

DOI: 10.5846/stxb202006221617

黄麟.森林管理的生态效应研究进展.生态学报, 2021, 41(10): 4226-4239.

Huang L. Research progress on the ecological effects of forest management. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4226-4239.

森林管理的生态效应研究进展

黄 麟*

中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101

摘要: 森林管理是实现森林生产效益最大化的主要措施, 是增加碳吸收以减缓气候变暖的关键手段, 是调节区域水文循环的有效途径, 是保护地以外实现生物多样性保护目标的重要补充。然而, 追求单一生产功能的传统森林管理弱化了其他生态功能, 并对森林景观结构和生物多样性产生负面影响。全球 80% 以上森林由于人类活动呈现不同程度退化进而影响人类福祉, 森林管理需要优化以追求多维生态功能的协同共赢。当前, 对于森林管理的生态效应仍有较多争论或未形成明确认识, 可持续森林管理能否取得额外的气候效益仍有待确认, 森林管理如何影响不同区域的水文生态功能仍未形成明确认识, 不同类型森林管理或多或少、或正面或负面影响栖息地及不同种类生物多样性的强度和方向不明确。因此, 森林管理的生态效应是一个值得深入探索的问题, 未来需要深入量化不同管理措施对气候变化缓解、水文循环调节、生物多样性保护乃至提供其他生态功能的作用, 将维持或提升生态功能及生物多样性作为可持续森林管理的一个重要目标, 通过优化森林管理策略开展森林提质增效以获得最大收益。

关键词: 森林管理; 缓解气候变化; 调节水文循环; 保护生物多样性; 生态效应权衡

Research progress on the ecological effects of forest management

HUANG Lin*

Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Forest management is considered to be the main measurement to maximize the benefit of forest commodity production, and the key method to increase carbon absorption to mitigate climate warming. It is also the effective way to regulate regional hydrological cycle, and the important supplement to achieve the goal of global biodiversity conservation besides the protected areas. However, the traditional forest management, which pursues a single production function, weakens other ecosystem functions and services, and has negative impacts on the forest landscape and biodiversity. More than 80% of the world's forests have different degrees of degradation due to human activities, and thus affects human well-beings. Therefore, it is necessary to transfer from traditional forest management to optimizing forest management. The optimizing forest management can promote multi-dimensional functions of ecological, economic, social and cultural aspects, and can achieve the "win-win" goals of wood production, biodiversity conservation, climate mitigation, hydrological regulation and other ecosystem functions. In this paper, we briefly reviewed the research progress on the ecological effects of forest management. At present, there are still many controversies about the ecological effects of forest management, or have not formed a clear understanding. Whether sustainable forest management can achieve additional climate benefits, and whether it can achieve climate mitigation goals, remains to be confirmed. How forest management impacts runoff and water quality in different regions has not been clearly recognized, which is an important issue worthy of in-depth and comprehensive analysis. Furthermore, the more or less intensity, and positive or negative impacts from different types of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977417, 41371019); 国家重点研发计划课题 (2017YFC0506503)

收稿日期: 2020-06-22; **网络出版日期:** 2021-03-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huanglin@igsnrr.ac.cn

forest management on habitat and biodiversity are unclear. It is necessary to quantify the impacts of different management measurements on the forest animals, plants and microorganisms, and to maintain or improve biodiversity as an important goal of sustainable forest management. Therefore, how to optimize the forest management to obtain the maximum benefits is a research focus worthy of further exploration. In the future, it is necessary to quantify the effects of different forest management measurements on climate change mitigation, hydrological regulation, biodiversity conservation, and other ecosystem functions.

Key Words: forest management; climate mitigation; hydrological regulation; biodiversity conservation; tradeoffs of ecosystem services

