类技术的性质和应用特点,逐一确定适用的 4 个划分依据水平,形成一个从Ⅰ级至Ⅳ级分类技术正向匹配石漠化治理背景现状类型的列表(图 2—3)。

#### 3.3 基于治理背景的石漠化生态治理技术多尺度综合配置

3.3.1 概化配置 通过在 Matlab 中编写多条件反向查询算法,基于石漠化治理Ⅳ级分类技术与其适用的治理背景现状类型的匹配结果(图 2—3),以石漠化程度、交通条件、人均耕地状况、所在坡面位置的不同水平为条件,反向查询得到 36 种石漠化治理背景类型下的坡面尺度治理技术集群。根据石漠化治理技术库的层级关系,将坡面尺度治理技术集群中的同类技术向上归并,对归并结果进行分类组合搭配,形成小流域尺度治理技术组合配置方案。基于小流域尺度技术组合配置方案,以经济发展和生态建设为导向,提炼总结出区域尺度治理方案。不同尺度的初步概化配置结果见表 2—4。

正向匹配					反向查询					
技术 纲目	I 级 分类	II 级 分类	III 级 分类	IV 级 分类	石漠化 程度	交通 条件	人均 耕地	坡面 位置	治理 背景	
石漠化生态治理技术库体系—上	生物技术	生态恢复	封山育林	全面封禁	重度	差	富余	均可	石漠化治理背景现状类型匹配建议—上	
				半封轮封	中度	差	富余	均可		
				生物结皮	中一重	好	富余	坡上一中		
				绿化先锋植物	重度	均可	富余	坡上		
				水土保持植物	中一重	均可	富余	坡中		
			人工恢复	造林种草技术	均可	好	均可	均可		
				中药材	均可	均可	不足	均可		
				经果林	轻一中	好	不足	坡下一中		
				香料林	均可	均可	不足	坡下一中		
				油料林	轻度	好	不足	坡下		
		经济作物	经济林草	饲料作物	饮料林	轻一中	好	不足		坡中一上
					用材林	均可	好	不足		坡上一中
					纤维林	轻一中	好	不足		坡中一下
					薪炭林	中度	差	富余		坡中
					草本饲料	均可	好	均可		坡中一上
	瓜蔬作物			木本饲料	轻一中	好	均可	坡下一中		
				耐储运菜	均可	差	不足	坡中一下		
				新鲜蔬菜	均可	好	不足	坡下		
				花卉作物	轻一中	好	不足	坡中一下		
				盆花作物	均可	好	不足	坡下		
	护坡植物		等高植物篱	干花精油	均可	好	不足	坡下		
				经济植物篱	轻度	好	不足	坡中一下		
				固氮植物篱	轻度	均可	均可	坡中一下		
				水土保持植物篱	中度	差	富余	坡上一中		
				植被护坡	重度	均可	均可	坡下		
		边坡防护	植生袋技术	重度	好	均可	坡下			
			厚层基质喷附技术	重度	好	均可	坡下			
			坡改梯	轻度	好	不足	坡中一下			
			穴坑整地	中一重	均可	均可	坡上一中			
			石谷坊	轻一中	好	均可	坡下一中			
	工程技术	水利工程	沟道防护工程	拦沙坝	轻一中	好	均可	坡下		
				防护堤	轻一中	好	均可	均可		
				拦沙排涝技术	轻一中	均可	均可	坡下		
				集水储水技术	均可	均可	均可	均可		
				引水供水技术	均可	均可	均可	均可		
		能源工程	能源建设工程	落水洞治理	轻一中	均可	均可	坡下		
				洼地排水系统	均可	好	不足	坡下		
				沼气技术	轻一中	差	不足	坡下		
				太阳能技术	均可	好	不足	坡下		
				小水电技术	轻一中	好	不足	坡下		
	能源节约工程	节能技术	均可	均可	不足	坡下				

图 2 石漠化治理技术与治理背景现状类型的匹配建议(上)

