

DOI: 10.5846/stxb201812292838

杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 胡云锋. 西南岩溶地区石漠化综合治理经验与做法. 生态学报, 2019, 39(16): - .

Du W P, Yan H M, Zhen L, Hu Y F. The experience and practice of desertification control in karst region of southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

西南岩溶地区石漠化综合治理经验与做法

杜文鹏^{1,2}, 闫慧敏^{1,2,*}, 甄霖^{1,2}, 胡云锋^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:我国西南岩溶地区石漠化是人地矛盾作用下的生态系统退化的过程或结果, 石漠化不仅带来水土流失加剧、旱涝灾害频发、生物多样性降低等生态问题, 还会带来贫困落后等一系列社会问题。20 世纪 80 年代开始进行的石漠化治理工作已经成为我国西南岩溶地区生态文明建设的重要举措与必由之路, 通过近 40 年来的石漠化治理使得我国西南岩溶地区石漠化问题恶化的趋势开始得到扭转。面向生态文明新时期的建设目标, 石漠化脆弱区仍存在人地矛盾难以全面消除、治理成果可持续性亟待提升等问题, 石漠化防治需要从多年来石漠化治理研究与实践探索积累中汲取有益于促进人地和谐、提升生态系统可持续性的治理经验与做法。因此, 本文以石漠化治理典型区域调研资料与文献资料为数据基础, 从石漠化治理目标、技术、措施和模式四个层面梳理石漠化治理经验与做法, 归纳总结出石漠化综合治理四点配置原则: (1) 以治理目标与预期周期为导向, 确立石漠化治理采取的措施; (2) 针对解决的关键生态退化问题, 结合区域特征遴选石漠化治理技术; (3) 针对石漠化退化阶段的差异, 确定石漠化治理途径措施; (4) 结合石漠化综合治理模式的共性特征, 以小流域为基本单元, 因地制宜的选择与构建石漠化综合治理模式。以期通过对实践经验的总结为石漠化治理过程中选择具备区位适宜性和机理明晰性的生态技术提供参考。

关键词:石漠化治理; 生态文明建设; 生态技术; 优良模式; 西南岩溶地区

The experience and practice of desertification control in karst region of southwest China

DU Wenpeng^{1,2}, YAN Huimin^{1,2,*}, ZHEN Lin^{1,2}, HU Yunfeng^{1,2}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Rocky desertification has resulted from ecosystem degradation caused by the negative impacts of human land use in the karst areas of Southwest China. Rocky desertification not only brings about ecological problems such as intensified soil erosion, frequent drought and flood disasters, and reduced biodiversity, but also leads to social problems such as poverty. Efforts to control rocky desertification started in the 1980s and have become an important measure and the only way to construct an ecological civilization in the karst areas of Southwest China. The worsening trend of rocky desertification in this region has been reversed through such control measures in the past 40 years. However, there are still some problems in these fragile rocky desertification areas facing the goal of constructing a new ecological civilization, such as the difficulty in eliminating contradiction between man and land, and the sustainability of the management results needs to be improved urgently. Efforts for the prevention of rocky desertification need to incorporate ideas from many years of research on and practice of managing rocky desertification, which would be beneficial in promoting the harmony between man and nature, and improving ecosystem sustainability. Therefore, based on investigative and literature data on typical areas where rocky

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503700); 中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA23100202)

收稿日期:2018-12-29; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yanhm@igsnrr.ac.cn

desertification control is in place, in this study, we combined the experiences and practices of rocky desertification control from four aspects: objectives, technologies, measures, and modes of rocky desertification control. We also summarized four allocation principles of comprehensive rocky desertification control to establish control measures for rocky desertification, guided by governance objectives and expected cycles. To solve the key ecological degradation problems, we should select the control strategies according to regional characteristics, differences in the stages of rocky desertification, take small watersheds as the basic unit, combine the common characteristics of comprehensive control models, and select and construct a comprehensive control model according to local conditions. This would provide reference for the selection of eco-technology with regional suitability and mechanism clarity for the control of rocky desertification.

Key Words: desertification control; ecological civilization construction; eco-technology; excellent patterns; karst region of southwest China

石漠化是在岩溶山区生态系统脆弱性与人类不合理经济活动相互作用下造成的地表呈现类似于荒漠景观的演变过程或结果^[1-3],是岩溶生态系统退化到极端的表现形式^[4]。中国西南地区、欧洲中南部地区、北美东部地区是全球三大集中连片的岩溶分布区^[5-6],岩溶生态系统具有可溶岩成土速率慢、岩石渗漏性强、地表缺水土少且异质性高、植被立地条件困难、易破坏难恢复等脆弱性特征。我国西南喀斯特地区岩溶面积占国土面积的 5.35%,人口密度相当于全国平均人口密度的 153.3%,且有限的耕地大多属于旱涝不保收的贫瘠山地^[7];人口密度大且经济落后导致人地矛盾突出,长期不合理土地利用引起的大面积水土流失和植被退化使得石漠化现象得以形成与发展。19 世纪以来,我国西南喀斯特地区生态环境经历了战乱破坏(1840—1949 年)、“大炼钢铁”、“以粮为纲”、“向山要粮”等政策导向(1950—1970 年)、相关配套制度和政策滞后的荒山荒地承包到户(1978 年开始)3 次严重的人为浩劫,造成今天喀斯特石漠化问题的局面^[8]。

石漠化不仅带来水土流失加剧、旱涝灾害频发、土壤肥力下降、生物多样性降低甚至丧失等生态问题^[9],还会带来人口贫困、交通不便、经济与科技文化落后等一系列社会经济问题^[10],已成为我国西南地区社会经济发展的关键制约因素。突出的人地矛盾使得农民长期垦山种粮、伐林烧柴,引起大面积水土流失和植被退化^[11-12],使得该地区陷入一个“人口压力大-贫困-掠夺资源-生态退化-进一步贫困”恶性循环的贫困陷阱^[13]。因此,石漠化治理对实现我国社会经济可持续发展、生态文明建设和全面小康社会建设具有重要意义^[14];现阶段,石漠化治理工作不仅已经提升到国家层面而且成为相关学者关注与研究的热点问题之一。

