

朱大运,熊康宁. 气候因子对我国喀斯特石漠化治理影响研究综述[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):19-23.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.004

气候因子对我国喀斯特石漠化治理影响研究综述

朱大运,熊康宁

(贵州师范大学喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化工程技术研究中心,贵州贵阳 550001)

摘要:中国西南地区是世界上饱受石漠化危害最严重的区域之一,近年来,围绕石漠化问题开展了许多治理工作。笔者在简述喀斯特石漠化地区气候与治理特点的基础上,从生物措施、工程措施、耕作措施、政策制度4个主要治理方向着眼,总结了各种治理措施与气候因子影响作用研究进展,结合现有的研究基础和成果,提出了今后喀斯特石漠化治理研究的课题:加强极端气候对石漠化治理的影响和预防;喀斯特石漠化演变与气候因子的微观作用机制探究;石漠化治理与气候变化适应性模型构建;加强学科交叉,将石漠化治理作为一个耦合系统进行研究。

关键词:石漠化治理;气候因子;影响作用;中国西南

中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)07-0019-05

我国喀斯特地貌分布广、面积大,主要分布在以贵州高原为中心的西南地区,面积约54万km²。区内生物多样性丰富,喀斯特作用强烈,景观类型复杂而典型,生态系统极度脆弱,在全球喀斯特研究中占有重要地位^[1-3]。近几十年来,为了满足人类日益增长的物质需求,资源被过度开发利用,喀斯特生态遭到严重破坏,石漠化现象快速增加^[4]。截至2011年年底,我国石漠化面积约12万km²,占喀斯特土地总面积的26.5%,占区域国土面积的11.2%,防治形势十分严峻^[5]。石漠化已成为政府和科研部门高度关注的问题,国家“十五”至“十二五”规划纲要中,明确将石漠化治理作为国计民生的大事,强调加快小流域治理,减少水土流失,加速推进黔桂滇

喀斯特地区石漠化综合治理进程^[6]。

当前,全球气候系统变暖是非常明确的^[7],以气候变暖和降雨格局转变为特征的全球变化正改变着陆地生态系统的结构和功能^[8]。在喀斯特地区气候因素是造成或加剧石漠化的重要原因之一。气候变化控制着地表水量平衡,通过降雨和温度因子调控土壤的入渗与蒸发过程,使得地表土壤一直经历干湿循环作用,表层土壤中的水分处于一种动态变化之中,最终土壤水力性能下降(持水能力、渗透特性等),侵蚀加剧,土壤水中的养分不能正常迁移,动植物所需水分及养分难以维系,生态系统退化,从而形成不同的石漠化景观^[9]。过去50年,我国西南地区气候整体呈现“暖干化”趋势^[10],极端气候事件发生频率和强度显著增加^[7,11-12],地表水热环境的改变给喀斯特石漠化治理带来新的挑战,促使研究者思考将人类-林草/作物-牲畜-生态经济效益作为耦合系统来应对气候变化,并基于这种思想开展了相关治理工作,从最初的生物措施,到工程措施,再到政策方针措施等,治理体系不断完善,对地形、气候等因子影响作用的认知逐步深化,取得了良好进展与示范性成果^[13-14]。笔者围绕喀斯特石漠化这一主题,对近几十年我国石漠化治理及其与气候因子关系的研究进行概要总结,并对未来发展趋势提出展望,旨在

收稿日期:2017-06-29

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFC0502601);贵州省科学技术基金(编号:黔科合基础[2016]1101);贵州师范大学2016年博士科研启动基金。

作者简介:朱大运(1984—),男,河南信阳人,博士,副教授,主要从事石漠化综合治理与气候变化、岩溶区水土保持研究。E-mail:zhudayun163@163.com。

通信作者:熊康宁,硕士,教授,主要从事喀斯特与洞穴、资源与环境及石漠化生态治理研究。E-mail:xiongkn@163.com。

[67]王友保,燕傲蕾,张旭情,等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(6):163-166,172.

[68]李 硕,刘云国,李永丽,等. 水葱修复土壤镉污染潜力的研究[J]. 环境污染与防治,2006,28(2):84-86.

