

DOI: 10.20103/j.stxb.202303180514

徐来仙, 何友均, 艾训儒, 何江. 基于森林生态系统服务权衡与协同的森林可持续管理. 生态学报, 2024, 44(4): 1347-1359.

Xu L X, He Y J, Ai X R, He J. Sustainable forest management based on trade-offs and synergies of forest ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1347-1359.

基于森林生态系统服务权衡与协同的森林可持续管理

徐来仙^{1,2}, 何友均^{1,*}, 艾训儒², 何江^{2,3}

1 中国林业科学研究院 林业科技信息研究所, 北京 100091

2 湖北民族大学 林学院, 恩施 445000

3 广西大学 林学院, 南宁 530000

摘要: 森林是水库、钱库、粮库、碳库, 提供多种生态系统服务, 对缓解全球气候变化、维护国土生态安全和促进经济社会可持续发展具有基础性、战略性作用。科学认识不同森林生态系统服务间的权衡与协同对实现森林多重效益和开展森林可持续管理至关重要, 但森林生态系统服务间的协同或权衡关系存在较大不确定性、因不同研究而异, 导致如何通过森林经营实现森林生态系统多种服务成为关键挑战。全面梳理森林生态系统多种服务之间协调与权衡研究现状后发现: (1) 研究聚焦森林碳汇、木材供应、生物多样性、森林游憩等多种服务之间的关系与影响因子; 天然林的协同效应高于人工林, 林龄、林分密度、树种组成、气温、海拔、社会偏好、管理政策等是主要驱动因素; (2) 对比不同森林经营模式或管理措施对森林生态系统多种服务的影响, 可持续经营是协同实现森林多重效益的有效途径; (3) 气候变化与森林生态系统多种服务之间的相互作用取决于气候因子种类与变化程度、森林类型、森林管理方式、区域环境等, 当前重点围绕 IPCC 发布的未来气候变化情景开展研究; (4) 借助 InVEST、FSOS、CASA 等工具, 模拟优化森林管理情景, 探索兼顾森林多目标的管理方案。同时, 系统总结现有研究和森林可持续管理面临的突出问题: ①森林生态系统多种服务间权衡协同的形成机理和驱动机制仍不清晰; ②未考虑全部的森林生态系统服务、森林类型、影响因素、森林管理方式和气候因子等; ③缺乏跨多种时间、空间、尺度的数据融合, 也未融入森林生长动态过程、不确定性和风险分析; ④模拟空间精度较低、运行机制简单和情景不完善导致优化森林生态系统多种服务的模型无法推广; ⑤森林管理设备和理念落后、资金投入和科技支持能力不足、森林质量不高、森林更新滞后等; ⑥森林资源管理一体化的技术体系不完善。在此基础上, 提出协同实现森林生态系统多种服务的森林可持续管理发展趋势与建议: 树立人与自然和谐共生的中国式现代化森林经营理念, 倡导基于自然的森林可持续经营, 推行增强气候韧性的森林可持续经营, 坚持系统观念精准提升森林质量, 完善森林经营的技术规程、标准和政策体系。

关键词: 气候变化; 生态系统服务; 权衡; 协同; 森林可持续管理

Sustainable forest management based on trade-offs and synergies of forest ecosystem services

XU Laixian^{1,2}, HE Youjun^{1,*}, AI Xunru², HE Jiang^{2,3}

1 Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China

3 College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530000, China

Abstract: Forests are four reservoirs, namely water reservoir, treasury, grain depot, and carbon pool. Forests provide multiple ecosystem services, which play a fundamental and strategic role in mitigating global climate change, maintaining national ecological security, and promoting sustainable economic and social development. Scientifically understanding trade-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170593, 31570633); 欧盟-德国复兴银行“绿色促进贷款技术援助基金 (TAG-CHINA) 对话 (DC) 项目”; 国家林业和草原局重点工程项目前期研究项目 (500102-5103)

收稿日期: 2023-03-18; **网络出版日期:** 2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hyjun163@163.com

offs and synergies among forest ecosystem services is essential for realizing multiple forest benefits and sustainable forest management. However, the synergies or trade-offs among forest ecosystem services are uncertain and vary from study to study, leading to key challenges in achieving multiple forest benefits through forest management. In this study, the research status of trade-offs and synergies among forest ecosystem services is comprehensively reviewed. Specifically, the existing studies mainly explore four aspects. (1) Exploring the relationships and influencing factors among forest carbon sink, timber supply, biodiversity, forest recreation, and forest ecosystem services. The natural forests have a higher synergistic effect than planted forests. Forest age, stand density, tree species composition, temperature, altitude, social preference, and management policy are main driving factors. (2) Comparing the effects of different forest management models or management measures on multiple forest ecosystems services, sustainable management is effective in synergistically achieving multiple forest benefits. (3) The interaction between climate change and multiple forest ecosystems services depends on the type and degree of climate factors, forest type, forest management, and regional environment. Future climate change scenarios released by the IPCC are the focus of current research. (4) Using InVEST, FSOS, CASA, and other models, researchers optimize forest management scenarios and explore multi-objective forest management schemes. Meanwhile, we systematically summarize the key problems faced by existing research and sustainable forest management. ① The formation mechanism and driving mechanism of trade-offs and synergies among multiple forest ecosystems services are still unclear. ② All forest ecosystem services, forest types, driving factors, forest management methods, and climatic factors are not considered. ③ It lacks of data fusion across multiple times, spaces, and scales. Forest growth dynamic processes, uncertainty and risk analysis are also not integrated into the study. ④ The models for optimizing multiple services of forest ecosystems cannot be promoted because of the low simulation spatial accuracy, the simple operating mechanism, and the imperfect scenario. ⑤ Forest management equipment and concepts are backward, capital and science and technology investment is low, forest quality is not high and forest regeneration is poor. ⑥ The technical system of integrated forest resource management is not perfect. Moreover, the paper puts forward the trends and recommendations for sustainable forest management that synergistically enhance multiple forest ecosystems services. Firstly, establishing a Chinese modern forest management concept of harmonious coexistence between man and nature. Secondly, advocating nature-based sustainable forest management. Thirdly, implementing climate-resilient sustainable forest management. Fourthly, adhering to the system concept, and accurately improving forest quality. Fifthly, improving the technical regulations, standards, and policy system of forest management.

Key Words: climate change; ecosystem service; trade-off; synergy; sustainable forest management

以气温快速变暖、极端天气频繁等为代表的全球气候变化,深刻影响整个生态系统的稳定与发展^[1-2]。森林作为陆地生态系统主体^[3-4],不仅提供木材等多种林产品,而且具备涵养水源、固碳释氧、林木积累营养物质、净化环境、生物多样性保育、保育土壤和森林游憩等多种服务^[5-6]。森林有“水库、钱库、粮库、碳库”之称,关乎国土生态安全和社会可持续发展,森林可持续管理是减缓气候变暖的根本措施^[7-8]。由于森林生态系统多种服务之间具有重叠性、不确定性、分布不均衡性以及社会偏好选择性^[6,9],不同森林生态系统服务之间常常存在无关、权衡和协同等复杂关系^[10-12]。权衡是某种服务的增加导致另一种或多种服务功能降低(负相关),协同是两种或多种服务功能同时增加或降低现象(正相关)^[11,13-14]。在全球气候变化背景下,森林生态系统服务之间的权衡与协同已成为当前多学科研究的前沿和热点^[9,15-16]。科学认识不同森林生态系统服务之间的权衡与协同关系是实现森林可持续管理的前提^[6,16],也是协同实现森林生态系统多种服务的基础^[14,17-18]。森林生态系统服务之间的协同或权衡关系因研究而异,因时间、空间、生境、尺度、森林类型等多种因素而变化^[6,9,19],导致各区域的森林管理策略存在差异、阻碍发挥森林多重效益^[6,20]。同时,人们对森林的需求趋于多元化,森林管理如何协同实现森林生态系统多种服务成为关键挑战^[20-21]。因此,从新视角总

