

DOI: 10.5846/stxb202101080090

熊康宁, 肖杰, 朱大运. 混农林生态系统服务研究进展. 生态学报, 2022, 42(3): 851-861.

Xiong K N, Xiao J, Zhu D Y. Research progress of agroforestry ecosystem services and its implications for industrial revitalization in karst regions. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 851-861.

混农林生态系统服务研究进展

熊康宁*, 肖杰, 朱大运

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, 贵阳 550001

摘要:混农林产业是兼顾生态环境修复、土壤资源可持续利用与社会经济效益共赢的生态治理衍生产业, 将生态系统服务与混农林实践相结合既是全球生态系统服务研究的主要前沿之一, 也是推进石漠化治理向生态产业振兴与生态系统服务提升融合阶段转变的具体路径。研究系统回顾了混农林生态系统服务的研究进展与特征, 揭示了混农林生态系统服务与喀斯特地区产业振兴的内在关系, 从混农林生态系统服务认知、评估与决策三个层面探讨了喀斯特地区产业振兴的方向, 强调未来喀斯特地区应围绕混农林生态系统服务的级联机理、供需关系、权衡协同及影响因素等层面为混农林产业振兴提供决策支撑, 进而更好地服务于喀斯特地区以巩固石漠化治理成效, 提升生态系统服务, 助力乡村振兴。

关键词:生态系统服务; 混农林; 产业振兴; 启示; 喀斯特地区

Research progress of agroforestry ecosystem services and its implications for industrial revitalization in karst regions

XIONG Kangning*, XIAO Jie, ZHU Dayun

School of Karst Science, Guizhou Normal University, State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China

Abstract: Agroforestry industry is a derivative industry of ecological governance that takes into account ecological environment restoration, sustainable utilization of soil resources and social and economic benefits. Integrating ecosystem services with agroforestry practices is not only one of the main frontiers of global ecosystem services research, but also a specific path to promote the transformation of rocky desertification control to the stage of ecological industry revitalization, ecosystem services improvement and integration. This paper systematically reviewed the research progress and characteristics of agroforestry ecosystem services, revealed the internal relationship between agroforestry ecosystem services and industrial revitalization in karst areas, and discussed the direction of industrial revitalization in karst areas from three aspects of cognition, evaluation and decision-making of agroforestry ecosystem services. It is emphasized that the future karst region should provide decision support for the revitalization of agroforestry industry from the aspects of cascading mechanism, supply-demand relationship, trade-off and synergy, and influencing factors of agroforestry ecosystem services. Thus, it can better serve karst areas to consolidate the effectiveness of rocky desertification control, improve ecosystem services, and help rural revitalization.

Key Words: ecosystem services, agroforestry, industries revitalize, revelation, karst regions

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502607); 贵州省世界一流学科建设计划项目(黔教科研发[2019]125号); 贵州省研究生教育创新计划(黔教合 YJSCXJH[2020]107)

收稿日期:2021-01-08; **网络出版日期:**2021-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiongkn@163.com

生态系统服务是人类和其他生物物种从生态系统功能中获得的各种惠宜^[1-2],是将生态系统与人类社会建立起密切联系的桥梁。虽然石漠化演变总体呈“持续净减幅”的趋势,中国西南喀斯特石漠化防治任务,正步入生态治理衍生产业发展与生态系统服务提升有机融合的新阶段^[3-4],但石漠化、生态系统服务功能恢复滞后,严重制约喀斯特地区区域社会经济可持续发展的局面仍存,成为推进生态文明建设的重点和难点^[5-6],势必会影响乡村振兴的整体成效的呈现。因此,振兴生态治理衍生产业以巩固石漠化治理成果,促进生态系统服务提升以改善民生福祉,既是解决产业振兴面临资源环境压力的重要途径,也是保障生态系统服务与区域生态安全的必然选择。

生态产业化是将同一地域空间的生态优势培育并转化为经济发展优势资源的载体^[7],在喀斯特地区发展生态产业防治石漠化既减轻人类活动过载对其脆弱环境资源的严重内耗,又使其自身不断循环增值,形成了支持人类福祉和经济发展的生态资产存量(自然资本)和流量(生态系统服务)^[8]。以水土综合整治为核心的石漠化混农林治理模式已发展为林-果、林-药及林-草等混农林生态治理衍生产业,是喀斯特地区石漠化防治科技扶贫产业发展模式之一,其在调和人地矛盾的方式上正发挥着生态与社会经济效益时空双赢作用^[9-10],实质是混农林自身功能促进生态系统质量整体改善和生态产品供给能力增强的体现。

经过多年的治理效益表明,在以贵州高原为中心的中国西南喀斯特地区发展混农林,不仅能够发挥混农林与水土保持措施耦合的生态效益最大化^[11],还具有控制水土流失、提高石漠化土地生产力和保护土壤动物多样性的积极作用^[12-13],凸显了混农林是治理石漠化的有效措施之一。由于当前喀斯特地区混农林生态系统服务的研究未能窥破其内在发展机理和机制,所探析的混农林生态系统服务较为单一(如水土保持、生产应用和土地退化恢复等),往往滞后于区域生态系统服务提升甚至成为人地关系协调发展的掣肘。新形势下如何提升喀斯特石漠化治理的可持续性和区域生态系统服务水平已迫在眉睫。因而以混农林生态系统服务提升为目标振兴喀斯特地区混农林产业的探索和实践,则是巩固石漠化治理成果、保障服务供需流动畅通、增进本地民生福祉的关键行动。有鉴于此,本文述评了国内外混农林生态系统服务研究进展,总结了混农林生态系统服务研究特征,探讨了混农林生态系统服务与振兴产业的内在关系,以期对喀斯特地区混农林产业振兴提供相应的启示,进而为巩固中国西南生态安全屏障,提升区域生态系统服务水平和能力,保障石漠化防治与扶贫开发成效和促进区域社会经济可持续发展。