正向匹配

反向查询

技术 纲目	I 级 分类	II 级 分类	III 级 分类	IV 级 分类	石漠化 程度	交通 条件	人均 耕地	坡面 位置	治理 背景		
石漠化生态治理技术库体系 I 下	耕作技术	耕作方法	等高垄作	等高耕作	轻度	均可	不足	坡下一中	石漠化治理背景现状类型匹配建议 I 下		
				沟垄耕作	轻度	均可	不足	坡下一中			
				条带种植	轻度	均可	不足	均可			
			穴状种植	一钵一苗	中一重	均可	不足	均可			
				一钵数苗	中度	均可	不足	均可			
				少耕	轻度	差	富余	坡中			
			少免休耕	免耕	中度	差	富余	坡中一上			
				休耕	重度	差	富余	坡上			
				复种轮作	复种	轻度	好	不足		坡下一中	
		种植方式	间套混种	轮作	轻度	好	不足	坡下一中			
				间作	轻度	好	不足	坡下一中			
				套种	轻度	好	不足	坡下一中			
			混种	混种	轻度	好	不足	坡下一中			
				栽培节水	覆盖保墒抗旱	生物覆盖保墒	轻一中	均可		不足	坡下一中
						物理覆盖保墒	轻度	好		不足	均可
	播种育秧抗旱	播种抗旱	轻一中		均可	均可	坡中一上				
		育秧抗旱	轻一中	均可	均可	坡中一上					
		生物节水	抗旱品种	抗旱植物	轻一中	好	不足	坡上一中			
	抗旱作物			轻一中	好	不足	坡中一下				
	生理节水		调亏灌溉	轻一中	均可	均可	坡中一下				
		根系分区交替灌溉	根系分区交替灌溉	轻度	好	不足	坡下				
			湿润灌溉	轻度	好	不足	坡下				
	灌溉节水		高效节水灌溉	水肥根灌	轻一中	好	不足	均可			
		滴灌		轻度	好	不足	均可				
		微喷灌		轻度	好	不足	坡下一中				
		管道输水灌溉	小管出流灌溉	轻一中	均可	均可	均可				
			低压管道输水	轻一中	均可	均可	坡下一中				
			渠道输水灌溉	渠道防渗灌溉	轻一中	好	均可	坡下一中			
		土壤改良	增施有机肥	有机废弃物	轻一中	好	不足	坡下			
				绿肥植物	轻一中	均可	不足	坡中			
				酸碱调节剂	均可	好	均可	坡下			
	添加改良剂		保水剂	中一重	好	不足	坡下				
			固土剂	中一重	好	不足	坡中				
			水土保持剂	重度	好	不足	坡下				
	培土技术	物理修复	客土法	中一重	好	不足	坡下一中				
			换土法	轻度	好	不足	坡下一中				
			深耕翻土法	轻度	均可	不足	坡下一中				
			隔离包埋法	轻度	好	不足	坡下				
			化学修复	化学吸附修复	轻一中	好	不足	坡下			
				化学沉淀修复	轻一中	好	不足	坡下			
		氧化还原修复		轻度	好	不足	坡下				
		生物修复	植物修复	均可	均可	不足	均可				
			动物修复	轻度	好	不足	坡下				
			微生物修复	轻度	均可	不足	均可				
			菌根修复	均可	均可	不足	均可				

图 3 石漠化治理技术与治理背景现状类型的匹配建议 (下)

表 2 不同尺度石漠化治理技术概化配置建议(轻度石漠化)

交通条件	人均耕地	坡面位置	坡面尺度治理技术集群	小流域尺度治理技术组合配置方案	区域尺度治理方案
富余		坡上	造林种草//草本饲料//防护堤//集储水—引供水//播种—育秧抗旱//小管出流灌	人工恢复+饲料(种草种树,发展畜牧)+护坡植物(固氮植物篱)+沟道防护+坡面水系工程+洼地排洪工程+节水技术+土壤改良	生态养殖+绿色发展
		坡中	造林种草//草本—木本饲料//固氮植物篱//石谷坊—防护堤//集储水—引供水//播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗		
		坡下	造林种草//木本饲料//固氮植物篱//石谷坊—拦沙坝—防护堤//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//酸碱调节剂		
好	不足	坡上	造林种草//中药材—饮料—用材林//草本饲料//防护堤//集储水—引供水//条带种植//物理覆盖保墒/播种—育秧抗旱//抗旱植物//水肥根灌—滴灌/小管出流灌//植物—微生物—菌根修复	人工恢复+经济林草+饲料(种草种树,发展畜牧)+瓜蔬(新鲜蔬菜)+花卉+护坡植物(经济—固氮植物篱)+坡面整地工程(坡改梯)+沟道防护工程+坡面水系工程+洼地排洪工程+能源工程(太阳能—小水电—节能技术)+农耕技术+节水技术+土壤改良+土壤修复(植物—动物—微生物—菌根)	特色农业+生态旅游
		坡中	造林种草//中药材—经果—香料—饮料—用材—纤维林//草本—木本饲料//鲜花作物//经济—固氮植物篱//坡改梯/石谷坊—防护堤//集储水—引供水//等高耕作—沟垄耕作—条带种植//复种—轮作/间作—套种—混种//生物—物理覆盖保墒/播种—育秧抗旱//抗旱植物—作物//调亏灌溉//水肥根灌—滴灌—微喷灌//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//绿肥植物//换土—深耕翻土/植物—微生物—菌根修复		
		坡下	造林种草//中药材—经果—香料—油料—纤维林//木本饲料//新鲜蔬菜//鲜花—盆花作物—干花精油//经济—固氮植物篱//坡改梯/石谷坊—拦沙坝—防护堤//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理—洼地排水系统//太阳能—小水电/节能技术//等高耕作—沟垄耕作—条带种植//复种—轮作/间作—套种—混种//生物—物理覆盖保墒//抗旱作物//调亏灌溉—根系分区交替灌溉//湿润灌溉—水肥根灌—滴灌—微喷灌//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//有机废弃物/酸碱调节剂//换土—深耕翻土—隔离包埋法/化学吸附—化学沉淀—氧化还原修复/植物—动物—微生物—菌根修复		
富余		坡上	集储水—引供水//播种—育秧抗旱//小管出流灌	护坡植物(固氮植物篱)+坡面水系工程+洼地排洪工程+农耕技术(少耕)+节水技术	基础农业+绿色发展
		坡中	固氮植物篱//集储水—引供水//少耕//播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水		
		坡下	固氮植物篱//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水		
差	不足	坡上	中药材//集储水—引供水//条带种植//播种—育秧抗旱//小管出流灌//植物—微生物—菌根修复	经济林草(中药—香料)+瓜蔬(耐储运)+护坡植物(固氮植物篱)+坡面水系工程+洼地排洪工程+能源工程(沼气—节能技术)+农耕技术(等高垄作)+节水技术+土壤改良+土壤修复(植物—微生物—菌根)	特色农业+绿色发展
		坡中	中药材—香料林//耐储运菜//固氮植物篱//集储水—引供水//等高耕作—沟垄耕作—条带种植//生物覆盖保墒/播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水//绿肥植物//深耕翻土/植物—微生物—菌根修复		
		坡下	中药材—香料林//耐储运菜//固氮植物篱//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//沼气/节能技术//等高耕作—沟垄耕作—条带种植//生物覆盖保墒//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水//深耕翻土/植物—微生物—菌根修复		

