

宁静, 杨磊, 曹建华, 等. 基于文献计量分析的岩溶区植被恢复研究现状与热点[J]. 中国岩溶, 2023, 42(2): 321-336.

DOI: 10.11932/karst2022y25

# 基于文献计量分析的岩溶区植被恢复研究现状与热点

宁 静<sup>1,3</sup>, 杨 磊<sup>2</sup>, 曹建华<sup>3,4</sup>, 李 亮<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006; 2. 威海海洋职业学院, 山东 荣成 264300;  
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;  
4. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004)

**摘 要:** 文章检索 1985-2021 年间 Web of Science 核心合集数据库 (简称 WoS) 和 CNKI 中国期刊全文数据库中有关岩溶区植被恢复的相关文献信息, 通过国内外发文趋势、高频关键词分析、关键词共现和聚类分析及主题时间演变分析等, 探讨有关岩溶植被恢复研究的热点与趋势。结果表明: 在 1985-2021 年间 WoS 和 CNKI 数据库分别收录相关文献 319 和 351 篇, 37 年间的发文量呈现波动性上升的趋势, 整体分为三个阶段: 第一阶段 (2005 年以前), 该阶段为研究的启蒙阶段, 发文量较少; 第二阶段 (2005-2015 年), 随着国内外学者对岩溶地区生态重建研究的重视, 该阶段文献数量有显著增加; 第三阶段 (2015-2021 年), 为快速发展阶段, 国际上发文量呈现直线性上升, 国内发文量呈现波动式上升, 而国内研究增长速率明显高于国际研究。石漠化、植被演替、土壤养分、物种多样性等为文献的高频关键词, 是国内外研究的共同关注点, 其中, 植被演替规律、土壤中养分及物种多样性是岩溶石漠化地区的核心问题。国际上对岩溶植被恢复研究更加关注生态系统服务功能、气候变化等, 而国内前期主要倾向于岩溶石漠化地区植被恢复研究, 后期主要是关注植被恢复对土壤性质变化及植物群落构成的影响。近年来, 岩溶生态系统服务功能、岩溶植被恢复的环境效益、岩溶碳汇、岩溶关键带等逐步成为当前岩溶植被恢复研究领域的新型热点问题。为促进岩溶植被恢复研究的发展, 建议加强国内与国际间的合作, 通过野外布设观测点, 长期观测和对比分析不同区域岩溶植被恢复的动态。通过研究岩溶植被系统恢复的技术、模式及评价方法等, 进一步揭示基于山水林田湖草生命共同体及乡村产业视角下的岩溶生态系统的构建、植被多样性的多尺度格局。

**关键词:** 植被恢复; 植被演替; 岩溶; 石漠化; VOSviewer

**中图分类号:** G 535.1; X 171.4 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-4810 (2023) 02-0321-16

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## 0 引 言

以灰岩和白云岩等碳酸盐岩为主的岩溶(喀斯特)地貌分布广泛, 据统计全球岩溶面积约为 2 200 万 km<sup>2</sup>, 占陆地面积的 15%<sup>[1]</sup>。中国是岩溶的重要分

布区, 面积达 360 万 km<sup>2</sup>, 其中裸露型碳酸盐岩面积约 130 万 km<sup>2</sup>, 40% 以上分布于西南地区<sup>[2-3]</sup>。该地区岩溶发育强烈, 特殊的地质背景加之人地矛盾突出, 自然植被不断被破坏, 土壤侵蚀严重而基岩大面积裸露, 土地生产力严重下降, 导致“石漠化”快速扩

资助项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0107100); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20297090, 桂科 AD19245176, 桂科 AD21196001); 广西中青年教师基础能力提升项目(2020KY06034); 桂林市科技计划项目(20200010403); 基本科研业务费项目(2020004)

第一作者简介: 宁静(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为: 岩溶生态系统。E-mail: 1530191290@qq.com。

通信作者: 李亮(1983—), 副教授, 研究方向为: 水文地质与工程地质。E-mail: 276531330@qq.com。

收稿日期: 2022-09-07

展,严重制约西南岩溶区社会发展,其综合治理已列入国家发展目标<sup>[4-5]</sup>。自20世纪90年代以来,尤其是2000年西部大开发战略实施以来,中国实施退耕还林还草工程极大地促进了石漠化治理,石漠化面积实现“持续净减少”<sup>[6-7]</sup>。同时,大量的生态恢复实践与生态工程建设为恢复生态学学科的发展与理论研究提供了良好机遇和支撑<sup>[8]</sup>。

目前,岩溶区植被恢复的研究主要关注植被恢复措施研究<sup>[9]</sup>,例如,利用“花江模式”建立的岩溶高原峡谷中-强度石漠化环境生态产业规模经营综合治理模式、贞丰县石漠化治理种植金银花促进植被恢复的“坪上模式”、生态移民的“环江模式”、平果县种植火龙果的“果化模式”等。此外,研究者还关注植被恢复对物种组成及多样性<sup>[10]</sup>、土壤养分<sup>[11-13]</sup>、水分<sup>[14]</sup>、微生物<sup>[15-16]</sup>组成、岩溶碳汇<sup>[17-19]</sup>等的影响。国内有涉及岩溶植被生态学的文献计量学研究,如利用VOSviewer软件研究岩溶区植被生态学领域不同时间段的关键词共现网络,发现喀斯特、植被和石漠化等为文献高频度关键词,表明石漠化区域的植被恢复是该领域的研究热点和核心内容<sup>[20]</sup>。虽然诸多国内外学者关注岩溶区植被恢复有关问题的研究,但国际和国内该领域研究的整体发展历程、研究现状、研究热点和研究趋势等方面至今却未见有总结报道。

文献计量是一种对于科学研究的定量评价方法,旨在评价特定研究领域的学术研究工作<sup>[21]</sup>。本文利用文献计量学方法对国际、国内近30多年来岩溶植被恢复研究的发文趋势、研究热点和主题演变进行分析与比较,旨在科学、客观、定量地描述恢复生态学学科在中国岩溶区生态恢复实践的发展历程。同时,阐明国际上有关该领域的研究热点和主题演变趋势,理清植被恢复发展脉络,以期为中国岩溶区植被恢复生态学研究和生态恢复实践工作的开展提供借鉴。

## 1 研究方法

### 1.1 数据来源

本文以Web of Science核心合集数据库为数据源,检索1985-2021年间发表的以“karst”、“vegetation restoration”、“carbonate rock”、“vegetation succession”等为主题的有关岩溶区植被恢复研究的国际文

献,共得到319条符合条件的文献信息。同时,本文以中国期刊全文数据库(CNKI)为数据源,检索以“岩溶(喀斯特)植被恢复”、“岩溶植被修复”、“石灰岩植被恢复”、“岩溶(喀斯特)植被演替”等为主题词的文献,获取国内研究数据源,由于CNKI中包含学术期刊、年鉴、学术报纸、专利等题材,为保证分析质量,仅选择期刊论文作为数据来源,时间跨度与国际研究数据保持一致,共筛选出351篇文献。

### 1.2 分析手段

本研究借助WoS和CNKI数据库自带的有关文献分析工具以及VOSviewer等软件,分析国际、国内岩溶区植被恢复研究现状和热点。运用Origin2022来分析整体的发文趋势以及高频关键词数量的统计,VOSviewer用于关键词共现分析和聚类分析。通过文献中出现的关键词来绘制关键词网络图,用图来凸显该领域的热点问题,其中图中的一个节点为一个关键词,圆圈大小表示关键词出现频率的大小,而节点与节点之间的连线表示关键词之间的紧密程度。通过定量分析岩溶植被恢复这一领域,对该领域当前研究热点与研究方向进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 岩溶区植被恢复文献发表趋势

为准确、清晰地认识国际、国内岩溶植被恢复相关文献的发表情况,绘制出国内外岩溶植被恢复领域年度文献分布及发表趋势图(图1)。从图1可知,

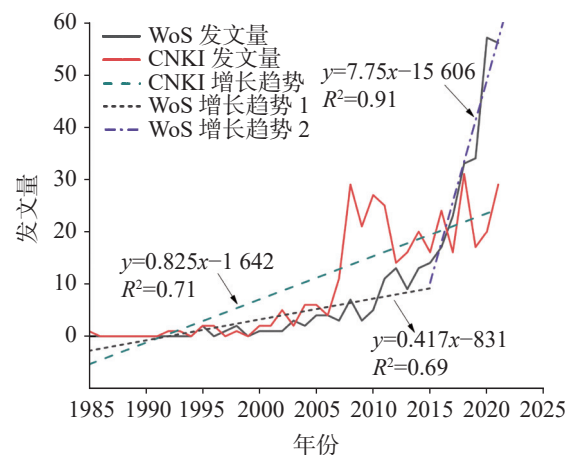


图1 1985-2021年岩溶植被恢复领域年度发文量及发表趋势  
Fig. 1 Annual publications and trends of studies on karst vegetation restoration from 1985 to 2021