1 混农林生态系统服务研究进展

混农林亦称农林复合经营,指的是基于同一土地单元,通过人为地将木本植物、作物与畜禽养殖等多种组分结合而成的土地可持续性利用系统^[14-16]。与常规农业生产系统表现不同,混农林最突出的特征是以多年生木本植物为基础,在景观上呈现多组分、多层次、多时序的物种共栖复合农林生产系统。实质上是不同物种之间依据生态学原理中互利共生性原则,对土地单元进行综合和可持续利用,既提升了生物多样性保护水平,又促进了生态与经济效益的共赢^[17-19]。从而使混农林产业在参与减缓气候变化、消除饥饿和贫穷、改善乡村居民生计、保障生态安全与可持续发展上具有广阔的远景。

以 Daily、Costanza 和千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MEA)所掀起的生态系统服务研究热潮仍未减退^[1,20-21],尤其是近年混农林和生态系统服务关系的研究表明,随着混农林土地利用方式的发展增加了退化土地中的生物多样性,提升了生态系统属性并最终保障多样化的生态系统服务持续供给(图1)^[22-23]。这是由于混农林凭借自身突出的多物种互利共生原则和多层次复合体促进并保护了生物多样性^[24],进而在此基础上形成了生物与环境错综复杂的生态系统结构与过程,在这结构与过程相互作用中又通过物质和能量驱动形成复杂的作用机制调控生态系统功能,并进一步根据价值导向,为人类和其他生物物种提供服务(图2)。因此,混农林独特的资源禀赋及其提供的生态系统服务成为全球不同地区生态学、地理学、农林科学领域学者以及相关管理者所关注的对象,概括当前混农林生态系统服务相关进展有助于提供思路启迪振兴喀斯特地区混农林产业。

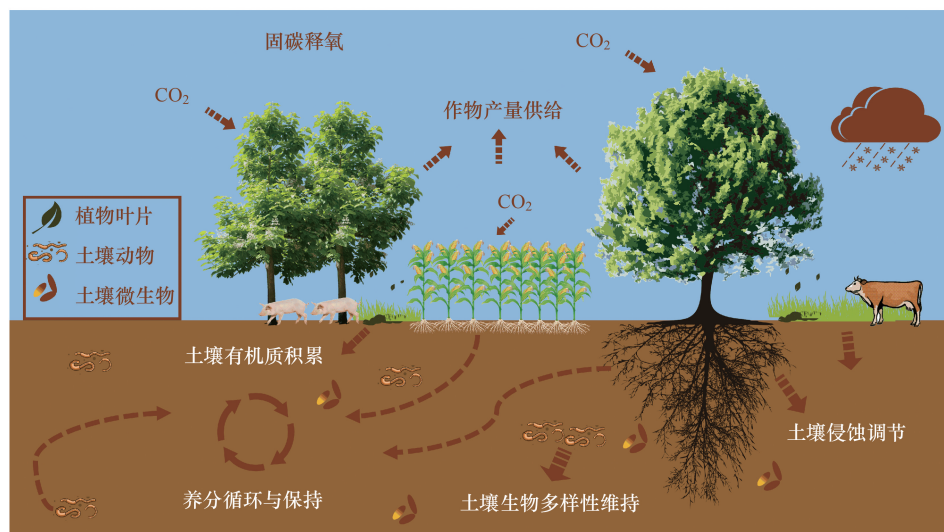


图 1 混农林生态系统服务示意图

Fig.1 Schematic diagram of agroforestry ecosystem services



图 2 混农林生态系统服务级联示意图

Fig.2 Schematic diagram of agroforestry ecosystem services cascade

本文通过中国知网(CNKI)、Web of Science 和 Scopus 等文献数据库,以“混农林/Agroforestry”和“生态系统服务/Ecosystem services”为检索词,对生态系统服务兴起时期以来(1999—2021 年)涉及混农林生态系统服务相关研究进行检索,并按不同年份出现的研究主题划分研究阶段,即随着时间的增长,研究内容逐渐多元,可划分为萌芽和多元化两个阶段进行表征(图 3)。

1.1 萌芽阶段

萌芽阶段的研究主要以生态系统服务价值评估为主,生态系统服务分类定性描述为辅。在价值评估方面,戚英等以价值量方法从混农林产品供给服务、涵养水源、水土保持、环境净化等调节服务进行量化^[25],曹建华等在此基础上增设了影子工程法、替代成本法、机会成本法对混农林生态系统服务价值评估^[26],这些研究看似提供多种路径便于各项生态系统服务之间比较,但是在价值评估过程中往往从研究者主观性选择出

发,使结果具有不确定性和非动态性。基于此,Alavalapati 等从“溢出效应”这一不同视角提出假设并采取陈述偏好法,探索了采取混农林土地利用方式时当地居民对相关生态系统服务的支付意愿^[27],进一步从生态系统服务付费角度上推进了价值评估的研究。

在生态系统服务分类描述方面,Jose、Sileshi 等均认为混农林除了减轻贫困之外,还为当地提供供给、调节、文化和支撑等许多生态系统服务^[28–29],这些学者采取的服务分类体系是基于 de Groot 等与 MEA 分类体系的研究基础上,虽然阐述了混农林生态系统服务类别对人类社会福祉作用,但由于缺乏明晰中间过程、最终服务和收益等问题,易导致在分类体系应用中对服务价值评估存在重复计算^[30]。从根本上而言,尽管较少考虑人类管理决策、缺乏明晰易懂可执行的分类体系,为混农林生态系统服务分类体系迈向决策化、便捷化的发展构成限制,但早期对服务分类的研究揭示了混农林业自身提供的生态系统服务的优势和潜力,对于促进区域可持续发展具有现实意义。为此,Sharma 等以尼泊尔桤木与香豆蔻混农林在喜马拉雅山区促进乡村减贫和管理山区生态保护的实例较好地印证了这一点^[31]。

通过分析萌芽阶段的进展发现,在充分认知混农林生态系统服务之前,人类社会对混农林提供的服务类别的认识还很局限。为探索这些模糊的认知,上述学者的研究经历了从定性描述到定量分析的过程,即假以已有服务分类体系对混农林生态系统服务类别进行认知,同时还受生态经济学观点影响并对服务产品进行价值量化。从侧面反映了对混农林生态系统服务类别认知及其潜在服务能力评估是生态系统服务研究的前提和基础^[32]。但在喀斯特地区目前针对混农林生态系统服务分类体系构建尚未引起深入探讨和完善。

