

DOI: 10.13931/j.cnki.bjfuss.2022255

基于文献计量的生物多样性与碳循环关联性分析研究

杜志博, 李洪远

(南开大学环境科学与工程学院)

摘要: 选取 Web of Science (WOS) 核心合集数据库中生物多样性与碳循环关联性领域相关文献为研究对象, 综合运用文献计量分析方法开展定量分析, 旨在系统梳理研究历史脉络、研究热点及发展态势, 并在此基础上总结出对我国的启示。结果表明: ①生物多样性与碳循环领域整体发展可分为3个时期; ②关联性研究热点及发展态势包括土壤微生物多样性与土壤有机碳、生态系统服务权衡与协同关系、海岸带“蓝碳”、模型的开发与应用4个方面; ③具体关系研究呈现出复杂性与差异性的特点。未来, 在该领域的研究中, 我国应进一步加强二者权衡与协同关系探究, 持续关注重点生态系统及各类新方法、新技术的应用。在国家层面出台相应的政策方针、行动指南和评价考核机制, 建立全国共享的数据监测与管理平台, 持续推动应对气候变化与保护生物多样性协同增效。

关键词: 生物多样性; 碳循环; 关联性; 文献计量

中图分类号: X176 文献标志码: A

文章编号: 1671-6116(2024)-02-0028-07

The Correlation Between Biodiversity Conservation and Carbon Cycle Based on Bibliometric Analysis

Du Zhibo, Li Hongyuan

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin, 300350, P.R. China)

Abstract: We selected the biodiversity and carbon cycle-related literature collected in the Web of Science (WOS) database as the basis, and employed a bibliometric analysis to systematically sort out the historical background, hot spots, research trends, and the complexity and differences of specific relationships. Finally, the implications for China were summarized on this basis. The results showed that: ① The overall development of the field of biodiversity conservation and the carbon cycle is divided into three periods. ② The relevant research hotspots and development trends include: soil microbial diversity and carbon cycle, ecosystem service trade-offs and synergistic relationships, "blue carbon" in coastal zones, and the development and application of technologies and models. ③ The specific relationship studies present complexity and variability. Therefore, in the future, China should further enhance the exploration of the trade-offs and co-benefits relationships between biodiversity conservation and carbon cycle in this field of research and continue to focus on critical ecosystems and the application of various new methods and technologies. In addition, China should introduce corresponding policy guidelines, action guidelines, and evaluation and assessment mechanisms at the national level, establish a nationally shared data monitoring and management platform, and continuously promote collaboration between climate change response and biodiversity conservation.

Key words: biodiversity; carbon cycle; correlation; bibliometrics

收稿日期: 2023-01-10

基金项目: 国家自然科学基金“高氮沉降背景下城市绿地特征与大气氮氧化物浓度的耦合机制研究”(32171853)。

第一作者: 杜志博, 博士生。主要研究方向: 生态恢复与生态规划、生物多样性保护。Email: duzb717@163.com 地址: 300350 南开大学环境科学与工程学院。

责任作者: 李洪远, 博士, 教授, 博导。主要研究方向: 生态恢复理论与方法、生物多样性与生态系统服务。Email: cialec@nankai.edu.cn 地址: 300350 南开大学环境科学与工程学院。

2020年,习近平总书记在第75届联合国大会上提出:中国二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。2021年,《生物多样性公约》(Convention on Biological Diversity, CBD)第15次会议、第26届联合国气候变化框架公约缔约方会议(Conference of the Parties, COP)接续召开,为世界可持续发展道路带来新的机遇^[1]。人为引起的气候变化和土地利用变化已成为威胁着从基因到生态系统各个层面的主要因素^[2]。有效的气候变化缓解政策往往侧重于保护或恢复高碳森林^[3],但这可能对生物多样性保护产生负面影响^[4]。因此,为了实现全面的生态系统保护,我们需要深入研究和平衡碳循环与生物多样性间的空间关系。此外,不同的环境保护政策目标间可能是协同的,也可能是互相矛盾的。一方面,保护自然栖息地、减少土地开发可以同时达到保护生物多样性、提升碳储量的目的;另一方面,以温室气体减排为目的的“减少森林砍伐和退化所致排放量”机制,可能会减少生物多样性^[5-6]。

