

◆岩溶森林生态保护修复◆

中国岩溶森林生态保护修复的理论与技术*

温远光^{1,2**},周晓果²,王磊¹,孙冬婧²,朱宏光¹

(1.广西大学林学院,广西森林生态与保育重点实验室,广西南宁 530004;2.广西科学院生态环境研究所,广西南宁 530007)

摘要:全面总结了近年来中国在岩溶森林生态保护修复理论与实践方面取得的研究成果。在理论方面,创新性地提出了基于自然保护地体系的岩溶森林生态保护修复政策支撑体系,基于岩溶地区小生境高度异质性的多物种共存与生物多样性维持理论,基于岩溶地形地貌、土壤和自然干扰机制下的隐域性植被演替理论,基于岩溶植物萌生特性的群落构建机制和岩溶生态资源评估与生态产业发展理论。在技术方面,凝炼了岩溶天然次生林封育改造与结构功能提升技术、岩溶石漠化地区森林生态系统修复重建技术体系、岩溶地区森林景观修复与空间经营技术和岩溶生态资源评估与生态产业规划经营技术。形成了岩溶森林生态保护修复的理论与技术创新体系,对未来岩溶地区老龄林、天然次生林和石漠化治理区生态保护修复、生态产业化与可持续经营进行了展望。

关键词:生态保护修复 理论与技术 生态产业 岩溶森林 石漠化

中图分类号:S718.5 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)01-0061-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220311.002

我国岩溶地貌面积约 $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$, 约占国土总面积的 1/3, 集中分布在我国西南部区域^[1]。西南岩溶地貌类型复杂多样, 以喀斯特峰丛洼地类型的面积最大^[2]。历史上, 西南岩溶地区森林繁茂, 生物多样性丰富, 水资源充足, 景观独特^[3,4]。在岩溶地区, 至今森林植被保存较好的广西弄岗国家级自然保护区、广西木论国家级自然保护区和贵州茂兰国家级自然保护区仍然保持了上述岩溶森林生态系统原有的

特征^[5]。广西弄岗国家级自然保护区是典型的岩溶天然林区, 是中国具有国际意义的陆地生物多样性 14 个关键地区之一^[6], 保存的北热带岩溶季雨林面积达 $1.00775 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 是中国最完整的北热带岩溶天然林。西南岩溶森林生态系统具有复杂的结构和功能, 不仅为人类提供了大量的木质和非木质林产品, 还具有历史、文化、美学、中医、休闲、旅游、世界自然遗产等方面的价值, 在保障农业生产条件、维持生

收稿日期:2021-07-18

* 广西重点研发计划项目(2018AB40007), 国家自然科学基金项目(31860171, 31560201), 中国博士后科学基金项目(2019M663409), 广西自然科学基金项目(2017GXNSFAA198114), 广西高等学校重大科研项目(201201ZD001), 广西森林生态与保育重点实验室开放课题(QZKFKT2020-01)和广西林业厅科研项目(桂林科字[2009]第八号)资助。

【作者简介】

温远光(1957-), 男, 博士, 教授, 主要从事森林生态学、恢复生态学研究, E-mail: wenyg@263.net。

【**通信作者】

【引用本文】

温远光, 周晓果, 王磊, 等. 中国岩溶森林生态保护修复的理论与技术[J]. 广西科学, 2022, 29(1): 61-70.

WEN Y G, ZHOU X G, WANG L, et al. Theory and Technology of Karst Forest Ecological Protection and Restoration in China [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(1): 61-70.

物多样性、保护生态环境、维护生态安全、减缓自然灾害和实现碳达峰、碳中和目标等方面发挥着重要的作用^[7,8]。由于受碳酸盐岩古老坚硬、可剪性强、洞穴缝隙发育和雨热同季的季风气候等的影响,岩溶地区形成了地表地下双层水文地质结构,蓄水保水难和水资源利用难^[9,10];碳酸盐岩成土物质先天不足,造成土壤资源匮乏、土壤较肥沃但土层浅薄、土被不连续、土壤富钙而偏碱性,限制岩溶山地植被生产力,具有显著的生态脆弱性,属于全球三大典型的脆弱生态系统之一^[10]。

2000年以前,受人类高强度活动影响和不合理的开发利用,我国西南岩溶森林资源锐减,生态功能退化,绝大部分地区沦为次生性的灌木林和灌草丛,部分地区退化为石漠,面积达 $1.296 \times 10^5 \text{ km}^2$,且每年仍以1.8%的速度递增^[11],造成了严重的生态后果和经济损失,亟待采取积极有效措施,保障区域生态安全和经济社会的可持续发展。2001年,国务院《关于国民经济和社会发展第十个五年计划纲要的报告》提出推进岩溶地区石漠化综合治理,从此石漠化治理上升为国家战略;2008年,国务院正式批复了《岩溶地区石漠化综合治理规划大纲(2006-2015年)》,石漠化治理作为一项独立的生态工程正式展开;2016年,《岩溶地区石漠化综合治理工程“十三五”建设规划(2016-2020年)》正式实施;2020年6月,《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021-2035年)》发布实施,进一步明确了未来15年长江中上游及湘桂石漠化综合治理任务,计划治理石漠化 $3.94 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[12]。在大规模岩溶森林生态保护修复背景下,我国石漠化面积由2000年以前的 $1.296 \times 10^5 \text{ km}^2$ 减少到2016年的 $1.007 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[12]。目前,众多学者在岩溶森林生态保护修复的基础理论、关键技术和生态产业培育等方面开展了大量研究^[7,12],取得了丰硕的成果。这些关键技术成果的应用解决了我国岩溶森林生态保护修复中面临的诸多难题,对提高岩溶地区石漠化生态修复速度和质量,维持岩溶森林生态系统生物多样性和稳定性,加快西南岩溶森林生态系统保护修复进程,创新岩溶生态资源利用途径,推动生态产业化发展,以及《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021-2035年)》的顺利实施提供理论和技术支撑,最终对改善和提升岩溶森林生态系统服务功能、助力乡村振兴、建设美丽中国和生态文明具有重要的理论和现实意义。