我国西南岩溶地区石漠化治理始于 20 世纪 80 年代,“八七”扶贫攻坚计划,退耕还林工程、“长防”和“长治”工程、“珠治”试点工程、世界粮食计划、世界银行贷款项目和澳大利亚、新西兰援助计划等一系列国内国际生态治理项目,为石漠化治理积累了宝贵的经验^[15-16]。2000 年,党中央国务院将“推进西南岩溶地区石漠化综合整治”列入我国“十五”政府工作计划,自此石漠化治理工作上升到国家层面^[17-18];之后的“十一五”、“十二五”、“十三五”都将石漠化综合治理作为我国重点区域生态修复的主要内容^[19]。随着 2000 年以来退耕还林还草、天然林保护等生态治理工程的实施,岩溶生态系统得到一定程度的恢复^[20]。特别是自 2008 年国务院批复《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲》以来,在西南喀斯特地区首批 100 个石漠化治理试点县开展封山育林育草、人工造林种草、坡改梯、生态移民等石漠化综合治理工程,之后又陆续在 351 个石漠化县开展生态恢复工作。从 2005 年开始,石漠化治理工作已经开始扭转西南岩溶地区石漠化问题恶化的趋势,截至 2016 年我国西南喀斯特地区石漠化总面积为 10.07 万 km²,较 2005 年下降 2.89 万 km²,近五年来减少 1.93 万 km²,年平均减少率达到 3.45%^[21]。我国西南岩溶地区生长季植被覆盖度从 1999 年的 69% 增加到 2017 年的 81%,植被生物量显著增加区域面积占比约为 55%,是全球植被覆盖度和生物量同时显著增加的区域之一^[22-23]。

岩溶地区特殊的地质、地貌、气候、水文、土壤等特征决定了岩溶生态系统退化形态的多样性和高度异质性^[24-25],因此,石漠化治理过程中探索出诸多的经验与模式^[26-27]。同时,学者也从不同的角度对我国岩溶地

区石漠化概念内涵^[28-31]、发生机制^[32-34]、退化机理与演变过程^[35-39]、空间分布与分级^[40-42]以及治理技术、措施、模式^[43-48]进行了一系列研究,从2006年起,以“石漠化”为主题的期刊文献年发文量超过100篇,2015年发文量达到峰值275篇;但以“石漠化研究进展”与“石漠化综述”为主题的期刊文献年发文量不足20篇。党的十九大报告与乡村振兴战略意见均提出要开展国土绿化行动,推进荒漠化、石漠化、水土流失综合治理;现阶段,虽然已有众多的石漠化治理技术、措施与模式范例,但仍需要对石漠化治理技术、措施与模式及其相互关系进行系统梳理,使得现有石漠化治理理论与实践成果更好地支撑下一阶段石漠化治理工作,从而为我国生态文明建设2035年目标(国土生态安全骨架基本形成,生态服务功能和生态承载力明显提升,生态状况根本好转)与2050年目标(生态文明全面提升,实现人与自然和谐共生)的实现做出贡献^[49-50]。本研究以凝练我国西南岩溶地区石漠化多年治理经验范式为目标,以石漠化治理典型区域调研资料与文献资料为数据基础,梳理不同石漠化治理项目治理周期与目标的差异,分析当前石漠化治理技术的退化问题针对性;结合案例总结不同石漠化退化阶段采用的治理途径与措施,阐明不同岩溶地区石漠化治理优良模式的共性与特性;进而从石漠化治理目标、技术、措施与模式四个层面总结石漠化综合治理配置原则,以期为今后石漠化理论研究与实践治理工作提供依据。

1 数据来源

本研究基于以下三方面数据对我国西南岩溶地区石漠化治理技术、途径措施和模式进行归纳、分析与总结:

(1) 石漠化治理代表性研究机构成果资料

石漠化治理代表性研究机构成果资料主要来自于以下机构:中国科学院亚热带农业生态研究所环江喀斯特生态系统观测研究站、国际岩溶研究中心(岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心)、贵州师范大学喀斯特研究院(国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心)、贵州省水土保持监测站等。相关资料主要包括:《贵州省2013—2015年石漠化监测实施方案》、《贵州省水土保持世行贷款欧盟赠款项目竣工报告》、《贵州省水土保持监测站课题研究进展情况报告》、《绿色旋律——2016贵州水土保持新闻报道侧记》、《贵州省水土保持规划(2016—2030)》、《山谷吹来世行风——贵州实施水土保持世行贷款/欧盟赠款项目侧记》、《点石成金——贵州石漠化治理技术与模式》、《贵州省喀斯特石漠化综合防治图集(2006—2050)》、《环江喀斯特生态系统观测研究站建设情况汇报报告》、《国际岩溶研究中心6年历程》、《西南岩溶石漠化综合治理地质调查报告》、《广西岩溶山区石漠化及其综合治理研究》、《岩溶峰丛洼地生态重建》等。

(2) 自20世纪80年代以来,我国在西南岩溶地区实行的重点生态治理与恢复建设项目及基本实施情况。主要项目有:国家水土保持重点建设工程、毕节鸭池示范区建设项目、“长防”、“长治”试点工程、广西岩溶山区封山育林工程、贵州花江示范区建设项目、广西环江古周/马山弄拉/平果果化示范区建设项目、贵州世界银行贷款/欧盟赠款项目、“珠防”、“珠治”试点工程、岩溶地区石漠化综合治理项目、坡耕地水土流失综合治理工程等。

(3) 针对西南岩溶地区石漠化概念内涵,退化机制,空间分布,演变过程,治理技术、措施、模式等方面进行研究的相关文献。

2 石漠化治理的目标、技术与措施

本研究中生态治理目标、技术、措施与模式的概念分别为:生态治理目标是指生态治理活动预期达到的目的,为生态治理活动指明方向;生态治理技术是指人类在长期利用和改造自然的过程中积累起来的提升生态系统功能的方法及其原理;生态治理措施是指为阻止某种生态退化进程所采取的遵循自然规律的技术手段;生态治理模式是指在以往经验基础上形成的解决生态问题的某种技术与措施的结构组合,较生态治理技术与措施更具整体性与综合性。基于上述生态治理目标、技术、措施与模式的定义,石漠化治理目标对石漠化治