结已有研究现状与问题、提出解决方案与未来研究方向显得尤为必要,有助于完成“双碳”目标、实现森林生态系统多种服务的可持续供给与管理^[6,16,21]。鉴于此,本研究全面总结和梳理森林生态系统多种服务之间权衡协同的研究重点与现状,归纳现有研究和森林可持续管理存在的问题与挑战,进而提出有利于增强生态系统服务的森林可持续经营理念、模式、技术和政策建议,为推动森林质量精准提升、森林生态系统服务协同增强和生态保护修复提供参考,为制定合理完善的政策方案提供理论依据。

1 研究重点与现状

从收集到的文献来看,面向森林生态系统服务权衡与协同的研究主要涉及 2 至 4 种森林生态系统服务的权衡协同与影响因子、不同森林经营方法对森林生态系统多种服务的影响、气候变化与森林生态系统多种服务的密切关联、模拟优化森林生态系统多种服务的管理决策等。

1.1 森林生态系统服务的权衡协同与影响因子

不同类型的森林生态系统服务之间存在不同的权衡取舍和协同增效,森林属性特征、环境因子和人为管理等因素共同塑造森林生态系统多种服务之间的多元关系^[6]。从人工林来看,Ahmad 等^[3]探索了传统人工林管理方式下中国华北落叶松(*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*)人工林内木材生产和林下植被多样性保护之间的关系,结果表明两者属于权衡关系,林木密度、年龄和郁闭度是平衡两者关系的主要影响因素,设 0.7 左右郁闭度可获较高生物量。芬兰大型北方森林碳储量、木材生产和生物多样性的权衡研究表明:森林集约化管理(轮伐期 80 年、每 1—3 年间伐一次,采伐时保持常绿树种密度为 5 株/hm²)、不管理、轮伐期延长 10 年、轮伐期延长 30 年、常绿树种管理(采伐时保留 30 株/hm²;轮伐期为 80 年)、延长轮伐期且无间伐(采伐阈值与现行森林管理方式相同,无间伐,轮伐期为 86 年)、缩短轮伐期且无间伐(采伐量最小,无间伐,轮伐期为 77 年)7 种森林管理制度在 50 年内均无法同时达到这 3 个服务的最大值,木材采伐收入和生物多样性、木材采伐收入和碳储量均呈负相关^[22],建议实施多样化的森林管理模式、放弃集约化木材生产方式。新疆天山雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)森林供给、调节、支持服务之间呈协同效应,以生物多样性与固碳释氧协同程度最高,固碳释氧与生产力次之,生产力与涵养水源最低;林分平均胸径、蓄积量、植被盖度、平均年龄和郁闭度对森林生态系统多种服务的影响最大(正相关),海拔与各森林生态系统服务呈负相关^[11]。Cademus 等^[23]使用 2002—2011 年 377 个永久森林样地数据量化美国北佛罗里达州(North Florida)湿地松(*Pinus elliotii*)生态系统碳汇、木材和产水量的供应水平,结果表明木材量和产水量为权衡关系,其余两两间均为协同效应,因空间而异;林龄、管理措施和立地质量是主要驱动因子。德国奥格斯堡(Augsburg)城市森林的森林娱乐、饮用水、生物多样性、木材供应和气候调节服务深受利益相关方重视,森林娱乐与木材供应、狩猎、饮用水之间存在权衡取舍;森林经营决定木材、生物多样性和饮用水之间的关系^[24]。在枯木管理方法下,德国巴伐利亚州(Bavaria)森林娱乐与森林枯木数量之间不存在显著权衡,枯木质量(分解程度和结构)和稀有动植物数量对森林公园选址产生积极影响^[25]。Cueva 等^[26]研究发现德国西南部巴登-符腾堡州卡尔斯鲁厄地区城市和城郊森林的供给服务(叶片生物量、食用价值、药用价值、观赏价值等)和调节服务(制造氧气、蒸发、蒸腾、总固碳量等)为协同作用,而支持服务(树木微生境丰富度,树种、结构和树木微生境多样性)与调节服务、供应服务之间呈权衡关系;森林服务供应量由高到底依次为森林区、半自然区、人造地表区、农业区。在减少毁林和森林退化所致排放(REDD+)管理下,尼泊尔 19 个社区森林的森林碳汇与植物多样性、林产品供应均呈反比,植物多样性与林产品(薪材、饲料)为协同作用,木材、薪材和饲料为权衡关系;森林规模和海拔是主要影响因素,森林规模较大且位于高海拔有利于协同实现森林生态系统多种服务,建议采取综合性森林管理模式^[27]。Li 等^[28]探讨丹江口库区不同林分密度下马尾松(*Pinus massoniana*)人工林生态系统服务之间的权衡协同,发现保水能力与植物物种多样性是权衡关系,且林分密度越高,权衡程度越大;树干径流与中高密度生物多样性为协同作用,中密度林分(1000—1425 株/hm²)的土壤持水性最好。

就天然林生态系统服务和驱动因素而言,新西兰丰盛湾地区(Bay of Plenty, New Zealand)原始森林的森

林碳汇和木材供应呈协同关系^[29]。Felipe-Lucia 等^[30]研究了中欧常见森林管理类型中森林生态系统多种服务的驱动因素,结果发现天然阔叶林的异质性、森林覆盖率和树木丰富度高于人工林,森林异质性、结构、组成和植物多样性等是协同实现森林生态系统多种服务的主要影响因子,其次是立地条件、坡度、土壤深度、土壤 pH 值、郁闭度等。天然林保护工程实施后,吉林省天然阔叶混交林的土壤保持、涵养水源、碳储量、气候调节、土壤肥力维持、生物多样性、生产力和木材生产 8 个服务间以协同关系为主,伴随权衡、中性关系;碳储量和木材生产的协同最强,气候调节和涵养水源的权衡最强;林分密度是最重要驱动因子^[19]。Lafond 等^[31]利用森林动力学模型、造林算法预测各种异龄林管理下西阿尔卑斯山异龄山地森林生态系统多种服务之间关系,结果发现抵抗自然灾害与保护生物多样性之间呈协同关系,木材生产与其他森林生态系统服务之间为权衡关系,采伐强度和采伐方式显著影响森林生态系统服务。Lan 等^[14]基于 2227 个国家森林清查样地数据,探讨中国东北天然林多种服务之间的权衡取舍和量化 8 种驱动因子的影响,大部分森林生态系统服务之间(林分生产力与涵养水源、碳储量与土壤保持、林分生产力与碳储量、碳储量与土壤有机碳)呈现协同效益,生物多样性与涵养水源、土壤保持、林分生产力、碳储量为较强权衡关系,林分密度、降水量、气温、树种丰富度共同调节森林生态系统服务的供给,林分密度是最主要驱动因子。Feng 等^[32]基于 InVEST 模型、相关性系数分析了当前自然保护区管理方式下江西省九连山国家级自然保护区近 20 年森林生态系统多种服务之间的关系、变动和影响因子,结果表明森林碳汇、产水量呈上升趋势,土壤保持能力有所减弱,阔叶林、针叶林、混交林、毛竹林和草地之间的协同效益占主导,权衡关系随海拔升高而减少,建议将生态系统服务权衡纳入生态管理政策。