注:表中 5 列坡面尺度技术集群中,符号“//”表示不同属于一个 II 级分类;“/”表示同属于 1 个 II 级分类,但不同属于 1 个 III 级分类;“—”表示同属于 1 个 III 级分类下的 IV 级分类。坡面水系工程是一切坡面种植和农业生产活动的基础,因此是必备技术,具体配置视当地条件和需求而定。表格中有些技术名称相对简化,具体可参照相关图书《石漠化生态治理技术及其配置模式》<sup>[82]</sup>。

3.3.2 细化配置 概化配置后的细化配置,指的是结合治理区的自然、社会、经济条件进一步确定合适的备选植物物种,并确认是否采用培土技术、节水技术、水利工程、能源工程和确定合适的相关技术。通过概化配置和细化配置相结合,既能得到不同尺度的石漠化治理方案,又能将石漠化生态治理具体落实到单项

技术,达到总体治理方向和具体治理手段兼顾的实用效果。

(1) 植物物种筛选。根据治理区的年降雨量、年均温、年日照时数、土壤 pH 值等气候土壤条件指标,从技术库中筛选出适合当地生长的备选植物物种。

(2) 培土技术确定。根据土壤健康状况的好坏,



确定是否采用培土技术。若土壤健康状况良好,则去掉概化配置结果中的培土技术。如果土壤遭受污染,则需进行土壤修复;如果土壤肥力低下,则需进行土壤改良。

表 3 不同尺度石漠化治理技术概化配置建议(中度石漠化)