理技术、措施、模式选择具有导向作用,石漠化治理技术是解决石漠化问题治理的基础,石漠化治理措施必须以相应的治理技术作为支撑,石漠化治理模式由石漠化治理技术与措施有机组合形成。

2.1 石漠化治理目标

基于石漠化治理代表性研究机构成果资料、代表性石漠化治理工程以及相关研究文献,对石漠化治理工程的目标、周期等基本信息进行梳理(表 1):我国目前实施的各类项目中,以兼顾生态、经济与社会效益为目标的项目周期为 5—10 年,主要包括小流域石漠化综合治理项目、世行项目等项目类型,主要采取生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施相结合的治理措施;以生态与经济效益为目标的项目周期为 3—5 年,主要包括与脱贫计划、五年规划等相结合的石漠化治理项目,主要采取生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施相结合的治理措施;单纯以生态效益为目标的项目周期为 1—3 年,主要包括道路工程、采矿生态保护、矿山修复等项目,主要采取生态措施与工程措施两项治理措施。西南岩溶地区石漠化与贫困化具有必然的地理耦合性,致使单独的生态治理工程项目和片面的环境保护无法从根本上解决石漠化问题^[52-56],在石漠化治理工程项目设计时需要通过对治理成果的生态、经济与社会效益进行三重优化,才能达到岩溶山区自然社会经济复合生态系统良性循环的目标^[54,57-58],从根本上解决西南岩溶地区石漠化问题。

表 1 石漠化生态治理项目治理周期、目标、措施与技术

Table 1 The difference of cycle, goal, measure and technology of ecological project of rocky desertification					
周期 Period	效益目标 Benefit goal	主要项目类型 Major project types	代表性项目 Typical project	治理措施 Treatment measure	治理技术 Treatment technology
短期(1—3 年) Short period(1—3 years)	生态效益	道路工程、采矿生态保护、矿山修复等项目	蒙自—新街高速公路建设项目、贵州毕节飞雄机场项目等	生态措施、工程措施	主要以水土保持技术为主
中短期(3—5 年) Middle-short period(3—5 years)	生态效益 经济效益	与脱贫计划、五年规划等结合的石漠化治理项目	“八七”扶贫攻坚计划、贵州世界银行贷款/欧盟赠款项目等	生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施	水土保持、水资源开发利用、农业结构调整优化技术等
中长期(5—10 年) Middle-long period(5—10 years)	生态效益 经济效益 社会效益	小流域石漠化综合治理项目、世行项目等	贵州世界银行贷款/欧盟赠款项目、“珠防”、“珠治”试点工程等	生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施	表 2 涉及到所有技术 ^[51]
长期(10 年以上) Long period(more than 10 years)	生态效益 经济效益 社会效益	石漠化治理示范区与自然保护 区建立等项目	贵州花江示范区建设项目、广西环江古州示范区建设项目等	生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施	表 2 涉及到所有技术 ^[51]

2.2 石漠化治理技术

石漠化治理技术的研发应用建立在对石漠化的形成机制的研究和认知基础之上,学术界已经对以岩溶区脆弱的生态地质环境是基础,强烈的人类活动是驱动力这一石漠化成因达成了共识^[12]。以碳酸盐为物质基础的岩溶地区少水与缺土伴生,土层浅薄且不连续,地下裂隙发达,雨水降落至地面沿着溶岩缝隙、竖井、落水洞等进入地下系统,形成水土漏失^[59]。缺水少土决定了这里的植被是易损、难生的,一旦岩石迅速大片裸露,即便土壤种子库未被破坏,植被的自然恢复也需要数十年甚至上百年。针对岩溶生态系统缺水、少土、植被恢复困难导致生态环境脆弱的基本特点,石漠化综合治理必须以蓄水、治土、造林为核心,其实质就是要解决水土保持与植被恢复问题^[60-62]。我国西南岩溶地区石漠化与贫困化具有必然的地理耦合性:石漠化是岩溶生态系统脆弱生态环境叠加人类不合理土地利用活动的最终表现形式,石漠化与贫困化之间存在一种内在互动效应^[53]——石漠化现象的产生减少了区域可利用资源量,制约区域社会经济发展,进而造成贫困化;而贫困又导致人类增加对土地资源开发利用的强度,使得区域石漠化问题更加严重;石漠化综合治理不仅要解决水土保持和恢复植被问题,更要解决区域经济发展与社会民生问题。因此,“水是龙头,土是关键,植被(经济植物)是根本,区域生态经济双赢、农民脱贫致富是目标^[47]”的石漠化综合治理基本思路得到了广大学者的认可。自 20 世纪 80 年代我国开始进行西南地区生态问题治理以来,相关工作人员与研究学者已经针对于

岩溶地区缺水、少土、植被生长困难和区域贫穷落后四大基本问题研发和总结了一系列适用于石漠化治理的关键技术(表 2):

针对石漠化地区缺水的问题——重点应用水资源开发利用技术与水土保持技术。西南岩溶地区的双层岩溶水文地质结构使得地表水水资源不足,水资源以地下水为主且地下水深埋、开发利用困难。水资源开发利用技术即通过蓄、引、提、堵等多种形式开发利用地表与地下水资源;同时,在不同地貌部位应用适用的水土保持技术,减少地表水的下渗、充分利用地表径流;此外,在地表与地下水开发利用过程中应采取水污染防治等相应配套技术。

针对石漠化地区少土的问题——重点应用土地整理技术、土壤改良技术与水土保持技术。西南岩溶地区缺土问题主要表现在地表径流对土壤冲刷作用强使得地表土层薄、土壤养分与有机质含量低、土地生产力低下、可利用土地资源面积小且分散。因此,需要通过土地整理技术调整土地利用结构、改善土地资源利用条件来提高土地资源利用率与生产力;通过土壤改良技术改善土壤的理化性质、增加土壤有机质含量来提高土壤蓄水保肥能力及生产能力,进而为植被生长创造良好的条件;通过水土保持技术削弱地表径流对土壤的冲刷作用来保持土壤空间分布的完整性,进而为农业生产提供良好的耕作条件。