人类活动大幅度改变了地球四分之三陆地表面覆盖和自然生态过程,使全球土地资源支持人类福祉和生物多样性的能力不断下降^[1],有限土地资源促使土地管理强度不断增加,以更好地满足社会对粮食、纤维、燃料和住房的需求^[2]。自几百年前,森林的主要功能被定义为向人类社会持续提供木材及其它林产品,森林管理应用于提高木材产量以及追求林产品生产效益最大化^[3],林业从天然林皆/择伐到短轮伐期人工林集约经营,为全球和区域经济做出了贡献^[4]。传统森林管理侧重同质林分和高经济价值树种,营造速生纯林,轮伐期作业,树种组成单一、垂直分层均匀^[5-6]。近几十年,人们认识到除了增加收入和提高民生以外^[7],森林作为重要陆地生态系统,在维持物种生存、缓解气候变化、提供清洁水源、游憩等方面的关键作用^[8-10]。然而,全球 80% 以上森林由于人类活动而发生不同程度退化^[11],森林需要优化管理以达到生态、经济、社会、文化等多维功能需求。生态文明建设中,山水林田湖草统筹治理理念下,如何在有限林地空间通过优化管理以提升关键生态功能,是当前生态保护修复一个亟待解决的科学问题,森林管理实现经济效益的实践趋于成熟,而对其生态效应的研究和实践较为零散,仍有较多争论或未形成明确认识,难以直接应用于生态监测与评估。本文综述了森林管理生态效应的研究现状,总结了研究中存在的争议并展望了未来研究要点。

1 森林管理的内涵与现状

通过管理维持森林生产和生态功能的意识由来已久,17 世纪,欧洲的 Evelyn 和 Colbert 注意到森林过度利用对持续提供森林产品的负面影响。20 世纪初,Gifford Pinchot 认识到公众积极参与可持续森林管理能带来利润^[12]。21 世纪初,可持续森林管理作为一项重要指导原则受到欧洲森林组织、国际热带木材组织、粮食及农业组织等国际组织的鼓励并予以实践。欧洲的自然导向林业、近自然林业,美国生态林业,加拿大的基于自然干扰管理,南美和澳洲的保留性林业,东南亚的减少影响采伐,以及我国的多功能森林经营^[13],部分森林得到了优化管理^[14]。无论传统或优化的森林管理,皆通过改变树种组成、林分结构、林下生物多样性等,影响土壤、小气候、水分循环,进而产生或正面或负面的生态、经济、社会、文化效应^[15-16]。

不同国家、地区、行业对于森林管理概念及其内涵的理解差异较大,《联合国气候变化框架公约》等国际组织将其定义为可持续地实现森林相关的生态、经济和社会功能,生态学者强调其结构与功能的稳定性、系统性,而行业管理部门偏重资源及其生产功能。由于日益增长的林木产品需求与保持健康生态环境之间的矛盾,在不损害未来利益的前提下,如何通过管理获得现有利益是可持续森林管理面临的巨大挑战^[17]。因此,新时代森林管理应该通过人类干预实现可持续地森林资源永续利用和生态功能协同提升,意味着一方面需要提升森林生态系统自我更新和优化的潜力,另一方面需要保证森林生态系统健康和生物多样性。

全球已纳入森林管理或已制定管理计划的国家越来越多,1953 年全球森林调查时,约 27% 森林纳入管理计划,2010 年达到 70%,2015 年 95% 以上森林制定了管理相关计划,其中欧洲、亚洲、北美洲和中美洲的大多数森林都纳入森林管理计划。寒带和温带地区分别有 87% 和 63% 纳入可持续管理,而热带和亚热带地区均低于 28%。森林管理国际认证大幅增加,其中 90% 在寒带和温带,而热带仅 6%。从森林管理计划中纳入水土管理、社会/社区参与管理、划定高保护价值森林 3 项管理需求的统计来看(图 1),60% 以上国家将水土管