[69]胡鹏杰,周小勇,仇荣亮,等. Zn超富集植物长柔毛委陵菜对Cd的耐性与富集特征[J]. 农业环境科学学报,2007,26(6):2221-2224.

[70]周启星,刘家女. 一种利用紫茉莉花卉植物修复重金属污染土壤的方法:CN101049603[P]. 2007-10-10.

[71]林立金,罗 丽,廖明安,等. 挺水植物水田芥对镉的积累特性研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(4):684-689.

[72]王素娟,李正文,王彦祥. 羽叶鬼针草对Cd、Pb的吸附特性研究[J]. 河南农业科学,2009(6):77-81.

[73]罗 丽,林立金,廖明安,等. 旱莲草对镉的富集特性研究[J].

华北农学报,2014,29(3):216-220.

[74]林立金,马倩倩,石 军,等. 花卉植物硫华菊的镉积累特性研究[J]. 水土保持学报,2016,30(3):141-146.

[75] Lin L, Jin Q, Liu Y, et al. Screening of a new cadmium hyperaccumulator, *Galinsoga parviflora*, from winter farmland weeds using the artificially high soil cadmium concentration method[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2014, 33(11):2422-2428.

[76]魏树和,周启星. 一种利用富集植物蒲公英修复重金属污染土壤的方法:CN101406896[P]. 2009-04-15.

[77]曾清如,杨 洋,陈璜涵,等. 一种利用油葵种植修复重金属污染土壤的方法:CN103639183A[P]. 2014-03-19.

[78]何池全,马 灏,吴美英,等. 一种利用能源作物蓖麻修复重金属污染土壤的方法:CN104785514A[P]. 2015-07-22.

为喀斯特石漠化治理提供借鉴和参考。

1 我国喀斯特地区气候特征与石漠化分区治理现状

我国喀斯特地区以贵州高原为中心,北起秦岭山脉南麓,南至广西盆地,西至横断山脉,东抵罗霄山脉西侧(98°36′~116°05′E,22°01′~33°16′N),涵盖贵州省、云南省、广西壮族自治区、湖南省、湖北省、重庆市、四川省、广东省等全境或部分分地区,气候以湿润多雨的亚热带气候为主要特征,温度较高,雨量丰沛,水资源季节年际变化大,干旱和内涝灾害频繁发生。同时,该地区还呈现地表-地下双层结构特征和典型的山地垂直气候特征^[15]。

喀斯特石漠化地区生态环境脆弱,可溶岩成土速率缓慢;水文过程变化迅速,旱涝时常发生;水土资源空间分布不匹配;水热因子的高度时空异质性,贯穿于喀斯特生态系统形成与演化的各个环节;氮磷钾极度缺乏的高钙镁土壤环境容量小,生态系统可恢复性低^[16],因此,开展治理工作十分困难,需要兼顾多种因素。国家《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲2006—2015》在充分考虑岩石类型、岩性组合特征对喀斯特地貌塑造的影响,不同喀斯特地貌对区域环境和水土资源的制约、石漠化在不同地貌条件下的形成、发育特征等因素基础上,将我国西南石漠化综合治理划分为八大区域,分别代表不同的石漠化特征类型,因地制宜、有针对性地布设治理方向。在这种方向指引下,探索出了生态经果林、果/草—养殖—沼气^[17]、经果林+特色作物种植+传统农业^[18]、立体生态农业^[19]等成功模式和案例,石漠化得到有效遏制,促进了当地生态经济社会的发展。

2 喀斯特石漠化治理与气候因子影响作用研究进展

喀斯特是一种特殊的地域综合体,抗干扰与适应能力差,对外界环境响应敏感,它发育于植被系统脆弱、土壤C层缺失且结构不稳定的生态环境中,西南亚热带高温多雨的气候条件为其提供了侵蚀动力基础^[20-21]。排除人为扰动和地表土壤系统自身作用,气候变化对喀斯特石漠化演变及防治的影响不容忽视,它通过气温、降水、光照、二氧化碳浓度等因子的生态循环功能作用于石漠化产生的外围环境,其中以气温和降水的表现最为明显,同时也是干扰石漠化治理进程的主导气候因子。石漠化治理措施多种多样,笔者参考中国水土保持措施分类标准^[22],从生物措施、工程措施、耕作措施、制度措施4个方面,分别阐述气候因子对石漠化治理影响的研究现状与进展。