针对石漠化地区植被生长困难的问题——重点应用植被恢复与重建技术。植被可以带来生态、社会、经济三重效益,可以说植被的恢复与重建是石漠化治理工作的重中之重。由于西南岩溶地区气候、土壤、水文等条件的组合使得植被立地条件十分困难,因此,需要研发适生植物收集、苗木繁育、恢复封造等植被恢复与重建技术因地制宜地营造生态林与经济林,进而实现石漠化治理生态效益与经济效益的统一。

针对石漠化地区贫困落后的问题——重点应用石漠化区域农业结构调整与生态产业培育技术。经济落后引起的土地资源不合理开发利用是西南岩溶地区石漠化现象产生的动因,石漠化综合治理必须兼顾生态效益与经济效益。因此,需要研发石漠化区域农业结构调整与生态产业培育技术,在石漠化综合治理过程中通过因地制宜调整农业结构实现区域生态经济双赢,使得石漠化综合治理效果具有可持续性^[35,47,51,63]。

表 2 石漠化治理技术总结表(针对解决问题)^[51]
Table 2 The summary of desertification control technology (problem targeting)

解决问题 Problem solving	技术名称 Technical term	主要内容 Main content
少土 Soil thin	土地整理技术	不同地貌部位土地整理、坡改梯、平整土地等
	土壤改良技术	客土改良、不同地貌土壤改良(荒地、坡耕地、梯形地等)
	水土保持技术	水土保持生物(植物篱技术、坡面植物梯化),水土保持工程(坡面治理工程、洼地治理工程)
缺水 Water shortage	水土保持技术	
	水资源开发及高效利用技术	地下水开发、岩溶蓄水构造及富水块段水资源开发、表层岩溶水资源开发、岩溶水资源高效利用等
植被立地困难 Vegetable site difficult	植被恢复与重建技术	适生植物收集与苗木繁育、人工造林等
贫困落后 Impoverished and backward	种草养畜技术	优良牧草种植、养殖、岩溶区人工草地管理等
	区域农业结构调整与生态产业培育技术	
其他问题/配套技术 Other issues/supporting technologies	洼地内涝防治技术	洼地排涝工程、洼地生物与工程相结合防治内涝等

2.3 石漠化治理途径及措施

石漠化治理途径可以分为自然恢复与人工干预两种:自然恢复主要指在消除人为干扰因素的前提下,通过岩溶生态系统自身的生产与恢复潜力来实现石漠化治理的过程,自然恢复途径的主要措施有封山育林、环境移民、生态保护区建设等生态措施。人工干预主要是指在生物、农艺、工程等人工措施的帮助下实现岩溶生态系统植被恢复与生态重建的目标,主要包括退耕还林还草等生物措施,套种轮作等农艺措施以及坡改梯、小

型水利设施建设等工程措施^[54-55, 64]。

封山育林是石漠化地区最直接、最有效、最经济的治理措施^[9],通过长时间自然封育,植被在依靠仅有的石缝土顽强地生长起来之后根系可以直接利用各种裂隙在岩层形成巨大的生态空间来满足其生长繁殖等自身需求^[65-67],进而实现自我更新演替,形成复合的植物群落。从现有石漠化治理实践来看,植树造林等人工措施很难使植被在岩石表层上直接生长起来,并且由于人工造林难以实现生态系统自然演替过程,形成的人工林在群落稳定性、生物多样性、生态功能性等方面无法与自然恢复的天然林相比^[9]。因此,仅从生态恢复的角度来看,在岩溶地区采用自然途径进行石漠化治理的效果要优于人工途径。我国西南岩溶地区突出的人地矛盾关系决定石漠化综合治理必须要兼顾生态与经济效益,不能单靠自然恢复来实现。生物、农艺、工程等人工干预措施也是人类活动的一部分,不同石漠化退化阶段的岩溶生态系统对人类活动承载能力的差异决定了要采取的石漠化治理措施不同^[9];因此,“在不同石漠化退化阶段应采用不同的治理措施”这一观点的提出对石漠化治理实践工作与理论研究具有重要的指导意义^[68]。

对于重度石漠化地区,宜采取封山育林与人工辅助生态修复措施。重度石漠化地区人地关系、人与自然的的关系严重失调,对重度石漠化地区进行生态治理,首先应该减轻人口压力,减少对区域资源的掠夺式开发。在重度石漠化地区采取的治理措施主要以生态移民、封山育林等自然恢复措施为主;考虑到自然恢复周期较长等问题,在条件允许的情况下,可以采用一些人工播种、补植、种草等林草措施以及铺设人工土,喷注草种泥浆等工程措施来推动植被顺向演替,加快石漠化治理进程。

对于中度石漠化地区,宜采取林草种植与生态诱导修复措施。大多数中度石漠化地区目前还处于开发利用中,人们通过砍伐、烧毁乔灌木开垦土地进行农业生产,使得中度石漠化地区物种单一、生态系统承载力极其不稳定易向重度石漠化演化;因此,对中度石漠化地区进行生态治理,应该在减轻人口压力追求生态效益的同时通过营造经济林果、种草养畜、改善耕作条件等措施兼顾治理的经济效益。

对于轻度石漠化地区,宜采取生态恢复与经济发展相结合的治理措施。轻度石漠化地区土地资源具有多功能性,土地开发利用活动具有多元化,生态问题并不严重,生态系统自身恢复能力较强;但是该区域大多属于落后的传统农业区,人地矛盾突出,人类不合理土地利用导致的水土流失等环境问题已经初现;因此,对轻度石漠化地区进行治理主要是通过宣传教育减少人类不合理的土地开发利用活动,并通过配套措施降低人类土地开发利用活动带来的负面效应。

潜在石漠化地区——采取水土保持与产业结构优化调整措施。潜在石漠化地区大多具有人口密度大、经济较发达、土地集中连片农业集约化水平相对较高等特点;但是该区域土地利用存在严重错位现象,虽然没有明显的石漠化现象,一经破坏治理也相当困难;因此,对潜在石漠化地区进行治理应该以水土保持等预防保护措施为主,同时应采取相应措施调整与优化产业结构解决土地利用错位问题^[56, 69-71]。