1 相关概念

1.1 喀斯特与岩溶

“喀斯特”与“岩溶”是两个使用频率都较高的专业名词。根据中国知网的查询结果,近30年来采用“喀斯特”一词的文献数量有9105条,而采用“岩溶”一词的文献数量有4256条。可见,“喀斯特”的使用频率更高。喀斯特,最早见于1774年的科学文献中,即今塞尔维亚共和国与黑山共和国西北部和克罗地亚共和国东北部的迪纳利山脉上的Karst(石头之意),指含二氧化碳的水对可溶性碳酸盐岩进行的以化学溶蚀作用为主,流水冲蚀、搬运、沉积等机械作用为辅而产生的地理过程与结果的总称^[13],此后,凡是有类似地理现象的自然景观都称之为“喀斯特”^[14]。我国学术界最初采取音译德语“Karst”一词,并在1961年中国科学院主持召开的第一次喀斯特会议上对“喀斯特”一词的使用进行了确认^[13]。1966年中国地质学会召开的全国岩溶(喀斯特)学术会议上,提出我国今后用“岩溶”一词代替“喀斯特”,由此我国学界开始使用“岩溶”一词。有学者认为,“喀斯特”与“岩溶”是两个不同的概念^[15];也有学者认为,二者是完全等同和等效的^[13]，“喀斯特”与“岩溶”被作为同义词广泛使用^[14]。喀斯特生境对干扰十分敏感,处于退化阶段的喀斯特生境生态恢复力十分弱小,就喀斯特环境系统的土壤、水、植物而言,它是一种脆弱的生态环境系统^[7,14]。鉴于国内习惯并与中央相关文件保持一致,本文采用“岩溶”一词。

1.2 石漠化

石漠化(Rocky desertification)是指在岩溶地区,人类不合理的经济活动和脆弱的生态环境相互作用而造成基岩大面积裸露,土地生产力下降直至土地资源丧失,地表呈现类似荒漠化景观的土地资源退化演变过程^[16]。温远光^[17]认为,石漠化是指在热带、亚热带湿润-半湿润气候条件和岩溶及其发育的自然背景下,受人为高强度活动的反复干扰,地表植被遭受严重破坏,造成土壤严重侵蚀,基岩大面积裸露的土地退化现象。一旦出现重度和极重度石漠化,生态与环境将极难修复^[7,14,18]。

1.3 岩溶森林生态保护

生态保护(Ecological conservation)是指人类对各种自然环境和自然资源的保护^[19]。岩溶森林生态保护,是以岩溶森林生态系统为保护对象,重点保护岩溶森林生态系统的生态环境(如岩石、土壤、水等)

和生态资源(如生物资源、森林资源、水资源、土壤资源等),保护岩溶地区生命支持系统的完整性、稳定性和可持续性。

1.4 岩溶森林生态修复

生态修复(Ecological restoration)是指对退化、受损或被破坏的生态系统进行恢复的过程^[19]。岩溶森林生态修复,是对岩溶退化生态系统,特别是石漠化生态系统进行植被修复、生态重建的过程。岩溶森林生态修复不仅是修复森林植被,还包括对整个生态系统的结构与功能、地上生物多样性与地下生物多样性、生态价值与经济价值等的修复和重建。

1.5 生态产业与生态产业化

生态产业(Ecological industry)是指按生态经济原理和知识经济规律组织起来的基于生态系统承载能力,具有高效的生态过程及和谐的生态功能的集团型产业^[20]。与传统产业不同,生态产业将生产基地与周边环境纳入整个生态系统统一管理,谋求资源的多级高效利用和有害废弃物的零排放^[20]。本文中的生态产业与上述定义明显不同,它是指遵循“绿水青山就是金山银山”“产业生态化,生态产业化”理念,利用绿水青山(生态系统)中蕴藏的生态资源来发展生态产业,以生态资源链对接生态产业链,通过对生态资源的生态价值实现机制,将生态资源转化为生态产品,再通过生态产业化来实现绿水青山向金山银山的转变,属于生态资源生态利用、生态与经济协调发展的新型产业。生态产业化就是利用优质生态资源,发展生态产业,将生态资源或服务物化为生态产品,实现生态资源保护增值、人与自然和谐发展,把绿水青山转变成金山银山的过程。生态产业化理念的提出为实现中华民族永续发展规划了蓝图,为岩溶生态保护修复和建设美丽中国提供了根本遵循。

2 岩溶森林生态保护修复理论

2.1 基于自然保护地体系的岩溶森林生态保护修复政策支撑体系

自然保护地是指各级政府依法划定或确认,对重要的自然生态系统、自然遗迹、自然景观及其所承载的自然资源、生态功能和文化价值,实施长期保护的陆域和海域^[21,22]。科学合理地建设自然保护地是国际公认的保护生物多样性、提供优质生态产品与服务、维系生态系统健康最重要和最有效的途径^[22]。国际上,世界自然保护联盟(IUCN)于1994年发布自然保护地体系,该体系获得了联合国和许多国家政