交通条件	人均耕地	坡面位置	坡面尺度治理技术集群	小流域尺度治理技术组合配置方案	区域尺度治理方案
好	富余	坡上	生物结皮—造林种草//草本饲料//穴坑整地/防护堤//集储水—引供水//播种—育秧抗旱//小管出流灌	人工恢复(生物结皮)+饲料(种草种树,发展畜牧)+护坡植物+坡面整地工程(穴坑整地)+沟道防护工程+坡面水系工程+洼地排洪工程+节水技术+土壤改良	生态养殖+绿色发展
		坡中	生物结皮—水土保持植物—造林种草//草本—木本饲料//穴坑整地/石谷坊—防护堤//集储水—引供水//播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗		
		坡下	造林种草//木本饲料//石谷坊—拦沙坝—防护堤//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//酸碱调节剂		
不足	好	坡上	造林种草//中药材—饮料—用材林//草本饲料//穴坑整地/防护堤//集储水—引供水//一钵—苗—数苗//播种—育秧抗旱//抗旱植物//水肥根灌//小管出流灌//植物—菌根修复	人工恢复+经济林草+饲料(种草种树,发展畜牧)+瓜蔬(新鲜蔬菜)+花卉+护坡植物+坡面整地工程(穴坑整地)+沟道防护工程+坡面水系工程+洼地排洪工程+能源工程(太阳能、小水电、节能技术)+农耕技术(穴状种植)+节水技术+土壤改良+土壤修复	特色农业+生态养殖+生态旅游+绿色发展
		坡中	造林种草//中药材—经果—香料—饮料—用材—纤维林//草本—木本饲料//鲜花作物//穴坑整地/石谷坊—防护堤//集储水—引供水//一钵—苗—数苗//生物覆盖保墒/播种—育秧抗旱//抗旱植物—作物/调亏灌溉//水肥根灌//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//绿肥植物/固土剂//客土法/植物—菌根修复		
		坡下	造林种草//中药材—经果—香料—纤维林//木本饲料//新鲜蔬菜//鲜花—盆花—干花精油//石谷坊—拦沙坝—防护堤//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理—洼地排水系统//太阳能—小水电/节能技术//一钵—苗—数苗//生物覆盖保墒//抗旱作物/调亏灌溉//水肥根灌//小管出流灌—低压管道输水/渠道防渗//有机废弃物/酸碱调节—保水剂//客土法/化学吸附—化学沉淀修复/植物—菌根修复		
差	富余	坡上	半封轮封//水土保持植物篱//穴坑整地//集储水—引供水//免耕//播种—育秧抗旱//小管出流灌	封山育林(半封轮封)+人工恢复(水保植物)+经济林草(薪炭林)+护坡植物(水保植物篱)+坡面整地(穴坑整地)+坡面水系+洼地排洪工程+农耕技术(免耕)+节水技术	绿色发展+生态修复
		坡中	半封轮封//水土保持植物//薪炭林//水土保持植物篱//穴坑整地//集储水—引供水//免耕//播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水		
		坡下	半封轮封//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水		
不足	好	坡上	中药材//穴坑整地//集储水—引供水//一钵—苗—数苗//播种—育秧抗旱//小管出流灌//植物—菌根修复	经济林草(中药—香料)+瓜蔬(耐储运)+坡面整地(穴坑整地)+坡面水系+洼地排洪+能源工程(沼气—节能技术)+农耕技术(穴状种植)+节水技术+土壤改良(绿肥植物)+土壤修复(植物—菌根)	特色农业+绿色发展