近年来,开展不同退化阶段石漠化治理工作,形成了许多典型示范区与典型案例;表 3 总结了不同退化阶段石漠化治理典型的治理措施与模式、治理成效和存在的问题。

3 石漠化综合治理模式的典型案例与经验

岩溶地区独特的地貌形态与地域结构对光、热、水、土、气等环境要素进行再分配使得气候、土壤、生物等自然要素在空间上具有水平分布和垂直分布的双重性质,不同区域之间以及同一区域内部的生态环境均存在差异^[16, 56, 80-81]。我国西南岩溶地区根据其地形地貌特征可以分为:岩溶高原区、岩溶峡谷区、岩溶槽谷区、中高山地区、断线盆地区、峰丛洼地区、溶丘槽谷区和峰林平原区八个地形区;对不同区域进行石漠化综合治理需要采取不同的蓄水、保土、恢复植被以及促经济发展措施,不同措施的有机结合形成了多样的石漠化综合治理模式。自 20 世纪 80 年代在西南岩溶地区开展大规模石漠化治理以来涌现出许多典型的治理模式(表 4)。由于岩溶地区生态环境的高度异质性,各种石漠化治理模式特征鲜明,但各种治理模式亦存在共性特征:封山育林(草)或保护林草植被是各种治理模式均采取的措施,相关研究表明岩溶地区通过自然途径来实现生态

保护与恢复效果优于人工途径^[9],因此,石漠化治理模式在理念上顺应自然规律,尽可能依靠自然力量恢复与治理是可行的途径。岩溶地区地表与地下的“二元结构”以及自然要素垂直方向空间分布的异质性^[83],使得各种石漠化治理模式均由不同治理措施结合而成,如平果果化的“山顶戴帽,中间缠带,脚穿鞋”立体生态农业模式就是一个典型特例;因此,从宏观上来看石漠化治理模式是各种治理措施空间上有机结合形成的一套立体治理模式。从微观上看各种治理模式所采取的系列治理措施,都是以减少水土流失(蓄水与固土)、增加植被覆盖度、增加地表土壤养分等为治理目标。

表 3 不同退化阶段石漠化治理典型案例总结表
Table 3 The typical cases of rocky desertification control in different degradation stages

典型案例 Typical cases	退化程度 Degradation stages	治理措施与模式 Treatment measures and models	治理成效 Treatment effects	存在问题 Existing problem
广西马山弄拉示范区 Guangxi mashan-nongla demonstration area	重度石漠化地区—— 2005 年重度石漠化面积 4.2 万 hm ² , 占石漠化土 地面积 87.7%。	以封山育林(草)为主, 辅之以人工造林、中幼林 抚育、弃耕、坡改梯等的 管护措施。	2005—2012 年,石漠化顺 向演替面积达到 16273.5 hm ² ;植被覆盖率达到 95%;居民生活水平显著 提高。	无法对治理成果维护和管理,治理效果缺乏持 续性 ^[72] 。
贵州花江模式 Guizhou huajiang model	中度石漠化地区——岩 溶面积占县域面积 80% 以上,中轻度石漠化土地 面积 40%以上。	建立了“优质高效经济林 +林产品加工+庭院经济 +小水窖”的石漠化综合 治理模式。	到 2012 年,花椒种植面 积扩大到 2000 hm ² ,受益 农户 1.64 万人;2017 年, 植被覆盖率达 48.28%。	花椒种植业存在树龄较低、 产量下降且年际波动大、地 力贫瘠难成林等问题 ^[73-75] 。
贵州晴隆人工种草养畜 模式 Artificial planting grass and raising livestock in qinglong, guizhou	轻度石漠化地区—— 2010 年中轻度石漠化土 地占岩溶面积 50%以上。	“陡坡人工种植优质牧 草-养殖优质肉羊-发展畜 牧业”的人工种草养畜 模式。	到 2014 年,林草覆盖率 达 67.65%;十五年间,水 土流失面积减少 150km ² ,人工草地土壤有 机质含量增加 30%。	种草养畜的治理模式,存在 潜在石漠化面积增加限制 饲草供给,无法扩大生产和 环境污染问题 ^[76-77] 。
广西平果果化示范区 Guangxi pingguo-guohua demonstration area	潜在石漠化地区——潜 在石漠化土地面积占县 域岩溶面积的 50%以上。	发展立体生态农业:注地 发展种植业;山麓与平缓 山坡发展经果林和用材 林;垭口和较陡山坡种植 藤本植物;陡峭山峰封山 育林。	石漠化治理以来,植被覆 盖率由 10%提高到 70%, 土壤侵蚀模数下降 82%, 水土流失治理程度达 85%,土地单位面积产值 提高 10—20 倍,居民年 均收入提高 20%。	种植经济作物受市场影响 大,不能很好解决居民致富 问题;治理模式良好,但是 技术依托性差,无法调用居 民积极性 ^[78-79]

表 4 八种岩溶地貌区石漠化治理思路及石漠化治理模式^[82]
Table 4 The distribution, characteristic, desertification treatment idea and typical pattern in eight kinds of karst landforms

地貌类型 Geomorphc type	分布区域 Distribution regions	区域主要问题 Regional key issues	治理思路 treatment scheme	典型模式 Typical models
岩溶高原 Karst plateau	贵州中部长江与珠江分 水岭地带(高原面上)	地表水资源短缺、中低产 田比重高、人口密度大、 贫困面大	保护现有林草植被的基 础上,重点保护和发展水 源林、改造中低产田、优 化农业生产结构	—
岩溶峡谷 Karst gorge	黔西南、滇东北、滇西南	土层薄、人口压力大、陡 坡开垦、砍伐薪柴严重、 地表水资源短缺、承载 力低	封山育林、人工造林为 主,发展特色农林牧业以 及生态旅游	贵州晴隆人工种草养畜模 式、贵州花江模式(顶坛花 椒模式)等
岩溶槽谷 karst valley	黔东南、川东、湘西、鄂 西、渝东南、渝中、渝东北	石漠化加重趋势明显、高 位岩溶水资源泄露、农业 生产结构不合理	保护、开发和合理调配不 同高程岩溶水资源、加强 水土保持、调整农业结 构、发展畜牧业	云南西畴岩溶槽谷小流域 石漠化治理模式等