1.2 多元化阶段

自从 2009 年全球第二届混农林业大会召开以来,混农林自身生态系统服务的潜在作用备受关注,受制于人口增长、粮食需求、生物多样性保护以及多种生态系统服务维持的多方矛盾,混农林能否充分且有效地发挥生态系统服务成为多元化阶段值得思考的问题。多元化阶段的研究主要围绕混农林生态系统服务权衡协同、乡村居民对生态系统服务的感知、生态系统服务指标选择创新、生态资产核算等主题展开。这体现了在全球变化和可持续发展政策宏观背景下,围绕混农林生态系统服务变化与人类福祉、可持续性的互动机制朝多元化和纵深化的趋势发展,为相关区域决策支持与生态系统服务优化提供了支撑依据。

在生态系统服务权衡协同关系方面,有关学者通过当地混农林产业探讨了产量供给和调节服务簇之间权衡关系,提出了当地农林耕作管理方式与生态系统相协调的途径^[33–34]。这些研究是基于混农林生态系统结构-过程-服务变化的相互机制,进行遴选与优化生态系统服务类型并做出合理决策。相较于前几位学者的研究^[33–34],Allinne 等则是建立生产-生态系统服务概念模型探讨了咖啡混农林病虫害防控及其他调节服务与产量供给服务的权衡^[35],该研究深刻理解了驱动因子-生态过程-服务供给三者之间的关系,为探索驱动因子触发生态系统服务之间非线性动力特征提供了实证。从而为探索促进混农林产业、社会经济与人类福祉协调发展提供适宜途径。

在乡村居民对生态系统服务感知方面,混农林产业中乡村居民作为其主要的生产活动主体,对生态系统服务的感知关系着生产者自身生态行为与社会经济活动行为的变化,从而影响生态系统服务的供给^[36]。Cerdán、Wagner 等通过混农林产业中乡村居民对混农林提供的生态系统服务的认知进行调研^[37–38],大多数乡村居民与当地技术人员往往以保证咖啡产量而做出一定的生态管理措施,并在生态系统服务感知上出现不同服务的选择性偏好认知。因此可将乡村居民与专家的知识框架相辅相成,以保障混农林生态系统服务的供

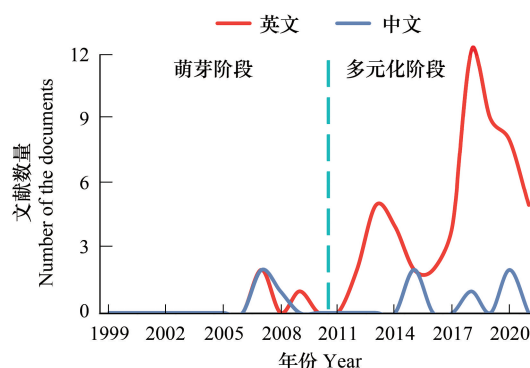


图3 混农林生态系统服务研究阶段分布

Fig.3 The research stage distribution of agroforestry ecosystem services

给。而从事混农林产业乡村女性居民经济地位变化受生态系统服务付费影响的假设,在 Benjamin 等的研究中得以证实^[39],使当地采取的生态系统服务补偿进一步促进了性别平等和保障了生态系统服务的供给。但从另一面看,社会经济活动行为能否驱使从事混农林产业群体生态行为发生变更,对平稳保障混农林生态系统服务的持续供给和可持续发展具有重要意义。

在生态系统服务指标选择创新方面,有关学者是基于产量供给服务维持的目的而扩展新指标认知其他生态系统服务。如蚂蚁生物群落在中介调节服务中对可可豆混农林系统供给服务形成干扰^[40];叶面积指数在混农林生态系统服务的应用^[41]。而有关学者则开发了一种多群体定制混农林生态系统服务评估工具,将多个实测数据整合为乡村居民提供土地利用方式与生态系统服务的决策比较^[42]。这些研究相较于萌芽阶段,更多的是关注如何立足于混农林生态系统实际并开发新指标、新方法以全面客观评估混农林生态系统服务,经历了由体系指导向自主抉择的深化认知转变。

在生态资产核算方面,相关研究针对混农林生态资产应用目的上主要有提供土地管理决策的支持、完善国民核算体系(SNA)计算中间服务的缺陷、生态资产存量与流量帐户可持续性量化等若干方面^[43-45],这些研究共同基于环境经济综合核算体系(SEEA)和欧洲环境经济信息采集系统(SERIEE)核算体系的基础上,依据大量物理数据新开发的一个混农林核算体系^[46],表征了混农林的自然资源使用和管理以及生态资产币值化流通情况。实质上是生态资产核算管理连接社会经济管理,对混农林中不同生态资产进行管理提升使用效益以服务人类福祉的多个相关利益。

综合而言,立足人地系统耦合的视角,为了能够使混农林生态系统服务有益于喀斯特地区产业振兴与人类福祉的可持续发展。本文认为应把握混农林生态系统格局、过程、服务和福祉之间的级联规律,全面考虑混农林生态系统服务变化对喀斯特生态环境效应,尤其是混农林参与石漠化治理及其提供的服务,对其构建典型喀斯特生态脆弱区混农林生态系统服务分类体系,量化多尺度下混农林生态系统服务的评估、权衡协同及影响因素分析、供需分析、情景预测与优化调控等内容,协调不同尺度上服务供给以满足不同利益群体参与振兴混农林生态产业的需求,并推动喀斯特地区混农林产业高质量发展。

2 混农林生态系统服务的研究特征

通过已检索获取的文献,按照每篇文献所界定的研究区域空间尺度进行篇数统计,统计结果表明,混农林生态系统服务聚焦于大区(7篇)、地区(25篇)和田间(18篇)3个非地带性的空间尺度,其中这些尺度并非表征绝对大小关系,仅作为揭示混农林生态系统服务在不同空间尺度下解决不同问题需求的思路和方法,并筛选代表性文献按照研究尺度、研究区域、研究对象、研究目标、指标选取和评估方式进行归纳总结(表1)。