国际上对于该主题的逐年文献数量整体呈上升趋势,研究可大致分为三个阶段:第一阶段(2000 年以前),该阶段的文献数量较少,年度发文量仅个位数,岩溶植被恢复研究处于萌芽时期;第二阶段(2000-2015 年),随着对生态服务功能研究的重视,学术界对岩溶植被恢复研究兴趣增长,岩溶植被恢复研究文献发表呈现较为稳定的增长态势,年发文量增加至十几篇;第三阶段(2015-2021 年),岩溶植被恢复相关文献骤增, WoS 上的发文量呈现指数型增加, 全球各地岩溶地区都相应开展了较为丰富的研究工作。

与国外研究相比,国内关于岩溶植被恢复的研究整体呈波动上升趋势。整体的研究可大体分为三个阶段:第一阶段(2005 年以前),该阶段为研究的启蒙阶段,虽然总发文量较少,但年度发文量略高于国际上的发文量;第二阶段(2005-2015 年),随着国家对岩溶地区生态重建的重视,在该阶段迎来图中第一个峰值点,特别是在 2008 年以后,出现直线式上升,2008 年达到了 29 篇;第三阶段(2015-2021 年),虽未出现直线增加的趋势,但总体以波动式上升。

为进一步明确国际、国内岩溶区植被恢复研究领域的文献发表趋势,通过线性拟合结果发现在 2015 年之前 CNKI 数据库文献发表量明显高于 Web of Science 数据库,而近 5 年的数据表明, Web of Science 数据的发文量远远高于 CNKI。这说明,近年来国际上对关于岩溶区植被恢复的研究越来越重视,虽然在 2015 年之前,国内的相关研究要远高于国际上的研究,但近 5 年却完全不同。国内比国际研究要早的主要原因是因为中国西南地区存在着大

片的岩溶区,由于其地貌类型多样,受气候、人为等影响的差异,石漠化程度不同等条件为国内的专家学者提供了绝佳的研究平台。

## 2.2 岩溶区植被恢复高频关键词

关键词词频在一定程度上反映当前岩溶区植被恢复的主要内容以及该领域的大致研究方向。本文选取两个数据库文献的关键词进行归纳总结,如表 1 所示,分别选取了两个数据库出现频率最高的前 10 个。在 WoS 数据库中,文献关键词排名前 10 的分别是“environmental sciences”、“vegetation”、“agriculture”、“karst”、“restoration”、“geology”、“forestry”、“soil”、“rocky desertification”、“succession”,除去检索所带的关键词,国际上对于岩溶区植被恢复问题归属环境科学学科。除此之外,与岩溶区植被恢复密切相关的还有“岩溶区土壤问题”,例如,植被恢复会影响土壤的养分分布、土壤中有机碳的含量以及土壤中微生物的生存条件等。而关于岩溶区植被恢复问题的研究中很大一部分是为了解决岩溶区的“石漠化问题”,此外,岩溶区植被恢复还与林业和农业问题密切相关。在 CNKI 数据库中,文献关键词排名前 10 的分别是“植被恢复”、“喀斯特”、“石漠化”、“植被演替”、“土壤养分”、“物种多样性”、“喀斯特山地”、“自然恢复”、“石灰岩”、“物种组成”。与 WoS 数据库不同,CNKI 数据库中增加了植被恢复过程中物种多样性的研究,例如,石漠化严重的地区植被恢复后,对物种组成及物种多样性的影响,并比较自然恢复的林地与人工恢复林地的物种多样性,以探寻最佳的恢复方法。

表 1 WoS 和 CNKI 数据库中排名前 10 的关键词  
Table 1 List of the top 10 keywords in WoS and CNKI database

关键词	出现次数	关联强度	关键词	出现次数	关联强度
environmental sciences	179	1 270	植被恢复	112	149
vegetation	69	491	喀斯特	100	97
agriculture	61	469	石漠化	40	62
karst	56	415	植被演替	28	31
restoration	55	421	土壤养分	16	26
geology	47	383	物种多样性	13	31
forestry	44	274	喀斯特山地	13	13
soil	42	332	自然恢复	13	11
rocky desertification	40	329	石灰岩	11	11
succession	40	305	物种组成	10	29



### 2.3 岩溶区植被恢复研究热点

关键词共现分析是文献计量学中常用的分析方法,可体现研究主题与研究热点。为识别岩溶区植被恢复的研究热点,本研究运用 VOSviewer 软件对国际、国内岩溶区植被恢复研究关键词进行共现可视化分析。为更加清晰地显示国际岩溶区植被恢复研究关键词共现关系,将关键词阈值设置为 5,可视化结果如图 2 所示。图中节点大小表示关键词出现频次,节点之间的连线表示关键词之间共现频次,连线越粗代表关键词共现频次越高;节点之间以颜色区分不同聚类,各聚类可反映岩溶区植被恢复研究的热点。

根据聚类分析结果,国际上岩溶区植被恢复研究关键词被划分为 5 个研究主题。总结及归纳得到近 30 年来国际学术界关于岩溶区植被恢复研究的 5 个热点主题:第一部分即黄色区域主要是由“land-use change”、“agricultural”、“nitrogen”、“carbon accumulation”、“terrestrial ecosystems”等关键词组成。此部分以陆地生态系统为主要的研究对象,以土地类型中的农业用地为主,通过对土壤中 N 和 C 的研究,来探寻其影响对植被恢复的作用。第二部分主要由“organic carbon”、“soil organic carbon”、“forest”、“karst ecosystem”、“biomass”等关键词构

成。该部分以岩溶生态系统为主要研究对象,通过对森林中的生物量以及土壤有机碳含量等来研究岩溶区植被恢复对地上、地下部分的影响。第三部分主要由“vegetation”、“forestry”、“biodiversity”“succession”“patterns”等关键词构成。该部分主要针对通过自然恢复、人工造林等不同模式下对岩溶生态系统的恢复情况,使得该领域研究从主要植被转向对植物种群和群落的研究。第四部分主要由“geology”、“rocky desertification”、“climate change”、“southwest China”等关键词构成。该部分主要以中国西南岩溶区为对象,通过一系列工程项目对西南岩溶区石漠化的恢复情况做的一系列研究。第五部分的内容与第一部分和第四部分内容基本相同,唯一的区别在于,第五部分与“loess plateau”生态脆弱地区进行比较,同样是以植物恢复的方式为主,但二者的恢复过程确实有明显差异。

同样,将关键词阈值设置为 5,研究国内岩溶区植被恢复关键词共现关系,可视化结果如图 3 所示。根据聚类结果,国内岩溶区植被恢复研究关键词被划分为 5 个研究主题。第一部分主要由“植被恢复”、“土壤酶活性”、“喀斯特山地”等关键词组成。此部分以岩溶山地的研究为主,通过研究“土壤酶活性”来反映该地区的植被恢复情况。第二部分主要由

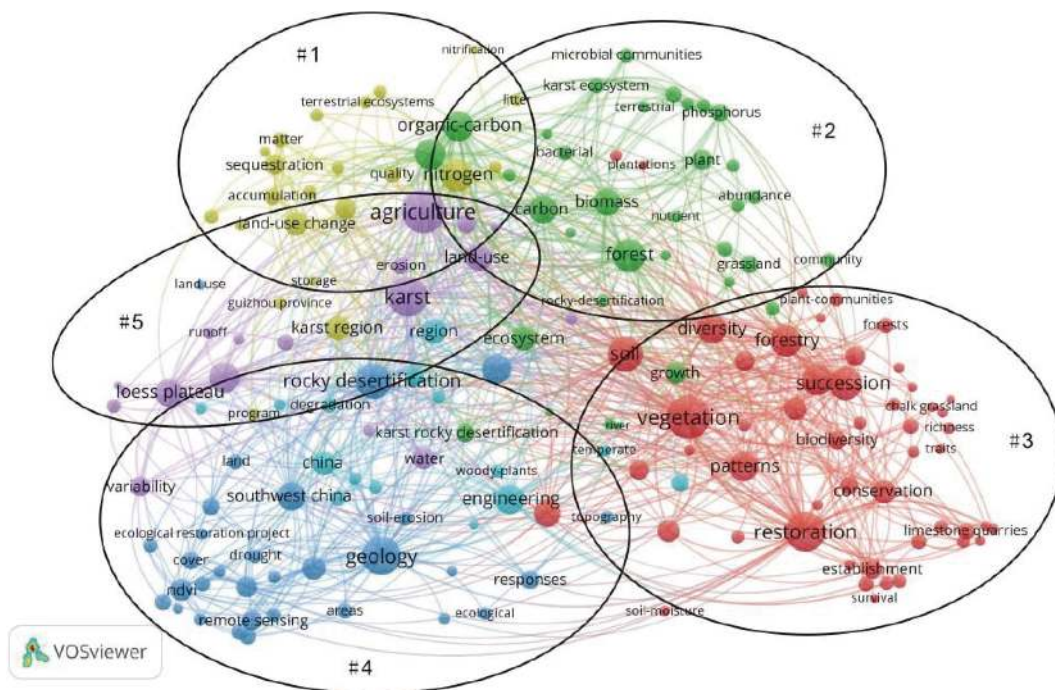


图 2 WoS 文献中出现 5 次以上关键词的共线网络图

Fig. 2 Occurrence network map of keywords published more than 5 times by publications in WoS