续表

地貌类型 Geomorphic type	分布区域 Distribution regions	区域主要问题 Regional key issues	治理思路 treatment scheme	典型模式 Typical models
中高山地 Middle-high mountain	滇东北、川西和四川盆地西部	自然条件差、人口贫困、局部水资源能源短缺、草地退化	保护现有林草植被的基础上,重点加强草地保护与建设,发展畜牧业与生态旅游业	毕节高原岩溶山地开发扶贫生态建设模式等
断陷盆地 Graben basin	滇东至四川攀西盐源地区、贵州西部	农村能源短缺、局部无序工矿活动严重、水资源匮乏、制约土地资源利用	保护现有林草植被的基础上,重点加强植被建设与特色产业开发	贵州六盘水三变模式、云南蒙自断陷盆地生态建设模式等
峰丛洼地 Peak-cluster depression	黔南、黔西南、滇东南、桂西、桂中	缺水、少土、耕地资源匮乏、石漠化现象严重、环境恶劣、人地矛盾突出	蓄水保土、提高植被覆盖度、建设基本农田、针对性生态移民	果化立体生态农业管理模式、环江古周小流域综合治理模式等
溶丘槽谷 Soluble high trough valley	湘中、湘南、粤东、粤中	季节性干旱严重、地面塌陷、地面沉降等地质性灾害严重	封山育林育草、合理开发水资源、加大农村新能源建设、调整单一产业结构	广西恭城岩溶丘陵沼气开发利用模式等
峰林平原 Peak forest plain	桂中、桂东、湘南、粤北	地表水资源匮乏、干旱缺水、地下水开采引发地面塌陷	封山育林、人工造林、合理开发地表水与地下水资源	广西崇左天等模式等

在地貌类型区域内部,不同的地形、水分等自然条件相互组合导致区域内部岩溶过程存在差异,进而形成了复杂多样的小生境,小生境之间亦具有高度异质性^[16]。如生境相对开放的石坑、石沟等小生境土壤有机碳及全氮的含量普遍高于处于相对封闭状态的石槽、石洞和石缝,可为石漠化治理过程中的植被恢复提供良好的土壤条件^[84];在相同气候条件下,岩性与地形是控制表层岩溶水发育的主导因素,山体低凹处表层岩溶水发育相对较好,可为植被恢复与农牧业发展提供良好的水源基础^[85];同一区域,海拔、坡度等因素的差异对石漠化治理过程中植被类型选择与农牧业生产布局也会产生重大的影响。现阶段,相关研究还未阐明不同土壤-岩石环境水分状况的差异成因及植物的适应机理^[86],制约了石漠化综合治理模式的推广;但基本明确的是在特定区域石漠化治理模式构建与选择时要以小流域为基本单元,借鉴相似区域的石漠化治理模式,结合本区域特点构建适宜本区域生态恢复与经济发

4 结论

依据机构调研资料与文献资料,本文对我国西南岩溶地区石漠化治理相关工程项目及其所采用的治理技术、措施、模式的梳理,解析石漠化综合治理模式目标,归纳不同治理目标项目中石漠化综合治理模式所采用治理技术的退化问题针对性与采用措施的时空特征针对性,总结出以下四点石漠化治理技术需求配置原则:

(1)以治理目标与预期周期为导向,确立石漠化治理采取的措施:对于以生态效益为治理目标的短期项目,主要采取生态措施与工程措施;以生态与经济效益为治理目标的中短期项目,主要采取生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施;以兼顾生态、经济与社会效益为治理目标的中长期与长期项目,主要采取生态措施、生物措施、农艺措施与工程措施。

(2)针对要解决的关键生态退化问题,结合区域特征遴选石漠化治理技术:石漠化现象是脆弱生态环境叠加人类不合理经济活动的最终表现形式,石漠化治理需要解决缺水、少土、植被立地困难和经济落后四大关键问题——应用水资源开发利用技术与水土保持技术解决缺水的问题,应用土地整理技术、土壤改良技术与水土保持技术解决少土的问题,应用植被恢复与重建技术解决植被生长困难的问题,应用石漠化区域农业结构调整与生态产业培育技术解决贫困落后的问题。

(3) 针对石漠化退化阶段的差异,确定石漠化治理途径措施与基本思路:根据石漠化地区土地退化程度,可将其分为潜在石漠化地区、轻度石漠化地区、中度石漠化地区和重度石漠化地区。不同石漠化退化阶段应采取不同的治理措施:潜在石漠化地区主要采取水土保持与产业结构优化调整措施,轻度石漠化地区主要采取治生态恢复与经济发展相结合的治理措施,中度石漠化地区主要采取林草种植与生态诱导修复措施,重度石漠化地区主要采取封山育林与人工辅助生态修复措施。

(4) 结合石漠化综合治理模式的共性特征,以小流域为基本单元,因地制宜的选择与构建石漠化综合治理模式:岩溶地区生态环境的高度异质性,使得石漠化治理过程中形成众多特征鲜明的石漠化治理模式,但各种治理模式亦存在共性特征——理念上顺应自然发展规律、宏观上构建立体生态恢复模式、微观上解决水土植被问题;石漠化治理模式构建与选择时要以小流域为基本单元,结合典型石漠化治理模式的共性特征,构建适宜本区域生态恢复与经济开发的石漠化治理模式。

石漠化综合治理是我国西南岩溶地区生态文明建设与可持续发展的重要举措,近年来系列生态工程措施的实施,使得西南岩溶地区石漠化治理已初见成效。然而,现阶段石漠化综合治理仍面临着治理难度逐步加大、陡坡耕种等人地矛盾难以全面消除、治理成果巩固乏力与可持续性差等系列问题。十九大报告提出的开展国土绿化行动与乡村振兴战略规划中提到的加强乡村生态保护与修复部分,都指出要大力推进石漠化综合治理。因此,本文从近 30 年来的石漠化治理实践中汲取有益的治理经验与做法,以期提升区域生态承载能力和保障脆弱的岩溶地区人地和谐发展提供重要的科学依据。

致谢: 特别感谢中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站、国际岩溶研究中心、贵州师范大学喀斯特研究院、贵州省水土保持监测站等机构的专家在项目组贵州和广西石漠化调研期间的支持和指导。

参考文献 (References):