从不同森林生态系统服务对比分析,Dai 等^[6]发现华南赣江流域不同森林类型生态系统服务供给能力及权衡关系各异,天然林的协同效应高于人工林;天然林(如阔叶林和竹林)的土壤保持、碳储量和木材之间具有较好协同作用;人工林的碳储量和产水量、土壤保持和木材为权衡关系。吴炜等^[12]分析中亚热带不同演替阶段次生林 3 种服务之间的关系和驱动因素,结果表明马尾松+石栎针阔混交林、南酸枣落叶阔叶林、青冈+石栎常绿阔叶林的土壤有机碳调节和全氮调节为协同,物种多样性与土壤有机碳调节、全氮调节是权衡关系;南酸枣落叶阔叶林的服务供给量最高、马尾松+石栎针阔混交林最低;在演替前期时,常绿阔叶树种比例、土壤 pH 值是权衡关系的主要影响因子;演替后期时,地形、土壤和树种组成的影响程度逐渐减弱。Baskent^[33]评估土耳其不同区域森林生态系统提供的关键服务,埃雷格利(Eregli)和耶希尔库沙克(Yeşilkuşak)的木材生产、空气调节和森林碳汇都较低,生物多样性栖息地为中等水平;森林组成和林分结构决定森林生态系统服务供给水平,从而影响当地人民生计来源。Naime 等^[34]发现墨西哥太平洋沿岸热带干旱森林调节服务(林产品和饲料)和供应服务(碳储量和碳汇)均随天然更新过程发生变化,早期主要表现为权衡关系,后期产生协同效应;幼龄次生林(0—12 年天然更新)和中龄次生林(12—25 年天然更新)的经济价值以碳汇为主,原生林(超过 25 年天然更新)的碳储量最高。Eguiguren 等^[35]模拟评估亚马逊中部厄瓜多尔(Chocó)低地雨林地区的 5 种森林类型与森林生态系统多种服务之间的关系,演替林成为恢复生态系统的首选方式、多功能性最高,采伐林造成森林覆盖变化、降低地上碳储量和木材生产能力;地上碳储量与木材生产、非木材林产品、植物多样性、栖息地呈协同作用,土壤有机碳与氮之间协同关系,磷、氮、钾之间表现为权衡关系。

总体而言,多数研究主要集中探讨 2—4 种森林生态系统服务之间的关系与影响因素。森林生态系统服务的供给能力、权衡协同关系和驱动因子都因研究而异,天然林的协同效应高于人工林。关于森林碳汇、木材供应、生物多样性、森林游憩、产水量、保育土壤、气候调节、林产品等森林生态系统服务的研究较活跃,涵养水源、饮用水、林分生产力、抵抗自然灾害、全氮调节、树木微生境丰富度等逐渐受到关注。森林碳汇与土壤保持、生物多样性与固碳释氧、生物多样性与抵抗自然灾害、森林碳汇与林分生产力、生物多样性与林产品等之间为协同效应,生物多样性与森林碳汇、生物多样性与木材生产、森林碳汇与物种多样性、森林游憩与木材生产、气候调节和涵养水源、生物多样性与林分生产力等之间呈权衡关系;然而,土壤保持和木材生产、森林碳汇与木材生产、森林碳汇与林产品、森林碳汇与产水量、生物多样性与土壤保持等之间的关系存在争议。森林年龄、郁闭度、林分结构、林分密度、平均胸径、蓄积量、树种组成、植被盖度等森林属性特征,气温、降水量、海拔、

土壤、地形、坡度、立地质量等环境因素,森林管理活动、采伐强度及方式等是调节森林生态系统多种服务的重要因素。

1.2 不同森林经营模式对森林生态系统多种服务的影响

森林经营是协同实现森林生态系统多种服务的有效途径^[24,30]。不同森林经营模式对群落结构、森林生产力、生物多样性、木材生产、固碳释氧和水土保持等具有重要影响^[36]。森林生态系统经营、可持续经营、近自然经营、结构化经营、目标树经营、次生林培育、分类经营等发展较为成熟,补植幼苗、降低采伐强度、清除病腐断木、异龄混交、延长轮伐期等森林管理措施不断完善。从较为成熟的森林经营模式来看,Wan 等^[37]探究 4 年间近自然森林经营、结构化森林经营和次生林综合培育 3 种方式对中国甘肃省大甘子沟小陇山自然保护区百花林场天然锐齿槲栎林(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)的影响,只有结构化森林经营显著提高林分混交度,降低劣势、弱势树种等不利结构,产生林分随机分布格局且抚育后四年依旧稳定。Ming 等^[38]发现随时间推移,近自然经营逐渐增加马尾松林(*Pinus massoniana*)和杉木林(*Cunninghamia lanceolata*)的树木生长速度,改变物种组成、林分密度、凋落物分解率等,提高生态系统碳储量。陈明辉等^[39]分析结构化经营、目标树经营和传统经营对东北阔叶红松林(*Pinus koraiensis*)生产力、密度、结构及综合状态的影响,结果表明结构化经营形成了类似天然林的随机分布格局,提升森林生产力和优化林分空间结构;与传统经营相比,伐除病腐木、断梢木、弯曲林木等经营措施显著提高林分蓄积生长量(17.28%)和断面积(42.86%),降低树木枯损率(57.22%)。随时间推移,瑞典南部森林栖息地、娱乐和碳储量之间呈现越来越强的权衡效应,木材生产和生物能源生产的权衡关系日益明显;同龄林有利于提供木材、生物能源原料、森林碳汇^[40]。短期内无干扰模式下蒙古栎(*Quercus mongolica*)天然次生林的林分生产力水平(胸径、树高、年龄、密度等)大于目标树经营和综合抚育经营,补植红松(*P. koraiensis*)等目标树经营最有利于优化树种组成、改善林分结构,加快森林演替进程^[17]。4 种森林管理(多目标经营、近自然经营、同龄林集约经营、保护性经营)对欧洲森林生态系统的生物多样性和水保护产生积极影响,且成本较低;木材产量与生物多样性、森林碳汇为权衡效应,树种组成、林分密度和年龄结构是主要影响因素^[41]。森林可持续管理不仅保护巴西亚马逊北部森林结构,而且持续维持理想水平的树种多样性、木材数量和碳储量^[42]。Atin 等^[5]研究发现森林可持续管理有助于维持沙巴州纳巴湾萨拉罗姆塔卡(Salarom Taka)森林的粮食安全。

从不断完善森林经营措施分析,Eyvindson 等^[43]研究发现择伐(selective logging)更有利于增加芬兰森林休闲娱乐服务、非木质林产品供给、减缓气候变化和保存物种栖息地等,建议北方森林经营中使用择伐(10%—25%)以获得最大化协同木材和其他服务效益。Nölte 等^[44]发现延长轮伐期和降低间伐强度两种森林管理均提高了哥斯达黎加柚木(*Tectona grandis*)人工林碳储量、降低了木材采伐的经济回报,同龄林转变为异龄林管理方式增加林分生物多样性,有利于森林碳平衡;贴现率决定异龄林管理方式的经济收益,生态系统服务付费(Payments For Ecosystem Services, PES)大约增加 3%—4%的人工林经济收益。在北方温带经济林中,树种丰富度与森林生物量、土壤碳汇、浆果产量呈现正驼峰形关系,与生物多样性、枯木率之间存在正相关;五种树种混交的经济林的生物量、碳汇等供给量高于单一树种的生产林,单一栽培云杉(*Picea asperata*)方式增加瑞典森林的树木生物量,但降低浆果产量^[45]。Hannes^[46]探究生态林、水果经济林、生物能源林(bioenergy forests)3 种替代性森林管理类型对宁夏回族自治区固原市森林生态系统多种服务和可持续经营的影响,生态林侧重于提供生物资源、非生物资源、调节环境,水果经济林倾向非木材林产品收入、林业相关产业收入、木材收入,生物能源兼顾社会、经济和环境功能;同时,建议深入观察树种特性、及时调整森林管理措施,向农民提供森林管理培训,并引入利益相关者参与森林生态系统服务评估。Jafarzadeh 等^[47]通过 InVEST、MPSIAC、Land-Use Conflict Identification Strategy 模型分析半干旱地区伊朗扎格罗斯森林管理(Zagros forest)对 4 种服务的协同与权衡,并考虑非线性规划、利益相关者偏好形成森林管理决策,结果表明防治土壤侵蚀和产水量协同效益最大,优化森林管理后显著增加森林碳汇能力、产水量、木材、食物等经济效益,减少土壤侵蚀速度。