对众多文献资料采用科学有效的工具进行系统梳理和分析具有重要意义。文献计量分析是一种定量分析学术文献的方法,基于已发表文献的描述、评价和监测^[7],以分析研究领域的研究趋势,对特定研究问题分析具有关键作用。本研究以Web of Science(以下简称WOS)核心合集数据库为数据源,分别检索“生物多样性和碳循环”“碳与生物多样性关联性”研究文献,借助Bibliometrix、CiteSpace软件进行计量分析^[7-8]。由于中国知网中与该领域相关的研究论文数量较少,且研究内容集中在政策分析^[9-10]和实现路径^[11-12]等理论探讨阶段,因此,未将该数据库纳入分析。在上述数据分析的基础上,本研究阐明了生物多样性和碳循环领域的整体发展脉络,深入剖析了碳和生物多样性关联性研究领域的热点和演变趋势。同时,综述了生物多样性保护与碳循环间的具体关系,旨在系统梳理分析研究领域发展历史,揭示未来研究热点及发展趋势,为科学理解生物多样性与碳循环关系提供参考。

一、数据来源及研究方法

(一) 数据来源

WOS数据库整合了SCIE(科学引文索引)、SSCI(社会科学引文索引)、AHCI(艺术与人文引文索引)等多个引文数据库,涵盖了全球范围内的高质量研究成果,具有研究前沿代表性和高影响力。因此,本研究以WOS核心合集数据库文献为数据来源,具体分为两部分收集数据。

1)“碳循环与生物多样性”综合数据收集。以“carbon cycle and biodiversity”为关键词和特定布尔运算符进行文献搜索,设置距离为10个单词,使用OR算法以指示任何概念的存在;删除2022年记录,排除WOS类别中发表文章数量小于10的类别,文献类型选择论文、综述论文和会议论文,最终得到研究文献1906篇(时间跨度为1998—2021年)。

2)为进一步探究两者间关联性研究前沿热点问题,第二部分开展“碳循环与生物多样性关联性”数据收集与分析。由于直接对碳循环与生物多样性关联性进行研究的文献数量较少,因此第二部分数据以“carbon and biodiversity correlation”为关键词进行主题检索,删除2022年记录,文献类型选择论文、综述论文和会议论文,最终得到研究文献588篇(时间跨度为2000—2021年)。

(二) 研究方法

整体发展脉络基于Bibliometrix软件进行,在分析过程中以关键词进行分析,采用Walktrap算法进行聚类,Fruchterman-Reinforce布局进行网络共现图谱分析,以Betweenness度量节点中心性。关联性研究基于CiteSpace软件进行,CiteSpace自动聚类的实现是依据谱聚类算法,对基于链接关系而非节点属性的聚类具有优势。在分析过程中选择LLR算法并结合人工分类开展关键词聚类分析,配合突现词检测以回顾研究爆发性热点。

二、结果分析

(一) 生物多样性与碳循环研究整体发展脉络

为绘制该领域研究的主题演变图,笔者将整个时间段划分为5个子时间段:1998—2006年、2007—2010年、2011—2015年、2016—2019年、2020—2021年。考虑到不同时期发文数量的巨大差异,第一个子时间段跨度为9年,最后一个子时间段跨度为2年,其余子时间段跨度为4年。最后一个子时间段虽然仅有2年,但发文数量很高且有助于理解最新演变趋势,能够满足分析要求。

在主题演变图(图1)中,2007—2010年、2011—2015年两个时间段均围绕森林生态系统开展系列研究,2016—2019年、2020—2021年均以气候变化为主线开展相关研究,生物多样性与碳循环研究整体发展脉络如下。

1)未关注关联性的萌芽时期(1998—2006年)。该时期研究较为零散,总体关注程度不高,累积发表文献数量为115篇。1998年,Finlay等^[13]通过界定淡水中游离原生动物的生物多样性的潜在范围,深入分析了其与生态系统功能(例如碳固定和养分循