2.1 气候因子对石漠化生物治理措施的影响

2.1.1 气候因子对石漠化治理物种选择的影响 喀斯特石漠化是植被逆向演替和消亡的结果^[23-24],因此,石漠化治理以生态恢复为核心原则,选择适宜的物种成为关系人工生物恢复措施成败的重要前提。在石漠化治理物种筛选方面,众多研究多考虑植被的适生、耐旱、喜钙、偏碱特性,通过重复种植试验来确定适应物种^[25-26],并且基本上以乡土树种为主,它们对小生境有着天然的适应性,气候因子影响作用通常被忽视。当前石漠化治理更加侧重强调生物功能多样、植被群落结构合理与生态经济综合效益的实现,生态功能型、经济型、药用型物种占有一定比例,它们对区域气候环境的适应

性、抗逆性评估是石漠化治理物种选择的重要指标。

喀斯特独特的地表-地下“二元三维”的空间结构特征,导致地质性干旱环境普遍而脆弱,干旱胁迫成为影响该地区植物生存的重要因素,也是石漠化物种选择的主要参考依据^[27]。现阶段气候因子对石漠化治理物种选择的理论研究更多集中于干旱胁迫适应性方面,涉及植被生长的各个阶段,从物种种子萌发^[28]、生长与生物量计算^[29]、水分利用率^[30]到植物的光合、蒸腾作用差异^[31],而且随着干旱程度的变化某些物种抗旱特性还会发生转化。吴俊文等对广东3种常见石漠化造林树种浙江润楠、枫香和亮叶含笑的光合与耗水特性研究表明,在不同胁迫条件下日平均耗水速率存在显著差异,在正常和轻度干旱情况下枫香的抗旱能力较强,而在重度干旱条件下浙江润楠的表现更好^[32]。

岩溶植被带有水平地带性、区域性烙印,不同的气候带,岩溶植被的区系成分、结构和外貌也不尽相同,在物种选择上还必需注重小尺度气候环境的综合影响。如蒜头果等树种从气候湿润、土壤肥厚的云南广南地区引种到气候、土壤等自然条件较差的砚山试验地生长表现并不好^[33]。同时,喀斯特山地光、热、水、二氧化碳等资源还存在垂直差异,生境异质性的存在甚至成为植被演替的主导因子,脱离了自然环境条件的具体要素,即便选用优良的树种,也有可能造成对生境的二次破坏。李先琨等指出,在喀斯特山地顶部、阳坡、阴坡植被恢复上,需要根据光照和温度因子选择适宜物种^[25]。

2.1.2 石漠化治理植被恢复对气候因子的响应 气候变化与植被变化的相关性已经在全球和区域尺度上得到证明。基于遥感信息的提取和分析^[34]表明,自20世纪80年代以来,我国西南喀斯特地区植被指数年际变化与气候因子年际变化相关性区域分异特征明显,在不同气候条件下呈现不同的规律性,进一步增进了对影响喀斯特生态系统稳定性的自然过程的认知。植被恢复是西南喀斯特石漠化治理和生态重建的关键步骤^[35],水热条件成为喀斯特植被系统恢复进程的重要限制性生态因子^[36-37]。研究发现,喀斯特地表植被净初级生产力(NPP)与气温、降水显著相关,气温的胁迫作用强于降水^[38],并且植被对气候因子的响应存在一定滞后性^[39-40],不同的植被类型对水热条件响应程度不同,与水热条件时滞相关越强的植被则滞后时间相对越久^[40],就温度和降雨来讲,植被NDVI对降水的响应比对温度的响应速度更快。此外,对于某些气候因子而言,它对植被的影响还存在阈值效应,超过阈值点主导因素就会发生变化,如贵州省喀斯特地区植被生长对降雨大小程度就有不同的响应,当年降雨量在900mm以下时,气候性干旱是制约植被生长的主要因素;当年降雨量在900mm以上时,地质性干旱开始影响植被生长^[41],并且植被在多次中度干旱后的恢复能力明显强于重度干旱^[42]。