综上所述,不同森林经营模式与措施对不同类型森林生态系统服务的影响各异,科学有效的森林经营能维持森林健康稳定、实现森林生态系统多种服务最大化。大部分研究主要对比分析 2—4 种森林经营模式或管理措施对森林结构、林分生产力、森林碳汇、森林娱乐、木材、生物多样性、产水量、栖息地、林产品与非木质林产品供给的影响。与传统经营相比,结构化森林经营有助于形成随机分布格局;近自然森林经营侧重调整树种组成、提高碳储量,应对减缓气候变化;森林可持续经营注重维持森林结构,持续提供木材、碳汇、生物多样性、林产品等多种服务。此外,补植等目标树经营有利于优化林分结构与组成,低强度择伐或间伐有助于保护栖息地、增加非木质林产品供给和休憩娱乐服务,延长轮伐期能够增加碳储量,混交异龄林可提供森林生态系统多种服务。

1.3 气候变化与森林生态系统多种服务的密切关联

气候变化是当前全球范围内面临的主要挑战之一,森林生态系统服务与气候变化的关系密切。以温度、降水、光照和风力等为代表的气候因子变化会引起森林生态系统多种服务之间的协同和权衡转变^[2],森林适应并减缓气候变化^[14]。从气候变化情景角度看,Mina 等^[2]应用动态森林模型模拟 21 世纪的五种气候变化情景对 4 个欧洲山区森林生态系统多种服务的影响,结果表明森林碳汇、木材生产、生物多样性和抵御自然灾害等服务之间的权衡与协同关系对森林管理和气候变化很敏感,具有高度异质性;最恶劣气候情景和低海拔下抑制森林生态系统多种服务有效供给;不同区域森林碳汇与木材生产的关系差异很大,碳汇与生物多样性、抵御自然灾害之间呈协同效应。欧洲山地森林生态系统服务对气候变化(温度、降水、气压、辐射)的响应存在很强海拔梯度,高海拔地区高温促进木材生物量,低海拔地区干旱抑制树木生长;极端气候变化情景抑制木材生产、森林碳汇、生物多样和抵御自然灾害等;喀尔巴阡山脉(Carpathians)和罗多彼山脉(Rhodopes)因区域降水量少,导致其森林对气候变化反映更敏感、脆弱;现行一成不变的森林管理方式不利于应对气候变化和发挥多重效益^[48]。Thrippleton 等^[49]评估不同采伐强度气候变化情景(RCP4.5, RCP8.5)对瑞士山地森林生态系统多种服务的影响,模拟发现 2010 年至 2100 年间通过近自然经营增加木材采伐策略可以降低风和树皮甲虫的干扰、增加阔叶树种多样性,形成森林娱乐和木材生产的协同关系,保护功能(防治落石、雪崩和山体滑坡)与碳汇、木材生产的权衡效应;在 RCP8.5 情景下,森林极易受风与病虫害的干扰。Morán-Ordóñez 等^[50]采用 SORTIE-ND 模拟发现 2100 年 RCP4.5 和 RCP8.5 气候变化情景对地中海森林生态系统服务供给的影响较少,森林碳汇、木材、蘑菇产量和生物多样性栖息地之间存在协同效应,防治土壤侵蚀和供水为权衡关系;这些森林生态系统多种服务主要取决于管理政策,而极端干旱或野火更易影响森林生态系统服务。刘闵^[15]发现 1992—2015 年间中国气候明显变暖变湿,森林保持土壤、产水量、固碳服务和粮食供应均呈不同程度上升,土壤保持与产水量的协同关系最强,温度升高是森林增加固碳服务的关键贡献因子。

结合森林管理和气候变化分析,Gutsch 等^[51]探索三种管理策略(自然保护、生物量生产和基线管理)和三种未来气候情景(RCP2.6、RCP 4.5、RCP 8.5)下德国森林到 2045 年的木材、碳汇、生境和水循环变化,结果表明森林管理措施对森林生态系统服务的影响高于气候变化,气候变化对碳汇和木材产生积极效应、对水循环和生境具有负面效应;木材分别与碳汇、生境服务之间存在权衡关系,水循环分别与碳汇、生境服务呈现权衡效应,碳汇和生境服务为协同作用。相比传统采伐,气候变化背景下减少对环境影响的伐木(reduced-impact logging, RIL)方式对内圭亚那中部伊沃克拉马森林(Iwokrama Forest)鸟类、蝙蝠和大型哺乳动物多样性有积极影响,伐木前后的森林结构和组成基本相似;大多数物种丰度变化与时间变化的自然速率有关,少数物种对 RIL 呈现独特响应;建议森林管理者改进木材采伐技术^[52]。Rodrigues 等^[53]评估当前和未来不断变化气候条件下 7 种森林管理模式(树种选择、林分密度、采伐等)对葡萄牙西北部森林保育土壤能力及风险的影响,发现气候变化导致森林土壤侵蚀程度不断增加,2017—2106 年内夏栎林(*Quercus robur*)管理的土壤保持效果最好,欧洲栗林(*Castanea sativa*)、栓皮栎林(*Quercus suber*)次之,低密度的海岸松林(*Pinus pinaster*)土壤流失最严重。Potterf 等^[20]发现芬兰森林集约皆伐管理降低风灾风险和景观多样性,但收获大量木材;连续覆盖林管理提高森林游憩、碳储量及物种栖息等多种服务,但因树木较高和疏伐频率高而增加了风灾概率。

综合来看,气候变化在不同程度上影响森林生态系统服务的供给能力、改变森林生态系统多种服务之间的权衡协同关系,而森林生态系统服务不断适应并反作用气候变化。气候变化与森林生态系统多种服务之间的关联程度主要取决于气候因子变化种类与变化程度、森林类型、森林管理方式、区域环境等因素。目前主要借助多种模型围绕政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的未来气候变化情景探讨不同气候变化情景对不同森林生态系统多种服务的影响,并分析气候变化条件下不同森林管理模式对森林生态系统多种服务的调节。只有极少研究关注风灾等对森林生态系统服务造成的影响。欧洲、瑞士山地森林生态系统服务对气候变化很敏感,恶劣情景(RCP8.5、极端气候)不利于发挥多重效益。气候变化情景(RCP4.5和RCP8.5)对地中海森林生态系统多种服务的影响很小。减少对环境影响的伐木、近自然经营增加木材采伐、森林可持续管理等方式有助于因地制宜减少气候变化的影响、提供森林生态系统多种服务。