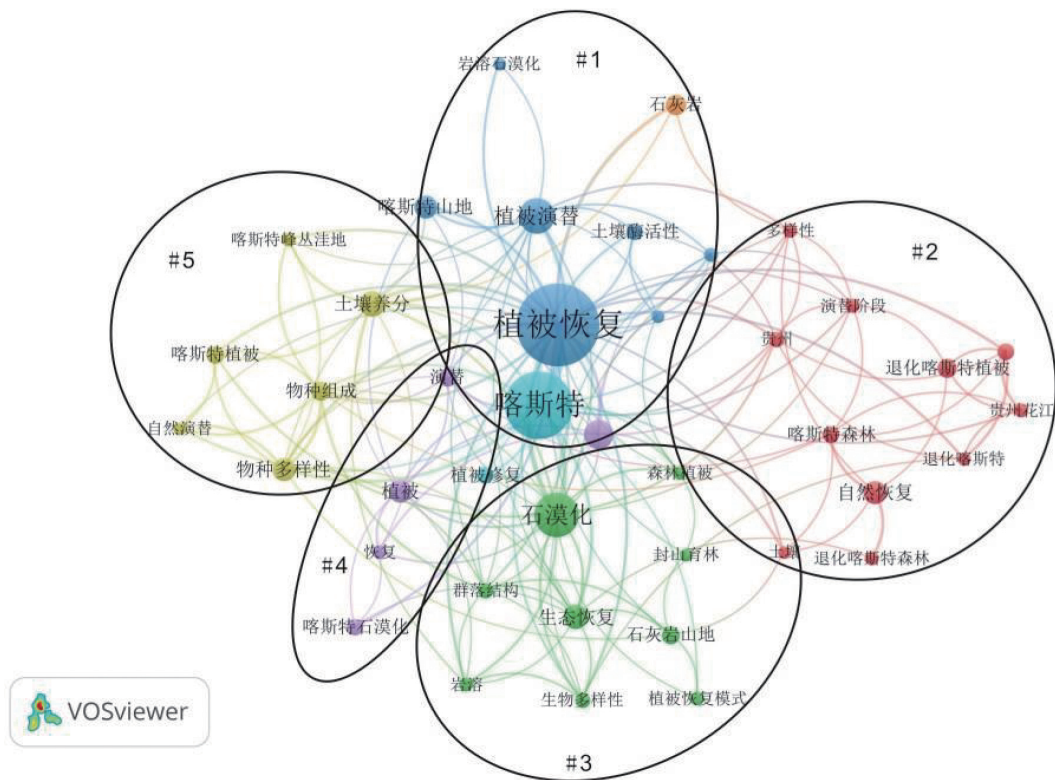


图 3 CNKI 文献中出现 5 次以上关键词的共线网络图

Fig. 3 Occurrence network map of keywords published more than 5 times by publications in CNKI

“自然恢复”、“退化喀斯特”、“喀斯特森林”、“演替阶段”等关键词组成。该部分主要是对贵州一些退化岩溶森林植被恢复状况的研究。第三部分主要由“石漠化”、“生态恢复”、“生物多样性”、“群落结构”、“封山育林”等关键词组成。该部分主要从岩溶区石漠化的危害对植被恢复紧迫性等方面开展研究。第四部分和第五部分主要由“喀斯特石漠化”“物种多样性”、“土壤养分”、“物种组成”等关键词组成。这两个部分主要以物种的多样性以及土壤养分等来评价植被恢复对岩溶区石漠化的影响。

## 2.4 岩溶区植被恢复研究主题演变

为明晰岩溶区植被恢复研究主题演变趋势,运用 VOSviewer 分别绘制国际、国内岩溶区植被恢复研究关键词时间演变图(图 4, 图 5),分析岩溶区植被恢复研究主题演变特征。图中节点颜色代表关键词出现的平均时间,关键词节点越趋近于蓝色表示出现时间越早,越趋近于黄色表示出现时间越晚。国际上对于岩溶区植被的恢复研究在 2014 年之前基本集中于第三部分的“vegetation”、“forestry”、“biodiversity”、“succession”。从 2018 年以后转向对“terrestrial ecosystems”、“rocky desertification”、

“land-use change”、“organic carbon”、“nitrogen”。研究内容开始具体到土地利用方式、土壤养分的研究,尤其是土壤中 C、N 的研究等,研究尺度扩大到陆地生态系统,其中关于石漠化区的植被恢复是一个热点问题。国内研究者早期主要是对“喀斯特石漠化”、“植被演替”、“自然恢复”等方向进行研究,近几年主要围绕生物多样性、群落结构、土壤质量评价等方向进行探讨,同时更加关注植被恢复对地上、地下部分的影响。

## 3 讨论

### 3.1 岩溶植被恢复的模式、技术及评价

#### 3.1.1 岩溶区植被恢复模式

由于岩溶地区成土速率慢、土层薄、水土易流失,是全球典型的脆弱生态系统,该地区的植被恢复难度较大<sup>[22-23]</sup>。因此,植被恢复模式的选择主要是为了改善土壤结构,协调土壤水、肥、气和热等之间的平衡关系<sup>[24-25]</sup>。较为成功的植被恢复模式为在黔西南布依族苗族自治州贞丰县的低中海拔岩溶山区分别种植花椒、金银花和李子的“顶坛模式”和“坪上





的丰富度总体上表现为随植被正向演替而增加。前人研究表明,岩溶区植被恢复模式对土壤有机碳产生显著的差异性影响,这种差异与细根生物量变化有密切的关系<sup>[31-32]</sup>。魏媛等<sup>[33]</sup>以贵州花江岩溶高原生态综合治理示范区内土壤为研究对象,分析退化岩溶植被恢复过程中不同生境、不同层次、根际和非根际土壤微生物生物量碳的变化特征。

### 3.1.2 岩溶区植被恢复技术

岩溶区特殊的生态环境决定了对植物种类有较强的选择性,以喻理飞为核心的作者群较早开展了岩溶植被恢复评价和修复技术的研究,目前对岩溶区植被恢复的修复技术主要有生物修复技术<sup>[34-35]</sup>、植被自然恢复与重建技术<sup>[36-37]</sup>、植被人工恢复与重建技术<sup>[38]</sup>等。以生物修复技术为基础的方法主要有物种框架法和最大生物多样性法:物种框架法即通过人工新建或在原有基础上选择一个建群种,作为恢复的基本框架种群;最大生物多样性法即按原生态系统的物种组成结构<sup>[20]</sup>、多样性进行各类物种恢复<sup>[39]</sup>。此外,岩溶区植被恢复技术的重点在于岩溶山地的造林技术,而造林技术成功的很大一部分原因在于树种的选择问题,适合的树种对特定地区造林的结果起关键性作用。例如,广西南亚热带地区种植的降香黄檀就是一个较为成功的案例,它不仅改善了当地生态环境,而且带来较高的经济效益<sup>[40]</sup>。庞世龙等<sup>[30]</sup>在广西平果县通过对比5种不同植被恢复模式,研究发现树种的选择会影响岩溶区植被恢复与重建,选择乡土种树,将很大程度上促进植被正向演替。除了树种的选择外,育苗技术<sup>[41]</sup>、选地技术<sup>[42]</sup>、种植技术、抚育施肥技术以及林分管理都影响最终结果。此外,土壤种子库的利用技术<sup>[43-44]</sup>、抗侵蚀边坡植被恢复技术<sup>[45]</sup>和丛枝菌根的运用<sup>[46]</sup>等新兴技术的兴起,使得植被恢复技术更加丰富。孙东等<sup>[45]</sup>通过研究修复后土壤理化性质和植被的变化,提出一种新的抗侵蚀边坡植被恢复方法。王圳等<sup>[47]</sup>分析贵州花江岩溶高原生态系统,发现苔藓植物对岩溶石漠化生境有极强的适应性,是石漠化及其他退化生态系统进行人工生态恢复的理想物种。有研究表明<sup>[48]</sup>“菌根技术”也是解决岩溶地区植被恢复的有效途径之一,它不仅能提高岩溶地区植被成活率,同时还能增加植物适应力。生物土壤结皮<sup>[49]</sup>是一种较好的治理石漠化地区生态恢复的新手段。郑智恒等<sup>[50]</sup>采用

人工培育结皮植被的方法,发现此方法能加速母岩成土速率、提高地表抗侵蚀力、改善土壤环境状态,调控降水下渗、改变土壤中水分再分配格局,促进土壤微生物和植被演替以及提高生物多样性。