2.1.3 气候因子对石漠化治理的影响 近几十年来,我国西南地区气候整体呈暖干化态势,气温明显上升,降水量有所减少^[43-44],水热条件失衡,干旱发生概率增大,进一步加剧了石漠化土地的喀斯特干旱现象。云南曲靖等喀斯特地区就因持续干旱气候影响石漠化面积扩展了6.8%,生物治理成果遭受严重破坏^[45]。毋庸置疑,人为干扰在石漠化逆向演变过程中发挥着举足轻重的作用,但是气候等其他因素影响作用评价也是外界一直比较关注的问题。相关性与主成分法量化分

析研究结果^[46],人为因素仍然是广西石漠化发展或逆转的主导因子,气候变化仅是次要影响因子,人类活动、气候变化对石漠化的影响贡献率分别为 64.115%、23.355%,相似结果在桂西北、粤北、贵州等地区石漠化研究中也得到相应的证实^[39,47-48]。除了极端气候事件,一般短时期内气候变化对石漠化区植被的影响作用并不明显,从长远考虑在石漠化治理的过程中应当结合气象资料,根据地区气象变化特点,选择适宜生长的耐贫瘠岩生性灌草,提高植被成活率,从而增加植被覆盖度,防止石漠化程度加剧^[46]。

生物措施是石漠化治理手段中最为行之有效的方法之一,在不同区域、不同气候条件下适林、适草植被的选择上,一直在不断地探索研究。谷勇等从石漠化特点、成因机制等方面考虑,根据气候、立地条件等差异,对云南喀斯特石漠化提出了分区治理,协调发展的理念^[49]。通过对石漠化适草植被的研究,李馨等认为,加强气候灾害预报与控制研究,提升草地在极端气候中生存能力,是石漠化治理中人工草地建设面临的重要问题之一^[50]。

2.2 气候因子对石漠化工程治理措施的影响

水土保持工程措施是小流域水土保持综合治理措施体系的主要组成部分^[51-52],其目的就是通过各种工程措施改变小地形和供水补水结构,发展农耕经济产业,减少和防止土壤侵蚀,拦蓄利用径流泥沙,以达到石漠化综合治理效果。我国西南喀斯特石漠化治理主要工程措施是坡改梯,部分坡改梯工程配套田间道路和微集水工程^[53]。与生物治理措施相比,气候因子对石漠化治理工程措施的影响方式较为单一,与降雨因子关系最为密切,主要表现在对地表产流峰值的预估上。西南喀斯特区多处于亚热带季风气候的控制下,年降水集中在夏季,产流高峰也发生在同一时期,且区域性差异大,充分评估最大降雨量、极端气候事件的潜在威胁,有助于增强工程措施设计的科学性、合理性。遵循这一理论,毕节石漠化地区坡改梯工程实施过程中就把气候要素作为重要参考,根据降雨和汇流面积,结合坡面自然排水方式、地形地貌等布设坡面沟渠工程,并且在配套蓄排引水工程建设中把沟渠的防御暴雨标准按 10 年一遇 24 h 最大降雨量设计^[54],明显高于清镇市王家寨小流域 5 年一遇的防洪设计标准^[55],表现出更强的抗洪防冲能力。黄雪松等对广西石漠化旱涝灾害防治措施与策略研究中也主张根据石漠化区旱涝灾害分布特点,设置农田基础设施、水利工程设施,进一步增强旱涝防御能力^[56]。然而,实际操作中由于对气候因子影响作用认识不充分,而导致工程措施没有发挥应有作用,治理效果不理想的情况也不乏存在。张信宝等发现,在一些石漠化坡耕地治理试点工程中存在部分蓄水工程来水不足、利用效率不高的问题,这主要与对喀斯特坡地降雨产流特性认识不足从而导致设计来水量偏大有关^[53]。