府的认可,已成为定义和记录保护区的国际标准^[23]。

中国积极建立以国家公园为主体的自然保护地体系。截至2018年底,各类自然保护地总数已达1.18万个,自然保护小区5万个,其中国家公园试点10个,国家级自然保护区474个,省级自然保护区864个。各类自然保护地面积超过 $1.728 \times 10^6 \text{ km}^2$,占国土面积的18%以上^[23]。基本形成类型比较齐全、布局基本合理、功能相对完善的自然保护地体系,90%的陆地自然生态系统类型、89%的国家重点保护野生动植物种类以及大多数重要自然遗迹在自然保护地中得到有效保护^[23]。就岩溶地区而言,自1980年以来,我国在岩溶地区相继建立了广西弄岗国家级自然保护区、广西木论国家级自然保护区、广西崇左白头叶猴国家级自然保护区和贵州茂兰国家级自然保护区,重点保护岩溶森林生态系统、珍稀动植物和岩溶地貌,保护区面积达 $6.777\ 27 \times 10^4 \text{ hm}^2$;2007年“中国南方喀斯特”入选世界自然遗产,使该区域 $5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的喀斯特自然资源和自然景观得到更好的保护^[8]。2019年,我国提出了自然保护地体系框架,明确了自然保护地的三大核心理念:一是保护自然,二是服务人民,三是永续发展。自然保护地的主要功能是守护自然生态、保育自然资源、保护生物多样性、维持自然生态系统健康稳定和提高生态系统服务功能。同时提出,自然保护地要将具有特殊和重要意义的自然生态系统、自然历史遗迹和自然景观保护放在首位,把最应该保护的地方保护起来^[22]。保护自然的根本目的是为人类社会高质量发展服务,人类生存需要依赖自然资源。良好的生态资源,可为社会提供最公平的公共产品和最普惠的民生福祉。正确处理自然保护与经济社会发展的关系,坚持生态惠民、生态利民、生态为民,让绿水青山充分发挥经济效益和社会效益^[22]。在漫长的社会经济发展历程中,中华民族用自己的智慧和创造力保存了丰富而珍贵的自然文化遗产,道法自然、天人合一等生态观念对中华文明产生了极为深刻的影响^[22]。面对资源约束趋紧、环境污染严重、生态系统退化的严峻形势,必须树立尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,维持人与自然长期和谐共生并永续发展。“人与自然生命共同体”和“建设人与自然和谐的现代化”理论的提出对科学指导岩溶森林生态保护修复具有深远意义。

2.2 基于岩溶地区小生境高度异质性的多物种共存与生物多样性维持理论

生境(Habitat)是生物出现的环境空间范围,一

般指生物居住的地方,或是生物生活的生态地理环境^[24]。小生境(Microhabitat)是小尺度的生境,是指生物或群落的具体生活场所,其尺度的界限是相对的,并没有公认的标准。岩溶地貌与常态地貌相比,在地表形态和地下形态上存在显著差别,常态地貌坡面比较一致,地表和地下基本为同质结构,而岩溶地貌由于以化学风化为主,特别是由纯质厚层产状水平石灰岩、白云岩组成的岩溶地层,溶蚀强烈,溶蚀作用导致石芽、溶沟、溶蚀裂隙十分发育,到处岩石嶙峋、起伏多变,且有大块岩石崩塌和堆积^[5],产生地表地下双层结构。这些复杂的岩石形态组合形成的微地形,构成了各种小生境,如明亮、阴暗、干燥、湿润、积水、肥沃、贫瘠生境,尤其是它们的组合更加复杂多样。岩溶生境就是由多种小生境类型如溶面、溶沟、溶蚀裂隙、溶洞、溶槽和土面镶嵌构成的复合体。各种小生境的外部形态不同,在光照条件、热量条件,水分的接收、贮存、蒸发等方面有较大差异^[5]。因此它们对植物分布、生长、发育的制约程度也不同。小生境的多样性导致群落组成物种的多样性和复杂性。研究表明,茂兰岩溶森林生态系统的生物多样性与贵州其他非岩溶区的生物多样性相比要丰富得多^[25]。茂兰常态地貌上常绿阔叶林生物多样性也比贵州其他地点的生物多样性要丰富,但以岩溶常绿落叶阔叶混交林生物多样性最丰富^[25]。岩溶地貌上具有丰富多样的小生境,例如在不大的地方,有岩石裸露、气温变化剧烈的石芽、石面、崩塌的大块岩等干旱生境,也有土层相对深厚、土壤营养元素丰富、有机质含量很高、气温变化幅度较小的石沟、石缝等肥沃生境^[26]。小生境的多样性也导致了植物生态类型的多样性。从旱生植物到湿生植物,喜光植物到耐阴植物,耐贫瘠树种到喜肥树种,生态幅较大的植物到生态幅较狭窄的喜钙植物都有分布,它们分别占领了其特性相应的小生境^[5]。基于多年的研究总结,我们提出了岩溶森林多物种长期共存与生物多样性维持的理论框架:(1)岩溶地貌小生境的高度异质性是众多物种长期共存的生态环境基础,(2)岩溶小生境的多样性导致植物生态类型的多样性,(3)岩溶小生境多样性和树种生活史特性相互作用维持森林中众多的树种能够长期共存。该理论框架创新性地建立了小生境多样性和生物多样性维持机制的耦合关系,揭示了岩溶地区小生境的高度异质性是不同生活史特性的多个物种长期共存和生物多样性维持的重要机制,拓展了岩溶森林生物多样性维持和保育的理论体

系,对岩溶地区生态保护修复具有重要的指导作用。

2.3 基于岩溶地形地貌、土壤和自然干扰机制下的隐域性植被演替理论

植被(群落)演替理论认为,演替的动力主要是生物之间及生物与环境之间的相互作用,最早定居的植物改造了环境,从而有利于新物种的定居生存,这一过程一再发生,直到顶极群落产生为止^[27]。植物群落演替根据其基质性质的不同分为原生演替(Primary succession)和次生演替(Secondary succession)两种类型^[27]。原生演替是指植被在裸地上的形成和建立过程的演替,次生演替是指植被在受到内外干扰后的恢复或重建演替,无论何种演替,其实质是群落的重新组织。