1.4 模拟优化森林生态系统多种服务的管理

借助模型优化森林生态系统多种服务的管理决策,有助于全方面、多维度揭示森林经营方法、气候变化和政策法律等对曾经、现在和未来森林生态系统多种服务之间协同权衡关系和总体效益的影响,最终有效指导森林管理实践。Bottalico 等^[54]改进 InVEST 模型评估当前和未来地中海森林(意大利中部)提供木材生产和森林碳汇的潜力,结果发现:与基线情景相比,“自然保护”情景增加了 85% 总生态系统服务价值、可持续性最高,“木材生产”情景降低了 82% 总生态系统服务价值;木材生产量越多、个人净现值越低、固碳社会效益越高,当个人净现值与固碳社会效益相等时,木材生产和森林碳汇处于最佳组合水平。Millington 等^[55]提出森林更新、生长和采伐的综合模型,评估 200 年内不同情景下美国北方森林管理的影响,结果显示弗吉尼亚铁木(*Ostrya virginiana*)采伐量越大、鹿密度越低、糖槭(*Acer saccharum*)更新率越高;鹿密度随时间推移对森林更新和木材生产具有负面影响,不采伐弗吉尼亚铁木(*O. virginiana*)会随时间推移形成负面累积效应。Gonzalez-Redin 等^[56]提出集成模型(Agent-Based Model)研究未来 3 种情景对澳大利亚热带森林生态系统多种服务的影响,现有管理情景(增加 10% 保护区面积)和多目标情景(提高 30% 半自然区面积)有助于协调生物多样性、森林碳汇,但减少甘蔗等食物供给;土地分离情景(land sparing,增加 5% 保护区面积、增加 22% 甘蔗产量)提高甘蔗产量,减少生物多样性和森林碳汇。应用 FSOS 模型建立蒙古喀喇沁旗旺业甸实验林场的森林生态系统多种服务平衡管理方案,由于森林处于成熟期、部分小班已进入老化期,建议所有小溪都设置 50 m 宽缓冲区,降低自然灾害风险,预计未来 120 年内可年采伐 7.5 hm²,平均每年增加碳汇 25t^[57]。Orsi 等^[58]基于欧洲森林现有数据进行简单建模,并绘制分辨率为 1 公里的森林生态系统服务地图,发现东北部森林侧重木材、气候调节、娱乐、侵蚀控制的“平衡”,中心区以“木材和供水”为主,北部为“固碳和土壤保育”和南部为“休闲游憩”。邓文文^[59]采用 Python、GIS 模拟湖南省靖县排牙山林场森林多目标规划模型,并考虑市场价格和社会偏好优化森林规划,结果表明只有 30 年后各种优化情景的林分蓄积量和碳储量才高于不采伐情景,碳价格对森林优化经营的影响大于木材价格。Pang 等^[40]基于不同土地政策和森林管理策略,应用景观模拟与生态评价(Landscape simulation and Ecological Assessment, LEcAt)工具分析模拟了两种情景下瑞典森林生态系统五种服务之间的协同作用和权衡取舍,结果表明木材和生物能源原料在同龄林林业情景下表现为权衡,在连续覆盖林业情景下表现为协同,且随时间变化而波动;森林碳汇、娱乐、栖息地之间呈权衡效应。Gu 等^[60]利用 CLUE-S、InVEST 模型探索贵州省西北部喀斯特地区不同情景下人类干扰对森林生态系统服务权衡协同效应的影响,生态保护情景下的生态系统服务优于基准情景和未来城市规划情景,所有情景下的土壤保持与生境质量、碳储量与生境质量、产水量和氮输出、作物产量和氮输出为协同作用,产水量和碳储量、碳储量和氮输出、生境质量和作物产量、氮输出和生境质量为权衡关系;人为干扰对部分森林生态系统服务有积极影响。Mo 等^[21]应用 InVEST 模型分析东江流域多种生态系统服务在栅格尺度和乡镇尺度上的相互作用、且划分生态功能区,两个尺度上粮食生产与产水量、净化水、固碳、水土保持均呈极显著权衡关系,粮食生产和净化水的权衡程度最高;划分农产品供给区(南部)、经济林业区(东北)、水源供给区(西部)和森林保护区(北部)4 大功能区。Qiao 等^[9]运用 CASA、USLE 模型发现 1990—2010 年太湖流域生态系统供给服务、文化

服务和调节服务之间的关系因尺度、时间而变化。伏牛山整体森林生态系统服务效益较低,61.06%的森林存在强权衡和弱权衡,南坡的协同效应高于北坡,中山落叶阔叶林带的协同效益最高^[16]。韩新生^[61]量化分析2010—2019年宁夏六盘山半干旱区立地因子、坡向、坡度、坡位对3种植被类型(华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林、天然虎榛子灌丛、天然草地)的碳储量、木材生产、物种多样性保护、产水量的影响,并确定兼顾多种森林生态系统服务的植被配置模式。田奥^[62]提出华北落叶松(*L. principis-rupprechtii*)人工林兼顾产水、木材生产、固碳等森林生态系统多种服务的管理权衡决策步骤,杨培松^[63]探索了适合靖县排牙山林场的6种森林生态系统服务经营模式(针阔混交林提质增效、人工林引进乡土树种、针阔混交林抚育经营、针阔混交林低强度择伐、阔叶混交林择伐促进更新、古树名木保护)。

总之,实现森林生态系统多种服务最大化是当前森林管理的主要任务,运用多种模型模拟不同森林管理对森林生态系统多种服务及其权衡协同的影响,有助于形成正确森林管理决策。InVEST、FSOS、RUSLE、CASA、CLUE-S和各种综合模型是优化管理森林生态系统多种服务的主流工具。学术界通常模拟2—3种优化森林管理情景,主要内容涉及经济收入(如净现值)、市场价格、林分密度、蓄积量、木材生产、森林碳汇、生物多样性、作物产量、社会偏好、森林游憩、栖息地、土壤保持、净化水、氮输出等多方面。自然保护情景下,地中海森林的生态系统服务价值最高;美国北方森林管理应更加侧重管理弗吉尼亚铁木(*O. virginiana*),其次是动物密度;澳大利亚热带森林的现有管理情景和多目标情景协同增加生物多样性、森林碳汇;瑞典森林更适合连续覆盖林业情景;贵州省西北部喀斯特地区在生态保护情景下的森林生态系统多种服务最优。同时,少量研究结合不同时空尺度、人类干扰、生态功能区等探索优化森林生态系统多种服务的管理方案,也开始探索兼顾森林生态系统多种服务的管理决策步骤和经营模式等。

2 问题与挑战

从21世纪10年代到现在,国内外学者在森林生态系统多种服务之间权衡协同方面积累了有益经验^[2—3,7,9,17,22]。2020年7月,我国新修订《森林法》第六条提出“国家以培育稳定、健康、优质、高效的森林生态系统为目标,对公益林和商品林实行分类经营管理,突出主导功能,发挥多种功能,实现森林资源永续利用”,进一步突出实现森林生态系统多种服务和森林可持续经营的重要性与紧迫性;森林可持续经营是协同实现森林生态系统多种服务、增强社会经济生态效益的关键路径^[33]。德国、美国、瑞典、葡萄牙、芬兰、澳大利亚、西班牙、新西兰等国家较早意识到森林生态系统多种服务之间权衡或协同机制和森林经营模式对协同实现森林生态系统多种服务的重要性,并结合气候变化、森林资源属性、政策策略、社会偏好和经济价值等开展深入研究。我国处于追求最大化实现森林生态系统多种服务的初步探索和发展阶段,现有研究尚不能满足实现森林生态系统多种服务最优化的实际需求;森林生态系统多种服务之间权衡或协同机制和森林可持续经营面临许多问题和挑战。

第一,森林生态系统服务之间权衡协同的形成机理和驱动机制仍不清晰。没有综合考虑多种驱动因素对森林生态系统多种服务关系和供给能力的影响,缺乏量化不同驱动因子的相对重要性。忽视土壤、大气、水分、阳光、温度等环境因素,当地经济发展、林产品价格等经济因素,利益相关者偏好、社会需求等社会因素,政策导向、政府决策、人为活动等管理因素与林分结构、林龄、平均胸径、植被盖度等森林属性对森林生态系统多种服务的综合作用;同时,无法精准区分气候、经济、社会偏好等因素对森林生态系统服务的贡献程度。第二,森林生态系统服务种类、森林类型、时空尺度、森林管理方式等缺乏多样性。目前侧重个别森林生态系统服务的研究,缺乏关注所有森林生态系统服务(供给、支持、调节、文化)之间的关系。森林类型有限、森林年龄跨度较小,主要集中于人工林乔木层或少量天然林,退化林、林下灌木草本、不同演替阶段森林等较少。森林生态系统服务权衡与协同具有尺度效应、季节动态性,但缺乏跨多种时间、空间、规模、尺度的融合研究。不同森林管理模式对森林生态系统多种服务的影响机制不明确,严重缺乏明确的主导森林经营思想。第三,缺乏定量数据,森林生态系统多种服务计算和相互作用存在偏差与不确定性。当前很多森林生态系统服务通过森林