理纳入森林管理计划,90%以上则将划定高保护价值森林作为主要内容^[12,17]。

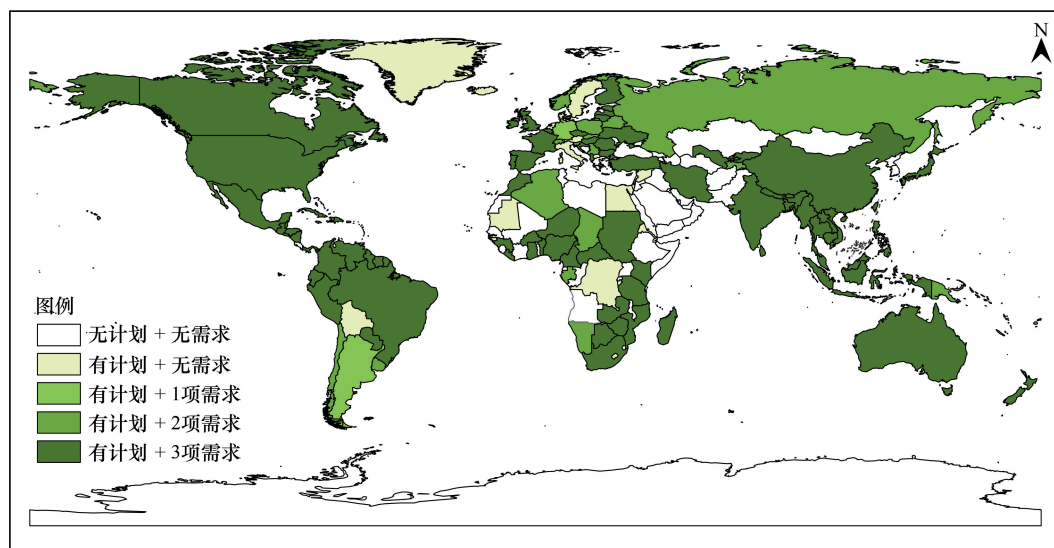


图1 全球森林管理计划及需求的国别差异^[17]

Fig.1 Countries with requirements (soil and water management, social considerations/community involvement, high conservation value forest delineation) in forest management plans^[17]

3项管理需求内容为:水土管理、社会/社区参与管理、划定高保护价值森林

2 森林管理研究历史进程

通过文献计量分析可以揭示森林管理研究的历史发展进程及不同时期研究内容与目标的差异。在 Web of Science 与 CNKI 检索篇名或主题词包含“Forest management”和“森林管理”的文献,数量分别为 10038 篇和 17645 篇。从图 2 可以看出,自 1890 年开始,国外已有森林管理文献发表,至 20 世纪 40 年代,主要介绍国际上森林管理状况;20 世纪 50、60 年代,关注森林经营管理及其对木材产业的影响;20 世纪 70、80 年代,开始关注森林管理对社会经济、环境、生物多样性的影响以及卫星遥感的应用;20 世纪 90 年代,关注森林管理对水、土、气、生各要素的影响;21 世纪初 10 年,综合、可持续、精细地森林管理发展迅速,其景观游憩、固碳与气候缓解、涵养水源等生态效应研究成为热点;2010 年至今,聚焦优化森林管理对于促进森林生态系统多项功能及其服务能力的综合生态效益。可以看出,森林管理研究目标从生产到生态的转变,以及新时代森林管理聚焦的水、土、气、生物多样性等关键生态效应,涉及的管理措施包括造林、原始林改为次生林或人工林、采伐、清除采伐残余、整地、氮素添加、树种改造、林分密度管理与间伐、林火管理等。

中国于 20 世纪 60 年代开始发表森林管理相关研究文献,至 20 世纪 80 年代,以森林管理与工业采伐、林业经济的关系作为核心,20 世纪 90 年代以可持续经营、参与性经营、分类经营作为森林多效益主线,21 世纪初 10 年,推动了国内近自然多功能森林生态系统经营,探索资源利用与公益林管理的平衡模式,关注森林管理的碳汇效应。2010 年至今,多目标森林管理成为森林生态恢复及其质量提升的焦点。近几十年,我国学者或林业工作者依托林场或森林生态系统定位观测站,在四川米亚罗、江西大岗山、湖南会同、甘肃白龙江、江苏溧水、广西大青山、浙江临安、福建将乐、吉林汪清、河北塞罕坝与木兰围场、北京延庆和密云、陕西火地塘与黄龙山、内蒙古蛮汉山、辽宁清原、大兴安岭新林等区域,以云杉 (*Picea asperata* Mast.)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、落叶松 (*Larix*)、华山松 (*Pinus armandii*)、火炬松 (*Pinus taeda*)、湿地松 (*Pinus elliottii*)、柏 (*Cupressus funebris*)、杨树 (*Populus*)、栎 (*Quercus*)、桦 (*Betula*)、桉 (*Eucalyptus*)、椴 (*Tilia*) 等不同树种为研究对象,通过样地控制试