2.3 气候因子对石漠化治理耕作措施的影响

长期以来,由于喀斯特地区耕地资源短缺、人地矛盾突出,毁林开荒、滥砍滥伐一直是加剧我国石漠化现象的直接原因,在此背景下以林草植被修复为核心的生态整治法应运而生^[27,49,57]。生物治理措施虽然较为有效,但并不能从根本上解决农民的粮食安全和收入增长问题。卢良恕提出,喀斯特地区气候资源独特,“立体气候”特征明显,降水较为丰富,具

备发展特色农业潜力^[58]。基于气候影响和水土保持考虑的等高线高植、草田轮作、免耕少耕等保护性耕作措施在西北黄土高原已经得到比较成熟的研究和推广运用^[59-60],然而在水土流失严重的西南喀斯特地区相关报道却很少,特别是在微观层面和气候影响机制的研究。何腾兵等对喀斯特山区旱地研究表明,实施保护性耕作措施后土壤理化性质发生了变化,全磷、全钾、速效钾等土壤养分含量明显高于常规耕作土壤^[61]。潘艳华等通过石漠化区耕作措施对比试验,进一步证实保护性耕作措施可以增加土壤有机质、全氮含量和孔隙度,降低土壤容重,极大改善石漠化土壤环境质量^[62]。

近年来,在保护性耕作和石漠化治理特色立体农业的引导下,气候因子在石漠化治理中作用的关注度逐渐上升。立体农业是结合当地的气候、水文、植被以及人文等因素,经过优化配置,由粮食作物-经济作物-牧草轮作模式、果树-药材模式等组成的复合农林经营体系,耕作方式与气候都是整个连接体系必不可少的部分^[19]。在广西平果县倡导的果农草系统耦合生产模型,就是以作物相似的生存气候条件为前提,从而实现豆科牧草、1 年生牧草及饲料作物参与粮食作物和经济作物的套作和轮作^[63]。任继周在对喀斯特地区农业发展建议中也提倡充分运用气候(水热)资源潜力,发挥气候因子的正向促进作用,通常情况下牧草等饲用植物生长期比一般农作物长 1~2 个月,比农作物多利用 20%~40% 的积温,节约 15%~20% 的水分,如果以 20% 的耕地用来草田套种,既可保证粮食产量,又可增加收益^[64]。

2.4 气候变化与石漠化治理政策措施的互动促进

喀斯特石漠化治理是一个兼具复杂性、科学性与长期性的工程^[65]。党的十七大报告指出,“加强水利、林业、草原建设,加强荒漠化石漠化治理,促进生态修复。加强应对气候变化能力建设,为保护全球气候作出新贡献”。喀斯特地区退化生态系统的恢复重建已上升为重大国家需求^[66],国家及各级相关部门颁布和制定了许多政策措施,相关制度、政策成为石漠化治理工程实施的根本保障。从气候变化层面上讲,与之最密切的有关石漠化治理政策措施当属生态移民和能源替代,力求恢复自然生境、改变传统的薪炭能源结构,通过增加碳汇、减少温室气体排放来改善气候环境。广西环江县自建立肯福、城北等移民开发区,实行生态移民后,原石漠化地区封山 3 年,植被覆盖率可提高 10%~30%,封山 6 年植被覆盖率可提高 90% 以上^[67];环江县下南乡实施环境移民工程 10 年,植被恢复效果显著,物种丰富度与多样性稳步增加,生态环境得到了极大改善^[68]。贵州省贞丰县北盘江镇自 1997 年以来推广“花椒-猪-沼气”治理模式,解决农村能源问题^[69],云南石林地区则利用该区日照充分的优势,修建太阳能光伏电站,尝试发展洁净能源^[70]。这些新型能源结构举措,一是减少了当地居民对植物柴的依赖和碳排放,缓解了对区域气候环境的影响;二是增加了经济效益和社会效益。

3 研究展望

自 20 世纪 80 年代初石漠化灾害概念提出^[71-72]以来,我国喀斯特石漠化治理已经走过了 30 多年的历程,石漠化问题受到各界越来越多的关注和重视。研究者从石漠化发生演变规律、调控机制、治理策略和调控措施等多方面开展了研究,