表1 混农林生态系统服务的研究特征
Table 1 Study feature of agroforestry ecosystem services

空间尺度 Spatial scales	研究区域 Study area	研究目标 Study Goals	研究对象 Study objects	指标选取 Study indicators	评估方式 Evaluation method
大区 ^[22,47-49]	北欧、南欧、西欧、东欧和中欧、南非巴西南南部	表征混农林产生生态系统服务的贡献和影响	欧洲、非洲代表性的混农林系统	生态系统服务指标选取由 MEA 和国际生态系统服务共同分类(CICES)如,供应、调节与管控服务;侵蚀控制、养分循环保持、生物多样性保护、固碳释氧等	Meta 分析
地区 ^[50-53]	瑞士西北部、哥斯达黎加、西班牙西北部、印度东北部、埃塞俄比亚东南部/北部	表征混农林生产方式设计评估比较、乡村居民群体参与意愿	林-农、林-牧等混农林系统、		定点采样分析/问卷调查
田间 ^[25-26,54-57]	秘鲁 San Martín、肯尼亚西部 Trans Nzoia、萨尔瓦多西北部 Las Vueltas、中国	表征混农林供给服务对不同服务簇间权衡协同关系	农-林-牧、农-林等混农林系统		定点采样分析/半结构访谈/问卷调查

2.1 大区尺度

在欧洲,Torralba 等采用 Meta 分析方法研究混农林对生物多样性保护及其他生态系统服务的影响,发现

混农林在水土保持、养分循环和生物多样性保护等方面显著提升了自身生态系统服务水平^[47]。同样 Fagerholm 等以 Meta 方法探讨了混农林在欧洲区域提供生态系统服务的演变,识别混农林不同的供应、支撑和调控服务,尤其是水土保持、养分循环和生物多样性保护等调节服务较为突出^[48]。由此发现,在大区研究尺度上,混农林提供的生态系统服务的研究偏向基于 Meta 分析的方法为主,旨在通过研究个体样本综合分析其对混农林所提供的生态系统服务认知和评价,为促进混农林产业发展和乡村规划提供客观地决策依据。与上述两者的方法相似,Kuyah 等发现混农林业不仅增加了南非的作物产量,还增强了水土保持、养分循环和生物多样性保护等生态系统服务,同时还发现非洲大陆的土壤有效磷与土壤水分之间存在权衡关系,因而提出了合理间作的距离、树种配置和树冠修剪等方案建议^[49]。

2.2 地区尺度

混农林生态系统服务的研究在不同地区之间各自形成的混农林系统也取得一些成果。Wegari 通过埃塞俄比亚东南部上下游区域混农林生态系统服务价值评估以及农户对混农林生态系统服务的认知,为土地利用变化和保护政策的提供决策^[50];同样,在埃塞俄比亚北部地区 Haile 等以问卷调查和访谈对当地乡村居民是否采取混农林种植意愿对其生态系统服务的支付意愿进行了探讨^[51]。虽然该方法在当地乡村居民种植意愿及其为生态系统服务的支付意愿上逻辑简单,但评估目的明确且实用性较强。Kay 等在欧洲的瑞士西北部分别划定樱桃园混农林系统和农用地,作为生态系统服务评估的实验样地和对照样地^[52],选定了水质净化、水土保持、固碳等主要的调节服务指标,表明瑞士西北部樱桃园混农林系统在调节服务具有显著性的作用,并以空间绘图方法直观展现,提供了呈现生态系统服务评估结果和决策支撑的新视角。

2.3 田间尺度

在田间研究尺度上,Jezeer 等对秘鲁香蕉与咖啡混农林产业的定点监测,同时增加了以咖啡产量、遮荫管理和农业生产投入等信息的调查访谈,结果发现林木遮荫措施不仅对咖啡产量影响小,而且还促进鳞翅目生物多样性丰富度和固碳效应等生态系统服务的提升,遮荫管理对咖啡产量与鳞翅目物种生物多样性和固碳效应并无权衡协同关系,更表明维持生态系统服务以协同农户生计与咖啡产量稳定是可能的^[55]。这种生态系统服务权衡协同的研究方法在萨尔瓦多西北部 Las Vueltas 市也得到应用,Kearney 等开发了生态系统服务综合指数法,能够较好地将水土保持、固碳、养分循环和生物多样性保护的各个指数综合起来并进行计算^[56]。该计算方法易于定点采样和长期监测,同时能够识别不同混农林生产方式下服务簇之间权衡协同关系,还有利于设计和改造产业模式^[57]。中国学者主要聚集于这一尺度的研究,以混农林模式为评价单元,形成了从价值评估和效益描述,对中国东部和中部地区混农林模式所提供的生态系统服务进行评估,量化和描述了不同服务簇之间的价值差异和服务产品的效益^[25-26]。

2.4 研究特征

在研究目标方面,表 1 中不同研究尺度的着眼点也不尽相同,即大区尺度仅关注混农林对生态系统服务的贡献和影响;地区尺度则关注区域土地利用比较和乡村居民群体参与意愿;而田间尺度则是探究混农林不同生产方式对生态系统服务簇之间权衡协同关系响应为主。这表明近年来在生态系统服务研究范式影响下,研究目标从大空间尺度到田间尺度也随研究进展的推进逐步多元化、纵深化。研究对象的选择则取决于研究目标,并且多数研究的对象是区域代表性混农林系统(如欧洲地中海林-牧混农林系统、热带咖啡、可可混农林系统)、林-牧、林-粮、果-粮以及林-粮-牧等混农林系统及产业。生态系统服务作为连通混农林产业研究目标和研究对象中的桥梁,在研究中被提及的频次和指标与研究目标呈现较高的相关性,并逐渐形成以供给服务与调节服务为核心的趋势。

在研究指标选择和评估方式方面,当采取 Meta 分析时,多数研究以基于大空间区域尺度对已有研究成果进行数据库构建;而当采取样地监测和调查访谈法时,多数研究则依据实地查勘取样和访谈调研。这些方法主要通过 MEA 和 CICES 进行分类,再次划分混农林生态系统服务的供给、调节和支撑服务,设立了作物生产量、水土保持、养分循环、生物多样性保护及固碳释氧等指标。所选指标表明是依据生态系统服务分类的共性

指标,并随研究尺度的增大而采取易量化的指标为主。在评估方式中,由于混农林生态系统服务在不同尺度产生的复杂性,评估模型主要以综合评价为主。对于 Meta 分析具体可操作性的主要有响应比和响应比指数,以表示量化混农林业对生态系统服务产生的两种不同效应大小和影响。还对不同效应之间大小和影响进行检验和评估。而实地采样监测和调查访谈,通过指标获取数据对混农林生态系统服务进行独立评估和综合评估,主要运用的统计方法以指数累加型方法、空间制图表达为主,以方差分析、假设性检验、主成分分析等方法应用为辅,甚至还出现研究方法和手段多样化集成以探究混农林生态系统服务。