### 3.1.3 岩溶区植被恢复评价与方法

对于采用不同技术和模式的岩溶区植被恢复效果是不同的。宋利荣等<sup>[51]</sup>采用AHP法将岩溶植被自然恢复评价标准划分为较差、一般、较好、很好、非常好5个等级,通过对恢复不同程度的地区采取不同的方案,更好地做到“因地制宜”。自然封育法是根据不同山地的立地条件,采取积极的干预与管理措施,诱导植被自然演替更新,而自然恢复的实质就是群落演替。从大尺度看群落的自然恢复,不论是早期Clements的顶级群落学说,还是近代的Whittaker的顶级格局学说和Margalef-Odum新Clements学说,都从不同角度表达了群落演替的会聚性、稳定性和区域优势。物种组成是群落最基本的特征,是形成群落结构的基础,物种多样性对生态系统功能具有促进作用。李先琨等<sup>[52]</sup>认为岩溶区生态建设与植被恢复过程中,要遵循植被地带性分布规律,参照区域性顶极植物群落,根据植被演替规律与生态经济并举的原则来优化其恢复技术。张芳等<sup>[53]</sup>对桂西北岩溶区展开系统性地研究,并提出将人工与自然进行结合的植被恢复方法。Robert Tropek等<sup>[54]</sup>在捷克共和国波希米亚岩溶的石灰岩采石场中,采用以植被演替为主、人工干预为辅的方式,通过对维管植物群落和10个节肢动物群进行采样,得出只需很少人为干预,就可使植被演替自发进行,从而可实现石灰岩采石场的恢复潜力,但是此类方法仅限于维持早期演替阶段,并不能加速群落的演替。王星等<sup>[55]</sup>分析人工生态恢复、植被自然恢复和免耕少耕保护性耕作的三种不同模式下表层土壤的入渗、持水与抗蚀性能的分析,总结出不同生态恢复模式下的综合水土保持能力。而植被人工恢复主要是按照植被系统的发展演替规律,通过人工手段有计划、有目的地增加植被的覆盖度及物种多样性等<sup>[56]</sup>。

## 3.2 岩溶区植被恢复对土壤微生物生态系统的影响

### 3.2.1 岩溶植被恢复过程对土壤理化性质的影响

土壤的理化性质即土壤的物理、化学性质。通常包括土壤的容重、透水性、养分状况、粘结性、可



塑性、酸碱性(pH)等。杨泽良等<sup>[57]</sup>研究桂西北岩溶区不同植被演替阶段土壤微生物群落多样性变化特征,发现随着植被演替的进行,土壤 pH 和容重呈现出下降的趋势。研究表明:不同植被类型不仅在一定程度上影响该地区的温度与湿度,而且对该地区土壤营养、养分循环等情况也具有一定的影响作用。司彬等<sup>[58]</sup>研究黔中岩溶植被自然恢复演替过程中土壤的理化性质,结果表明:在植被自然恢复演替过程中土壤容重和 pH 都逐渐降低,而土壤中的速效养分和有机质都随时间推移不断上升。目前,岩溶区已有大量有关土壤理化性质的基础研究发现岩溶区植被恢复对土壤肥力、生物多样性、生产能力等都具有一定的影响。吴平等<sup>[59]</sup>分析两种不同林地的土壤理化性质,发现混交林对土壤恢复效果好于纯林。苏樑等<sup>[60]</sup>以岩溶峰丛洼地不同植被恢复阶段的草丛、灌丛、次生林和原生林为研究对象研究群落活细根生物量、形态特征及其与土壤性状的关系,结果发现:植物群落细根特征与土壤性状之间存在着不同的相关性,其中土壤有机碳、速效钾和全氮对细根特征影响较大,这是植物长期适应生境条件所形成的有效策略。盛茂银等<sup>[61]</sup>发现土壤的理化性质与石漠化程度有着必然的联系,其为岩溶区石漠化的治理提供了一个新的方向。岩溶石漠化的本质是生态系统生物地球化学循环过程的改变以及生态系统功能的丧失<sup>[62]</sup>。石漠化植被恢复过程中如何有效提高土壤养分存留与可利用性将直接影响土壤生态功能的恢复和区域生态恢复的可持续性<sup>[63]</sup>。

### 3.2.2 岩溶植被恢复对土壤微生物与酶活性的影响

土壤微生物是生态系统中养分在源和汇之间流动的巨大动力,在植物凋落物的降解、养分循环与平衡、土壤理化性质的改善中起着重要作用,同时它也与植被演替密切相关。沈利娜等<sup>[64]</sup>研究发现在植被恢复过程中,土壤微生物总数量与土壤细菌数量趋势一致,具体表现为顶级林>灌丛>乔幼林>灌草丛>草丛。顶级群落环境稳定,是微生物特别是细菌快速繁殖的温床。结果表明:退化岩溶植被恢复过程中土壤微生物的生物量碳存在较大差异。随着退化岩溶植被的恢复,土壤微生物生物量碳上升明显,从大到小表现为乔木群落阶段、灌木群落阶段、草本群落阶段、裸地阶段,反映出土壤质量在逐渐恢复。李强等<sup>[65]</sup>认为南方大部分岩溶区水热条件都比

较好,但以土壤为核心的土壤-水-植被紧密相关复合生态系统的养分积累及演替速率明显低于非岩溶区。

土壤氮素的可用性在决定生态系统的结构和功能方面起着重要作用。杨怡等<sup>[66]</sup>通过研究不同类型的植被恢复对土壤氮素转化的影响,发现不同类型的植被恢复对土壤氮素转化是不同的。大体来说,随着植被的恢复,土壤氮矿化和硝化速率逐渐增加,而氨化速率逐渐下降。植物通过吸收土壤中的养分物质来供其生长,其中土壤中酶的多少是一个较为重要的因子。土壤酶主要来源于土壤微生物及部分植被根系,土壤酶活性与土壤肥力间有一定的相关性,可作为评价土壤肥力的指标<sup>[67]</sup>。岩溶生态系统中植被的演替对土壤微生物的数量及群落组成具有较大影响,这种作用影响系统中土壤、微生物和植物之间物质能量的循环和转化,从而导致岩溶生态系统生态功能的变化<sup>[68]</sup>。有研究用土壤综合肥力指标值 (IFI) 来评价植被各恢复阶段的土壤生物学肥力质量,随着植被逐渐恢复,土壤物质循环也逐渐加快,微生物活性随之逐渐增强,使得土壤生物学肥力逐渐提高,即退化岩溶植被的恢复对土壤生态肥力有一定的改善作用,这有利于土壤生物学质量的提高<sup>[69-70]</sup>。

### 3.2.3 植被恢复对石漠化程度的改善

通过分析相关文献可知,岩溶石漠化地区植被恢复与林业发展问题,在 1985 年以前都未受到专家学者的重视,1985-2001 年为初步发展阶段,2001 年至今为快速增长阶段<sup>[71]</sup>。岩溶地区植被恢复的研究很大程度上是以岩溶森林和岩溶林地为基础,此后伴随着岩溶地区石漠化问题也进一步显现,相关研究也随之加深<sup>[72]</sup>。岩溶地区石漠化问题不仅导致该地区的生态系统退化,而且使得该地区生物多样性急剧减少,而这些已严重阻碍西南岩溶地区经济社会的发展<sup>[73]</sup>。面对越来越严重的石漠化现象,官国培<sup>[74]</sup>提出“因地制宜,适地适树”的想法,其中实行“封山育林”是石漠化生态重建、植被恢复最直接和最有效的措施。周政贤等<sup>[75]</sup>将贵州地区石漠化的类型划分为 5 类,分析这 5 种类型的特点,并提出相应的植被恢复模式。梅再美等<sup>[76]</sup>针对不同强度等级石漠化,提出不同强度等级的石漠化土地的植被恢复途径与对策,以及不同强度石漠化土地的植被恢复技术。但是,由于岩溶区地貌较为复杂,关于岩溶地



区的地质资料较为缺乏,且户外工作浪费较大的人力物力,种种原因使得对该地区的研究出现滞后性。但随着“十三五”提出的“改革与创新治理技术和模式,转变环境治理理念和方式”,再加上在各领域学者的共同努力下,该领域取得了许多有价值的成果<sup>[77]</sup>。白义鑫等<sup>[78]</sup>以9种典型的石漠化治理措施为研究对象,构建适合石漠化综合治理增汇型植被恢复技术与模式。

### 3.2.4 植被恢复对岩溶碳汇的影响

岩溶生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,在全球碳循环中同样发挥着重要作用。因此,对岩溶生态系统碳的研究亦较活跃,已开展植被自然恢复过程中的土壤有机碳库特征<sup>[79]</sup>,土壤团聚体<sup>[80-81]</sup>、石漠化程度对土壤碳库、不同植被类型的碳格局<sup>[82]</sup>,植被类型对土壤有机碳、氮<sup>[83]</sup>,植被恢复模式与林龄及豆科植物对岩溶生态系统的碳储量<sup>[84-85]</sup>等研究。结果表明:植被恢复能有效提高岩溶生态系统的碳储量,人工造林相对于封山育林更能快速促进植被恢复、形成乔木林,从而提高生态系统碳储量。董波等<sup>[86]</sup>发现土壤碳储量是不同植被恢复模式总碳储量的主体。保护石灰岩山地现有土层,防治水土流失及减少频繁的人为扰动对于维持土壤碳储量具有重要作用。曹建华等<sup>[87]</sup>通过不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响研究,得出碳循环强度的增加,使土下碳酸盐岩的侵蚀能力加强,树箱比土箱提高2.84倍、比草箱提高1.36倍。