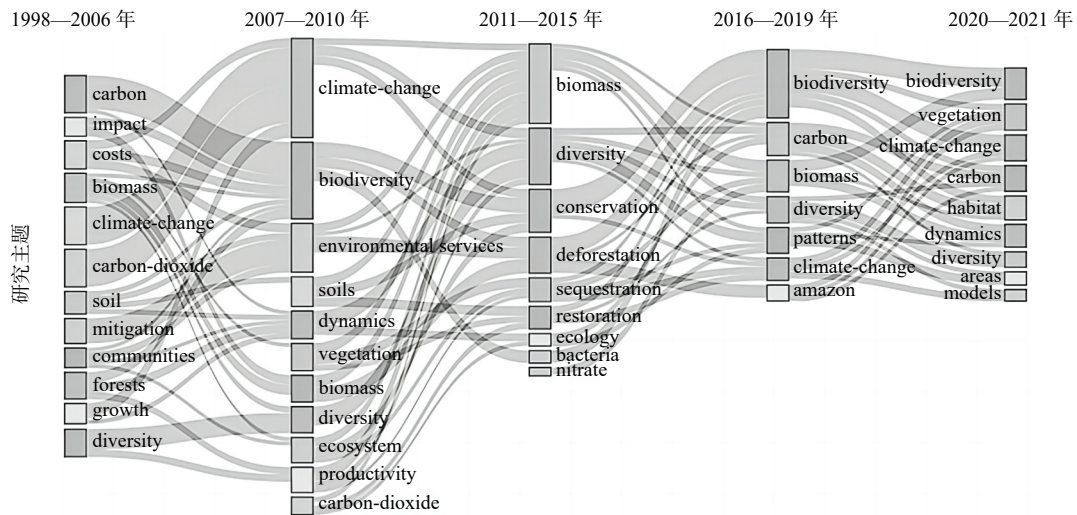


图1 生物多样性与碳循环研究主题演变图

环)之间的关联。之后,各学者从 CO_2 排放、温室气体化学组成、生物多样性等单一主题角度开展相关研究,研究方法主要为基于各个相关指数的定量研究^[14-15]。

2)以森林生态系统为主要研究对象的发文增长期(2007—2015年)。该阶段文献数量明显增加,发文量达到589篇。相较于其他植被生态系统,森林生态系统的碳密度更高且森林植被集中了全球的陆地生物量,对全球碳平衡有着重要的影响^[16]。同时,森林生态系统也在生物多样性保护方面发挥着不可替代的作用。随着一系列政策的出台,该阶段各学者逐渐将研究重心聚焦于森林生态系统,致力于减少 CO_2 排放的研究。此外,研究重点转向关注森林资源数据核算,森林砍伐、海洋酸化等不利因素的影响及清洁发展机制,碳信用额度等。随着研究的不断深入及方法、技术的不断发展,基于地图的空间分析^[17-18]成为各学者开展相关研究的重要信息手段。

3)关注气候变化的加速期(2016—2021年)。这个时期的文献数量一直呈现上升趋势,累计文献发表总量达到1202篇。尤其在2019—2020年增速最快。同时,文章作者、合著者数量、合作指数也呈现增长趋势,越来越多的学者开始关注到该领域。第21届联合国气候变化大会正式通过了《巴黎协定》,在国际上再次引发对气候变化的关注,各国纷纷响应,出台了一系列气候变化相关法律法规。气候变化与陆地生态系统碳循环紧密相关,温室气体排放是气候变暖的关键因素之一,气候变暖又会反过来破坏生态系统碳平衡,改变碳循环过程^[17]。气体调节、生物多样性保护是重要的生态系统服务类型之一,在进行碳循环与生物多样性研究时也会与生态系统服务研究关联。在该阶段,各学者聚焦气候变化对生物多样性保护、碳循环影响的研究,研究对象由

重点关注森林生态系统拓展到土壤、湿地生态系统和海洋“蓝碳”,研究方法呈现科学化、精确化、多样化的特点,各学者在不断改进基础定量分析、空间分析的同时也表现出对模型分析^[19-20]的极大热情。

(二) 关联性研究热点及发展态势

完成第二部分数据的检索、筛选后,根据文献数量、质量等将整个研究时间段划分为2000—2009年、2010—2016年、2017—2021年3个子时间段。聚类结果中,3个阶段聚类的模块值^[21]依次为0.8189、0.7446、0.7341,聚类结构显著;平均轮廓值^[21]依次为0.9295、0.8943、0.8916,结果具有可靠性且能够满足分析要求。生物多样性与碳循环关联性领域关键词聚类图谱如图2所示。

由图2可知,2000—2009年,研究呈现内容分散、领域众多、目标零散的特点,且重要节点数量少,未发现具有较高中心性的节点,中心性最大的节点为植物多样性(plant diversity)。2010—2016年,聚类明显增大,说明各项研究相似性有所增加,学者们开始关注某些相同的研究领域,重要节点数量明显增加,且出现具有高中介中心性节点,即转折点。2017—2021年,各聚类大小均大于10且聚类效果良好,重要节点数量比第二阶段明显增多,转折点数量增多。对出现频次较高的关键词及对应的文献进行汇总梳理发现,研究主要围绕4个方面展开。

1)土壤微生物多样性与土壤有机碳。土壤是陆地生态系统最大的有机碳库,在全球碳循环过程中发挥重要作用,其细微的变化可能导致大气 CO_2 浓度产生较大的波动。当前土壤成为陆地生态系统碳循环的重点研究对象,土壤有机碳成为全球气候变化研究的热点内容。土壤微生物多样性在碳和营养物质循环等生态系统功能中发挥着关键作用,通过微生物对碳循环的控制与土壤碳积累紧密耦合^[22]。