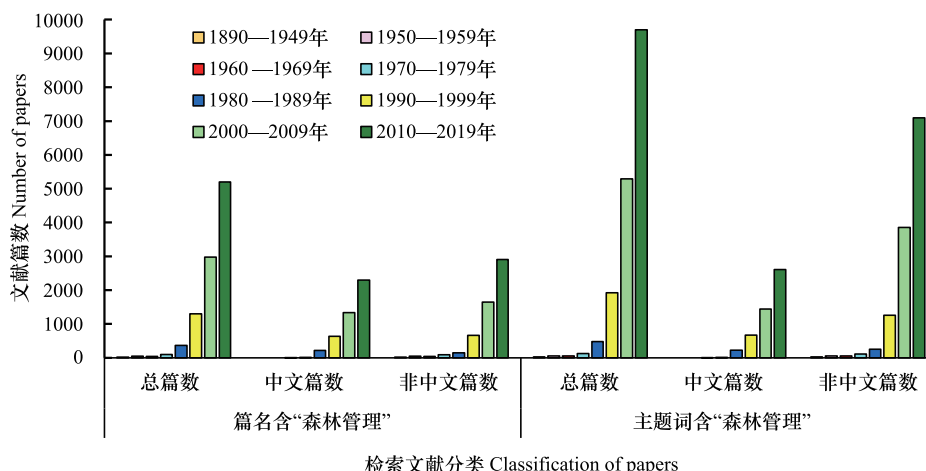


图2 基于文献计量的森林管理论文发表量年代际变化趋势

Fig.2 Interdecadal variations of the number of papers published on forest management based on bibliometrics

验,研究了采伐、混交、密度调控、抚育间伐、林火管理等不同管理措施对林分生长因子与生产力、气象因子、碳水循环、土壤理化性状、林下植被、凋落物、动物与微生物、生物多样性乃至林分天然更新等的影响研究。

3 森林管理生态效应的研究现状

森林管理改变森林植被-土壤-大气界面及其生物地球物理和生物地球化学过程,影响光、水、热、能量交换等自然特征和过程,从而影响森林生态系统的功能及其服务效应,特别是产品供给、碳固定、水源涵养、生物多样性保护效应。这些生态效应因地理位置、气候背景、立地条件、林分特征等具有极大差异。

3.1 森林管理的产品供给效应

森林以供给木材产品为主,随着生态公益林比例大幅提升、用材林面积缩小,人类对林木产品和生态服务需求之间的矛盾凸显。如何通过森林管理,在保证生态功能不下降甚至提升的前提下,提高木材供给量是林业面临的一大挑战。立地条件、林地类型、树种组成、林龄、株密度等是造成林木产品产量差异的主要因素^[18]。因此,林分结构调控是森林管理的核心内容,直接关系到森林生产力及其稳定性。林分密度影响林木的生长和竞争,从而影响林分生物量积累,为了得到合理的林分密度,根据不同林龄、树种和立地条件采取适宜的抚育间伐、择伐措施,充分发挥每株树木的生长潜力,最大限度地利用林地生产力并保证森林最大连续生长量,增加林分组成和结构的多样性。比如,亚马逊地区森林密度管理使得木材产量高出 36%—50%^[19]。

混交是通过疏伐补植调整林分的水平分布格局、树种组成比例,将纯林改造为异龄、多物种近自然林分,促进森林生长和演替进程^[20-22],必然改变林分生产力、物种多样性和地下生态过程,改善土壤理化性质^[23],随着树种丰富度增加可提高木材产品产量^[24-25]。此外,确定合理轮伐期有助于维持人工林生产力的持久性,较短的采伐周期、较低的采伐强度、轮换采伐树种有利于促进森林木材的可持续生产^[26]。采伐方式与强度可能改变森林的结构和土壤水热条件从而影响林分生物量和生产力^[27],因此,不同林龄阶段需采用不同强度抚育间伐以促进生长。

3.2 森林管理的碳固定效应

适当地森林管理被认为是增加生物量碳储量^[14,28-29]、提高二氧化碳吸收量^[30]以缓解气候变化的关键手段和有效途径^[31-32]。防火、防病虫害、森林更新、幼林抚育、采伐剩余物和枯死木管理等^[33]产生的碳汇可适当抵消温室气体减排指标。大面积幼龄林是持续地碳汇,可持续管理可能会增加更多的碳吸收,对土壤碳的影响大于植被碳^[34]。因此,要使人工造林具备天然林缓解气候的能力,必须优化管理以增强其碳汇能力^[31]。通过优化物种组成、间伐或疏伐等低强度的管理措施可以维持或增加林分水平的碳密度,通过延长轮伐期、火