隐域性植被(非地带性植被)是指在一定的气候带或大气候区内,因受地下水、地表水、地貌部位或地表组成物质等非地带性因素影响而生长发育形成的植被类型^[28]。隐域性植被的演替规律与地带性植被有明显不同。岩溶森林植被属于隐域性植被^[4]。在亚热带地区,地带性森林植被为常绿阔叶林,而在同一区域的岩溶区却为常绿落叶阔叶混交林,植被群落的组成和结构存在明显的差异。基于岩溶地形地貌、土壤和自然干扰机制的特殊性,我们构建了岩溶隐域性植被群落演替的理论框架:(1)在岩溶峰丛洼地底部及周边斜坡地带,土层相对深厚、土壤营养元素丰富、有机质含量很高、气温变化幅度较小,植被演替为土壤顶极群落类型;(2)在岩溶孤峰、峰丛洼地上部,土壤营养元素较丰富、有机质含量较高,但土层相对浅薄、土壤稀少、气温变化幅度较大、风力较大,植被演替为地形顶极群落类型;(3)隐域性植被由于在生长发育过程中同时也受到地带性因素的影响,使其在种类组成和生理生态特性方面,都在一定程度上打上了地带性的烙印。该理论框架揭示出在一个峰丛洼地单元同时存在多元演替机制,丰富了植被演替的理论体系,是开展岩溶区域生态景观规划和近自然生态系统经营的依据,也可为制定岩溶地区现有人工林改造和次生林培育技术规程提供参考。

2.4 基于岩溶植物萌生特性的群落构建机制

萌生是植物抵抗干扰的一种重要方式,在遭受严重干扰时,许多植物因为具有较强的萌生能力而保存下来,而一些萌生能力较弱的植物则有可能灭绝^[29]。由此可见,萌生过程在植被恢复和自然更新中起到了重要的作用^[30]。有研究表明,除裸子植物外,几乎70%–80%的树种均具有不同程度的萌生能力,但不

同的物种其萌生能力不同^[30,31]。沈有信^[31]对云南喀斯特山地半湿润常绿阔叶林(群落中落叶成分占33.7%,应属于常绿落叶阔叶混交林)的研究发现,在调查样地出现的76种植物中,所有根株总数大于10的物种都有萌生株出现。这些萌生植物中,34.7%的个体具有萌生迹象,表明约1/3的喀斯特乔木个体已经或正在产生萌生体,遭受过损伤的根株平均萌生率达99.3%^[31]。笔者对马山岩溶植被不同演替阶段群落的调查表明,随着进展演替,群落中无论是乔木层还是灌木层,萌生个体的密度存在显著差异。演替早期(25年生)、演替中期(45年生)和演替后期(65年生)群落乔木层每公顷的萌生个体数分别为1550.00株、580.56株、319.44株,分别占群落乔木层个体总数的82.42%、55.73%、25.39%;灌木层每公顷的萌生个体数分别为2997.22株、547.22株、150.00株,分别占群落灌木层个体总数的76.91%、54.57%、33.54%,这表明岩溶植物具有很强的萌生能力。群落构建(Community assembly)是一个群落中物种在空间和时间尺度上组合的决定因素,物种多样性越高,组合越复杂,生态系统就越稳定^[32]。群落构建研究对于解释物种共存和物种多样性的维持至关重要,生态修复工作越来越侧重于受干扰地区生物群落的物种组成多样性和功能多样性,通过物种结构、时空结构和营养结构的组合来指导保护修复工作。在过去20年里,生态修复研究主要集中于如何恢复植被、提升生物多样性和生态系统功能,群落构建在生态修复工作中得到广泛应用^[33,34]。结合岩溶地区实际,笔者创建了基于岩溶植物萌生特性的群落构建理论框架:(1)在原先刀耕火种频繁的岩溶地区,在群落建立早期,萌生为群落贡献大量根株,很多根株通过萌生体占据群落空间,萌生特性具有抗干扰能力强、幼年期生长迅速等优点,因而它在植被演替的前期阶段发挥着明显的促进作用,加速了群落构建;(2)随着群落的发育,当干扰强度较低、种间竞争关系稳定时,根株内部以及根株之间竞争增强,物种更倾向于采取实生更新的策略,实生植株比例增加,有利于更为稳定的群落构建;(3)岩溶森林具有多种更新策略,大量的物种和个体将通过营养繁殖方式补充种子更新的不足,以适应岩溶山地的干扰特征。

2.5 岩溶生态资源评估与生态产业发展理论

岩溶地区具有丰富的生态资源,包括森林资源、生物多样性资源、水资源、景观资源、红色资源、旅游资源、长寿资源等,而且有很多生态资源是岩溶区域

所特有的,例如“甲天下”的桂林山水、素有“天下第一奇观”之称的云南石林、中国南方喀斯特等。党的十九大报告提出,我们要建设的现代化是人与自然和谐共生的现代化,既要创造更多物质财富和精神财富以满足人民日益增长的美好生活需要,也要提供更多优质生态产品以满足人民日益增长的优美生态环境需要。因此,岩溶地区经济社会发展必须坚持保护优先、绿色发展的理念,通过发展生态产业,将生态资源转换为生态产品,将生态优势转换为经济优势和发展优势,从而实现区域经济社会的高质量发展和岩溶森林生态系统的高水平保护。为此,笔者提出创建岩溶生态资源评估与生态产业发展理论框架:(1)从物质循环与能量流动综合效能的角度,计量分析与评价不同生态资源类型(光、热、水、土、气)及主要生命元素的综合利用效率与功能,研究不同生态资源类型的综合特征及判别标准,建立生态资源评价体系;(2)以生态资源链部署生态创新链,以生态创新链部署生态产业链,探索生态产品价值实现机制,通过生态产业化实现绿水青山向金山银山转变;(3)揭示不同类型生态资源形成机理与生态产品价值实现机制,探索区域自然要素与人文要素耦合机制;(4)提出优势生态资源与特色生态产业发展协同创新模式,形成生态资源评价与生态产品实现关键技术,创立生态产业学理论体系;(5)研编青山生态产业、绿水生态产业、修复生态产业、健康生态产业、文旅生态产业技术标准;(6)创建生态资源评价、生态产业规划、生态产品创制、生态产品营销和生态产业管理决策支持系统。