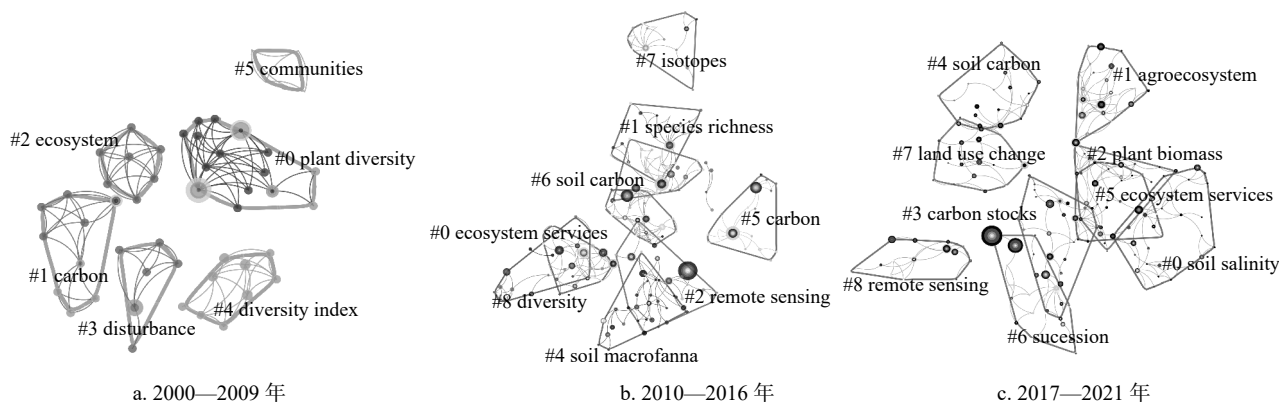


图 2 关联性关键词聚类图谱

总体上,土壤微生物多样性与土壤有机碳研究呈现不断增长的趋势,且随着研究的不断深入,研究对象由自然系统土壤扩展到人工干预土壤,研究方法由定性描述拓展到定量测定与模型模拟^[23]。研究热点包括:土壤有机碳组分测定及其影响因素研究^[24-25],土壤有机质代谢产物定量测定与模型模拟^[26],养分、碳循环过程中土壤微生物多样性及土壤酶活性关联性研究^[27],气候变化与土地利用改变等人为因素干预下土壤有机碳定量测定与动态变化分析^[28-30]。

2)生态系统服务权衡与协同关系。生态系统服务的权衡与协同关系源于利益相关者对各类生态系统服务需求的偏好,当重点关注某一种或几种生态系统服务时,其他类型的生态系统服务将相应被削弱,此时,权衡与协同关系得以体现。总体上,生态系统服务权衡与协同关系研究大致可分为3个阶段^[31]:第一阶段为萌芽期,研究重点为生物多样性保护;第二阶段研究重点迅速拓展,进入加速期,学者们从不同角度(如农业生态系统、气候变化的影响等)对生态系统服务进行全面的分析;第三阶段为稳定期,基于偏好及供需关系的权衡和协同研究成为重点。研究内容主要包括2个方面:一是时空特征分析^[32-33],在空间尺度上,研究主要包括单一尺度、多尺度分析,及原始区与干扰区的对比分析;在时间尺度上,研究关注某阶段一定时间间隔内的生态系统服务对比分析。二是驱动因素研究^[34-35],自然因素及人为压力均会影响生态系统服务权衡与协同关系变化,学者们从不同学科角度、基于不同方法和研究尺度对驱动机制进行了全面、深入的探究。

3)海岸带“蓝碳”。海洋或沿海植被生态系统捕获的碳被定义为“蓝碳”,主要包括红树林、海草床及盐沼生态系统。由于海洋沉积物碳埋藏率高,保护和恢复“蓝碳”栖息地被认为是碳封存的有效措施,有助于满足《巴黎协定》要求,实现联合国可持续发展目标,因此,“蓝碳”生态系统成为全球碳循

环的研究热点和焦点。检索到的文献多集中于“蓝碳”生态系统碳储量的定性、定量研究,主要研究内容包括:碳动力学^[36-37](如碳循环、碳汇、溶解有机碳等)、测量技术^[38-39](如有机碳含量、生物量测定等)、生态价值^[40](如管理和恢复措施的评估等)及气候变化。高频关键词包括沉积物、土壤有机碳、有机质、恢复和保护等。与盐沼、海草床相比,红树林生态系统由于其极大的固碳速率和稳定的固碳能力得到了最多的关注^[41]。此外,当前研究仍多以陆地生态系统、海洋生态系统作为独立的研究对象开展相关研究,这可能会对全球、国家层次统一制定管理政策、措施产生不利影响。