### 3.2.5 植被恢复对水分的影响

西南岩溶地区由于植物根系在吸水过程中存在“二元结构”的特点,再加上地表水的渗漏、土层不连续、土壤含水率低,并且植物在降水极少的情况下会受到水分的胁迫作用,这使得水分成为植被恢复重建的主要障碍因子<sup>[88]</sup>。同时,植物水分之间的关系不仅仅是生态水文研究的基础,它更会影响生态系统中植被的演替过程<sup>[88-89]</sup>。而水文-生态过程是岩溶关键带形成的关键驱动力,其相关过程和机理是解决相关生态环境问题的关键。蒋忠诚<sup>[90]</sup>在研究岩溶植物营养元素来源的问题中,发现植物中有一些营养元素是来自于岩溶水和土壤水当中。邓艳等<sup>[91]</sup>通过分析广西不同石漠化程度下植被水分来源的稳定同位素,发现不同石漠化程度下植被水分来源不

相同。Brooks等<sup>[92]</sup>基于稳定氢、氧同位素方法,提出“两个水世界”的假设(TWW假说),而该假说是否在岩溶地区存在需要进一步探索。

## 4 结语与展望

岩溶植被恢复的研究尺度从单个植物到涉及群落、土壤微生态系统、生态经济型、区域和全球,呈现出从小尺度向大尺度研究的转化、宏观影响到微观影响的转化。通过文献计量法对岩溶植被恢复的研究分析发现,虽然国内外学者在岩溶区植被恢复领域已取得较多研究成果,但与全球地带性的森林、草地等植被类型相比,岩溶区植被恢复的研究关注度和生态恢复规律的掌握程度还较为滞后,迄今对岩溶区植被结构和植被恢复中的动态过程和机理的理解还较为有限。这主要是因为西南岩溶地区地貌类型多样,空间异质性大,不同地貌之间植被恢复对地形及气候条件等的响应也不一致,导致植被恢复速率也不一致。本研究通过不同学科与管理模式在该领域间的相互交融,使得该领域的研究不断涌现新的研究主题与热点问题,为岩溶区植被恢复研究提供了新思路。

## 参考文献

- [1] Bottrell S H, Ford D C, Williams P W. Karst Geomorphology and Hydrology[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 601.
- [2] Jiang Z, Lian Y, Qin X. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [3] Huppert G. Karst in China: Its geomorphology and environment[J]. *Journal of Geography*, 1998, 97(3): 138.
- [4] 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.  
XIONG Kangning, LI Jin, LONG Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888.
- [5] 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.  
WANG Shijie, LI Yangbing. Problems and development trends about researches on karst rocky desertification[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 573-582.
- [6] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Stephanie H, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X G, 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 engineer-

- ing[J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [7] Tong X, Brandt M, Yue Y, Ciaisi P, Jepsen M R, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [8] 张紧紧, 熊康宁, 李瑞. 喀斯特石漠化综合治理植被恢复技术研究进展[J]. *中国饲料*, 2020(5): 5-10.  
ZHANG Jinjin, XIONG Kangning, LI Rui. Study on vegetation restoration technology of karst rocky desertification comprehensive control[J]. *China Feed*, 2020(5): 5-10.
- [9] 欧芷阳, 申文辉, 何琴飞, 彭玉华, 黄小荣, 庞世龙. 广西平果县喀斯特山地不同植被演替阶段的物种组成与物种多样性[J]. *广西林业科学*, 2018, 47(4): 381-389.  
OU Zhiyang, SHEN Wenhui, HE Qinfei, PENG Yuhua, HUANG Xiaorong, PANG Shilong. Species composition and diversity at different vegetation successional stages in karst areas of Pinggou county, Guangxi[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2018, 47(4): 381-389.
- [10] 陈志霞, 喻阳华, 吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(1): 95-102.  
CHEN Zhixia, YU Yanghua, WU Yingu. Effects of different vegetation restoration on soil nutrients and stoichiometry in marble mines in rocky desertification area in central Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2021, 39(1): 95-102.
- [11] 莫燕华, 邹涵, 马姜明, 李玉凤, 菅瑞, 秦佳双, 宋尊荣, 林正忠. 喀斯特石山不同演替阶段灌木群落土壤温湿度变化[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(3): 122-130.  
MO Yanhua, ZOU Han, MA Jiangming, LI Yufeng, JIAN Rui, QIN Jiashuang, SONG Zunrong, LIN Zhengzhong. Variation of soil temperature and moisture at different successional stages of loropetalum chinense communities in karst hills of Guilin, China[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 39(3): 122-130.
- [12] 武亚楠, 喻理飞, 张丽敏, 刘娜, 严令斌. 喀斯特高原区植被恢复过程中土壤碳特征及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(10): 1935-1942.  
WU Ya'nan, YU Lifei, ZHANG Limin, LIU Na, YAN Lingbin. Characteristics and influencing factors of soil carbon pool during vegetation restoration in karst plateau[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10): 1935-1942.
- [13] 魏媛, 喻理飞, 张金池, 俞元春. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生态肥力质量评价: 以贵州花江喀斯特峡谷地区为例[J]. *中国岩溶*, 2009, 28(1): 61-67.  
WEI Yuan, YU Lifei, ZHANG Jinchi, YU Yuanchun. Evaluation on soil ecologic fertility quantity during vegetation succession of degraded karst: A case study in Huajiang valley, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2009, 28(1): 61-67.
- [14] 孙智妍. 喀斯特坡地植被恢复的土壤水分效应及其影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2020.
- SUN Zhiyan. Effects of vegetation restoration on soil moisture on slopes in karst area and its influencing factors[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2020.
- [15] 刘代军, 涂波, 施松梅, 杨晓红, 黄先智, 秦俊. 石漠化地区的生态危机及菌根桑生物修复潜力研究进展[J]. *中国岩溶*, 2012, 31(2): 185-190.  
LIU Daijun, TU Bo, SHI Songmei, YANG Xiaohong, HUANG Xianzhi, QIN Jian. Research progress of the ecological crisis in rocky desertification area and the bioremediation potential of mycorrhizal mulberry[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(2): 185-190.
- [16] 张晓晓, 王苗苗, 冯书珍, 邱虎森, 盖爽爽, 赵蕾, 胡亚军, 何寻阳, 陆祖军. 岩性与植被类型对喀斯特土壤AM真菌群落的影响[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2): 158-167.  
ZHANG Xiaoxiao, WANG Miaomiao, FENG Shuzhen, QIU Husen, GAI Shuangshuang, ZHAO Lei, HU Yajun, HE Xunyang, LU Zujun. Effects of lithology and vegetation type on the soil AM fungi community in karst region[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 37(2): 158-167.
- [17] 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.
- [18] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 唐萍萍. 北方不同植被下土壤岩石试片的溶蚀速率及碳汇分析: 以山西汾阳地区为例[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(3): 258-265.  
HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, TANG Pingping. Analysis on tablets dissolution rate and carbon sink under different vegetation in North China karst area: A case study of Fenyang, Shanxi Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(3): 258-265.
- [19] 卢立华, 农友, 李华, 杨予静, 明安刚, 雷丽群, 何日明, 陈琳. 植被恢复模式对石漠化生态系统碳储量的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7229-7236.  
LU Lihua, NONG You, LI Hua, YANG Yujing, MING Angang, LEI Liqun, HE Riming, CHEN Lin. Effect of vegetation restoration patterns on the carbon storage in a rocky desertification ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7229-7236.
- [20] Qiao Y, Jiang Y, Zhang C. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in Southwest China during recent decade[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- [21] 王俊丽, 张忠华, 胡刚, 付瑞玉, 周元慧, 陶旺兰. 基于文献计量分析的喀斯特植被生态学研究态势[J]. *生态学报*, 2020, 40(3): 1113-1124.  
WANG Junli, ZHANG Zhonghua, HU Gang, FU Ruiyu, ZHOU