3 岩溶森林生态保护修复技术

3.1 岩溶天然次生林封育改造与结构功能提升技术

封山育林是岩溶地区植被恢复和生态重建最直接、最经济、最有效的技术措施^[7]。与传统的封山育林不同,“封育改造与结构功能提升”是在对天然次生林的群落组成、结构和功能特征分析的基础上,在“封”的前提下开展有针对性实施“封育+造林”“封育+改良”和“封育+抚育”,从而达到人为诱导促进天然次生林顺向恢复演替作用。袁丛军等^[35]基于对封山造林、封山改良、封山抚育3种类型下的群落物种组成结构、林分径级结构、林分高度级结构研究,发现抚育间伐降低了中小径级林木比例,提高了大径级林木比例;密度和立地条件是限制该区林木生长成大径级林木的关键因子;林木树高分布总体上均呈现先增加后减少的趋势。封育改造与结构功能提升技术

的应用,调整了天然次生林目标树种和伴生树种的比例,封育改良类型更有利于保持天然次生林的物种组成、丰富物种多样性及维持群落稳定性,加速天然次生林的顺向演替,天然次生林的林分结构和生态服务功能明显提升^[12,35,36]。

3.2 岩溶石漠化地区森林生态系统修复重建技术体系

3.2.1 以豆科乡土珍贵树种修复石漠化生态系统技术

氮是植物生长和生态恢复主要的限制性元素,土壤中氮的供应能力在很大程度上决定着生态恢复成效或生态系统的结构和功能及其对全球变化的响应^[37,38]。在水热条件类似的条件下,土壤氮供应能力较高往往意味着生态恢复的速率更快,重建的植被更容易达到演替的顶极阶段,相反,氮供应不足则常常造成重建的植被长期停留在演替的早期阶段。豆科 Leguminosae 固氮植物能通过与共生的固氮微生物将大气中的 N_2 转变为植物可利用的氮素(这一过程被称为“共生固氮”),从而增加生态系统的可利用氮素水平^[39-41]。2011年在马山县岩溶石漠化地区开展的豆科植物顶果木 *Acrocarpus fraxinifolius*、降香黄檀 *Dalbergia odorifera* 纯林及其混交林的试验研究发现,3种人工林群落的生物量、碳储量和碳固持速率均高于灌丛(对照),且高出灌丛8倍以上;3种人工林以顶果木纯林的生物量、碳储量和碳固持率最高,降香黄檀纯林最低,顶果木×降香黄檀混交林居二者之间,但三者之间差异不显著^[42]。3种治理模式的物种丰富度无显著差异,但混交林治理模式对植物多样性指数和均匀度指数的作用相对较优^[43]。最近的研究表明,降香黄檀纯林的土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)含量显著高于顶果木纯林和顶果木×降香黄檀混交林,顶果木纯林显著高于顶果木×降香黄檀混交林^[44]。3种人工林土壤真菌、丛枝菌根真菌和总磷脂脂肪酸(Phospholipids Fatty Acid, PLFA)含量无显著差异,但降香黄檀纯林土壤细菌、放线菌、丛枝菌根真菌和 PLFA 含量均高于顶果木纯林和顶果木×降香黄檀混交林,顶果木纯林高于顶果木×降香黄檀混交林^[44]。降香黄檀纯林的土壤细菌、革兰氏阳性菌、革兰氏阴性菌、放线菌的 PLFA 含量显著高于顶果木×降香黄檀混交林;顶果木×降香黄檀混交林的真菌、细菌比显著高于降香黄檀纯林,但与顶果木纯林无显著差异^[44]。从3种人工林的土壤微生物生物量及微生物群落结构来

看,在喀斯特地区顶果木×降香黄檀混交林并未显示出酸性土地区混交林提高土壤微生物生物量、改善土壤微生物群落结构的优势,但顶果木×降香黄檀混交林的真菌、细菌比最高,更有利于提高土壤生态系统的稳定性^[44]。笔者创立了以豆科乡土珍贵树种修复石漠化生态系统技术。该项技术的应用产生了显著成效,创造了“石漠”造林10个月郁闭、18个月成林的奇迹,治理后森林生态系统中的植物多样性、生产力、土壤养分和土壤微生物群落多样性得到明显改善^[42-44],表明应用豆科植物功能群恢复石漠化不仅可以取得快速、高效和显著的效果,还能显著提升生态系统服务功能。

3.2.2 石漠化治理林下套种高价值经济植物金花茶修复石漠化生态系统技术

针对石漠化植被修复模式单一、结构单一、服务产品单一、难以持续等难题,笔者系统开展多目标、多价值、多用途、多产品和多服务的多样化植被修复模式设计以及可持续经营技术研发示范。2019年在持续近10年的石漠化植被修复基础上,在林下引入金花茶 *Camellia petelotii*、防城金花茶 *C. nitidissima*、显脉金花茶 *C. euphlebica*、中东金花茶 *C. achrysantha*、崇左金花茶 *C. chuongtsoensis*、扶绥金花茶 *C. fusuiensis*、凹脉金花茶 *C. impressinervis* 和陇瑞金花茶 *C. longruiensis* 等,经过两年多的观察表明,金花茶的成活率在98%以上,保存率在92%以上,并已有少量植株开花。该技术的推广应用,很好地解决了以往石漠化植被修复中普遍存在的模式单一、结构单一、服务产品单一、只有树没收入和难持续等难题,形成了多目标、多样化的植被修复模式构建与可持续经营技术体系,创建了不砍树、能致富、可持续、可推广,绿水青山就是金山银山的典型示范区。