资源二类清查数据、相关文献数据、遥感数据和少量现场样本数据计算,其缺失碳密度、灌木、草本植物等多种信息。第四,未考虑极端天气事件频率、强度对森林生态系统多种服务造成的影响,忽略植被对气候变化响应的滞后效应。第五,模拟优化森林生态系统多种服务模型无法推广,模拟情景设置类型不完善,模型选取因子不全面,部分数据、数字高程等空间分辨率较低,偏差较大,模拟结果与实践存在一定差距。同时,模型没有融入森林生长动态,也没有考虑未来气候变化、干扰等带来的不确定性和风险。另外,模拟模型(如 InVEST)因其空间精度较低、运行机制较简单而受争议。第六,由于气候变化明显、资源利用与管理之间矛盾突出以及外来物种入侵、病虫害与火灾等频繁,森林可持续经营面临巨大挑战。一方面,我国森林资源丰富、植物种类较多、南北差异很大,但是森林管理设备和理念落后、森林抚育投入和科技支撑不足,很多林业经营者能力欠缺、没有结合实际情况开展针对性森林管理,以“封禁”代替“经营”现象较多,致使森林可持续管理水平较低,阻碍森林生态系统服务多种效益发挥。另一方面,森林资源调查、设计、规划、采伐和管理一体化的技术体系不完善,无法实时监测森林并共享林业信息资源;同时,森林资源评价体系不完善,以森林经营方案为核心的森林资源管理制度体系不健全,从而降低森林可持续管理效率。最后,森林质量不高、森林结构不合理、龄级结构不稳定、森林更新滞后等,不利于发挥森林生态系统多种服务。

3 发展趋势与展望

3.1 树立人与自然和谐共生的中国式现代化森林经营理念

党的二十大报告明确提出“中国式现代化”,人与自然和谐共生作为中国式现代化本质要求之一。中国式现代化要求坚持可持续发展,贯彻践行绿色青山就是金山银山理念,统筹产业结构调整、污染治理、生态保护,积极应对气候变化、逐步推进碳达峰碳中和,推进山水林田湖草沙一体化保护和修复,提升生态系统多样性、稳定性和持久性^[64]。森林经营永远是林业发展的主题,是实现森林可持续、多目标发展的关键途径,是推动生态文明建设和减缓全球气候变暖的核心路径。人与自然和谐共生的中国式现代化森林经营理念就是要坚持问题导向和目标导向,以森林可持续经营、森林多目标经营、森林健康经营、近自然经营等相关理论为指导,从单一经营向多因素经营转变,从分类经营向多目标经营转变,从单过程经营向全周期经营转变,加速培育功能完备、质量优良、健康稳定的森林生态系统,推动森林生态产品价值转换。伊春林区正在积极践行人与自然和谐共生的中国式现代化森林经营理念,打造全国森林可持续经营试点,致力于安排好、经营好、管理好“绿水青山、冰天雪地”,以发挥最强最多最大效益。今后需在人与自然和谐共生的中国式现代化森林经营理念指导下,进一步探究多种森林类型、多元时空数据、不同尺度(样地、小班、林班、生态系统、景观)、多重森林生态系统服务、多个驱动因素(自然、经济、社会、森林属性)、多种森林经营、多种气候因子与森林情景模拟对森林生态系统服务权衡协同的影响,致力于精细化指导森林经营,提升多种森林生态系统服务。

3.2 倡导基于自然的森林可持续经营

基于自然的解决方案(Nature based Solutions, NbS)是通过保护、可持续管理和修复自然或人工生态系统,有效和适应性地应对气候变化、防灾减灾、生态系统退化等社会挑战,并为人类福祉和生物多样性带来益处的行动^[65]。NbS 与我国“绿水青山就是金山银山”、“山水林田湖草沙生命共同体”等生态文明理念高度契合,对推动生态文明建设、提高森林可持续经营现代化水平、保护恢复生态系统和实现碳达峰、碳中和目标具有重要意义。只有认清森林生态系统多种服务间协同权衡的形成机制与驱动因子,明确不同森林经营对不同类型森林生态系统多种服务关系的影响,才能基于自然提出实现森林生态系统多种服务的最佳解决方案。今后,建议根据不同类型森林的生长动态过程,融合模型与数据的不确定性以及气候、干扰与政策的风险性,长期研究更自然真实的全周期森林生态系统多种服务间的权衡协同;同时,量化森林生态系统多种服务影响因子的相对重要性,创新性协调森林管理方式,寻找基于自然的森林可持续经营方式。

3.3 推行增强气候韧性的森林可持续经营

全球气候以前所未有的速度和规模发生变化,国际社会出台了《联合国气候变化公约》、《京都协议书》、

《巴黎协定》等一系列应对气候变化的政治协议,习近平总书记于 2020 年提出“双碳目标”以减缓气候变化,即 2030 年前达到二氧化碳排放峰值,2060 年前实现碳中和。党的二十大报告明确坚持先立后破,立足我国能源资源禀赋,有计划实施碳达峰行动,提升生态系统碳汇能力。未来需要基于已有的未来气候情景和长期动态监测样地数据,加强实际样地样点调查、获取乔灌木等多元定量数据并融合遥感影像等高分辨率数据,探索更精准的预测模型,减少不确定性和偏差,更好指导实践;全面考虑当前和未来不同时间、不同尺度的降水、温度、风速、光照、极端天气事件(干旱、洪涝、雪灾)等多种气候因子动态变化,森林生长过程中森林特征属性、环境因素、管理干扰的变化和不确定性,以及植被对气候变化的滞后效应,更准确反应不同森林生态系统服务对不同气候变化的响应,推行增强气候韧性的森林可持续经营标准、技术、模式,增强森林生态系统多种服务。

3.4 坚持系统观念精准提升森林质量

党的十八大以来,习近平总书记提出“坚持系统观念”、指出“系统观念是具有基础性的思想和工作方法”,并发表一系列论述和要求。党的二十大报告中明确指出“坚持系统观念”,即用普遍联系、全面系统、发展变化的观点观察事物,把握好全局和局部、当前和长远、宏观和微观、主要矛盾和次要矛盾、特殊和一般的关系,在统筹兼顾中实现协同发展,在扬长补短中提升整体效能,促进生态经济社会发展更协调、稳定^[66]。我国森林依旧面临总量不足、分布不均、人工林质量差、天然林低质化和生态脆弱等问题,乔木林平均蓄积只有德国等发达国家的三分之一^[67]。2016 年以来,我国坚持推进森林数量和质量并重,全面实施森林质量精准提升工程,着力提高森林质量与效益,充分发挥森林多种功能,构建健康稳定优质高效的森林生态系统。坚持系统观念的森林经营是精准提升森林质量与发挥森林生态系统多种服务的根本途径^[67]。塞罕坝林场坚持系统观念提升森林质量,按照山水林田湖草沙一体化保护和系统治理要求,实现“全系统全要素”保护、“统筹协调、集团作战”治理模式,确立人工林可持续经营路线,打造了森林质量精准提升样板。今后,从森林生长全周期出发,采取实地调查、问卷调查和遥感等方式获取森林自然属性、地形因子、气候因子、经济因素、社会偏好、政府政策、人类干扰、抚育措施等多维度数据,结合先进模型工具系统确定森林主导功能,统筹兼顾多种森林功能,切实加强森林经营,不断提升森林质量和森林生态系统多种效益,构建更科学、更合理的森林多目标可持续经营方案或决策指南。同时,完善基础设施、引入新技术、加强森林全面监测、培养一批森林经营“工匠”人才,构建森林经营数字化、智能化平台,打造森林管理全过程的可视化、智慧化决策支持系统。探索生态产品价值实现机制与路径,建立科学、权威的森林价值评估与审核方法;因地制宜开展森林可持续经营,调动林业经营者积极性。