- [1] 中国科学院. 关于推进西南岩溶地区石漠化综合治理的若干建议. 中国科学院院刊, 2003, 18(3): 169-169.
- [2] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. Land Degradation & Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [3] 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 吕仕洪, 罗为群, 蓝芙宁, 曹建华. 论岩溶峰丛洼地石漠化的综合治理技术——以广西平果果化示范区为例. 中国岩溶, 2008, 27(1): 50-55.
- [4] 张浩, 熊康宁, 王孝良, 肖华, 张乾柱. 贵州晴隆县种草养畜治理石漠化的效果、存在问题及对策. 中国草地学报, 2012, 34(5): 107-113.
- [5] 李阳兵, 罗光杰, 白晓永, 王永艳, 王世杰, 谢静, 杨广斌. 典型峰丛洼地耕地、聚落及其与喀斯特石漠化的相互关系——案例研究. 生态学报, 2014, 34(9): 2195-2207.
- [6] 颜萍, 熊康宁, 王恒松, 李晋, 刘洋. 喀斯特地区水土流失与水土保持研究进展. 中国水土保持, 2016, (1): 54-59.
- [7] 张殿发, 欧阳自远, 王世杰. 中国西南喀斯特地区人口、资源、环境与可持续发展. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(1): 77-81.
- [8] 李松, 熊康宁, 王英, 肖时珍, 王茂强. 关于石漠化科学内涵的探讨. 水土保持通报, 2009, 29(2): 205-208.
- [9] 温远光, 陈放, 朱宏光, 赖家业, 刘京涛, 吴庆标. 石漠化综合治理的理论与技术//生态安全与可持续发展——广西生态学会 2003 年学术年会论文集. 南宁: 中国生态学会, 广西大学, 广西区科协, 国家林业局中南速生材繁育重点开放性实验室, 2003: 78-85.
- [10] 黄金国, 魏兴琥, 王兮之. 粤北岩溶山区土地石漠化成因及其生态经济治理模式. 水土保持研究, 2013, 20(4): 105-109.
- [11] Guo F, Jiang G H, Yuan D X, Polk J S. Evolution of major environmental geological problems in karst areas of Southwestern China. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(7): 2427-2435.
- [12] 李阳兵, 王世杰, 容丽. 关于喀斯特石漠和石漠化概念的讨论. 中国沙漠, 2004, 24(6): 689-695.
- [13] 曹建华. 一个曾被忽略的方程式——解读石漠化. 人与生物圈, 2009, (5): 4-17.
- [14] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.
- [15] 覃小群, 朱明秋, 蒋忠诚. 近年来我国西南岩溶石漠化研究进展. 中国岩溶, 2006, 25(3): 234-238.
- [16] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 苏维词, 曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [17] 苏维词, 杨华, 李晴, 郭跃, 陈祖权. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治. 土壤通报, 2006, 37(3): 447-451.
- [18] 黄秋昊, 蔡运龙, 王秀春. 我国西南部喀斯特地区石漠化研究进展. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 106-111.

- [19] 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. 中国岩溶, 2016, 35(5): 461-468.
- [20] 蒋忠诚. 广西弄拉峰丛石山生态重建经验及生态农业结构优化. 广西科学, 2001, 8(4): 308-312.
- [21] 国家林业局. 中国石漠化状况公报. 北京: 国家林业局, 2012.
- [22] Brandt M, Yue Y M, Wigneron J P, Tong X W, Tian F, Jepsen M R, Xiao X M, Verger A, Mialon A, Al-Yaari A, Wang K L, Fensholt R. Satellite-observed major greening and biomass increase in South China karst during recent decade. *Earth's Future*, 2018, 6(7): 1017-1028.
- [23] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, De Keersmaecker W, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [24] 李阳兵, 谭秋, 王世杰. 喀斯特石漠化研究现状、问题分析与基本构架. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 27-34.
- [25] Xiong Y J, Qiu G Y, Mo D K, Lin H, Sun H, Wang Q X, Zhao S H, Yin J. Rocky desertification and its causes in karst areas: a case study in Yongshun County, Hunan Province, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(7): 1481-1488.
- [26] 李阳兵, 王世杰, 谭秋, 龙健. 喀斯特石漠化的研究现状与存在的问题. 地球与环境, 2006, 34(3): 9-14.
- [27] 肖华, 熊康宁, 张浩, 张乾柱. 喀斯特石漠化治理模式研究进展. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(3): 330-334.
- [28] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [29] 袁道先. 全球岩溶生态系统对比: 科学目标和执行计划. 地球科学进展, 2001, 16(4): 461-466.
- [30] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-482.
- [31] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因. 地球科学进展, 2003, 18(6): 933-938.
- [32] 张信宝, 王世杰, 白晓永, 陈伟燕, 张思屹. 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. 地球与环境, 2013, 41(1): 1-6.
- [33] Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N, Zhou Z F. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, PR China: phenomena and mechanisms. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 123-131.
- [34] 胡宝清, 廖亦眉, 严志强, 蒋树芳, 黄秋燕, 李生明. 基于 RS 和 GIS 的喀斯特石漠化驱动机制分析——以广西都安瑶族自治县为例. 山地学报, 2004, 22(5): 583-590.
- [35] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [36] 陈起伟, 熊康宁, 兰安军. 喀斯特高原峡谷与高原盆地石漠化及变化特征对比. 热带地理, 2014, 34(2): 171-177.
- [37] Hao Y H, Cao B B, Zhang P C, Wang Q Y, Li Z T, Yeh T C J. Differences in karst processes between northern and southern China. *Carbonates and Evaporites*, 2012, 27(3/4): 331-342.
- [38] 李森, 魏兴琥, 张素红, 李红兵, 王明刚, 罗红波, 王金华. 典型岩溶山区土地石漠化过程——以粤北岩溶山区为例. 生态学报, 2010, 30(3): 674-684.
- [39] 王君华, 莫伟华, 陈燕丽, 莫建飞, 钟仕全, 苏永秀. 基于 3S 技术的广西平果县石漠化分布特征及演变规律. 中国水土保持科学, 2014, 12(3): 66-70.
- [40] 熊平生, 袁道先, 谢世友. 我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展. 中国岩溶, 2010, 29(4): 355-362.
- [41] 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. 地理学报, 2003, 58(2): 314-320.
- [42] 黄秋昊, 蔡运龙. 基于 RBFN 模型的贵州省石漠化危险度评价. 地理学报, 2005, 60(5): 771-778.
- [43] Zhang M Y, Wang K L, Zhang C H, Chen H S, Liu H Y, Yue Y M, Luffman I, Qi X K. Using the radial basis function network model to assess rocky desertification in northwest Guangxi, China. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(1): 69-76.
- [44] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 鹿士杨, 杜虎. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草的土壤生态效应. 土壤学报, 2011, 48(6): 1219-1226.
- [45] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. 农业工程学报, 2011, 27(9): 305-310.
- [46] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 王克林. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性. 生态学报, 2012, 32(8): 2390-2399.
- [47] 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. 草业科学, 2008, 25(9): 40-50.
- [48] 颜萍, 熊康宁, 檀迪, 郭杰, 陈航, 胡晚枚. 喀斯特石漠化治理不同水土保持模式的生态效应研究. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2016, 34(1): 1-7, 21-21.
- [49] 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. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.