- Yuanhui, TAO Wanglan. Bibliometric analysis of research trends on karst vegetation ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(3): 1113-1124.
- [22] 吴清林, 梁虹, 熊康宁, 李瑞. 石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前沿理论与对策[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 11-18, 33.
- WU Qinglin, LIANG Hong, XIONG Kangning, LI Rui. Frontier theories and countermeasures for integrated regulation of soil and water loss and mountainous agroforestry in rocky desertification environment[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 11-18, 33.
- [23] 王锐, 章新平, 戴军杰, 罗紫东, 贺新光, 关华德. 亚热带针阔混交林土壤-植物-大气连续体(SPAC)中水稳定同位素特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6): 1148-1157.
- WANG Rui, ZHANG Xinping, DAI Junjie, LUO Zidong, HE Xinguang, GUAN Huade. Characteristics of water stable isotopes in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) in the needle-leaf and broad-leaf mixed forest in subtropical region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(6): 1148-1157.
- [24] 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.
- SU Weici. Controlling model for rocky desertification of karst mountainous region and its preventing strategy in southwest, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 29-32, 79.
- [25] 卢立华. 岩溶区植被恢复与模式构建技术与实践[C]. “石漠化综合治理与生态文明建设”学术研讨会暨2015年石漠化防治专业委员会年会, 2015: 69-78.
- LU Lihua. Technology and practice of vegetation restoration and model construction in karst areas[C]. "Comprehensive control of rocky desertification and construction of ecological civilization" academic seminar and 2015 annual meeting of rocky desertification prevention and control committee, 2015: 69-78.
- [26] 邓家富. 黔西南州石漠化治理的主要做法及成功模式[J]. *中国水土保持*, 2014, 23(1): 4-7.
- DENG Jiafu. Main practices and successful models of rocky desertification control in southwestern Guizhou[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014, 23(1): 4-7.
- [27] 程方. 喀斯特石漠化治理模式综合评价及其生态补偿标准核算[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- CHENG Fang. Comprehensive evaluation of karst rocky desertification control model and calculation of ecological compensation standard[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [28] 王进, 刘子琦, 张国, 李渊, 李开萍, 鲍恩侯. 喀斯特石漠化治理不同恢复模式土壤养分分布特征: 以贵州花江示范区为例[J]. *西南农业学报*, 2019, 32(7): 1578-1585.
- WANG Jin, LIU Ziqi, ZHANG Guo, LI Yuan, LI Kaiping, BAO Enyu. Distribution characteristics of soil nutrients of different restoration models in karst rocky desertification control area: Taking Huajiang demonstration zone in Guizhou as example[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 32(7): 1578-1585.
- [29] 刘维明, 黄增, 邓超冰, 黎铨海. 大环江流域重金属污染土壤的3种修复技术研究[J]. *江西农业学报*, 2016, 28(10): 94-97.
- LIU Weiming, HUANG Zeng, DENG Chaobing, LI Xuanhai. Study on three kinds of remediation technologies for heavy-metal-contaminated soil in Dahuanjiang River Basin[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2016, 28(10): 94-97.
- [30] 庞世龙, 欧芷阳, 申文辉, 侯远瑞, 黄小荣, 郑威. 广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(7): 60-66.
- PANG Shilong, OU Zhiyang, SHEN Wenhui, HOU Yuanrui, HUANG Xiaorong, ZHENG Wei. Edaphic characteristics of different regeneration patterns in karst mountainous areas of Guangxi[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(7): 60-66.
- [31] 王赛男, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 霍伟杰, 袁道先. 岩溶断陷盆地"盆-山"耦合地形影响下的气候特征及其对石漠化生态恢复的影响探讨[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 50-59.
- WANG Sainan, PU Junbing, LI Jianhong, ZHANG Tao, HUO Weijie, YUAN Daoxian. Climatic characteristics under the influence of basin-mountain coupled topography and its influence on the ecological restoration of rocky desertification in Mengzi karst graben basin, Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 50-59.
- [32] 贺同鑫, 胡宝清, 张建兵, 张诗萌, 庞榆, 裴广廷, 胡刚, 张伟, 孙建飞. 植被恢复十年喀斯特坡地细根对土壤碳氮存留与可利用性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(23): 8638-8648.
- HE Tongxin, HU Baoqing, ZHANG Jianbing, ZHANG Shimeng, PANG Yu, PEI Guangting, HU Gang, ZHANG Wei, SUN Jianfei. Fine root effects on the retention and availability of soil carbon and nitrogen after ten years of vegetation restoration in a karst slope ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(23): 8638-8648.
- [33] 魏媛, 张金池, 喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(5): 71-75.
- WEI Yuan, ZHANG Jinchu, YU Lifei. Changes of soil microbial biomass carbon along successional processes of degraded karst vegetation[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(5): 71-75.
- [34] 刘建梅. 西北地区植被恢复技术进展浅析[J]. *农业与技术*, 2014, 34(7): 7-8.
- LIU Jianmei. Analysis on the progress of vegetation restoration technology in Northwest China[J]. *Agriculture and Technology*, 2014, 34(7): 7-8.
- [35] 于建军, 周思彤, 李津瑶. 露天矿排土场生态修复与植被重建技术分析[J]. *南方农机*, 2019, 50(11): 75.
- YU Jianjun, ZHOU Sitong, LI Jinyao. Analysis on the technology of ecological restoration and vegetation reconstruction of open pit dump[J]. *China Southern Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 75.
- [36] 陈亚宁, 陈亚鹏, 朱成刚, 李卫红. 西北干旱荒漠区生态系统可



- 持续管理理念与模式[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7410-7417.
- CHEN Yaning, CHEN Yapeng, ZHU Chenggang, LI Weihong. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert areas in Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7410-7417.
- [37] 吴鹏, 崔迎春, 赵文君, 舒德远, 侯怡菊, 丁访军, 杨文斌. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(3): 80-92.
- WU Peng, CUI Yingchun, ZHAO Wenjun, SHU Deyuan, HOU Yiju, DING Fangjun, YANG Wenbin. Characteristics of soil stoichiometric in natural restoration process of maolan karst forest vegetation, Southwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(3): 80-92.
- [38] 胡宁. 广西喀斯特人工林生态恢复土壤微生物网演变特征及机制[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- HU Ning. Soil micro-food web evolution characteristic and mechanism following karst ecosystem restoration by forestation in Guangxi Region[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [39] 何霄嘉, 王磊, 柯兵, 岳跃民, 王克林, 曹建华, 熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6577-6585.
- HE Xiaojia, WANG Lei, KE Bing, YUE Yuemin, WANG Kelin, CAO Jianhua, XIONG Kangning. Progress on ecological conservation and restoration for China Karst[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [40] 郭文福, 贾宏炎. 降香黄檀在广西南部热带地区的引种[J]. *福建林业科技*, 2006, 33(4): 152-155.
- GUO Wenfu, JIA Hongyan. The introduction of *dalbergia odorifera* in southern subtropical area of Guangxi[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2006, 33(4): 152-155.
- [41] 谢元贵, 何劲松, 李苇洁, 李安定, 龙秀琴. 喀斯特地区葛藤栽培技术[J]. *农技服务*, 2011, 28(1): 101-102.
- XIE Yuangui, HE Jinsong, LI Weijie, LI Anding, LONG Xiuqin. Cultivation techniques of *pueraria lobata* in karst region[J]. *Agricultural Technology Service*, 2011, 28(1): 101-102.
- [42] 谢锋, 杨大应, 崔姗姗, 宋光林, 王艳娇, 饶书恺. 一种喀斯特地区铅锌矿污染地石漠化区域植被恢复的方法: CN109832074A [P]. 2019.
- XIE Feng, YANG Daying, CUI Shanshan, SONG Guanglin, WANG Yanjiao, RAO Shukai. A method for vegetation restoration in rocky desertification regions of lead-zinc mine contaminated areas: CN109832074A [P]. 2019.
- [43] 徐丽丽, 陈洪松, 王克林, 张伟. 土壤筛对喀斯特地区不同植被类型土壤种子库的分选效果[J]. *土壤通报*, 2009, 40(1): 150-153.
- XU Lili, CHEN Hongsong, WANG Kelin, ZHANG Wei. Separation effect of soil sieves on separating soil seed bank of different vegetation types in karst region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 150-153.
- [44] 马文宝, 薛建辉, 卜晓莉, 吴永波. 西南喀斯特山地森林群落土壤种子库研究综述[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12): 2619-2623.
- MA Wenbao, XUE Jianhui, BU Xiaoli, WU Yongbo. Soil seed bank of forest communities in southwest karst mountains: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(12): 2619-2623.
- [45] 孙东, 邹兴善, 卢鑫. 喀斯特地区岩质边坡抗侵蚀植被恢复技术研究[J]. *贵州科学*, 2019, 37(3): 60-65.
- SUN Dong, ZOU Xingpu, LU Xin. Anti-erosion vegetation restoration technology for rock slopes in karst regions[J]. *Guizhou Science*, 2019, 37(3): 60-65.
- [46] 林艳, 何跃军, 何敏红, 吴春玉, 方正圆, 韩勛, 徐鑫洋, 王世雄. 喀斯特植被演替过程土壤丛枝菌根真菌(AMF)多样性[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4127-4137.
- LIN Yan, HE Yuejun, HE Minhong, WU Chunyu, FANG Zhengyuan, HAN Xu, XU Xinyang, WANG Shixiong. Species diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungi in karst vegetation succession process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4127-4137.
- [47] 王圳, 张金池, 于水强, 王潇, 王如岩, 崔晓晓. 退化喀斯特地区植被恢复过程中苔藓的先锋作用[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(3): 137-140.
- WANG Zhen, ZHANG Jinchu, YU Shuiqiang, WANG Xiao, WANG Ruyan, CUI Xiaoxiao. The vanguard role of bryophytes in the course of vegetation restoration of karst degradation area[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2011, 35(3): 137-140.
- [48] 王如岩, 于水强, 张金池, 王圳, 王荣娟. 菌根真菌在退化喀斯特地区植被恢复中的应用[J]. *林业科技开发*, 2010, 24(5): 4-7.
- WANG Ruyan, YU Shuiqiang, ZHANG Jinchu, WANG Zhen, WANG Rongjuan. Mycorrhizal fungi in the degradation process of karst areas of vegetation[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2010, 24(5): 4-7.
- [49] 罗征鹏, 熊康宁, 许留兴. 生物土壤结皮生态修复功能研究及对石漠化治理的启示[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 394-404.
- LUO Zhengpeng, XIONG Kangning, XU Liuxing. Study on the role of biological soil crust in ecological restoration and its enlightenment to the control of rocky desertification[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(1): 394-404.
- [50] 郑智恒, 熊康宁, 容丽, 池永宽. 生物土壤结皮在喀斯特生态治理中的应用潜力[J]. *西北植物学报*, 2020, 40(6): 1075-1086.
- ZHENG Zhiheng, XIONG Kangning, RONG Li, CHI Yongkuan. Application potential of biological soil crust in karst ecological management[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40(6): 1075-1086.
- [51] 宋利荣, 刘映良, 杜兴乔, 张卫方. 荔波退化喀斯特植被自然恢复评价[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 27(2): 15-18, 57.
- SONG Lirong, LIU Yingliang, TU Xingqiao, ZHANG Weifang. Evaluation of natural restoration of degraded karst vegetation in