3.5 完善森林经营的技术规程、标准和政策体系

科学合理的森林经营技术规程、法律和政策体系,有助于协同推进森林生态系统多种服务。基于森林资源属性特征,今后需要尽快研究并制定以实现森林生态系统多种服务最优化为目标的全国性森林可持续、多功能经营的规程标准和政策制度;同时,加大科研力度,建立区域性、地方性森林可持续和多功能经营技术标准。结合资源动态变化、经济效益、经营目标和社会需求,编制适合新时代需求的新型森林经营方案,补充主要树种抚育技术措施,定期修订相关法律、法规、技术标准,并从国家层面继续推行“揭榜挂帅”,鼓励开展森林经营、林草良种专项技术攻关,加快科技研发和成果转化,为协同提升森林生态系统多种服务和推进森林可持续经营提供支撑。

参考文献(References):

- [1] Hao X, Ouyang W, Zhang K H, Wan X Y, Cui X T, Zhu W H. Enhanced release, export, and transport of diffuse nutrients from litter in forested watersheds with climate warming. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155897.
- [2] Mina M, Bugmann H, Cordonnier T, Iraischek F, Klopčič M, Pardos M, Cailleret M. Future ecosystem services from European Mountain forests under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(2): 389-401.
- [3] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, Liu Y H, Bohnett E, Zhang K B. Optimizing stand structure for tradeoffs between overstory and understory

- vegetation biomass in a larch plantation of Liupan Mountains, Northwest China. *Forest Ecology and Management*, 2019, 443: 43-50.
- [4] 徐来仙, 姚兰, 郭秋菊, 艾训儒, 朱江. 鄂西南利中盆地马尾松天然次生林森林健康评价. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2021, 41(3): 69-77.
- [5] Atin V, Ibrahim A L, Lintang W J. Food security and Sustainable Forest Management (SFM) implementation at the Forest Management Unit (FMU) level: a case study in Salarom Taka, Nabawan, Sabah. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1053(1): 012015.
- [6] Dai E F, Wang X L, Zhu J J, Tian Q. Quantifying co-benefits and trade-offs between forest ecosystem services in the Gan River Basin of South China. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8271.
- [7] Buotte P C, Law B E, Ripple W J, Berner L T. Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications*, 2020, 30(2): e02039.
- [8] Njana M A, Mbilinyi B, Eliakimu Z. The role of forests in the mitigation of global climate change: empirical evidence from Tanzania. *Environmental Challenges*, 2021, 4: 100170.
- [9] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, Xu D L, Wang L, Ye X, Yang Y, Huang X F. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 218-229.
- [10] Wu S Y, Li S C. Ecosystem service relationships: formation and recommended approaches from a systematic review. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 1-11.
- [11] 兰洁, 雷相东, 张毓涛. 天山中部雪岭云杉林多功能权衡与协同关系. *林业科学*, 2019, 55(11): 9-18.
- [12] 吴炜, 项文化, 勾蒙蒙, 徐传洪, 欧阳帅, 方晰. 中亚热带 3 种次生林生态系统服务权衡与协同. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 256-264.
- [13] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [14] Lan J, Lei X D, He X, Gao W Q, Guo H. Stand density, climate and biodiversity jointly regulate the multifunctionality of natural forest ecosystems in northeast China. *European Journal of Forest Research*, 2023, 142(3): 493-507.
- [15] 刘闵. 1992—2015 年气候变化和人类活动对中国生态系统服务功能权衡及协同关系的影响[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.
- [16] 张静静, 朱文博, 朱连奇, 李艳红. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析. *地理学报*, 2020, 75(5): 975-988.
- [17] 冯琦雅, 陈超凡, 覃林, 何亚婷, 王鹏, 段艺璇, 王雅菲, 何友均. 不同经营模式对蒙古栎天然次生林林分结构和植物多样性的影响. *林业科学*, 2018, 54(1): 12-21.
- [18] Larsson Ekström A, Bergmark P, Hekkala A M. Can multifunctional forest landscapes sustain a high diversity of saproxylic beetles? *Forest Ecology and Management*, 2021, 490: 119107.
- [19] 兰洁, 雷相东, 何潇, 高文强, 李玉堂. 吉林省天然阔叶混交林生态系统多功能性及驱动因素. *生态学报*, 2021, 41(13): 5128-5141.
- [20] Potterf M, Eyvindson K, Blattert C, Burgas D, Burner R, Stephan J G, Mönkkönen M. Interpreting wind damage risk-how multifunctional forest management impacts standing timber at risk of wind felling. *European Journal of Forest Research*, 2022, 141(2): 347-361.
- [21] Mo W B, Zhao Y L, Yang N, Xu Z G. Ecological function zoning based on ecosystem service bundles and trade-offs: a study of Dongjiang Lake Basin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(14): 40388-40404.
- [22] Triviño M, Pohjannies T, Mazziotto A, Juutinen A, Podkopaev D, Le Tortorec E, Mönkkönen M. Optimizing management to enhance multifunctionality in a boreal forest landscape. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(1): 61-70.
- [23] Cademus R, Escobedo F, McLaughlin D, Abd-Elrahman A. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in *Pinus elliottii* forests in southeastern USA. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [24] Meyer M A, Schulz C. Do ecosystem services provide an added value compared to existing forest planning approaches in Central Europe? *Ecology and Society*, 2017, 22(3): 6.
- [25] Vítková L, Bače R, Kjučukov P, Svoboda M. Deadwood management in Central European forests: key considerations for practical implementation. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 394-405.
- [26] Cueva J, Almeida Yakouchenkova I, Fröhlich K, Dermann A F, Dermann F, Köhler M, Grossmann J, Meier W, Bauhus J, Schröder D, Sardemann G, Thomas C, Carnicero A R, Saha S. Synergies and trade-offs in ecosystem services from urban and periurban forests and their implication to sustainable city design and planning. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 82: 103903.
- [27] Rana E, Thwaites R, Luck G. Trade-offs and synergies between carbon, forest diversity and forest products in Nepal community forests. *Environmental Conservation*, 2017, 44(1): 5-13.
- [28] Li S Y, Tang Z Y, Zhang A, Wang A H, Qi L. Trade-offs and synergies between plant species diversity and water retention capacity of *Pinus massoniana* plantation community in Danjiangkou Reservoir area. *Forests*, 2022, 13(12): 2081.