		坡中	中药材—香料林//耐储运菜//穴坑整地//集储水—引供水//一钵—苗—数苗//生物覆盖保墒/播种—育秧抗旱//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水//绿肥植物//植物—菌根修复		
		坡下	中药材—香料林//耐储运菜//拦沙排涝—集储水—引供水/落水洞治理//沼气/节能技术//一钵—苗—数苗//生物覆盖保墒//调亏灌溉//小管出流灌—低压管道输水//植物—菌根修复		

(3) 节水技术确定。根据治理区是否干旱缺水或基于治理方案的需水程度,确定是否采用概化配置结果中的节水技术,并根据当地的自然经济条件选取合适的节水技术。

(4) 水利工程确定。根据治理区坡耕地现有的灌溉条件,确定是否考虑概化配置结果中的坡面水系工程,并根据当地是否有洼地洪涝灾害来确定是否考虑洼地排洪工程。

(5) 能源工程确定。根据治理区能源是否出现短缺,确定是否在该区建设沼气池、太阳能、小水电和其他节能工程(例如节能灶、节煤炉等),并根据当地的自然条件和经济条件选取合适的技术措施。如果能够解决石漠化地区农村的能源问题,就可以大大地减少农村的家庭由于燃料缺乏而上山过度樵采所造成的植被破坏和水土流失现象,从而有效地抑制石漠化的形成和发展。



表 4 不同尺度石漠化治理技术概化配置建议(重度石漠化)

交通条件	人均耕地	坡面位置	坡面尺度治理技术集群	小流域尺度治理技术组合配置方案	区域尺度治理方案
好	富余	坡上	生物结皮—绿化先锋植物—造林种草//草本饲料//穴坑整地//集储水—引供水	人工恢复(生物结皮—先锋植物—水保植物)+饲料(种草养殖)+护坡植物(边坡防护)+坡面整地工程(穴坑整地)+坡面水系工程+土壤改良	绿色发展+生态养殖
		坡中	生物结皮—水土保持植物—造林种草//草本饲料//穴坑整地//集储水—引供水		
		坡下	造林种草//植被护坡—植生袋—厚层基质喷附技术//集储水—引供水//酸碱调节剂		
好	不足	坡上	造林种草//中药材—用材林//草本饲料//穴坑整地//集储水—引供水技术//一钵一苗//植物—菌根修复	人工恢复+经济林草(中药—香料—用材林)+饲料(种草养殖)+瓜蔬(新鲜蔬菜)+花卉+护坡植物(边坡防护)+坡面整地(穴坑整地)+坡面水系工程+洼地排洪工程+能源工程(太阳能—节能技术)+农耕技术(穴坑种植)+土壤改良+土壤修复(植物—菌根)	特色农业+生态养殖+生态旅游+绿色发展
		坡中	造林种草//中药材—香料—用材林//草本饲料//穴坑整地//集储水—引供水//一钵一苗//固土剂//客土法/植物—菌根修复		
		坡下	造林种草//中药材—香料林//新鲜蔬菜//盆花作物—干花精油//植被护坡—植生袋—厚层基质喷附技术//集储水—引供水/洼地排水系统//太阳能/节能技术//一钵一苗//酸碱调节剂—保水剂—水土保持剂//客土法/植物—菌根修复		
差	富余	坡上	全面封禁/绿化先锋植物//穴坑整地//集储水—引供水//休耕	封山育林(全封)+人工恢复+护坡植物+坡面整地(穴坑整地)+坡面水系工程+农耕技术(休耕)	生态修复+绿色发展
		坡中	全面封禁/水土保持植物//穴坑整地//集储水—引供水		
		坡下	全面封禁//植被护坡//集储水—引供水		
差	不足	坡上	中药材//穴坑整地//集储水—引供水//一钵一苗//植物—菌根修复	经济林草(中药—香料)+瓜蔬(耐储运)+坡面整地工程(穴坑整地)+坡面水系工程+能源工程(节能技术)+农耕技术(穴坑种植)+土壤修复(植物—菌根)	特色农业+绿色发展
		坡中	中药材—香料林//耐储运菜//穴坑整地//集储水—引供水//一钵一苗//植物—菌根修复		
		坡下	中药材—香料林//耐储运菜//植被护坡//集储水—引供水//节能技术//一钵一苗//植物—菌根修复		