3.2.3 岩溶石漠化地区人工林近自然森林经营技术

传统森林经营方式过于追求人为控制,以达到单一功能的最大化,如木材生产最大化的纯林式经营,不仅忽略了大自然本身的力量和增加营林成本,还会增加病虫害、降低生物多样性等生态稳定性风险。近自然森林经营从森林自然更新到稳定的顶极群落,即完整的森林发育演替过程来计划和设计各项经营活动,以达到优化森林的结构和功能、永续利用与森林相关的各种自然力、不断优化森林经营过程,从而使人为干扰调控为主的森林逐步恢复为近自然状态的一种森林经营模式^[45]。中国林业科学研究院热带林业实验中心是我国人工林近自然化改造和近自然森

林经营的典型示范样板。目前,国内对马尾松、杉木等人工林的近自然森林经营已有较多的研究^[45-47],主要是在已有的针叶林纯林中引入珍贵阔叶树种,形成针阔混交林,但对于岩溶石漠化地区人工林近自然森林经营技术的研究极少涉及。实际上,岩溶石漠化地区更需要实施近自然森林经营策略。岩溶石漠化地区的人工林主要是阔叶树种人工林,针叶林极少(常见的有柏木 *Cupressus funebris*、侧柏 *Platycladus orientalis* 等),亚热带岩溶区域稳定的顶极群落为常绿落叶阔叶混交林。因此,岩溶石漠化地区不能照搬国内外已有的近自然森林经营方法。笔者提出了岩溶石漠化地区人工林近自然森林经营技术,对任豆 *Zenia insignis*、降香黄檀、顶果木、柚木 *Tectona grandis*、铁刀木 *Cassia siamea*、铁力木 *Mesua ferrea* 等珍贵优良树种,开展近自然森林经营的作业设计,包括树种选择,树种丛植混交、带状混交、目标树选择、目标树管理,树种高价值大径材定向培育、天然更新、年度作业设计等内容,可为岩溶地区人工林近自然森林经营提供技术支撑。

3.2.4 岩溶石漠化地区藤本经济植物生态修复技术

以藤本经济植物修复岩溶石漠化生态系统是常用的生态修复技术。目前藤本植物生态修复技术主要有金银花 *Lonicera japonica* 生态修复技术、毛葡萄 *Vitis heyneana* 生态修复技术、火龙果 *Hylocereus undatus* 生态修复技术、星油藤 *Plukenetia volubilis* 生态修复技术等。这类修复技术主要应用于岩石裸露大、土壤分布稀少的区域。藤本经济植物生长快,能够快速在岩石上形成植被覆盖,但因其不能形成林冠结构,所以对石漠化区域的生态系统修复能力不如珍贵乡土树种修复技术。火龙果生态修复技术缺少绿叶覆盖,生物多样性单一,凋落物回归稀少而营养物质输出较大,长期经营还可能引起土壤肥力下降、病虫害增多,影响该技术的稳定性和可持续性。

3.2.5 岩溶石漠化地区农林牧复合生态修复技术

农林牧复合也是岩溶石漠化地区生态修复技术体系中的重要技术,已得到广泛应用。最典型的是林+牧草+养牛复合生态修复技术。该技术通过以林护农、以农养牧、以牧促林,实现农、林、牧的互利共生和生态修复。在石漠化植被修复后,在林下放养黑山羊是马山、都安、大化一带常见的林牧模式。该模式应严格控制载畜量,在林下引种金花茶后,前3年要禁止在林下放养黑山羊,以免对金花茶幼苗和幼树生长造成伤害和影响。

3.2.6 岩溶石漠化生态修复中的社会经济治理技术

社会经济治理技术是基于岩溶石漠化地区的资源压力、人口压力、土地压力、能源压力和生态压力等而采取的“异地安置,生态移民”“项目带动,发展中小城镇”,缓解岩溶石漠化地区生态系统人口和环境压力,从而实现石漠化治理^[7]。中国科学院将石漠化治理与扶贫开发有机结合,形成“环境移民-易地扶贫-生态衍生产业培育-生态系统服务提升”科技扶贫体系,探索生态系统服务提升与特色产业发展的长效扶贫机制,为我国西南喀斯特生态脆弱区的精准扶贫提供技术支撑和模式样板^[48]。

3.3 岩溶地区森林景观修复与空间经营技术

山水林田湖草作为生命共同体,其生态保护与修复必须以生态系统服务功能提升为导向,而且需要考虑生态系统本身的脆弱性,协调好保护与发展的关系。因此,生态保护与修复工程必须从整体统筹考虑,解决生态系统及要素分割管理的问题。刘世梁等^[49]以贵州省为研究案例区,通过分析生态系统服务和景观脆弱度,得到生态系统服务重要性的空间分布,确定需要生态修复的重点流域,进一步从生态保护与经济发展角度,辨析保护与发展的冲突区。结果表明,贵州省的生态系统服务能力空间差异显著,水源涵养能力在贵州东部和东南部较高,土壤保持能力在东南部和西北部较高,生物多样性则在西南部、东南部、东北部较高,景观脆弱度在都柳江流域、赤水河流域最高,生态重要性高的区域主要在都柳江流域^[49]。生态保护与经济发展冲突分析结果表明,生态保护与经济发展在贵州省西北部和东南部存在较多的冲突区,是保护与修复的优先区域。该思路既体现了山水林田湖草的完整性,又体现了生态恢复的优先性,为岩溶山地生态保护修复工程实施与决策管理提供参考^[49]。贵州推行的“顶戴帽-腰系果-坝种蔬”综合治理模式是一种较好的空间经营技术。该技术采取坡上封山育林,坡腰种植防护林、经果林,坡麓栽植高效经果林,坝子地发展绿色蔬菜模式,解决单一植被修复效益低的问题,取得显著成效^[49]。笔者在马山岩溶峰丛洼地地区,峰丛洼地上部山顶陡崖部分采取自然修复森林植被,峰丛洼地周边斜坡地带采取豆科珍贵树种人工修复植被,林下套种高价值经济植物,洼地种植玉米、蔬菜等,同样具有因地制宜、宜农则农、宜林则林的空间经营技术特征。