- [50] 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. 中国岩溶, 2016, 35(5): 469-475.
- [51] 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. 北京: 科学出版社, 2011.
- [52] 李阳兵, 王世杰. 关于西南岩溶区石漠化土地恢复重建目标的讨论. 热带地理, 2005, 25(2): 123-127.
- [53] 胡业翠, 方玉东, 江文亚. 广西喀斯特石漠化与贫困化空间相关性及其互动效应研究. 资源与产业, 2009, 11(5): 105-110.
- [54] 王建锋, 谢世友. 西南喀斯特地区石漠化问题研究综述. 环境科学与管理, 2008, 33(11): 147-152.
- [55] 田秀玲, 倪健. 西南喀斯特山区石漠化治理的原则、途径与问题. 干旱区地理, 2010, 33(4): 532-539.
- [56] 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. 生态学报, 2014, 34(18): 5328-5341.
- [57] 万军. 贵州省喀斯特地区土地退化与生态重建研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(3): 447-453.
- [58] 曹建华, 邓艳, 杨慧, 蒲俊兵, 朱同彬, 蓝芙宁, 黄芬, 李建鸿. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范. 生态学报, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [59] 陈洪松, 王克林. 西南喀斯特山区土壤水分研究. 农业现代化研究, 2008, 29(6): 734-738.
- [60] 李先琨, 何成新. 西部开发与热带亚热带岩溶脆弱生态系统恢复重建. 农业系统科学与综合研究, 2002, 18(1): 13-16.
- [61] 李先琨, 苏宗明, 吕仕洪, 欧祖兰, 向悟生, 区智, 陆树华. 广西岩溶植被自然分布规律及对岩溶生态恢复重建的意义. 山地学报, 2003, 21(2): 129-139.
- [62] 苏维词, 朱文孝, 熊康宁. 贵州喀斯特山区的石漠化及其生态经济治理模式. 中国岩溶, 2002, 21(1): 19-24.
- [63] 袁道先, 曹建华. 岩溶动力学的理论与实践. 北京: 科学出版社, 2008.
- [64] 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. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [65] 张竹如, 李燕, 王林均, 陈强, 陈黎明. 贵州岩溶石漠化地区恢复的初步研究——贵阳黔灵山的启示. 中国岩溶, 2001, 20(4): 310-314.
- [66] 任海, 刘庆, 李凌浩. 恢复生态学导论(第二版). 北京: 科学出版社, 2008.
- [67] 李先琨, 何成新, 唐建生, 蒋忠诚, 黄玉清. 广西岩溶山地生态系统特征与恢复重建. 广西科学, 2008, 15(1): 80-86, 91-91.
- [68] 邓菊芬, 崔阁英, 王跃东, 阙农云, 黄必志. 云南岩溶区的石漠化与综合治理. 草业科学, 2009, 26(2): 33-38.
- [69] 白晓永. 贵州喀斯特石漠化综合防治理论与优化设计研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2007.
- [70] 盈斌. 岩溶地区土地利用、石漠化与治理工程设计[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2009.
- [71] 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——以贵州为例. 北京: 地质出版社, 2002.
- [72] 邓必玉, 马一琳, 许仕道, 莫剑锋. 广西马山县岩溶土地石漠化动态变化情况及其变化原因分析. 广西林业科学, 2012, 41(4): 365-369.
- [73] 李阳兵, 王世杰, 熊康宁. 花江峡谷石漠化土地生态重建及其启示. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1): 138-142.
- [74] 陈圣子. 人为干预下石漠化生态系统健康诊断与演变研究——以花江示范区为例[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016.
- [75] 喻阳华, 秦仕忆. 黔中顶坛花椒衰老退化原因及其防治策略. 贵阳学院学报: 自然科学版, 2018, 13(2): 98-102.
- [76] 邓家富. 黔西南州石漠化治理的主要做法及成功模式. 中国水土保持, 2014, (1): 4-7, 23-23.
- [77] 刘伟. 黔西南布依族苗族自治州晴隆模式研究[D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2016.
- [78] 吴孔运, 蒋忠诚, 罗为群, 覃小群. 喀斯特峰丛山地立体生态农业模式实施效果研究——以广西壮族自治区平果县果化示范区为例. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1197-1200.
- [79] 刘芳, 何报寅, 张亮, 寇杰锋, 韦金丽. 基于热红外遥感的广西平果县石漠化初步研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(6): 952-956.
- [80] 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. 中国岩溶, 2016, 35(5): 476-485.
- [81] 陈永华. 贵州喀斯特石漠化综合治理技术集成与模式研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2008.
- [82] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究. 北京: 科学出版社, 2014.
- [83] 安吉平, 王济, 蔡雄飞, 段志斌, 颜蒙蒙. 西南喀斯特二元结构下土壤流失研究进展. 湖北农业科学, 2017, 56(9): 1605-1610.
- [84] 廖洪凯, 龙健, 李娟, 杨江江, 冯业强. 西南地区喀斯特干热河谷地带不同植被类型下小生境土壤碳氮分布特征. 土壤, 2012, 44(3): 421-428.
- [85] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理. 热带地理, 1998, 18(4): 322-326.
- [86] 陈洪松, 聂云鹏, 王克林. 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展. 生态学报, 2013, 33(2): 317-326.