4)技术、模型的开发与应用。传统的生物多样性指数基于物种、群落调查展开,侧重于群落多样性的研究,涵盖群落内部、生境间及区域3个空间尺度,常见的指数包括物种丰富度指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数及Pielou指数等。随着研究的不断发展,学者们开始考虑更全面的影响因素和更大尺度的分析维度,出现了一系列基于生物多样性保护和管理目的的监测、评估方法,包括基于保护目标的评估方法^[42-43](如Hotspots分析、GAP分析)、基于遥感技术的评估方法^[44](如利用遥感影像计算景观指数和生境制图)、基于模型模拟的评估方法及替代指标的方法。在碳储量评估方面,植被碳储量估算方法^[45]总体可概括为3类,分别为:①样地清查法,即通过样地实测数据精确测定生物量以估算碳储量的方法,通常适用于小尺度研究。常见的估算方法有生物量回归模型法^[46]、平均生物量法^[45]、生物量回归方程^[47]和转换因子连续函数法^[48]。②遥感估算法,即将遥感数据与实测数据相结合估算碳储量的方法,该方法能够完成大面积估算。常见的遥感数据^[45]有卫星遥感数据、合成孔径雷达数据和激光雷达数据。③过程模型模拟法^[45],即利用数学模型定量模拟生态系统与环境因子的相

相互作用关系,以估算碳储量的方法,通常适用于大尺度研究。近期,机器学习^[49]等已在遥感影像分类、物种识别、碳通量模拟、碳强度影响因子识别等方面得到广泛应用。

(三) 具体关系研究的复杂性与差异性

截至目前,关于生物多样性和碳储存之间的关联存在着不一致的结论。各研究得出的相关性结果存在差异,呈现出复杂的态势。一些研究发现陆地碳的全球变化与脊椎动物物种丰富度变化间存在正相关关系^[50-51];其他研究者在国家或区域等小一级范围的研究中,发现二者呈现适中的相关性或相关程度比较弱^[52-54];另一些研究则表明,在区域等小范围内物种丰富度与碳储量之间的对应关系有限,甚至存在负相关性^[55-56]。

生物多样性与碳储存间的相关关系的对比证据可能反映了该领域研究在研究尺度(如全球、国家或区域)、地理位置(如热带、温带)、分类群(如脊椎动物、植物)、碳储量估算(如地上和/或地下)方面的多样性和差异性^[57]。在全球范围内,热带地区通常具有更高的生物多样性和碳储量。然而,在局部范围内,特别是种植大面积人工林的区域,可能导致更高的碳储量和更低的生物多样性,从而大大降低了二者的协同效益。

总体上,从全球范围进行分析比局部更可能揭示二者的正相关关系^[50,57-58]。这可能与选取的环境驱动因素有关,通常全球范围分析更关注气候因素,物种丰富度、初级生产力和土壤碳的空间变化都与气候密切相关^[57],且气候因素在全球范围内的空间变化较为显著;而在区域或局部等小范围研究中其他变量可能变成主导因素^[57],如地形、土壤等;在较小范围内,预计碳密度和物种丰富度的变化相比较小,这反过来又会影响两者间相关性。

另一个需要关注的问题是,与碳储存单一测量指标不同,生物多样性研究往往是多维度的,《生物多样性公约》将生物多样性概括为种内生物多样性、种间生物多样性、生态系统多样性三个主要方面^[17],因此在二者相关性研究中,选取不同研究指标得到的相关性结果不同。在后续研究中,应选择合适的空间范围、清晰的分析目标和恰当的分析方法,探究两者间关系以制定合理的政策决策、管理措施。

三、研究结论与讨论

本研究基于计量分析软件,对生物多样性和碳循环关联性领域的研究历史脉络、研究热点及发展态势、具体关系分析开展系统梳理,通过可视化方式分析了该领域的相关研究成果,并在此基础上结

合现有研究内容总结出对我国的启示。

(一) 结论

1)生物多样性与碳循环两大研究领域整体发展脉络分为3个时期:未关注关联性的萌芽期、以森林生态系统为主要研究对象的增长期、关注气候变化的加速期。生物多样性和碳循环研究整体分支较多,但本质上核心问题比较集中,主要集中在以下两个方面:一是碳循环和生物多样性影响因素及管理、修复措施研究;二是生态系统组成、结构、功能变化及景观格局演变分析。

2)生物多样性和碳循环关联性研究不断得到重视,研究成果不断涌现。具体体现为土壤生态系统研究蓬勃发展,生态系统服务权衡与协同研究进入黄金发展期,海岸带、海陆一体化研究进入机遇期,新技术、模型应用研究发展前景广阔。

3)具体关系研究呈现复杂性与差异性的特点,不同研究尺度、地理位置、分类群及测定指标均会产生不同的相关性结果。总体来看,在不同尺度上,二者间相关性存在对比性证据,生物多样性和碳循环间的相关性可能反映出地理位置、研究对象和碳含量测定方面的多样性^[19]。