灾管理和病虫害防治可以维持或增加景观水平的碳密度^[35]。

采伐使温带森林植被碳储量减少 30%,硬木林的碳损失(36%)大于针叶林或针阔混交林(20%)^[36]。由于立地条件、土壤类型、林分特征、采伐方案、取样深度等因素,采伐对土壤碳的影响存在差异,通常使土壤碳储量平均减少 11.2%^[37],表层土壤碳(0—15cm)减少 3.3%,深层土壤碳(60—100cm)减少 17.7%^[38],原因是伐后林内高光、高温小气候刺激微生物呼吸、凋落物输入减少或更快分解^[39]。土壤碳储量在伐后 1—5 a 开始恢复^[36-37,40]。不同采伐方式的影响具有差异,全树采伐(WTH)导致土壤碳储量减少 6—10%^[40],而纯茎采伐(SOH)或增加 18%^[41]或无影响^[42-43],择伐可以减少与皆伐相关的土壤碳损失,因此,采伐 9a 后的 WTH 迹地是净碳源,而择伐迹地是净碳汇^[44]。此外,清除采伐残留物导致表层土壤碳损失 10%—45%,甚至>20cm 土壤碳储量损失 10%^[40]。总之,采伐对深层土壤碳的影响存在极大不确定性,对伐后土壤碳损失及其恢复的非生物和生物机理仍需深入了解^[38]。

密度控制对土壤碳储量的影响有较大差异,有研究得出高密度林分比低密度的土壤碳储量高,则高密度会增加土壤碳^[45],有研究认为高密度比低密度的土壤碳储量低,故而高密度减少土壤碳^[46],也有试验认为密度对碳储量的影响不明显^[47]。抚育间伐对土壤碳储量的影响可能不显著^[40,44],也可能导致土壤碳损失^[48-49]。比如,强度低于 33%的轻度间伐使土壤碳增加 17%,而不超过 65%的重度间伐使土壤碳减少 8%^[50]。土壤碳在间伐后早期(≤ 2 a)由于分解导致土壤碳损失 30%,但在伐后中期(2—5 a)到后期(>5 a)可恢复至未间伐林分水平^[38]。

林分混交能够提供更多生态系统服务并适应气候变化^[8,51]。由于地上和地下生态位互补性、地上地下凋落物输入更多,混交林可更稳定地增加土壤碳储量。此外,混交林对气候干扰具有更大的复原力,有助于长期保持土壤碳储量^[52]。亚热带针阔混交林 0—20cm 土壤碳储量分别比马尾松和红栲人工纯林高 14%和 8%,土壤温室气体净排放量也低于人工纯林^[21]。此外,物种多样性对土壤碳储量的影响比树种性状或功能群的影响小且不一致,其影响结果与环境有关^[53]。因此,为了有效利用资源,有针对性地选择具有互补特性的树种,既影响土壤碳储量,也增加树种多样性^[38]。

3.3 森林管理的水源涵养效应

管理引起林分、土壤结构变化,影响森林对大气降水再分配过程和水质状况,进而影响水源涵养功能及效应。林分尺度表现为拦蓄降水,量化指标包括林冠层的穿透雨量/率、林冠截留量/率、树干径流量/率,土壤层的土壤含水率、土壤持水量、毛管/非毛管/总孔隙度,枯落物层的自然持水率、最大持水量/率、有效拦蓄量等^[54]。森林管理对林分水源涵养功能的作用与其措施类型和强度、观测时间、森林不同组成部分有关。抚育间伐与封山育林均能促进天然林持水能力,但前者作用更显著^[55]。不同抚育强度的影响不同,森林水文生调节能随着强度的增加基本呈现先增大后减小的趋势,中度抚育使得土壤和枯落物的最大持水量/率增加最多,水文功能最好^[54,56]。混交也影响林分水源涵养能力,油松侧柏与沙棘混交林的枯落物层持水量是纯林的 6.6 倍,平均容水量比纯林提高了 15.6%,最大、最小和毛管持水量分别比纯林高了 11%、9.8%、10.5%,储水量比纯林提高了 12.4%^[57]。