3.4 岩溶生态资源评估与生态产业规划经营技术

3.4.1 岩溶天然林区生态资源评估与生态产业规划经营技术

岩溶山区是典型的生态脆弱区,对脆弱区的自然资源特别是森林资源应该采取生态和永续利用方式,决不能重蹈传统资源利用的覆辙。为此,笔者创立了岩溶天然林区生态资源评估与生态产业规划经营技术框架。该技术框架包括岩溶山区“水土气生文”资源识别和评估,重点是森林资源、生物多样性资源、水资源、景观资源、旅游资源、特色文化资源的辨识与评估;依据岩溶地区生态资源特点,规划设计相应的生态产业,如在景观资源极其丰富的“桂林漓江山水”“云南石林奇观”“中国南方喀斯特世界自然遗产地”等发展旅游生态产业;广西是世界和中国长寿之乡,岩溶区域是长寿之乡的集中分布区,利用长寿资源和长寿文化发展健康生态产业;在巴马、上林等水资源丰富且水质优良区域发展绿水生态产业等;创建生态资源评价、生态产业规划、生态产品创制、生态产品营销和生态产业管理决策支持系统。

3.4.2 岩溶石漠化治理区生态资源评估与生态产业规划经营技术

岩溶山区是典型的生态脆弱区,石漠化治理区更是如此。因此,研发岩溶石漠化治理区生态资源评估与生态产业规划经营技术尤为重要,即根据石漠化修复后的生物生态资源特点,对接生态产业规划。为此,笔者提出了岩溶石漠化治理区生态资源调查、生态资产评估、生态产品创制与生态产业规划经营技术框架。该技术框架包括岩溶石漠化治理区“水土气生”修复评估,根据生态资源链对接生态产业链,形成“生物+”“生态+”等多种生态修复产业模式,如火龙果修复生态产业、金银花修复生态产业、毛葡萄修复生态产业、金花茶修复生态产业、铁皮石斛 *Dendrobium officinale* 修复生态产业等。

4 存在问题及展望

在岩溶森林生态保护修复方面,对天然老龄林生态系统维持机制、恢复状态、恢复机理和恢复生态学过程研究较少,如何加快天然次生林结构和生态服务功能向老龄林方向发展的研究也相对缺乏,岩溶石漠化治理区多目标、多功能、多树种混交和森林生态系统可持续经营的研究还相对缺乏,如何实现岩溶地区特别是石漠化治理区生态资源修复与生态产业化协同发展更是缺乏研究。目前岩溶森林生态保护修复

需要解决以下问题:

(1)岩溶地区老龄林形成与维持、退化与恢复的理论以及生态保护与修复技术;

(2)岩溶地区天然次生林、灌丛和草丛向老龄林恢复演替过程中,生态系统结构和功能提速、提质和增效的机制和关键技术;

(3)岩溶石漠化治理区由单一的植被修复向森林生态系统生态修复的全面提升,增强石漠化治理区的生态系统稳定性和可持续性;

(4)在岩溶区域,尤其要坚定“绿水青山就是金山银山”的理念,解决生态资源、生态优势和生态产品的价值实现理论、机制和技术问题;

(5)为如期实现碳达峰和碳中和目标,全面提升岩溶区域山水林田湖草的空间规划和用途管控,提升岩溶生态系统碳汇增量。

力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和,是党中央作出的重大战略决策。上述问题的根本解决将有助于推动岩溶地区绿色、低碳、生态、高效和持续发展,助力“双碳”目标的实现。

参考文献

- [1] 袁道先. 我国西南岩溶地区的石漠化问题[C]//中国国际科学技术合作协会. 中国—东盟荒漠化综合治理研讨会论文集. 北京: 中国国际科学技术合作协会, 2003: 150-160.
- [2] LI D D, ZHANG X Y, GREEN S M, et al. Nitrogen functional gene activity in soil profiles under progressive vegetative recovery after abandonment of agriculture at the Puding Karst Critical Zone Observatory, SW China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 125: 93-102.
- [3] 中国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 李治基. 广西森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] 周游游, 黎树式, 黄天放. 我国喀斯特森林生态系统的特征及其保护利用——以西南地区茂兰、木论、弄岗典型喀斯特森林区为例[J]. *广西师范学院学报(自然科学版)*, 2003, 20(3): 1-7.
- [6] MYERS N, MITTERMEIER R A, MITTERMEIER C G, et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities [J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [7] 温远光, 陈放, 吴庆标, 等. 中国石漠化的综合治理技术与效果[C]//中国国际科学技术合作协会. 中国—东盟荒漠化综合治理研讨会论文集. 北京: 中国国际科学技术合作协会, 2003: 202-209.
- [8] 韩会庆, 苏志华. 喀斯特生态系统服务研究进展与展望