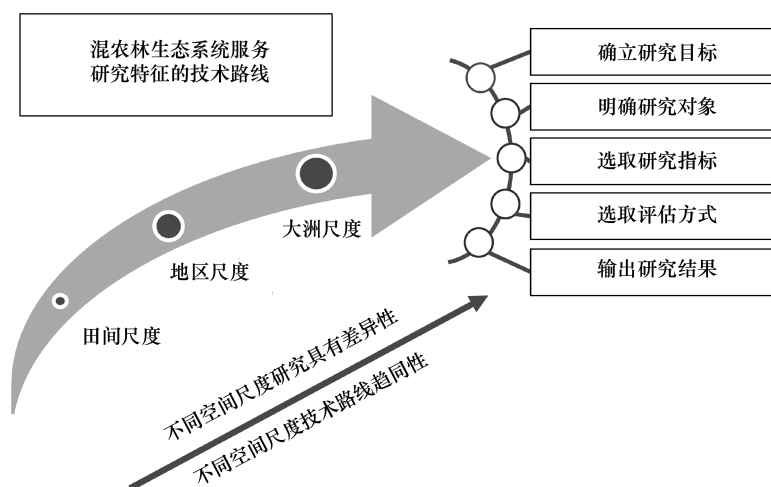


图4 混农林生态系统服务方法论技术路线

Fig.4 Technical route of agroforestry ecosystem service research characteristics

综上,明确研究目标对研究对象具有决定作用,而研究指标和方法表明研究路径的多样化可合理性论证混农林生态系统服务。因此,研究特征基本遵循了“确立研究目标-明确研究对象-选取研究指标与评估方式-输出研究结果”的技术路线(图3)。尽管在研究目标、研究对象和评估方式上具有差异性,而各个空间尺度在技术路线上具有趋同性。不同空间尺度的研究目标和对象多强调混农林业所提供的生态系统服务,而非单一地将混农林视为农林复合经营的生产资料。从大区尺度到田间尺度的研究上,还呈现出不同利益相关群体对生态系统服务的重视程度的差异以及管理策略的权衡。这与已有的生态系统服务种类多样性、不均衡性和人类价值取向基本一致^[58]。因此,在生态系统服务的研究范式影响下,混农林研究方法选取指标不仅多数涵盖了反映生态系统服务的指标,还表现出技术路线在各个尺度上的通用性。

3 产业振兴与混农林生态系统服务的内在关系

产业振兴与混农林生态系统服务分别作为响应中国乡村振兴战略和《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035年)》(以下简称规划)的具体行动,在实现目标具有内在一致性。混农林产业振兴亦指通过已有混农林产业发展的基础上进行振兴,以产业带动帮助当地乡村地区和居民实现共同富裕目标;混农林生态系统服务则是在不损害生态系统稳定性和完整性前提下,为当地乡村居民生存发展提供优质的物质和服务产品为目标。前者是巩固脱贫攻坚成效和注重维护生态系统稳定性和完整性,而后者是促进产业振兴走生态优先、绿色高质量发展之路。对于政府决策群体、乡村居民群体而言,提升混农林生态系统服务则是近期目标,以近期目标高质量发展带动振兴混农林产业则是远景目标,表现出两者目标上的协同一致的内在关系。

混农林生态系统服务为混农林产业振兴奠定基础。规划指出应统筹山水林田湖草一体化保护和修复,从自然生态系统质量的整体改善和生态产品供给能力这两个重要目标着力推进。而混农林作为一种土地利用

方式,不仅在有限空间发展植被立体高效配置,还以自身的土地系统作为生态系统服务的载体,为促进混农林产业走生态优先、绿色发展之路埋下伏笔。当下,喀斯特地区混农林生态系统服务在人类价值导向下存在选择性偏好,过于侧重调节服务,而忽视与供给服务和文化服务的重视程度,将导致人地矛盾关系更加激化以及生态系统服务权衡与需求更加差异,进而促使石漠化治理与产业发展有机耦合质量下降。因此,着手生态系统服务是揭示生态系统保护、恢复与重建机理的关键^[59],也是延续混农林产业链长效发展的需要。

混农林产业振兴可巩固和提升生态系统服务水平质量。混农林产业振兴既要走环保、绿色和可持续的高质量发展路径,又要发挥好混农林整体生态系统服务禀赋优势。如何防止混农林生态系统退化和服务下降,巩固混农林生态系统服务水平已成为亟待解决的关键问题。当前混农林产业出现林分结构单一、种间关系和产业脱节等问题^[60-62],为加剧喀斯特生态系统脆弱性、石漠化治理成效稳定性带来风险。而通过混农林生态系统服务振兴喀斯特地区混农林产业,破除上述风险问题和推进产业优化升级具有确保生态恢复的长期稳定性,本质是以混农林自身特点发挥生态农业高效性的优势,全面组织并盘活混农林生态系统内各种资源的组配效应,实现能量和物质循环多级且高效的利用,为巩固喀斯特地区区域经济发展并提升生态系统服务质量提供了可能性。

4 混农林生态系统服务对喀斯特地区产业振兴的启示

与全球其他混农林发展区域不同,喀斯特地区其水文系统的内在特性和生态系统在结构-功能-生境框架的外在表现充斥着脆弱性^[63-64],实质上是对外界干扰敏感性和适应性的缺乏^[65]。在这样的脆弱生态系统本底特征上,人类不合理的活动加剧原本脆弱的生态系统格局和功能进一步退化、地质灾害频发及其石漠化蔓延等生态问题^[66]。基于此,喀斯特地区因地制宜发展以混农林复合种植生态型山地农业为主的呼声日益高涨^[67-68],已取得了众多学者的相继支持和采用^[69-72],这一共识暗含了喀斯特地区山地农业在可持续性发展驱动下,不断解构并围绕治理区域生态、社会和经济进行因地制宜空间重组的客观规律^[73]。可见,通过在喀斯特地区推动混农林产业振兴得以防治石漠化和保护生物多样性,还改变当地传统农业结构得以促进生态系统服务提升,并促使当地乡村振兴和生态文明建设得以长效维持。为了能够振兴具有发展潜力的混农林产业,并促进当地乡村振兴和生态文明建设得以长效维持,根据上述各个章节的分析主要有以下几点启示:

(1) 充分认识生态系统服务是振兴喀斯特地区混农林产业的必要前提

尽管喀斯特地区在生态修复变绿贡献、石漠化面积“净减幅”等取得成效^[5,74-75],但生态系统服务的提升亟需具体路径。相关研究基于喀斯特地貌特征、生态移民、土地利用变化等自然和社会经济因素,围绕喀斯特地区生态系统服务提升进行了前期探索^[76-78],表明人类活动通过不同土地利用类型加以影响,引起生态系统的服务供给差异是喀斯特地区生态系统服务之间权衡的主要因素。振兴生态治理衍生产业既调节上述生态系统服务之间权衡关系,又推进石漠化治理有的放矢,促使石漠化治理任务向生态产业振兴与区域生态系统服务提升融合阶段的转变,而混农林产业振兴则是响应“转变”的具体行动。如本文所述,混农林生态系统服务在助推产业振兴上,既巩固混农林生态系统质量和生态产品供给能力,又为区域发展和人类福祉提供优质物质和服务产品。因此,振兴混农林产业主体内容应当体现在几个方面,首先,探析混农林生态系统格局、过程、服务和福祉的级联机理;再次,盘点混农林生态系统中生态资产存量,以生态资产核算、评估及管理并促进相关管理决策和效益最优配置;最后,通过混农林生态系统服务权衡协同关系、影响因素和供需流动等方面促进混农林产业完善和空间优化,对实现混农林产业以生态优先和绿色发展的振兴路径和决策提供支撑,有助于推进区域生态安全和可持续发展水平逐步提升。

(2) 明晰量化生态系统服务供需关系、权衡协同及影响因素是振兴混农林产业的重要环节

本文的研究特征表明研究目标、对象和指标和评估模型侧重反映混农林生态系统服务评估、权衡等方面,但是在实现喀斯特地区混农林产业振兴过程中,生态产品增加和服务供给存在时空均衡异质性、产业发展难以为继以及长期相对贫困背景下人地矛盾激化等因素,严重制约了乡村振兴推进绿色发展的要求,使得混农

林产业难以通过单一的生产应用回避这个问题。随着混农林提供的供给和调节服务的供需关系及权衡与协同逐渐成为混农林生态系统服务的核心,基于其建立的评估目标到混农林生态系统格局和过程的映射,驱动混农林生态系统服务评估向多维度、多尺度散射式发展。因此,应结合石漠化治理、生态过程及混农林产业受益群体的条件,综合考虑不同空间尺度上利益相关者的实际需求,开展多尺度多类型服务之间的供给和使用的空间流动关系传输表达,厘清服务簇之间的权衡或协同关系及其尺度依存与空间差异特征,揭示影响混农林生态系统服务时空分布和选择偏好的自然和社会经济因素,以提升决策者制定绿色发展的管理措施并增加混农林生态系统服务价值,是巩固保障石漠化治理成效的措施之一,也是振兴混农林产业发展的重要环节。

(3) 提升混农林生态系统服务决策支持能力是振兴喀斯特地区产业的管理实践

混农林生态系统服务决策支持能力的提升在于科学认知不同服务簇之间的权衡关系,既是实现生态系统可持续管理的需要^[79],也是振兴喀斯特地区混农林产业可持续管理的选择。混农林生态系统服务必然存在多重非线性关系、权衡特征、形成机制及其时空格局,通过可持续发展框架辨识不同服务簇权衡关系,有利于使决策管理目标不受短期利益驱使。而当前的研究对生态系统服务簇的相互作用(如,权衡、协同和兼容)有了一定的认识^[80],但在探究服务簇相互作用特征和建模上,未达到决策应用的水平^[81-83]。因此,未来研究应在喀斯特地区加强考虑混农林生态系统服务负向服务产品评估、服务簇之间变化轨迹、混农林种植模式的服务供需关系以及生态补偿优化,进一步将混农林生态系统服务与喀斯特生态过程集成,完善相关指标和评估方法,有效地促进混农林生态系统服务研究的深化,不仅为石漠化治理、相关产业振兴及区域可持续发展提供多目标调控方案,也能够提供混农林产业振兴与生态系统服务提升的具体路径。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997: 3-3.
- [2] Costanza R, de Groot R, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [3] 熊康宁, 朱大运, 彭韬, 喻理飞, 薛建辉, 李坡. 喀斯特高原石漠化综合治理生态产业技术与示范研究. *生态学报*, 2016, 36(22): 7109-7113.
- [4] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 曾馥平. 科技扶贫与生态系统服务提升融合的机制与实现途径. *中国科学院院刊*, 2020, 35(10): 1264-1272.
- [5] 国家林业和草原局. 中国·岩溶地区石漠化状况公报. (2018-12-14) [2021-04-25]. <http://www.forestry.gov.cn/main/65/20190620/104657229771680.html>.
- [6] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 吴协保, 肖峻, 祁向坤, 张伟, 杜虎. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应. *生态学报*, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [7] 尚嫣然, 温锋华. 新时代产业生态化和生态产业化融合发展框架研究. *城市发展研究*, 2020, 27(7): 83-89.
- [8] 刘焱序, 傅伯杰, 赵文武, 王帅. 生态资产核算与生态系统服务评估: 概念交汇与重点方向. *生态学报*, 2018, 38(23): 8267-8276.
- [9] 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——以贵州省为例. 北京: 地质出版社, 2002: 144-145.
- [10] 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. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 11-18, 33-33.
- [11] Wu Q L, Liang H, Xiong K N, Li R. Eco-benefits coupling of agroforestry and soil and water conservation under KRD environment: Frontier theories and outlook. *Agroforestry Systems*, 2019, 93(5): 1927-1938.
- [12] 陈海, 朱大运, 陈浒, 文雅琴. 混农林业对石漠化地区土壤环境的影响及其应用. *世界林业研究*, 2019, 32(2): 13-18.
- [13] 刘青山, 陈浒, 李林芝, 王存璐, 陈静, 杨乙未, 张红梅. 石漠化治理混农林业区土壤螨类群落的边缘效应. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(2): 370-377.
- [14] King K F S. Concept of "Agroforestry" // Chandler T, Spurgeon D, eds. *International Cooperation in Agroforestry*. Nairobi: ICRAF, 1979: 1-14.
- [15] Lundgren. What is agroforestry?. *Agroforestry Systems*, 1982, 1(1): 7-12.
- [16] 李文华, 赖世登. 中国农林复合经营. 北京: 科学出版社, 1994: 33-38.
- [17] Tewari V P, Singh M. Agroforestry: an alternative land use system in fragile hot arid ecosystem // Singh A, Dudeja S S, Singh S, eds. *Resource Management for Sustainable Agriculture*. Hisar: Society of Sustainable Agriculture and Resource Management, 2000: 71-79.
- [18] 洪传春, 刘某承, 李文华. 农林复合经营: 中国生态农业发展的有效模式. *农村经济*, 2015, (3): 37-41.
- [19] Zhang J Z, Fu B J, Stafford-Smith M, Wang S, Zhao W W. Improve forest restoration initiatives to meet Sustainable Development Goal 15. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5: 10-13.
- [20] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [21] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005: 39-40.