## 4 基于区域发展类型的石漠化治理技术模式应用总结

中国西南喀斯特区人多地少,普遍面临着 3 大难题:经济贫困(缺粮少钱),生存环境条件恶劣(缺水少土、植被覆盖率低、人畜饮水困难、旱涝灾害频发等),区域可持续发展后劲不足(农村产业结构单一、缺乏替代产业和新的经济增长点)<sup>[83]</sup>。在此治理背景下,石漠化治理应以缓解人地矛盾,解决上述 3 大问题为核心。因此,为了将石漠化治理融入地区发展,以经济发展方向为线索,对区域产业背景或区域发展类型进行了分类。基于建成技术库,结合现有石漠化治理模式、代表性的技术措施和常见的治理范式,对不同区域发展类型下对应的模式、技术及其适用条件进行了总结(表 5)。

## 5 结论

本研究以已有的海量文献资料为基础,根据西南喀斯特石漠化地区的区域特点,以水土保持综合治理为导向,构建石漠化生态治理技术库体系,并进一步

探讨石漠化治理技术在不同治理背景下的多尺度配置问题及其在不同区域发展类型下的应用问题。这些工作有助于实现不同自然社会经济条件下石漠化治理技术的快速筛选和多尺度配置,有助于将石漠化治理融入到地区发展,为今后石漠化治理工作提供底层数据支持和治理方案参考。

石漠化治理是一个非常复杂的难题,在现实中需要面临的情况千变万化,根据各种治理条件确定最佳治理方案目前依然存在巨大挑战。本研究所提出的石漠化治理技术综合配置方法仅是一种普遍意义上的尝试,无法覆盖现实中出现的所有可能情况。将来在大数据和人工智能深度学习技术的支撑下,基于现有技术模式应用的训练,可进一步开发自动生成最佳石漠化治理技术配置和范式选择方案,并能进行效益分析评价的人机互动系统,以便于政府部门和投资者进行效益预测和风险评价。

此外,关于喀斯特地区的水土地下漏失阻控技术,主要体现在地表地下的蓄水保水和地表的拦沙固土这两个方面,未来还需进一步加强地下河堵洞成库、地下河出口建坝等地下蓄水技术的开发和研究。

表 5 区域发展类型及其石漠化治理技术模式应用总结

发展类型 (I 级模式)	II 级模式	III 级模式	技术类型	适用条件
粮食主导型 (粮食保障模式)	基础农业	粮食作物型	工程技术、农耕技术、节水技术、培土技术	人多地少,粮食紧缺的地区。
(产业升级模式) 经济主导型	特色农业	特色种植型	中药、香料、油料、饮料、用材、纤维	耕地不足、交通条件好的山区。
		果蔬园艺型	水果坚果、瓜蔬种植、花卉作物	离城区较近的石漠化地区。
	生态养殖	农地畜牧业	“草—圈舍—畜禽”	石漠化山区农村。
		草场畜牧业	“粮—圈舍—畜禽”	
		林下畜牧业	“林下/草—家禽”	
		沼气种养模式	“养殖—沼/肥—种植”	
	生态旅游	石漠景观旅游模式	国家石漠公园游、石漠化治理示范基地游、石漠化景观观光游、矿山石漠化改造开发游	特色石漠地质景观和石漠化治理示范区; 旅游黄金线及具有旅游发展潜力的地区; 有开发潜力的旅游景区及周边; 城市或重要风景资源周边喀斯特景观; 人文资源有特色的区域; 少数民族聚居的地区; 坝库淹没良田,不适宜发展种植业的地区。
		田园农业旅游模式	田园农业游(田园茶园果园)、园林观光游(花卉苗木园)、农业科技游(精品现代农业)	
		农家乐旅游模式	农业观光农家乐、民俗文化农家乐、民居型农家乐、食宿接待农家乐、农事参与农家乐	
		民俗风情旅游模式	农耕、民俗、乡土、民族文化游	
村落乡镇旅游模式		古民居、民族村寨、古镇建筑、新村风貌		
休闲度假旅游模式		休闲度假村、休闲农庄、乡村酒店		
科普教育旅游模式	农业科技教育基地、少儿教育农业基地、农业博览园、观光休闲教育农业园			
回归自然旅游模式	赏景、登山、露营、探险、攀岩、漂流等			
(植被恢复模式) 生态主导型	生态修复	封山育林育草	全面封禁、半轮半封	人迹不易到达的深山、远山和治理难度极大的重度石漠化荒地。
		人工植树种草	封育补植造林、荒山坡绿化、退耕还林还草	交通便捷、坡度较陡的轻中度石漠化地区。
	绿色发展	生物质能源建设	薪柴林	石漠化山区农村。
		坡耕地防护	等高植物篱	
		道路边坡防护	植物护坡	
		矿山、采石场的生态修复与复垦	土壤修复 植被绿化	
	生态移民 <sup>[44]</sup>	开发性建设移民	就近从事劳动密集型加工产业	人口压力大的生态脆弱区和自然保护区。
		城镇服务性移民	进城定居从事服务和商贸行业	
区域集中居住迁移		兴建集镇,集约经营农业		
国家生态安置		国家安置迁移生态难民		
(综合治理模式) 全面发展型	立体生态农业	立体分区综合治理	山顶种养护林,山腰种经果林,山脚种粮经作物,在家养殖牲畜。	有自然、经济条件的石漠化地区。
	生态种养循环经济产业化	种植+养殖+规模/产业化	禽/畜—蚰—草—果—蔬—药—蜂(例) 禽/畜—沼—茶—花—蜂(例) 禽/畜—沼—草/林—菌(例)	
	生态农业旅游	种植(名贵)+养殖(特种)+加工+旅游	花草种植+牛—蚯蚓养殖+加工+农家乐/采摘/摄影/婚庆/节庆/赛事(例)	