采伐或间伐对森林冠层水源涵养能力具有显著负效应,郁闭度每降低 10%,林冠截留率下降 3%左右^[58]。间伐可以改善土壤物理性质及其持水性能,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,提高土壤初/稳渗率^[59],增加土壤入渗量/率^[60],从而提高土壤水源涵养功能^[56]。也有研究表明,间伐破坏土壤结构^[61-62],伐后土壤容重显著增大,总/毛管孔隙减小而非毛管孔隙增大,土壤自然/毛管持水量、最小和最大持水量皆显著下降^[63],降低了土壤蓄水能力^[64]。间伐方式、强度和伐后恢复时间显著影响冠层截留能力,同时由于间伐造成林冠下层植物结构、组成和生物多样性的变化,导致林冠下层的水源涵养功能在短期内表现为降低趋势,但在伐后随着林下植被增加有所恢复^[65]。轻度间伐对枯落物量和最大持水量无显著影响,能够提高凋落物层水源涵养能力^[66],也有研究认为中等强度间伐能够促进针叶林凋落物分解,进而提高凋落物层的水源涵养功能^[67],而皆伐后凋落物量及最大持水量均以 50%以上的幅度降低^[58]。伐后恢复时间极大影响上述结论,间伐后凋落物

量明显下降,持水量及降水拦蓄量均显著降低^[68],有研究表明伐后 10 a,间伐强度 40% 的森林水文性能最佳^[69]。

流域尺度的森林水源涵养能力表现为水量和水质调节,通过调节水量实现对河川径流量的削洪补枯,一般利用管理和未管理森林的径流量和水质对比实现量化。有研究认为间伐和皆伐均能显著促进流域河川年径流量的增加^[65,70],特别是显著增加洪峰流量和融雪径流量^[71]。也有研究认为管理与河川径流量之间关系不显著或表现为负相关^[63]。此外,混交可以显著地减少地表径流,油松侧柏与沙棘混交林年均产生地表径流次数比纯林减少近 20 次,年均径流量比纯林减少了 90%^[57],将天然林或次生林改造为纯林则会大大减少径流总量,落叶阔叶林比常绿针叶林能产生更高的年径流量,也能控制洪水流量^[70]。森林管理对水质调节的影响在前苏联、日本、美国和我国有少量研究,采伐后森林硝态氮等氮元素流失量显著增加,溪水径流中生化需氧量和氮含量分别增加 1.7 倍和 2.7 倍^[72]。随间伐强度的增加,林内雨和凋落物层水的 pH 值均呈下降趋势,Cd、Pb 和 Zn 浓度均呈增大趋势,因此,低强度间伐的水质调节效应表现较好^[73]。

3.4 森林管理对生物多样性的影响

完整、原始的天然林对于生物多样性保护具有特殊价值^[11],因为多样、完整的物种组合与功能和系统发育多样性有关^[74]。树种丰富度降低 10%,森林生产力平均降低约 2.7%^[75]。人类活动缩小特有种范围、扩大普通物种分布及生物均质化,强烈威胁森林生物物种多样性^[76],仅依靠保护地不足以实现全球生物多样性保护目标^[77]。森林管理改变生物栖息地及其供给资源的可用性,因管理强度和方向差异而或大或小的影响森林生物多样性^[78-79],比如加强森林管理可能对各种动植物群体产生负面或不显著影响^[6,80]。森林管理对物种丰富度的影响与管理措施有密切关系,有研究得出由好到坏依次为:森林选育保留,减少影响采伐,传统择伐,皆伐,农林复合经营,营造用材林,营造薪材林^[79]。与传统采伐相比,森林选育保留对生物多样性保护的效果较好,特别强调维持物种和结构多样性^[81]。因此,森林管理在保护全球生物多样性方面可发挥重要作用^[79,82]。

森林管理对林下植物多样性的影响结论不一致,一般认为未管理比管理森林含有更多的物种,特别是真菌、苔藓、地衣^[83],也有研究得出管理森林中维管植物的物种丰富度往往更高^[6],还有发现未管理和管理的林下植物多样性差别不大^[84]。抚育方式和强度影响林下植物种类丰富度、密度、盖度以及植被结构。间伐能够提高林下灌木层和草本层植物的丰富度和多样性^[22,85-87],草本层的增加尤其明显^[88]。间伐或可导致草本植物丰度或多样性的长期下降^[89],或降低林下木本植物的丰富度^[90],间伐强度越大,林下植物的种类越丰富,数量增加越明显,密度、盖度和高度也越大^[91-92]。弱度、中度间伐提高了群落物种多样性,而强度间伐则降低了群落物种多样性^[93]。大多数研究认为间伐后林下植物物种多样性比伐前高,是维持树种多样性最好的方式,中度和强度间伐都可促进林下植被的良好发育,随着伐后时间延长,植物种类明显增加^[94]。但是,立地条件同时产生影响,阴坡厚土林在强度间伐后林下植被生物多样性最高,而阳坡薄土和阳坡厚土在中度间伐条件下灌草生物多样性最高^[95]。