(二) 讨论

当前,生物多样性和碳储量间关系仍然存在争议,对是否可能同时保护生物多样性和进行储存碳未能给出明确答案。然而,这个问题对政策制定和现场保护行动具有重要的实际意义。在此背景下,探究生物多样性和碳循环相关关系成为重要内容和现实需求。在两者协同效益区域,提升碳汇能力可能会在具有高度正相关的生态区域产生直接和重要的生物多样性效益。但也必须注意到存在权衡关系的区域,针对这些区域必须实施混合战略,将提升碳汇能力与保护生物多样性结合起来,以最大程度获得双重效益。

我国高度重视协同应对气候变化和保护生物多样性工作,持续推进全球气候治理与保护生物多样性进程,并取得了多项成果^[58-60]。然而,总体来看,目前多项工作仍处于起步阶段,在政策制定、科学研究等方面面临着诸多挑战^[58,61]。在此背景下,结合上文对生物多样性和碳循环关联性领域研究热点、发展态势的分析,本研究总结出对我国该领域科学研究及政策制定的几点启示。

未来的研究重点应主要集中在以下3个方面:一是进一步加强权衡与协同关系研究,加强驱动机制及影响因素分析,开展多时空尺度、气候变化背景下的权衡与协同耦合分析,明确其特征及稳健性^[62-63]。此外,将管理权衡决策纳入权衡与协同关系分析,深入探讨权衡与协同关系同生态文明建设

及人类福祉的关系^[64]。二是持续关注重点生态系统, 进一步加强土壤微生物、土壤有机碳与气候变化的关系及“陆海统筹”生物多样性与碳循环^[65]研究。三是推进新技术、新方法的创新应用, 加强不同区域尺度、不同适用条件下研究框架的构建及模型的创新, 深入探索气候变化、碳循环等不同模型的耦合, 发展更科学、成熟的数据-模型融合方法体系和技术框架^[66]。同时, 注重理论与实践相结合, 提高实践的有效性。

政策制定方面, 为更好地推进应对气候变化与保护生物多样性协同治理, 国家层面应整合、提炼、补充现存的相关政策, 尽快制定协同治理(规划)方案、行动指南, 确定协同治理的优先级顺序^[59], 持续推动基于自然的解决方案^[61]; 建立包含生物多样性保护、气候变化等相关信息的数据平台或对现有的监测网络进行整合优化, 实现生物多样性、气候变化相关数据的科学监测与信息共享^[67]; 明确任务目标和职责分工, 制定合理的评价标准体系、绩效考核机制。

参考文献:

- [1] ZHU L, HUGHE A C, ZHAO X Q, et al. Regional scalable priorities for national biodiversity and carbon conservation planning in Asia[J]. *Science Advances*, 2021, 7(35): eabe4261.
- [2] SCHEFFERS B R, DE MEESTER L, BRIDGE T C L, et al. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people[J]. *Science*, 2016, 354(6313): aaf7671.
- [3] THOMAS C D, CAMERON A, GREEN R E, et al. Extinction risk from climate change[J]. *Nature*, 2004, 427(6970): 145-148.
- [4] BEAUDROT L, KROETZ K, ALVAREZ-LOAYZA P, et al. Limited carbon and biodiversity co-benefits for tropical forest mammals and birds[J]. *Ecological Applications*, 2016, 26(4): 1098-1111.
- [5] DEWBOLD T, HUDSON L N, ARNELL A P, et al. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? a global assessment[J]. *Science*, 2016, 353(6296): 288-291.
- [6] THOMAS C D, ANDERSON B J, MOILANEN A, et al. Reconciling biodiversity and carbon conservation[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16: 39-47.
- [7] RODRIGUEZ-SOLER R, URIBE-TORIL J, VALENCIANO J D P. Worldwide trends in the scientific production on rural depopulation, a bibliometric analysis using bibliometrix R-tool[J]. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104787.
- [8] 周超峰. 文献计量常用软件比较研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
- [9] 王毅, 张蒙, 李海东, 等. 推进应对气候变化与保护生物多样性协同治理 [J]. *环境与可持续发展*, 2021, 46(6): 19-25.
- [10] 王灿发, 张祖增, 邱卫佳. 论生物多样性保护与气候变化应对协同治理的法治进路 [J]. *环境保护*, 2022, 50(8): 19-23.
- [11] 陈悦. 应对气候变化与生物多样性保护的协同规制: 以生态系统服务为路径 [J]. *中国政法大学学报*, 2022(4): 5-20.
- [12] 王夏晖, 刘桂环, 华妍妍, 等. 基于自然的解决方案: 推动气候变化应对与生物多样性保护协同增效 [J]. *环境保护*, 2022, 50(8): 24-27.
- [13] FINLAY B J, ESTEBAN G F. Freshwater protozoa: biodiversity and ecological function[J]. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7: 1163-1186.
- [14] MATOS F A R, MAGNAGO L F S, AQUILA C M C, et al. Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 509-522.
- [15] MOHANTA M R, MOHANTA A, MOHAPATRA U, et al. Carbon stock assessment and its relation with tree biodiversity in Tropical Moist Deciduous Forest of Similipal Biosphere Reserve, Odisha, India[J]. *Tropical Ecology*, 2020, 61(4): 497-508.
- [16] 马学威, 熊康宁, 张俞, 等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望 [J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(5): 62-72.
- [17] SOTO-NAVARRO C, RAVILIOUS C, ARNELL A, et al. Mapping co-benefits for carbon storage and biodiversity to inform conservation policy and action[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2020, 375(1794): 20190128.
- [18] HERNANDEZ-STERFANONI J L, CASTILLO-SANTIAGO M Á, ANDRES-MAURICIO J, et al. Carbon stocks, species diversity and their spatial relationships in the Yucatán Peninsula, Mexico[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3179.
- [19] DICKSON R, BAKER M, BONNIN N, et al. Combining deforestation and species distribution models to improve measures of chimpanzee conservation impacts of REDD: a case study from Ntakata Mountains, Western Tanzania[J]. *Forests*, 2020, 11(11): 1195.
- [20] LI W, NIU Z, SHANG R, et al. High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, 92: 102163.
- [21] 陈悦, 陈超美, 胡志刚, 等. 引文空间分析原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 24.
- [22] YANG Y, CHEN X L, LIU L X, et al. Nitrogen fertilization weakens the linkage between soil carbon and microbial diversity: a global meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28: 6446-6461.
- [23] 李雅, 刘梅, 曾全超, 等. 基于文献计量的土壤有机碳与土壤微生物多样性研究前沿态势分析 [J]. *土壤通报*, 2017, 48(3): 745-756.
- [24] YANG R R, FANG J H, CAO Q Q, et al. The content, composition, and influencing factors of organic carbon in the sediments of two types of constructed wetlands[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 49206-49219.
- [25] LEI Z Y, YU D W, ZHOU F Y, et al. Changes in soil organic carbon and its influencing factors in the growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin sandy land, northeast China[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 16453.
- [26] WITZGALL K, VIDAL A, SCHUBERT D I, et al. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 4115.
- [27] KUMAR A, MISHRA V N, BISWAS A K, et al. Soil organic carbon, dehydrogenase activity and fluorescein diacetate as influenced by contrasting tillage and cropping systems in vertisols of central India[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2018, 39(6): 1047-1053.
- [28] HORÁKOVÁ E, POSPÍŠILOVÁ L, VLCEK V, et al. Change in the soil's biological and chemical properties due to the land use[J]. *Soil and Water Research*, 2020, 15(4): 228-236.
- [29] CHUKWUDI N, VILÉM P, VIT V. Responses of soil and plants to spatio-temporal changes in landscape under different land use in Imo watershed, southern Nigeria[J]. *Archives of Agronomy and Soil Sci-*