## [参 考 文 献]

- [1] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J].草业科学,2008,25(9):19-25.
- [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.
- [3] 曹建华,蒋忠诚,杨德生,等.贵州省岩溶区水土流失、石漠化受岩溶环境制约[J].中国水土保持,2009(1):20-23.
- [4] Golob A. Common Strategy for Protection and Sustainable Use of Ecosystem Services in Karst Eco-Regions

- [R]. Slovenia; Slovenia Forest Service, 2019.
- [5] Day M. Protection of Karst Landscapes in the Developing World: Lessons from Central America, the Caribbean, and Southeast Asia[M]// Van Beynen P E. Karst Management. Dordrecht; Springer Netherlands, 2011.
- [6] Bowles D E, Arsuffi T L. Karst aquatic ecosystems of the Edwards Plateau region of Central Texas, USA: A consideration of their importance, threats to their existence, and efforts for their conservation [J]. Aquatic Con-

- ervation: Marine and Freshwater Ecosystems, 1993, 3 (4):317-329.
- [7] Gunn J. Karst catchment protection: The cuilcagh mountain park initiative, County Fermanagh, Northern Ireland [M] // Bárányi-Kevei I, Gunn J. Essays in the Ecology and the Conservation of Karst. Szeged Hungary: International Geographical Union, 1999.
- [8] Di M Aggio C, Madonia G, Parise M, et al. Karst of Sicily and its conservation [J]. Journal of Cave and Karst Studies, 2012, 74(2):157-172.
- [9] Lauritzen S. Karst resources and their conservation in Norway [J]. Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography, 1991, 45(3):119-142.
- [10] Debevec V, Kranjc D. The karst biosphere reserve in Slovenia [J]. Journal on Protected Mountain Areas Research and Management, 2019, 11(2):43-49.
- [11] Restificar S D F, Day M J, Urich P B. Protection of karst in the Philippines [J]. Acta Carsologica, 2006, 35 (1):121-130.
- [12] Day M. Conservation of karst in Belize [J]. Journal of Caves and Karst Studies, 1996, 58(2):139-144.
- [13] Waltham A C. A review of karst conservation sites in Britain [J]. Studies in Speleology, 1983, 4:85-92.
- [14] Auler A S. Cave protection as a karst conservation tool in the environmentally sensitive Lagoa Santa Karst, Southeastern Brazil [J]. Acta Carsologica, 2016, 45 (2):131-145.
- [15] Goldscheider N. A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains [J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(4):1241-1249.
- [16] Hamilton S E. Current initiatives in the protection of karst biodiversity [J]. Natura Croatica: Periodicum Musei Historiae Naturalis Croatici, 2001, 10(3):229-242.
- [17] Hall A, Day M. Ecotourism in the state forest karst of Puerto Rico. [J]. Journal of Cave & Karst Studies, 2014, 76(1):30-41.
- [18] 覃庆锋, 陈晨, 曾宪芷, 等. 长江流域防护林体系工程建设 30 年回顾与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16 (5):145-152.
- [19] 傅健全. 谈珠江流域防护林体系工程建设[J]. 林业资源管理, 1993(6):71-75.
- [20] 时事政策动向. 天然林保护工程启动在即[N]. 领导决策信息, 1998-09-02.
- [21] 国家林业局, 国家计委, 财政部. 关于开展 2000 年长江上游、黄河上中游地区退耕还林(草)试点示范工作的通知[EB/OL]. (2019-01-30) <http://www.ecocompensation.org.cn/policy/209>.
- [22] 国家发展改革委. 中国的易地扶贫搬迁政策[EB/OL]. (2018-03-30)[2020-01-02]. [http://www.qxn.gov.cn/ztlz/tpgj/ydfpbq/201912/t20191220\\_33901278.html](http://www.qxn.gov.cn/ztlz/tpgj/ydfpbq/201912/t20191220_33901278.html).
- [23] 中央政府门户网站. 国务院批复《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》[EB/OL]. (2008-04-17)[2020-01-02]. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content\\_946918.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content_946918.htm).
- [24] 国家发展改革委, 水利部. 全国坡耕地水土流失综合治理试点工程启动实施[EB/OL]. (2010-04-13)[2020-01-02]. [http://www.gov.cn/gzdt/2010-04/13/content\\_1579606.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2010-04/13/content_1579606.htm).
- [25] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 等. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7092-7097.
- [26] 隋喆, 熊康宁, 牟祥会, 等. 喀斯特小流域不同等级石漠化综合治理生态工程技术集成研究[J]. 中国水土保持, 2010(4):17-19.
- [27] 郭红艳, 万龙, 唐夫凯, 等. 岩溶石漠化区植被恢复重建技术探讨[J]. 中国水土保持, 2016(3):34-37.
- [28] 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.
- [29] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 等. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7103-7108.
- [30] 段华超, 郑鑫华, 李世民, 等. 云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J/OL]. 中国岩溶: 1-13[2021-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20210413.1323.002.html>.
- [31] 王爱娟, 穆洪晓. 石漠化的生态治理技术与治理模式发展[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5):285-289.
- [32] 许尔琪. 基于 CiteSpace 的喀斯特石漠化国际研究进展[J/OL]. 中国岩溶: 1-14[2021-1-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20210421.1047.006.html>.
- [33] 国家林业和草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报[R]. 北京: 国家林业和草原局, 2018.
- [34] 李生, 姚小华, 任华东, 等. 喀斯特地区石漠化生态治理与可持续发展[J]. 江西农业大学学报, 2006, 28(3):403-408.
- [35] 杨金祥, 季静秋. 根灌高效节水农业新技术及其应用效果[J]. 中国农村水利水电, 2003(7):21-23.
- [36] 冯耀宗. 石漠化治理建设的生态系统工程技术: 中国, 101886383A[P]. 2010-11-17.
- [37] 吴明开, 张荷轩. 石漠化生态恢复方法: 中国, 104620932A [P]. 2015-05-20.
- [38] 刘宝元, 刘瑛娜, 张科利, 等. 中国水土保持措施分类[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2):80-84.
- [39] 粟雄飞, 尹文嘉, 甘日栋. 广西喀斯特地区石漠化治理范例探讨: 以广西马山县“弄拉模式”为例[J]. 中共南宁市委党校学报, 2010, 12(6):51-54.
- [40] 朱斌, 刘丹一. 石漠化地区林下经济发展模式研究[J]. 林业经济, 2015, 37(12):86-90.
- [41] 熊康宁, 梅再美, 彭贤伟, 等. 喀斯特石漠化生态综合治理与示范典型研究: 以贵州花江喀斯特峡谷为例[J]. 贵州林业科技, 2006, 34(1):5-8.
- [42] 苏维词, 杨华. 典型喀斯特峡谷石漠化地区生态农业模式探析: 以贵州省花江大峡谷顶坛片区为例[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4):217-220.
- [43] 赵苏琴. 环江县典型石漠化综合治理工程对农户生计的