然而由于人为扰动和地质条件在石漠化演变中起重要作用,主要研究成果多聚焦于这2个相关内容。客观地讲,在当前全球气候快速变化的大背景下,气候因子对喀斯特石漠化的影响作用以及石漠化治理对气候变化的适应性研究相对滞后,目前尚处于初级阶段,随着石漠化治理时间尺度的不断延展,气候对石漠化治理的影响研究会引起更多的关注。

在现有研究基础上,未来喀斯特石漠化治理与气候变化关系问题,应从以下几个方面进一步深入。

3.1 极端气候对石漠化治理的影响机制及预防

近年来,西南地区气候异常情况频繁,干旱、洪涝、霜冻等极端灾害事件发生次数明显增多,给石漠化治理成果带来了严峻的挑战。增强喀斯特区植被对极端气候的生理反应,以及自适应恢复或外界介入恢复特征研究十分必要;总结归纳多介质、长尺度气候变化成果,探索极端气候事件发生规律,并对未来变化趋势作出相应的预测,为预防和应对极端灾害提供理论支撑。

3.2 喀斯特石漠化演变与气候因子的微观作用机制探究

石漠化演变是多种因素综合作用的结果,它与气候变化关系的探究目前主要集中在宏观层面,即石漠化面积的增减与气温、降水变化如何对应。如果进一步细化到不同等级石漠化对月、季节甚至每日气候变化的响应,或者喀斯特区内林、草、微生物、动物、土壤养分对月、季气候因子的响应研究,将有助于人们在微观层次上对石漠化演变和气候作用机制有更深入了解,从而为石漠化治理提供科学指导。

3.3 石漠化治理与气候变化适应性模型构建

遥感技术迅猛发展^[73-74],尤其是中高分辨率遥感影像、激光雷达影像不断丰富,为石漠化和气候变化短周期、大范围、高密度、高时效性的动态监测提供了可能,同时可以让研究者占有更多历史资料。在大数据分析支撑下,引入更多相关因子,构建石漠化治理与气候变化适应性模型,模拟不同升温、降水模式下,石漠化治理采用不同模式的预期效果,增强应对措施的前瞻性。

3.4 加强学科交叉,将石漠化治理作为一个耦合系统进行研究

石漠化治理适应气候变化研究是一个复杂的、跨学科的系统工程,当前对石漠化治理措施设置和气候气象学科的交叉合作相对缺乏,研究方法少且单一,今后应加强借鉴其他气候变化适应研究中的方法,如气候情景和社会经济情景构建、行动影响矩阵、参与式评估、风险评估、措施评估等,提高研究的有效性、科学性和全面性。

参考文献:

[1] 袁道先, 章程. 喀斯特动力学的理论探索与实践[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.

[2] 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[3] 袁道先. 我国喀斯特资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶, 2015, 34(2): 98-100.

[4] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation [J]. Land Degradation and Development, 2004, 15(2): 115-121.

[5] 国家林业局防沙治沙办公室. 中国石漠化状况公报[R]. 北京: 国家林业局, 2012.

[6] 姚永慧. 中国西南喀斯特石漠化研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 76-84.

[7] IPCC. Fifth assessment report, climate change 2013: The physical science basis[R]. Sweden: Stockholm, 2013: 1-35.

[8] 肖胜生, 郑海金, 杨洁, 等. 土壤侵蚀/水土保持与气候变化的耦合关系[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 106-113.

[9] 解继. 石漠化地区区域气候条件与演变对土壤退化的影响[D]. 上海: 同济大学, 2008.

[10] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近50a中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104-116.

[11] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.

[12] 郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 中国过去2000年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1): 3-12.

[13] 蒋忠诚, 李先琨, 覃小群, 等. 论喀斯特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[J]. 中国岩溶, 2008, 27(1): 50-55.

[14] 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.

[15] 李阳兵, 邵景安, 王世杰, 等. 喀斯特生态系统脆弱性研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 1-9.

[16] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.

[17] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 喀斯特峰丛山地脆弱生态系统重建技术研究[J]. 地球学报, 2009, 30(2): 155-166.