- [J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 352-358.
- [9] 张信宝, 王克林. 西南碳酸盐岩石质山地土壤-植被系统中矿质养分不足问题的思考[J]. 地球与环境, 2009, 37(4): 337-341.
- [10] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. 地球科学, 2014, 35(5): 535-542.
- [11] 国家林业和草原局. 中国岩溶地区石漠化状况公报[EB/OL]. (2018-12-14)[2020-12-15]. <http://www.forestry.gov.cn/main/195/20181214/104340783851386.html>.
- [12] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 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.
- [13] 罗光杰, 白晓永. 喀斯特与岩溶的来龙去脉[N]. 中国科学报, 2014-03-28(16).
- [14] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [15] 谢翠华. 岩溶不等于喀斯特[J]. 地质科学, 1981(4): 409.
- [16] 《中国荒漠化(土地退化)防治研究》课题组. 中国荒漠化(土地退化)防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [17] 温远光. 广西石漠化的成因与治理对策[M]//邹德正. 科学技术与西部大开发. 南宁: 广西科学技术出版社, 2001: 308-309.
- [18] 刘京涛, 温远光, 周峰. 桂西南退化喀斯特植被自然恢复研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 65-69.
- [19] 付战勇, 马一丁, 罗明, 等. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 9008-9021.
- [20] 王如松, 周涛, 陈亮, 等. 产业生态学基础[M]. 北京: 新华出版社, 2006.
- [21] 国家发展和改革委员会社会发展司. 国家发展和改革委员会负责同志就《建立国家公园体制总体方案》答记者问[J]. 生物多样性, 2017, 25(10): 1050-1053.
- [22] 唐小平, 蒋亚芳, 刘增力, 等. 中国自然保护地体系的顶层设计[J]. 林业资源管理, 2019(3): 1-7.
- [23] 苏航, 刘小妹. 从国际相关体系看我国自然保护地体系建设[J]. 中国土地, 2020(4): 32-35.
- [24] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构-功能-生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320-330.
- [25] 周运超, 潘根兴. 茂兰森林生态系统对岩溶环境的适应与调节[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 47-53.
- [26] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ)[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2003.
- [27] 郝文芳. 陕北黄土丘陵区撂荒地恢复演替的生态学过程及机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [28] 苏宗明. 广西岩岗石灰岩山森林类型的分类问题[J]. 广西植物, 1981, 1(2): 7-10.
- [29] BOND W J, MIDGLEY J J. Ecology of sprouting in woody plants: The persistence niche [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2001, 16(1): 45-51.
- [30] 陈沐, 曹敏, 林露湘. 木本植物萌生更新研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1114-1118.
- [31] 沈有信. 滇中岩溶山地半湿润常绿阔叶林植物繁殖体与森林更新[D]. 昆明: 中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园), 2006.
- [32] 周晓果, 卢文科, 叶铎, 等. 基于系统发育和功能性的森林群落构建机制[J]. 广西科学, 2014, 21(5): 525-533.
- [33] BROWN G W, MURPHY A, FANSON B, et al. The influence of different restoration thinning treatments on tree growth in a depleted forest system [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 437: 10-16.
- [34] ALLEN C D, SAVAGE M, FALK D A, et al. Ecological restoration of southwestern ponderosa pine ecosystems: A broad perspective [J]. Ecological Applications, 2002, 12(5): 1418-1433.
- [35] 袁丛军, 喻理飞, 严令斌, 等. 喀斯特石漠化区不同经营类型次生林群落特征及林分结构[J]. 西部林业科学, 2017, 46(1): 70-78.
- [36] 陆志成, 温远光, 周晓果, 等. 封育年限对岩溶植被组成和土壤肥力修复的影响[J]. 广西植物, 2019, 39(8): 1016-1028.
- [37] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development [J]. Nature, 2015, 528(7580): 51-59.
- [38] WEN L, LI D J, YANG L Q, et al. Rapid recuperation of soil nitrogen following agricultural abandonment in a karst area, southwest China [J]. Biogeochemistry, 2016, 129(3): 341-354.
- [39] 徐大平, 丘佐旺. 南方主要珍贵树种栽培技术[M]. 广州: 广东科技出版社, 2013.
- [40] CHAER G M, RESENDE A S, CAMPELLO E F C, et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil [J]. Tree Physiology, 2011, 31(2): 139-149.
- [41] GRISCOM H P, ASHTON M S. Restoration of dry tropical forests in Central America: A review of pattern and process [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(10): 1564-1579.
- [42] 温远光, 张健, 严理, 等. 豆科植物对石漠化土地生物碳固持能力的影响[J]. 广西科学, 2015, 22(6): 573-577.
- [43] 温远光, 夏承博, 周晓果, 等. 不同石漠化治理模式下群落的植物组成及多样性[J]. 广西科学, 2017, 24(2):

- 168-174, 181.
- [44] 张彧娜, 周晓果, 温远光, 等. 喀斯特地区三种人工林土壤微生物群落结构特征[J/OL]. 广西植物, 2021; 1-17 [2021-5-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20210511.0907.002.html>.
- [45] 何友君, 梁星云, 覃林, 等. 南亚热带人工针叶纯林近自然改造早期对群落特征和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2484-2495.
- [46] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 等. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(19): 6154-6162.
- [47] 朱宏光, 陆晓明, 温远光, 等. 马尾松人工林近自然化改造对林分生长的影响[J]. 广西科学, 2014, 21(5): 477-483.
- [48] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [49] 刘世梁, 董玉红, 孙永秀, 等. 基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分分析——以贵州省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8957-8965.

Theory and Technology of Karst Forest Ecological Protection and Restoration in China

WEN Yuanguang^{1,2}, ZHOU Xiaoguo², WANG Lei¹, SUN Dongjing², ZHU Hongguang¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Institute of Eco-Environmental Research, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

Abstract: The research results in the theory and practices of Karst forest ecological protection and restoration in China in recent years were comprehensively summarized. In terms of theory, the policy support system of Karst forest ecological protection and restoration based on natural protection land system, the theory of multi-species coexistence and biodiversity maintenance based on the high heterogeneity of niche in Karst area, the theory of covert vegetation succession based on Karst topography, soil and natural disturbance mechanism, the community construction mechanism based on the characteristics of Karst plant germination, and the theory of Karst ecological resource assessment and ecological industry development are innovatively proposed. In terms of technology, enclosure modification and structural function enhancement technology of Karst natural secondary forest, technical system for forest ecosystem restoration and reconstruction in Karst rocky desertification area, forest landscape restoration and space management technology in Karst area, Karst ecological resources assessment and ecological industry planning management technology were highly refined. As a result, the theory and technology innovation system of ecological protection and restoration of Karst forest was formed, and the future ecological protection and restoration, ecological industrialization and sustainable management of aging forest, natural secondary forest and rocky desertification control area in Karst area was prospected.

Key words: ecological protection and restoration; theory and technology; ecological industry; Karst forest; rocky desertification

责任编辑: 陆媛峰



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>