- 影响研究[D].湖南长沙:湖南师范大学,2019.
- [44] 但新球,喻甦,吴协保.我国石漠化地区生态移民与人口控制的探讨[J].中南林业调查规划,2004,23(4):49-51.
- [45] 李品荣,陈强,常恩福,等.滇东南石漠化地区封山育林前后群落生态学特征比较[J].西北林学院学报,2006,21(5):7-10.
- [46] 陈强.云南岩溶地区石漠化生态治理模式及技术[M].云南昆明:云南科技出版社,2011.
- [47] 祝列克.岩溶地区石漠化防治实用技术与治理模式[M].北京:中国林业出版社,2009.
- [48] 刘拓,周光辉.石漠化综合治理模式[M].北京:中国林业出版社,2012.
- [49] 李玉田.岩溶地区石漠化治理研究[M].广西桂林:广西师范大学出版社,2004.
- [50] 谢家雍.西南石漠化与生态重建[M].贵州贵阳:贵州民族出版社,2001.
- [51] 李菁.石灰岩地区开发与治理[M].贵州贵阳:贵州人民出版社,1996.
- [52] 韦茂才.智胜石漠化:滇桂黔石漠化片区扶贫探索[M].广西南宁:广西人民出版社,2014.
- [53] 熊康宁,陈永毕,陈浒,等.点石成金:贵州石漠化治理技术与模式[M].贵州贵阳:贵州科技出版社,2011.
- [54] 胡培兴,白建华,但新球,等.石漠化治理树种选择与模式[M].北京:中国林业出版社,2015.
- [55] 谷晓平,李茂松.西南地区农业干旱和低温灾害防控技术研究[M].北京:中国农业科技出版社,2016.
- [56] 姚小华,任华东,李生,等.石漠化植被恢复科学研究[M].北京:科学出版社,2013.
- [57] 鞠建华,戴传固.岩溶石漠化遥感监测与防治[M].北京:地质出版社,2006.
- [58] 梁瑞龙,黄开勇.广西热带岩溶区林业可持续发展技术[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [59] 蒋忠诚,李先琨,胡宝清.广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [60] 温远光.石漠化地区的植被恢复与综合优化治理模式[M].北京:中国林业出版社,2005.
- [61] 国家林业局.LY/T 2829-2017 喀斯特石漠化山地经济林栽培技术规程[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [62] 国家技术监督局.GB/T 16453.1-1996 水土保持综合治理技术规范坡耕地治理技术[S].北京:中国标准出版社出版,1996.
- [63] 住房和城乡建设部.GB/T 50434-2018 生产建设项目水土流失防治标准[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [64] 国家林业局和草原局.LY/T 2994-2018 石漠化治理监测与评价规范[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [65] 国家林业局.LY/T 1840-2009 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [66] 水利部.SL 461-2009 岩溶地区水土流失综合治理技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [67] 水利部.GB/T16453.4-2008 水土保持综合治理技术规范小型蓄排引水工程[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [68] 湖北省质量技术监督局.DB42/T 1261-2017 岩溶区石漠化生态治理技术规程[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [69] 国家发展改革委.贵州省水利建设生态建设石漠化治理综合规划[EB/OL].(2011-07-30)[2020-01-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201107/t20110708\\_962118.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201107/t20110708_962118.html).
- [70] 国土资源部,环保部,住建部,等.全国生态保护与建设规划(2013—2020年)[EB/OL].(2014-11-19)[2020-01-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/njs/sjdt/201411/t20141119\\_1194736.html](https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/njs/sjdt/201411/t20141119_1194736.html).
- [71] 水利部.全国水土保持规划(2015—2030年)[EB/OL].(2018-05-29)[2020-01-02]. [http://www.sx.gov.cn/art/2018/5/29/art\\_1229417255\\_3686593.html](http://www.sx.gov.cn/art/2018/5/29/art_1229417255_3686593.html).
- [72] 农业部.全国种植业结构调整规划(2016-2020)[EB/OL].(2016-04-28)[2020-01-02]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content\\_5068722.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/28/content_5068722.htm).
- [73] 国家林业局,农业部,水利部.岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015)[EB/OL].(2008-04-17)[2020-01-02]. [http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content\\_946918.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2008-04/17/content_946918.htm).
- [74] 国家发展和改革委员会,国务院扶贫开发办.滇桂黔石漠化片区区域发展与扶贫攻坚规划(2011—2020年)[EB/OL].(2013-09-24)[2020-01-02]. [http://cn.chinagate.cn/infocus/2013-09/24/content\\_30114043.htm](http://cn.chinagate.cn/infocus/2013-09/24/content_30114043.htm).
- [75] 国家林业局.桂黔滇喀斯特石漠化防治生态功能区生态保护与建设规划(2014—2020年)[EB/OL].(2019-01-19)[2020-01-02]. <https://max.book118.com/html/2019/0107/8141055015002000.shtm>.
- [76] 国家发改委,国家林业局,农业部,等.岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划[EB/OL].(2017-06-14)[2020-01-02]. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fz-zlgh/gjjzxgh/201706/t20170614\\_1196796.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fz-zlgh/gjjzxgh/201706/t20170614_1196796.html).
- [77] 郝竹青.水力侵蚀地区土壤侵蚀与水土流失解析及启示[J].水利天地,2004(12):30-31.
- [78] 刘佳丽,张学俭.珠江上游水土流失导致石漠化现象的分析及防治对策[J].水利水电技术,2009,40(7):98-102.
- [79] 国家林业局.岩溶地区石漠化状况公报[EB/OL].(2007-06-15)[2020-01-02]. [http://www.gov.cn/ztlz/fszs/content\\_650610.htm](http://www.gov.cn/ztlz/fszs/content_650610.htm).
- [80] 宋同清,彭晚霞,杜虎,等.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.
- [81] 陈百明,周小萍.全国及区域性人均耕地阈值的探讨[J].自然资源学报,2002,17(5):622-628.
- [82] 王爱娟,柯奇画,张科利.石漠化生态治理技术及其配置模式[M].郑州:黄河水利出版社,2021.
- [83] 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.