- [29] Powers B F, Ausseil A G, Perry G L W. Ecosystem service management and spatial prioritisation in a multifunctional landscape in the Bay of Plenty, New Zealand. *Australasian Journal of Environmental Management*, 2020, 27(3): 275-293.
- [30] Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, Manning P, van der Plas F, Boch S, Prati D, Ammer C, Schall P, Gossner M M, Bauhus J, Buscot F, Blaser S, Blüthgen N, de Frutos A, Ehbrecht M, Frank K, Goldmann K, Hänsel F, Jung K, Kahl T, Nauss T, Oelmann Y, Pena R, Polle A, Renner S, Schlöter M, Schöning I, Schrumpf M, Schulze E D, Solly E, Sorkau E, Stempfhuber B, Tschapka M, Weisser W W, Wubet T, Fischer M, Allan E. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nature Communications*, 2018, 9: 4839.
- [31] Lafond V, Cordonnier T, Mao Z, Courbaud B. Trade-offs and synergies between ecosystem services in uneven-aged mountain forests: evidences using Pareto fronts. *European Journal of Forest Research*, 2017, 136(5): 997-1012.
- [32] Feng J Y, Chen F S, Tang F R, Wang F C, Liang K A, He L Y, Huang C. The trade-offs and synergies of ecosystem services in Jiulianshan national nature reserve in Jiangxi Province, China. *Forests*, 2022, 13(3): 416.
- [33] Başkent E Z. Assessment and valuation of key ecosystem services provided by two forest ecosystems in Turkey. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112135.
- [34] Naime J L, Mora F, Sánchez-Martínez M, Arreola F, Balvanera P. Economic valuation of ecosystem services from secondary tropical forests: trade-offs and implications for policy making. *Forest Ecology and Management*, 2020, 473: 118294.
- [35] Eguiguren P, Ojeda Luna T, Torres B, Lippe M, Günter S. Ecosystem service multifunctionality: decline and recovery pathways in the Amazon and chocó lowland rainforests. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7786.
- [36] Bisseleua D, Hervé B, Vidal S. Plant biodiversity and vegetation structure in traditional cocoa forest gardens in southern Cameroon under different management. *Biodiversity and Conservation*, 2008, 17(8): 1821-1835.
- [37] Wan P, Zhang G Q, Wang H X, Zhao Z H, Hu Y B, Zhang G G, Hui G Y, Liu W Z. Impacts of different forest management methods on the stand spatial structure of a natural *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolongshan, China. *Ecological Informatics*, 2019, 50: 86-94.
- [38] Ming A G, Yang Y J, Liu S R, Nong Y, Li H, Tao Y, Sun D J, Lei L Q, Zeng J, An N. The impact of near natural forest management on the carbon stock and sequestration potential of *Pinus massoniana* (Lamb.) and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) hook. plantations. *Forests*, 2019, 10(8): 626.
- [39] 陈明辉, 惠刚盈, 胡艳波, 张弓乔, 张岗岗, 刘瑞红, 杨媛铭, 赵中华, 王海滨. 结构化森林经营对东北阔叶红松林森林质量的影响. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 19-30.
- [40] Pang X, Nordström E M, Böttcher H, Trubins R, Mörtberg U. Trade-offs and synergies among ecosystem services under different forest management scenarios-the LECA tool. *Ecosystem Services*, 2017, 28: 67-79.
- [41] Duncker P S, Raulund-Rasmussen K, Gundersen P, Katzensteiner K, De Jong J, Ravn H P, Smith M, Eckmüllner O, Spiecker H. How forest management affects ecosystem services, including timber production and economic return: synergies and trade-offs. *Ecology and Society*, 2012, 17(4): 50.
- [42] Condé T M, Tonini H, Higuchi N, Higuchi F G, Lima A J N, Barbosa R I, dos Santos Pereira T, Haas M A. Effects of sustainable forest management on tree diversity, timber volumes, and carbon stocks in an ecotone forest in the northern Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, 2022, 119: 106145.
- [43] Eyvindson K, Dufflot R, Triviño M, Blattner C, Potterf M, Mönkkönen M. High boreal forest multifunctionality requires continuous cover forestry as a dominant management. *Land Use Policy*, 2021, 100: 104918.
- [44] Nölte A, Meilby H, Yousefpour R. Multi-purpose forest management in the tropics: incorporating values of carbon, biodiversity and timber in managing *Tectona grandis* (teak) plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 345-357.
- [45] Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, Jonsson M, Gustafsson L, Kjellander P, Ruiz-Jaen M C, Fröberg M, Stendahl J, Philipson C D, Mikusiński G, Andersson E, Westerlund B, Andrén H, Moberg F, Moen J, Bengtsson J. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 2013, 4: 1340.
- [46] Koenig H J. Multifunctional forest management in Guyuan: potentials, challenges and trade-offs. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(4): 300-310.
- [47] Jafarzadeh A A, Mahdavi A, Shamsi S R F, Yousefpour R. Assessing synergies and trade-offs between ecosystem services in forest landscape management. *Land Use Policy*, 2021, 111: 105741.
- [48] Bugmann H, Cordonnier T, Truhetz H, Lexer M J. Impacts of business-as-usual management on ecosystem services in European Mountain ranges under climate change. *Regional Environmental Change*, 2017, 17(1): 3-16.
- [49] Thrippleton T, Temperli C, Krumm F, Mey R, Zell J, Stroheker S, Gossner M M, Bebi P, Thürig E, Schweier J. Balancing disturbance risk and ecosystem service provisioning in Swiss Mountain forests: an increasing challenge under climate change. *Regional Environmental Change*, 2023, 23(1): 29.

- [50] Morán-Ordóñez A, Ameztegui A, De Cáceres M, de-Miguel S, Lefèvre F, Brotons L, Coll L. Future trade-offs and synergies among ecosystem services in Mediterranean forests under global change scenarios. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101174.
- [51] Gutsch M, Lasch-Born P, Kollas C, Suckow F, Reyer C P O. Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 045012.
- [52] Bicknell J E, Struebig M J, Davies Z G. Reconciling timber extraction with biodiversity conservation in tropical forests using reduced-impact logging. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(2): 379-388.
- [53] Rodrigues A R, Botequim B, Tavares C, Pécurto P, Borges J G. Addressing soil protection concerns in forest ecosystem management under climate change. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(3): 34.
- [54] Bottalico F, Pesola L, Vizzari M, Antonello L, Barbati A, Chirici G, Corona P, Cullotta S, Garfi V, Giannico V, Laforzezza R, Lombardi F, Marchetti M, Nocentini S, Riccioli F, Travaglini D, Sallustio L. Modeling the influence of alternative forest management scenarios on wood production and carbon storage: a case study in the Mediterranean region. *Environmental Research*, 2016, 144: 72-87.
- [55] Millington J D A, Walters M B, Matonis M S, Liu J G. Modelling for forest management synergies and trade-offs: northern hardwood tree regeneration, timber and Deer. *Ecological Modelling*, 2013, 248: 103-112.
- [56] Gonzalez-Redin J, Gordon I J, Hill R, Polhill J G, Dawson T P. Exploring sustainable land use in forested tropical social-ecological systems: a case-study in the Wet Tropics. *Journal of Environmental Management*, 2019, 231: 940-952.
- [57] 郭宁. 内蒙古喀喇沁旗旺业甸实验林场多目标可持续森林经营方案设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [58] Orsi F, Ciolli M, Primmer E, Varumo L, Geneletti D. Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104840.
- [59] 邓文文. 基于木材生产和固碳权衡的森林经营措施空间优化研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [60] Gu Y Y, Lin N F, Ye X, Xu M J, Qiu J, Zhang K, Zou C X, Qiao X N, Xu D L. Assessing the impacts of human disturbance on ecosystem services under multiple scenarios in Karst areas of China: insight from ecological conservation red lines effectiveness. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109202.
- [61] 韩新生. 六盘山半干旱区三种典型植被的结构变化及其多功能影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [62] 田奥. 六盘山半湿润区华北落叶松人工林的多种功能时空变化与优化管理[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019.
- [63] 杨培松. 基于森林自然度的多功能经营模式研究——以靖州排牙山国有林场为例[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [64] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平: 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 2022-10-25 [2023-05-25]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [65] 安岩, 顾佰和, 王毅, 谭显春, 翟寒冰. 基于自然的解决方案: 中国应对气候变化领域的政策进展、问题与对策. *气候变化研究进展*, 2021, 17(2): 184-194.
- [66] 人民网. 习近平: 坚持系统观念法. 2022-11-24 [2023-05-26]. <http://politics.people.com.cn/n1/2022/1124/c1001-32573627.html>.
- [67] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 赵秀海, 胡雪凡. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究. *北京林业大学学报*, 2019, 41(5): 1-18.