- ence, 2019, 65(10): 1460-1476.
- [30] RAMESH T, BOLAN N S, KIRKHAM M B, et al. Soil organic carbon dynamics: impact of land use changes and management practices: a review[J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 156: 1-107.
- [31] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 等. 生态系统服务权衡与协同研究: 发展历程与研究特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 11-25.
- [32] SUN X, LI F. Spatiotemporal assessment and trade-offs of multiple ecosystem services based on land use changes in Zengcheng, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 1569-1581.
- [33] XU X, YANG G, TAN Y, et al. Ecosystem services trade-offs and determinants in China's Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1601-1614.
- [34] ASADOLAHI Z, SALMANMAHINY A, SAKIEH Y. Hyrcanian forests conservation based on ecosystem services approach[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76: 1-18.
- [35] HAN H, DONG, Y. Assessing and mapping of multiple ecosystem services in Guizhou Province, China[J]. *Tropical ecology*, 2017, 58: 331-346.
- [36] SPIVAK A C, SANDERMAN J, BOWEN J L, et al. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 685-692.
- [37] REITMAIER G M, HO D T, JOHNSTON S G, et al. Mangroves as a source of greenhouse gases to the atmosphere and alkalinity and dissolved carbon to the coastal ocean: a case study from the Everglades National Park, Florida [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125.
- [38] GAO J, LUNDQUIST C J, SCHWENDENMANN L. Aboveground carbon stocks in rapidly expanding mangroves in New Zealand: regional assessment and economic valuation of blue carbon[J]. *Estuaries and Coasts*, 2020, 43: 1456-1469.
- [39] LE N N, PHAM T D, YOKOYA N, et al. Learning from multimodal and multisensor earth observation dataset for improving estimates of mangrove soil organic carbon in Vietnam[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(18): 6866-6890.
- [40] O'CONNOR J J, FEST B J, SIEVERS M, et al. Impacts of land management practices on blue carbon stocks and greenhouse gas fluxes in coastal ecosystems-a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1354-1366.
- [41] 聂鑫, 陈茜, 李福泉, 等. 国内外海洋蓝碳热点与前沿趋势研究——基于 CiteSpace 5.1 的可视化分析[J]. *生态经济*, 2018, 34(8): 38-42, 63.
- [42] ORSIF, CIOLLI M, PRIMMER E, et al. Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union[J]. *Land Use Policy*, 2020, 99(2): 104840.
- [43] STITT J M, HUDAK A T, SILVA C A, et al. Characterizing individual tree-level snags using airborne lidar-derived forest canopy gaps within closed-canopy conifer forests[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(2): 473-484.
- [44] SCHNEIDER F D, FERRAZ A, HANCOCK S, et al. Towards mapping the diversity of canopy structure from space with GEDI[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 115006.
- [45] SUN W L, LIU X H. Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China[J]. *Forest Ecosystem*, 2020, 7(1): 4.
- [46] CHAVE J, ANDALO C, BROWN S, et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests[J]. *Oecologia*, 2005, 145: 87-99.
- [47] MAGALÃES T M. Live above-and belowground biomass of a Mozambican evergreen forest: a comparison of estimates based on regression equations and biomass expansion factors[J]. *Forest Ecosystems*, 2015, 2: 1-12.
- [48] BUESING N, MARXSEN J. Theoretical and empirical conversion factors for determining bacterial production in freshwater sediments via leucine incorporation[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, 3(2): 101-107.
- [49] SEGATTO P L, BATTIN T J, BERTUZZO E. The metabolic regimes at the scale of an entire stream network unveiled through sensor data and machine learning[J]. *Ecosystems*, 2021, 24(7): 1792-1809.
- [50] STRASSBURG B B N, KELLY A, BALMFORD A, et al. Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems[J]. *Conservation Letters*, 2010, 3(2): 98-105.
- [51] BUCHANAN G M, DONALD P F, BUTCHART S H M. Identifying priority areas for conservation: a global assessment for forest-dependent birds[J]. *PLoS One*, 2011, 6(12): e29080.
- [52] ARMENTERAS D, RODRIGUEZ N, RETANA J. National and regional relationships of carbon storage and tropical biodiversity[J]. *Biological Conservation*, 2015, 192: 378-386.
- [53] LOCATELLI B, IMBACH P, WUNDER S. Synergies and trade-offs between ecosystem services in Costa Rica[J]. *Environmental Conservation*, 2014, 41(1): 27-36.
- [54] DAY M, BALDAUF C, RUTISHAUSER E, et al. Relationships between tree species diversity and above-ground biomass in Central African rainforests: implications for REDD[J]. *Environmental Conservation*, 2014, 41(1): 64-72.
- [55] PAOLI G D, WELLS P L, MEIJAARD E, et al. Biodiversity conservation in the REDD[J]. *Carbon Balance and Management*, 2010, 5(1): 1-9.
- [56] MURRAY J P, GRENYER R, WUNDER S, et al. Spatial patterns of carbon, biodiversity, deforestation threat, and REDD + projects in Indonesia[J]. *Conservation Biology*, 2015, 29(5): 1434-1445.
- [57] DI MARCO M, WATSON J E M, CURRIE D J, et al. The extent and predictability of the biodiversity-carbon correlation[J]. *Ecology Letters*, 2018(21): 365-375.
- [58] 侯一蕾, 邢方圆, 马丽, 等. 应对气候变化与保护生物多样性协同: 全球实践与启示[J]. *气候变化研究进展*, 2023, 19(1): 91-101.
- [59] 任海, 郭兆晖. 中国生物多样性保护的进展及展望[J]. *生态科学*, 2021, 40(3): 247-252.
- [60] ZHANG S, ZHOU Y Q, YU R, et al. China's biodiversity conservation in the process of implementing the sustainable development goals (SDGs)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 338: 130595.
- [61] 冯思远, 赵文武, 韩逸. 变化环境下的生物多样性保护: 第四届“一个星球”峰会述评[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 2050-2058.
- [62] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [63] 张碧天, 闵庆文, 焦雯璐, 等. 生态系统服务权衡研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [64] 郭宗亮, 刘亚楠, 张璐, 等. 生态系统服务研究进展与展望[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 928-936.
- [65] 章海波, 骆永明, 刘兴华, 等. 海岸带蓝碳研究及其展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(11): 1641-1648.
- [66] 李新, 马瀚青, 冉有华, 等. 陆地碳循环模型-数据融合: 前沿与挑战[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(10): 1650-1663.
- [67] 吴慧, 徐学红, 冯晓娟, 等. 全球视角下的中国生物多样性监测进展与展望[J]. *生物多样性*, 2022, 30(10): 196-210.