森林管理引起森林结构变化从而决定了森林野生动物的种类、数量和分布。采伐可能导致栖息地碎片化,引起枯木、空洞、根盘等小生境的可用性^[6],对昆虫等扩散能力较弱的物种造成严重后果^[96],而线虫和细菌受到的影响较小^[97]。采伐强度与生物多样性和生态系统功能之间呈凹形关系,表明即使是低强度干扰也可能导致敏感的甲虫物种丧失^[98]。采伐强度的增加导致大多数脊椎动物物种丰富度的线性下降,而在低采伐强度下观察到鸟类物种丰富度略有增加^[99]。间伐可能降低鸟类的种类和数量,减少采伐量有望稳定老龄林中鸟类的数量,但迄今为止还不足以扭转其下降趋势^[100]。也有研究认为间伐形成多层郁闭林可以增加鸟类种群数量,低强度间伐增加了食物供给而不危害灵长类动物。择伐后,85%—100%的哺乳动物、鸟类、无脊椎动物和植物物种能够保留^[101]。不同种类对择伐的响应具有差异,鸟类对伐木的敏感性比哺乳动物低,两栖类敏感性与采伐强度有关^[102-103]。此外,森林管理对土壤真菌多样性、酶活性的影响远小于气候、土壤^[104],短期内森林管理强度越高,外生菌根和木材栖息物种的多样性越低^[105],也有研究得出欧洲中部未管理森林

的枯木真菌孢子物种丰富度低于管理森林^[106]。

4 目前研究中存在的争议

4.1 森林管理能否取得额外气候效益进而有助于气候缓解目标

森林管理或许比造林更有助于实现 1.5℃ 或 2℃ 升温控制目标^[30]。然而,对于森林管理缓解气候变化也产生了激烈争论^[14]。传统采伐或择伐导致碳排放增加^[107-108],而减少影响伐木有利于森林恢复^[101,109],可以改善生态系统服务提供^[110],如果实施得当可将择伐造成的全球碳排放量减少 30%^[107,111]。然而,森林管理亦引起地表反照率与粗糙度、生物挥发性有机化合物排放、蒸腾和显热通量等变化,从而导致其获得的碳固定效益被增强、减弱甚至抵消,因此,森林管理可以抵消 CO₂ 排放,但不能阻止全球气温上升^[32,112]。有研究认为,目前不确定欧洲可持续森林管理到 21 世纪末能否减少大气 CO₂ 增加、减少大气顶部辐射不平衡、既不增加近地面气温也不减少降水量^[32]。故而,通过可持续森林管理能否获得额外的气候效益仍有待确认^[14,32]。此外,如果维持目前的森林覆盖率,通过森林管理获得的额外气候效益具有适度性和区域性,而非全球性效益^[32]。

4.2 森林管理是否可以有效调节流域水文生态功能

不同气候、地质、植被和地形环境下,森林管理如何影响河流径流量,目前没有统一结论,有研究认为造林可以降低土壤水分,因而森林采伐或疏伐后产水量普遍增加,径流随之增加^[113],但这种短暂的径流效益通常只持续伐后的几年或最多几十年^[114],也有研究显示相反效果^[115-116]。植被输送的水是下风向区域降水的重要来源,约占大陆降水量的 40%^[117],因此,持续大规模森林采伐可能导致降水减少,但是这种影响的程度和范围仍然难以预测^[118]。森林管理对径流影响的不确定性可能会影响联合国可持续发展目标中关于水资源和森林可持续管理目标的政策制定^[118-119]。此外,森林管理通常会对水质造成一定影响^[120],采伐后泥沙产量通常会增加,但择伐导致泥沙量增加是暂时的、对水质影响也很小^[121]。比如,澳大利亚东南部桉树采伐显著地影响径流量和悬移质产沙量,但对浑浊度的影响不显著^[122]。