- [22] Santos P Z F, Crouzeilles R, Sansevero J B B. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 140-145.
- [23] Rodriguez L, Suárez J C, Pulleman M, Guaca L, Rico A, Romero M, Quintero M, Lavelle P. Agroforestry systems in the Colombian Amazon improve the provision of soil ecosystem services. *Applied Soil Ecology*, 2021, 164: 103933.
- [24] Nair P K R, Gordon A M, Mosquera-Losada M R. Agroforestry//Jørgensen S E, Fath B D, eds. *Encyclopedia of Ecology*. Amsterdam: Elsevier, 2008: 101-110.
- [25] 戚英, 虞依娜, 彭少麟. 广东鹤山林-果-草-鱼复合生态系统生态服务功能价值评估. *生态环境*, 2007, 16(2): 584-591.
- [26] 曹建华, 蒋菊生, 梁玉斯, 林位夫, 吴志祥. 胶园间作海南本土桑种及其服务功能价值评估. *热带农业科学*, 2008, 28(3): 8-15.
- [27] Alavalapati J R R, Shrestha R K, Stainback G A, Matta J R. Agroforestry development: an environmental economic perspective//Nair P K R, Rao M R, Buck L E. *New Vistas in Agroforestry*. Dordrecht: Springer, 2004: 299-310.
- [28] Jose S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 2009, 76: 1-10.
- [29] Sileshi G W, Akinnifesi F K, Ajayi O O, Chakeredza S, Kaonga M, Kaonga P. Contributions of agroforestry to ecosystem services in the Miombo Eco-region of eastern and southern Africa. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2007, 1(4): 68-80.
- [30] Boyd J, Banzhaf S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*, 2007, 63(2/3): 616-626.
- [31] Sharma R, Xu J C, Sharma G. Traditional agroforestry in the eastern Himalayan region: land management system supporting ecosystem services. *Tropical Ecology*, 2007, 48(2): 1-12.
- [32] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 139-151.
- [33] Meylan L, Merot A, Gary C, Rapidel B. Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: the case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. *Agricultural Systems*, 2013, 118: 52-64.
- [34] Wood S L R, Rhemtulla J M, Coomes O T. Intensification of tropical fallow-based agriculture: Trading-off ecosystem services for economic gain in shifting cultivation landscapes? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 215: 47-56.
- [35] Allinne C, Savary S, Avelino J. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 222: 1-12.
- [36] Fagerholm N, Oteros-Rozas E, Raymond C M, Torralba M, Moreno G, Plieninger T. Assessing linkages between ecosystem services, land-use and well-being in an agroforestry landscape using public participation GIS. *Applied Geography*, 2016, 74: 30-46.
- [37] Cerdán C R, Rebolledo M C, Soto G, Rapidel B, Sinclair F L. Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems. *Agricultural Systems*, 2012, 110: 119-130.
- [38] Wagner S, Rigal C, Liebig T, Mremi R, Hemp A, Jones M, Price E, Preziosi R. Ecosystem services and importance of common tree species in coffee-agroforestry systems: local knowledge of small-scale farmers at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Forests*, 2019, 10(11): 963.
- [39] Benjamin E O, Ola O, Buchenrieder G. Does an agroforestry scheme with payment for ecosystem services (PES) economically empower women in sub-Saharan Africa?. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 1-11.
- [40] Bisseleua D H B, Begoude D, Tonnang H, Vidal S. Ant-mediated ecosystem services and disservices on marketable yield in cocoa agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 409-417.
- [41] Taugourdeau S, Maire G I, Avelino J, Jones J R, Ramirez L G, Quesada M J, Charbonnier F, Gómez-Delgado F, Harmand J M, Rapidel B, Vaast P, Rouspard O. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 192: 19-37.
- [42] Tsonkova P, Quinkenstein A, Böhm C, Freese D, Schaller E. Ecosystem services assessment tool for agroforestry (ESAT-A): an approach to assess selected ecosystem services provided by alley cropping systems. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 285-299.
- [43] Ovando P, Campos P, Oviedo J L, Caparrós A. Ecosystem accounting for measuring total income in private and public agroforestry farms. *Forest Policy and Economics*, 2016, 71: 43-51.
- [44] Campos P, Oviedo J L, Álvarez A, Mesa B, Caparrós A. The role of non-commercial intermediate services in the valuations of ecosystem services: application to cork oak farms in Andalusia, Spain. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100996.
- [45] Campos P, Álvarez A, Mesa B, Oviedo J L, Ovando P, Caparrós A. Total income and ecosystem service sustainability index: Accounting applications to holm oak *dehesa* case study in Andalusia-Spain. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104692.
- [46] 侯鹏, 付卓, 祝汉收, 翟俊, 陈妍, 高海峰, 金点点, 杨旻. 生态资产评估及管理研究进展. *生态学报*, 2020, 40(24): 8851-8860.
- [47] Torralba M, Fagerholm N, Burgess P J, Moreno G, Plieninger T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 230: 150-161.
- [48] Fagerholm N, Torralba M, Burgess P J, Plieninger T. A systematic map of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecological Indicators*, 2016, 62: 47-65.
- [49] Kuyah S, Whitney C W, Jonsson M, Sileshi G W, Öborn I, Muthuri C W, Luedeling E. Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2019, 39(5): 47.
- [50] Wegari H T. 埃塞俄比亚东南裂谷地区的农林复合土地利用系统——土地利用变化与生态系统服务响应[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [51] Haile K K, Tirivayi N, Tesfaye W. Farmers' willingness to accept payments for ecosystem services on agricultural land: the case of climate-smart agroforestry in Ethiopia. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100964.
- [52] Kay S, Crous-Duran J, de Jalón S G, Graves A, Palma J H N, Rocas-Díaz J V, Szerencsits E, Weibel R, Herzog F. Landscape-scale modelling of agroforestry ecosystems services in Swiss orchards: a methodological approach. *Landscape Ecology*, 2018, 33(9): 1633-1644.