[18] 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.

[19] 吴孔运, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 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[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1197-1200.

[20] 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[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.

[21] 苏维词, 杨华, 李晴, 等. 我国西南喀斯特山区土地石漠化成因及防治[J]. 土壤通报, 2006, 37(3): 447-451.

[22] 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.

[23] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 等. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究[J]. 林业科学, 2002, 38(1): 1-7.

[24] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 贵州喀斯特地区石漠化过程中植被特征的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 23-26.

[25] 李先琨, 苏宗明, 吕仕洪, 等. 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[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 129-139.

[26] 吴克华, 熊康宁, 容丽, 等. 不同等级石漠化综合治理的植被恢复过程特征——以贵州省花江峡谷为例[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 327-335.

[27] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.

[28] 王慧慧, 王普昶, 赵钢, 等. 干旱胁迫下白刺花种子大小与萌发对策[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 335-341.

[29] 李周, 高凯敏, 刘锦春, 等. 西南喀斯特地区两种草本对干湿

- 交替和N添加的生长响应[J]. 生态学报,2016,36(11):3372-3380.
- [30] 杨成,刘丛强,宋照亮,等. 喀斯特山区植物碳同位素组成特征及其对水分利用效率的指示——以贵州花溪杨中小流域为例[J]. 中国岩溶,2007,26(2):105-110.
- [31] 刘成名,熊康宁,苏孝良,等. 干旱胁迫对石漠化地区3种乡土草种光合作用的影响[J]. 四川农业大学学报,2014,32(4):382-387.
- [32] 吴俊文,刘珊,吉跃,等. 干旱胁迫下广东石漠化地区造林树种光合和耗水特性[J]. 生态学报,2016,36(11):3429-3440.
- [33] 陈强,常恩福,李品荣,等. 滇东南岩溶山区造林树种选择试验[J]. 云南林业科技,2001(3):11-16.
- [34] 蒙古军,王钧. 20世纪80年代以来西南喀斯特地区植被变化对气候变化的响应[J]. 地理研究,2007,26(5):857-866.
- [35] 文丽,宋同清,杜虎,等. 中国西南喀斯特植物群落演替特征及驱动机制[J]. 生态学报,2015,35(17):5822-5833.
- [36] 何跃军,钟章成,刘济明,等. 石灰岩退化生态系统不同恢复阶段土壤酶活性研究[J]. 应用生态学报,2005,16(6):1077-1081.
- [37] 张军以. 贵州典型喀斯特峰丛洼地水土资源匹配结构及其利用模式研究[D]. 重庆:重庆师范大学,2011.
- [38] 黄晓云,林德根,王静爱,等. 气候变化背景下中国南方喀斯特地区NPP时空变化[J]. 林业科学,2013,49(5):10-16.
- [39] 张勇荣,周忠发,马士彬. 近20年贵州喀斯特山区石漠化与气候变化特征分析[J]. 环境科学与技术,2014,37(9):192-197.
- [40] 韦振锋,任志远,张翀. 气候因子与植被的时滞相关分析[J]. 生态环境学报,2013,22(11):1757-1762.
- [41] 倪雪波,刘荣高,王世杰. 干旱影响石漠化地区植被生长的遥感观测[J]. 西南大学学报(自然科学版),2009,31(12):140-144.
- [42] Liu C C, Liu Y G, Guo K, et al. Influence of drought intensity on the response of six woody karst species subjected to successive cycles of drought and rewetted[J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 139(1): 39-54.
- [43] 韩兰英,张强,姚玉璧,等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报,2014,69(5):632-639.