- Libo county of Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2009, 27(2): 15-18, 57.
- [52] 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[J]. *广西科学*, 2008, 15(1): 80-86.  
LI Xiankun, HE Chengxin, TANG Jiansheng, JIANG Zhongcheng, HUANG Yuqing. Evolution and ecological processes of karst ecosystem of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2008, 15(1): 80-86.
- [53] 张芳, 杜虎, 曾馥平, 彭晚霞, 宋同清. 喀斯特峰丛洼地原生林群落更新动态[J]. *生态学报*, 2019, 39(22): 8516-8525.  
ZHANG Fang, DU Hu, ZENG Fuping, PENG Wanxia, SONG Tongqing. Regeneration dynamics of primary forest in the karst peak-cluster depression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(22): 8516-8525.
- [54] Tropek R, Kadlec T, Karesova P, Spitzer L, Kocarek P, Malenovsky I, Banar P, Tuf I, Hejda M, Konvicka M. Spontaneous succession in limestone quarries as an effective restoration tool for endangered arthropods and plants[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 47(1): 139-147.
- [55] 王星. 喀斯特峰丛洼地不同生态恢复模式对土壤持水性和抗蚀性的影响[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.  
WANG Xing. The effects of different ecological restoration modes on surface soil water retention and anti-erodibility in karst peak-cluster depression[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [56] 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.
- [57] 杨泽良, 任建行, 况园园, 李萍芳, 向国红, 薛萍. 桂西北喀斯特不同植被演替阶段土壤微生物群落多样性[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(3): 185-191.  
YANG Zeliang, REN Jianhang, KUANG Yuanyuan, LI Pingfang, XIANG Guohong, XUE Tao. Dynamics of soil microbial communities along vegetation restoration gradient in karst area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(3): 185-191.
- [58] 司彬, 姚小华, 任华东, 李生, 何丙辉. 桂西喀斯特植被恢复演替过程中物种多样性变化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(3): 113-118.  
SI Bin, YAO Xiaohua, REN Huadong, LI Sheng, HE Binghui. Species diversity in the process of vegetation succession in karst area in western Guangxi[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2008, 30(3): 113-118.
- [59] 吴平, 薛建辉. 典型喀斯特地区3种人工林对土壤理化和微生物特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(5): 67-72.  
WU Ping, XUE Jianhui. Effects of three different plantations on soil physicochemical and microbial characteristics in karst region[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2015, 39(5): 67-72.
- [60] 苏祿, 宋同清, 杜虎, 曾馥平, 王华, 彭晚霞, 张芳, 张家涌. 喀斯特峰丛洼地不同植被恢复阶段细根生物量、形态特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(3): 783-789.  
SU Liang, SONG Tongqing, DU Hu, ZENG Fuping, WANG Hua, PENG Wanxia, ZHANG Fang, ZHANG Jiayong. Biomass and morphological characteristics of fine roots and their affecting factors in different vegetation restoration stages in depressions between karst hills[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 783-789.
- [61] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 刘洋. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 434-448.  
SHENG Maoyin, XIONG Kangning, CUI Gaoyang, LIU Yang. Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 434-448.
- [62] 张伟, 王克林, 刘淑娟, 叶莹莹, 潘复静, 何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1801-1808.  
ZHANG Wei, WANG Kelin, LIU Shujuan, YE Yingying, PAN Fujing, HE Xunyang. Soil nutrient accumulation and its affecting factors during vegetation succession in karst peak-cluster depressions of South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [63] 曹洋, 熊康宁, 董晓超, 肖华, 全明英. 关岭-贞丰石漠化治理示范区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 850-858.  
CAO Yang, XIONG Kangning, DONG Xiaochao, XIAO Hua, QUAN Mingying. Change of vegetation coverage and its response to climatic factors in the Guanling-Zhenfeng demonstration area for reduction and control of rock desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(6): 850-858.
- [64] 沈利娜, 邓新辉, 蒋忠诚, 覃星铭. 不同植被演替阶段的岩溶土壤微生物特征: 以广西马山弄拉峰丛洼地为例[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(4): 310-314, 333.  
SHEN Lina, DENG Xinhui, JIANG Zhongcheng, QIN Xingming. Features of karst soil microbe at different vegetation successions: A Case study on the peak cluster depression in Nongla, Mashan, Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 310-314, 333.
- [65] 李强, 孙海龙, 何师意, 姜光辉, 吴孔运, 汪劲良. 桂林岩溶试验场植物多样性恢复及其水、气效应[J]. *热带地理*, 2005, 25(1): 5-9.  
LI Qiang, SUN Hailong, HE Shiyi, JIANG Guanghui, WU Kongyun, WANG Jinliang. Recovery of the phytodiversity and its water-gas effect in the Guilin karst experimental site[J]. *Tropical Geography*, 2005, 25(1): 5-9.
- [66] 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军. 西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(6): 2845-2852.  
YANG Yi, OUYANG Yundong, CHEN Hao, XIAO Kongcao, LI Dejun. Effects of vegetation restoration on soil nitrogen path-