- [53] Pico-Mendoza J, Pinoargote M, Carrasco B, Andrade R L. Ecosystem services in certified and non-certified coffee agroforestry systems in Costa Rica. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2020, 44(7): 902-918.
- [54] Roces-Diaz J V, Díaz-Varela E R, Barrio-Anta M, Álvarez-Álvarez P. Sweet chestnut agroforestry systems in North-western Spain: classification, spatial distribution and an ecosystem services assessment. *Forest Systems*, 2018, 27(1): e03S.
- [55] Jezeer R E, Santos M J, Verweij P A, Boot R G A, Clough Y. Benefits for multiple ecosystem services in Peruvian coffee agroforestry systems without reducing yield. *Ecosystem Services*, 2019, 40: 101033.
- [56] Kearney S P, Fonte S J, García E, Siles P, Chan K M A, Smukler S M. Evaluating ecosystem service trade-offs and synergies from slash-and-mulch agroforestry systems in El Salvador. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 264-278.
- [57] Cerda R, Avelino J, Harvey C A, Gary C, Tixier P, Allinne C. Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services. *Crop Protection*, 2020, 134: 105149.
- [58] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. *地理研究*, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [59] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 804-815.
- [60] 杨苏茂, 熊康宁, 喻阳华, 刘兴宜, 董晓超. 我国喀斯特石漠化地区林草植被恢复模式的诊断与调整. *世界林业研究*, 2017, 30(3): 91-96.
- [61] Saj S, Jagoret P, Etoa L E, Fonkeng E E, Tarla J N, Nieboukaho J D E, Sakouma K M. Lessons learned from the long-term analysis of cacao yield and stand structure in central Cameroonian agroforestry systems. *Agricultural Systems*, 2017, 156: 95-104.
- [62] 孙圆, 梁子瑜, 汪贵斌, 贾卫国, 郑文江, 陆兴安, 郭起荣, 曹福亮. 农林复合经营工程领域研究热点与前沿分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2020, 44(6): 228-235.
- [63] Ford D C, Williams P. Introduction to Karst//Ford D C, Williams P, eds. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. New Jersey, USA: Wiley, 2007: 471-472.
- [64] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔阜. 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. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 320-330.
- [65] IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [66] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策. *生态经济*, 2015, 31(1): 23-30.
- [67] 苏维词, 朱文考. 贵州喀斯特地区生态农业发展模式与对策. *农业系统科学与综合研究*, 2000, 16(1): 40-44.
- [68] 梅再美, 熊康宁. 贵州喀斯特山区生态重建的基本模式及其环境效益. *贵州师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 18(4): 9-17.
- [69] 周家维, 安和平. 贵州喀斯特地区农林复合系统的分类. *贵州林业科技*, 2002, 30(2): 31-34, 51-51.
- [70] 李先琨, 吕仕洪, 蒋忠诚, 何成新, 陆树华, 向悟生, 欧祖兰. 喀斯特峰丛区复合农林系统优化与植被恢复试验. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 92-98.
- [71] 熊康宁, 陈永华, 陈浒, 兰安军, 隋喆. 点石成金-贵州石漠化治理技术与模式. 贵阳: 贵州科技出版社, 2011: 42-57.
- [72] Wang K L, Zhang C H, Chen H S, Yue Y M, Zhang W, Zhang M Y, Qi X K, Fu Z Y. Karst landscapes of China: patterns, ecosystem processes and services. *Landscape Ecology*, 2019, 34(12): 2743-2763.
- [73] 蔡运龙. 持续农业及其中国态势. *地理学报*, 1995, 50(2): 97-106.
- [74] 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.
- [75] Qiao Y N, Jiang Y J, Zhang C Y. Contribution of Karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- [76] Gao J B, Zuo L Y, Liu W L. Environmental determinants impacting the spatial heterogeneity of karst ecosystem services in Southwest China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(4): 1718-1731.
- [77] Qi X K, Li Q, Yue Y M, Liao C J, Zhai L, Zhang X M, Wang K L, Zhang C H, Zhang M Y, Xiong Y. Rural-urban migration and conservation drive the ecosystem services improvement in China Karst: a case study of Huanjiang County, Guangxi. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 566.
- [78] Peng J, Tian L, Zhang Z M, Zhao Y, Green S M, Quine T A, Liu H Y, Meersmans J. Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101199.
- [79] 郑华, 李屹峰, 欧阳志云, 罗跃初. 生态系统服务功能管理研究进展. *生态学报*, 2013, 33(3): 702-710.
- [80] Willemen L, Hein L, van Mensvoort M E F, Verburg P H. Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 62-73.
- [81] Spake R, Lasseur R, Crouzat E, Bullock J M, Lavorel S, Parks K E, Schaafsma M, Bennett E M, Maes J, Mulligan M, Mouchet M, Peterson G D, Schulp C J E, Thuiller W, Turner M G, Verburg P H, Eigenbrod F. Unpacking ecosystem service bundles: towards predictive mapping of synergies and trade-offs between ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2017, 47: 37-50.
- [82] Lee H, Lautenbach S. A quantitative review of relationships between ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 340-351.
- [83] Agudelo C A R, Bustos S L H, Moreno C A P. Modeling interactions among multiple ecosystem services. A critical review. *Ecological Modelling*, 2020, 429: 109103.