- [44] 陆虹,覃卫坚,李艳兰,等. 近40年广西石漠化地区气候变化特征分析[J]. 气象研究与应用,2015,36(1):6-9.
- [45] 温庆忠,肖丰,罗娅妮. 气候因素对云南石漠化治理的影响与对策[J]. 林业调查规划,2014,39(5):61-64.
- [46] 马华,王云琦,王力,等. 近20年广西石漠化区植被覆盖度与气候变化和农村经济发展的耦合关系[J]. 山地学报,2014,32(1):38-45.
- [47] 李森,王金华,王兮之,等. 30年来粤北山区土地石漠化演变过程及其驱动力——以英德、阳山、乳源、连州四县(市)为例[J]. 自然资源学报,2009,24(5):816-826.
- [48] 童晓伟,王克林,岳跃民,等. 桂西北喀斯特区域植被变化趋势及其对气候和地形的响应[J]. 生态学报,2014,34(12):3425-3434.
- [49] 谷勇,陈芳,李昆,等. 云南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复[J]. 科技导报,2009,27(5):75-80.
- [50] 李馨,熊康宁,龚进宏,等. 人工草地在喀斯特石漠化治理中的作用及其研究现状[J]. 草业学报,2011,20(6):279-286.
- [51] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展[J]. 土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [52] 高照良,田红卫,王冬,等. 水土保持工程措施生态服务功能的物质量化分析[J]. 生态经济,2012(11):149-153,170.
- [53] 张信宝,王世杰,孟天友. 石漠化坡耕地治理模式[J]. 中国水土保持,2012(9):41-44.
- [54] 罗林,胡甲均,姚建陆. 喀斯特石漠化坡耕地梯田建设的水土保持与粮食增产效益分析[J]. 泥沙研究,2007(6):8-13.
- [55] 高渐飞,熊康宁,吴克华. 典型喀斯特石漠化小流域小型农田水利配套技术与模式[J]. 中国农村水利水电,2012(8):16-23.
- [56] 黄雪松,陆虹,廖雪萍,等. 广西典型石漠化区旱涝灾害分布特征及防御对策[J]. 气象研究与应用,2015,36(2):59-61.
- [57] 曹建华,袁道先,童立强. 中国西南喀斯特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.
- [58] 卢良恕. 西南岩溶地区现代农业建设的新思路[J]. 中国农业资源与区划,2003,24(1):1-3.
- [59] 韩丽娜,丁静,韩清芳,等. 黄土高原区草粮(油)翻耕轮作的土壤水分及作物产量效应[J]. 农业工程学报,2012,28(24):129-137.
- [60] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):61-69.
- [61] 何腾兵,樊博,李博,等. 保护性耕作对喀斯特山区旱地土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(4):163-167.
- [62] 潘艳华,雷宝坤,郭玉蓉,等. 保护性耕作改善石漠化土壤环境质量研究[J]. 西南农业学报,2011,24(5):1844-1848.
- [63] 黄玉清,何成新,王晓英,等. 西南喀斯特山区苹果草系统耦合及生产效益分析——以广西平果县果化镇龙何屯为例[J]. 中国生态农业学报,2007,15(6):156-160.
- [64] 任继周. 岩溶地区农业的出路在草地畜牧业[J]. 草业科学,2008,25(9):26-30.
- [65] 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.
- [66] 王荣,蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式[J]. 应用生态学报,2010,21(4):1070-1080.
- [67] 张俊佩,张建国,段爱国,等. 中国西南喀斯特地区石漠化治理[J]. 林业科学,2008,44(7):84-89.
- [68] 陈志辉,王克林,陈洪松,等. 喀斯特环境移民迁出区植物多样性研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):723-727.
- [69] 苏维词,朱文孝,滕建珍. 喀斯特峡谷石漠化地区生态重建模式及其效应[J]. 生态环境,2004,13(1):57-60.
- [70] 郭贤良,寸守权. 石漠化地区太阳能电厂总平面布置的特点[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(增刊1):32-35.
- [71] 袁道先. 袁道先院士1981年在美国科技促进年会(AAAS)的学术报告[R]. 加拿大:多伦多,1981.
- [72] Williams P W. Environmental change and human impact on karst terrains[J]. *Catena Supplement*, 1993, 25: 1-19.
- [73] 郑有飞,黄图南,段长春,等. 微波遥感土壤湿度反演算法及产品研究进展[J]. 江苏农业科学,2017,45(5):1-7.
- [74] 刘伟,赵庆展,汪传建,等. 基于最小二乘支持向量机的无人机遥感影像分类[J]. 江苏农业科学,2017,45(9):187-191.