- ways in a karst region of Southwest China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2845-2852.
- [67] 蒲通达, 陈祖拥, 刘方. 贵州喀斯特森林生态系统中小生境土壤酶活性的差异性[J]. *河南农业*, 2015(11): 48-50.  
PU Tongda, CHEN Zuyong, LIU Fang. Differences of soil enzyme activities in small and medium habitats of Guizhou karst forest ecosystem[J]. *Agriculture of Henan*, 2015(11): 48-50.
- [68] 王新洲. 喀斯特不同生态系统根际土壤酶活性及微生物生物量和细菌群落结构变化的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.  
WANG Xinzhou. Study on the changes of enzyme activities, microbial biomass and bacterial community structures of rhizosphere soil in different karst ecosystems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [69] D Jordan, R J Kremer, W A Bergfield, K Y Kim, V N Cacic. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 297-302.
- [70] V Acosta-Martínez, T M Zobeck, T E Gill, A C Kennedy. Enzyme activities and microbial community structure in semi-arid agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 38(4): 216-227.
- [71] 张俞, 熊康宁, 喻阳华, 谭代军, 程雯, 许敏. 喀斯特石漠化环境植被修复与林产业发展关键技术探析[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(7): 19-25.  
ZHANG Yu, XIONG Kangning, YU Yanghua, TAN Daijun, CHENG Wen, XU Min. Research on key technology of vegetation restoration and forest industry development in karst rocky desertification environment[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(7): 19-25.
- [72] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in Southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 15(2): 115-121.
- [73] 孟莹莹, 周莉, 周旺明, 于大炮, 包也, 王晓雨, 郭焱, 代力民. 长白山风倒区植被恢复26年后物种多样性变化特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 142-149.  
MENG Yingying, ZHOU Li, ZHOU Wangming, YU Dapao, BAO Ye, WANG Xiaoyu, GUO Yan, DAI Limin. Characteristics of plant species diversity in a windthrow area on Changbai Mountain after 26 years of natural recovery[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(1): 142-149.
- [74] 官国培. 喀斯特地貌石漠化现状与植被恢复[J]. *中国林业*, 2002(11): 18.  
GUAN Guopei. Current situation of karst rocky desertification and vegetation restoration[J]. *Forestry of China*, 2002(11): 18.
- [75] 周政贤, 毛志忠, 喻理飞, 丁贵杰, 谢双喜, 聂朝俊, 陈则群. 贵州石漠化退化土地及植被恢复模式[J]. *贵州科学*, 2002, 20(1): 1-6.  
ZHOU Zhengxian, MAO Zhizhong, YU Lifei, DING Guijie, XIE Shuangxi, NIE Chaojun, CHEN Zequn. The study on degraded land and its vegetation restoration models of desertification in Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 2002, 20(1): 1-6.
- [76] 梅再美, 熊康宁, 孙建昌, 陈永毕. 贵州喀斯特石漠化土地的植被恢复技术研究[J]. *贵州林业科技*, 2004, 32(3): 1-7.  
MEI Zaimei, XIONG Kangning, SUN Jianchang, CHEN Yongbi. A study on the ways of vegetation restoration and the technology of afforestation in karst rock desertification land in Guizhou[J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2004, 32(3): 1-7.
- [77] Anding L, Chunyan G, Lifei Y. The composition and structural feature of plant community in different karst stony desertification areas[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017, 15(4): 1167-1183.
- [78] 白义鑫, 盛茂银, 肖海龙, 胡琪娟. 典型石漠化治理措施对土壤有机碳、氮及组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 170-177, 185.  
BAI Yixin, SHENG Maoyin, XIAO Hailong, HU Qijuan. Effects of typical rocky desertification control measures on soil organic carbon, nitrogen, and components[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 170-177, 185.
- [79] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤有机碳库特征演化[J]. *土壤学报*, 2013, 50(2): 306-314.  
HUANG Zongsheng, FU Yuhong, YU Lifei. Characteristic evolution of soil organic carbon pool with process of natural restoration of karst forest vegetation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 306-314.
- [80] Hu N, Lan J. Impact of vegetation restoration on soil organic carbon stocks and aggregates in a karst rocky desertification area in Southwest China[J]. *Journal of Soils & Sediments: Protection, Risk Assessment & Remediation*, 2020, 20(3): 1264-1275.
- [81] 姜勇祥, 蓝家程, 龙家辉. 喀斯特石漠化地区退耕模式对土壤团聚体组成和稳定性的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(4): 10-17.  
JIANG Yongxiang, LAN Jiacheng, LONG Jiahui. Effects of de-farming patterns on the composition and stability of soil aggregates in karst rocky desertification area[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 38(4): 10-17.
- [82] 杜虎, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 彭晚霞, 付威波, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型碳格局变化及影响因子[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4658-4667.  
DU Hu, SONG Tongqing, ZENG Fuping, WANG Kelin, PENG Wanxia, FU Weibo, LI Shasha. Carbon storage and its controlling factors under different vegetation types in depressions between karst hills, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4658-4667.
- [83] 李菲, 李娟, 龙健, 廖洪凯, 刘灵飞, 张文娟. 典型喀斯特山区植被类型对土壤有机碳、氮的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3374-3381.  
LI Fei, LI Juan, LONG Jian, LIAO Hongkai, LIU Lingfei, ZHANG Wenjuan. Effect of vegetation types on soil organic carbon and nitrogen in typical karst mountainous area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3374-3381.
- [84] 温远光, 张健, 严理, 朱宏光, 周晓果, 尤业明, 陆志成. 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.
- WEN Yuanguang, ZHANG Jian, YAN Li, ZHU Hongguang, ZHOU Xiaoguo, YOU Yeming, LU Zhicheng. Restoring ecosystem carbon sequestration through legume species afforestation: A case study for karst desertification restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 22(6): 573-577.
- [85] 邵治钦, 曾成, 肖时珍, 肖华, 代林玉, 闫伟. 近27a来典型白云岩流域岩溶碳汇变化及其调控机制: 以贵州施秉黄洲河流域为例[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 625-635.
- TAI Zhiqin, ZENG Cheng, XIAO Shizhen, XIAO Hua, DAI Linyu, YAN Wei. Variation and regulation mechanism of karst carbon sink in typical dolomite basin in recent 27 years: A case study of the Huangzhouhe basin in Shibing, Guizhou[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(4): 625-635.
- [86] 董波, 万福绪, 严妍, 蒋丹丹, 刘建中, 刘天池. 徐州市石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 288-292.
- DONG Bo, WAN Fuxu, YAN Yan, JIANG Dandan, LIU Jianzhong, LIU Tianchi. Carbon storage of different forest restoration patterns in limestone mountains of Xuzhou City[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(3): 288-292.
- [87] 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 姜光辉. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 90-96.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing, JIANG Guanghui. Influence of soil carbon transfer under different vegetations on carbon cycle of karst dynamics system[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 90-96.
- [88] 杨静, 王升, 丁亚丽, 陈洪松. 喀斯特白云岩地区不同土体构型土壤剖面持水导水性能研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(5): 697-704.
- YANG Jing, WANG Sheng, DING Yali, CHEN Hongsong. Moisture-retaining and transmissibility properties of soil profiles with different architectures in dolomite karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(5): 697-704.
- [89] 李建明, 王志刚, 王爱娟, 王家乐, 王可, 刘晨曦, 崔豪, 张平仓. 退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 99-108.
- LI Jianming, WANG Zhigang, WANG Aijuan, WANG Jiale, WANG Ke, LIU Chenxi, CUI Hao, ZHANG Pingcang. Effects of land restoration years on physical properties of rocky desertified soil in trough valley of the Southeast China karst region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(1): 99-108.
- [90] 蒋忠诚. 论南方岩溶山区生态环境的元素有效态[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 123-128.
- JIANG Zhongcheng. Liable content of elements in ecological environments in karst mountains in South China[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(2): 123-128.
- [91] 邓艳, 蒋忠诚, 李衍青, 胡阳. 广西不同石漠化程度下典型植物水分来源分析[J]. 热带地理, 2015, 35(3): 416-421.
- DENG Yan, JIANG Zhongcheng, LI Yanqing, HU Yang. Water sources of typical plants in different rocky desertification grades in Guangxi[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(3): 416-421.
- [92] Brooks J R, Barnard H R, Coulombe R, McDonnell J. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3: 100-104.

## Bibliometric analysis of the current research focus on vegetation restoration in karst areas

NING Jing<sup>1,3</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>, CAO Jianhua<sup>3,4</sup>, LI Liang<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. Weihai Ocean Vocational College, Rongcheng, Shandong 264300, China; 3. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** Vegetation plays an important role in the flow of material energy and nutrient cycle in the ecosystem. Karst vegetation is one of the main factors to maintain the stability of karst ecosystem function. At the same time, as a medium connecting soil, atmosphere and rock, plants not only present the characteristics of water balance in hydrologic and ecological processes, but also are an important link in regional vegetation restoration which is the basis of ecological construction and rocky desertification control in karst areas. In order to comprehensively understand the research progress, development trend and hot issues of karst vegetation restoration at home and abroad, literature related to this topic from 1985 to 2021 was retrieved from the Web of Science Core Collection Database (WoS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI) in this study. Based on high-frequency keyword analysis, keyword co-occurrence and cluster analysis, time evolution analysis of research subject, etc., the focuses and trends of karst vegetation restoration were analyzed. The results show that 319 and 351 related articles were collected respectively in WoS and CNKI databases from 1985 to 2021, and the number of articles published in 37 years experienced an increase

with fluctuation. The publishing of these articles could be divided into three stages, the first stage (before 2005), an initiation stage of the research, in which the number of articles published was small; the second stage (2005-2015), a stage with a significant increase of literature due to great attention from domestic and foreign scholars to the ecological reconstruction of karst areas; the third stage (2015-2021), a rapid development stage, in which the number of international publications saw a continuous increase, while the domestic number showed a rise with fluctuation, and the growth rate of domestic research is significantly higher than that of international research.

Rocky desertification, vegetation succession, soil nutrients and species diversity are high-frequency keywords in the literature, reflecting the common concerns of domestic and foreign research. Among them, vegetation succession law, soil nutrients and species diversity are the core issues in studies on karst rocky desertification areas. International studies on karst vegetation restoration pay more attention to ecosystem services and climate change, while domestic studies mainly focus on vegetation restoration in karst rocky desertification areas in the early stage, and pay more attention to the effects of vegetation restoration on soil properties and plant community composition in the later stage. In recent years, the diverse configuration of karst vegetation restoration technology and mode, for example, Huajiang Mode, Pingshang Mode, Huanjiang Mode, Pingguo Mode, etc. put forward through test, research and development, has become one of the research focuses. In addition, environmental benefits of vegetation restoration (moisture, nutrients, soil and water loss, etc.), soil seed banks, microbe and plant functional groups, vegetation restoration and forestry industry (understory economy and ecological industry), karst plant restoration and karst carbon sink, etc. have gradually become new hot issues in the research field of karst vegetation restoration. In the research of "vegetation restoration", the issues about industrial development such as fruit forest for ecological economy, governance and management modes for ecological economy, etc. have also been taken into account. In recent years, the restoration of karst vegetation (the control of rocky desertification) in China is closely related to the projects of poverty alleviation and elimination, for example, Huajiang Mode—the establishment of comprehensive management of industry for ecological environment in medium-intensity rocky desertification areas in karst plateau canyon, Pingshang Mode—the facilitation of vegetation restoration by planting honeysuckle in the rocky desertification control of Zhenfeng county, Huanjiang Mode characterized with ecological migration, and the Pingguo Mode characterized with the dragon fruit planting in Pingguo county.

Due to the slow soil formation rate, thin soil layer and easy soil erosion, the karst area falls into a typical vulnerable ecosystem in the world, and the vegetation restoration in this area is very difficult. Therefore, the vegetation restoration mode is selected for the purpose of improving soil structure and coordinating the balance among soil water, fertilizer, air and heat. In order to promote the development of karst vegetation restoration research, it is suggested to strengthen domestic and international cooperation, and to set up some observation points in the field to observe and compare the dynamics of karst vegetation restoration in different regions for a long time. By comparing the spatio-temporal changes of large scale at home and abroad, the function and significance of vegetation restoration process on ecological restoration in karst areas can be analyzed through monitoring data. Through the restoration technology, model and evaluation method of karst vegetation system, the construction of karst ecosystem and the multi-scale pattern of vegetation diversity from the perspective of life community of mountain, forest, field, lake and grass and the perspective of rural industry can be further revealed. By comparing the research at home and abroad, some new ideas will be provided for ecological restoration in karst areas.

**Key words** vegetation restoration, vegetation succession, karst, rocky desertification, VOSviewer

(编辑 黄晨晖)