4.3 控制森林管理的强度和方向能否发挥生物多样性保护作用

长期以来,气候变化、人类干扰等被认为是影响森林物种多样性的主要因素。最新研究表明,森林管理改变栖息地和资源的可用性,必然对森林生物多样性产生或大或小的影响^[78-79],只是在强度和方向上有所不同。比如,乔木基底面积或土壤微环境最能反映植物区系多样性,基底面积与林下植被多样性呈负相关,土壤微环境与林下植物多样性呈正相关,但是,林分属性和土壤微环境的影响有时取决于森林管理措施类型^[84]。较高的择伐强度会降低生物量和物种丰富度,减少影响采伐对生物丰富度的影响不明确,也可能产生有利结果^[81,107]。从生态保护修复角度而言,我国退耕还林、天然林保护、防护林建设等生态工程以恢复森林为主,生物多样性恢复只是次要考虑因素,然其巨大规模决定这些工程也具备潜力对中国的生物多样性保护产生深远影响^[74],然而,生态工程是否发挥生物多样性保护作用、潜力如何,皆有待深入探索。

4.4 通过优化森林管理是否可以获得生态效应协同共赢

追求单一功能的传统森林管理弱化了其他生态系统服务的提供并对森林景观结构和生物多样性产生负面影响,最终影响人类福祉^[123-124]。鉴于全球对木材持续地巨大需求,仅仅考虑生态系统与生物多样性保护,不考虑或优先考虑木材生产皆是不可行的^[79],需要通过优化的森林管理以减少其对生态系统的负面影响,达到各项生态系统功能与服务的协同提升目标^[31,105,107]。比如,通过更新枯死木或低产林分、保护幼芽不受采伐损害、混交乡土树种、适度森林采伐等,达到保留林分和木材生产的双赢策略^[14,28,74],低强度择伐获得最优生态效应和最差经济收益,高强度择伐相反,而中强度择伐获得中等收益且产生的生态影响最小^[111]。当然,森林管理作为促进森林可持续利用和减少农村贫困的一种协同方式,能否减少森林损失和减轻贫困的争议未有定论^[7]。因此,如何通过改善森林管理获得木材生产、气候缓解和生物多样性等最大收益是值得深入探索的问题^[10,111]。

5 未来研究展望

森林管理改变具有缓冲能力的冠层覆盖及其结构^[78],采伐或间伐形成林窗,可能对森林光照状况、土壤湿度、空气温湿度以及蒸汽压亏缺产生长期影响,进而改变林内小气候和水分分配^[125]。同时,森林管理改变土壤理化性质,进而直接或间接影响土壤碳分解对气候变化的响应以及水文过程^[126]。通过森林管理将低产低效森林恢复至接近本地原始状态的完整天然林,是缓解生物多样性危机、减缓气候变化危害、实现生态服务多维供给与可持续性目标的一个优先选择^[11,127]。综上所述,需要在不同区域、不同时空尺度开展各种森林管理生态效应的观测试验,特别是针对林龄、郁闭度、林分密度、树种组成等不同林分结构,气候、地貌、土壤、水文等不同立地条件,管理与非管理以及封育、间伐、择伐、清除、混交等不同管理措施,以及林下经济、森林火灾与病虫害防治等人为干扰,通过可持续地森林管理提升我国森林质量以及森林的生态、生产功能。

因此,通过对研究进展及目前存在争议的解析,森林管理生态效应未来研究应聚焦如下几个方面:

5.1 优化森林管理以应对气候变化

全球应对气候变化行动下,造林/再造林、减少毁林、森林管理等林业活动的气候变化减缓效应有待优化,对于林业土地利用变化的 CO₂净排放量,IPCC 评估报告的全球模型模拟结果与 UNFCCC 国家温室气体清单结果之间存在 4Gt 差异,其中约 3.2Gt 源于森林管理导致的森林碳汇估算差异^[128]。适度地森林管理意味着,适应未来气候也许需要大规模改变林分组成和造林方式,既不产生积极也不产生消极的气候影响,追求生态系统景观、结构、功能多样性^[32,129]。

5.2 优化森林管理增强流域水文效应

森林生态系统的水源涵养、水分调节、水质净化等水文效应极大地影响流域水生态安全,这种效应因森林类型及其管理导致的植被、枯落、苔藓、土壤层差异而表现不同。因此,森林管理的水文生态效应值得全面深入分析^[118],不同区域、不同森林管理方式与强度对于不同类型森林及流域水文生态功能的长期影响有待深入研究。

5.3 优化森林管理促进生物多样性保护

维持或改善生物多样性是可持续森林管理的一个重要目标^[130],以木材为主的森林管理与保护森林生物多样性并不矛盾^[131],故而优化森林管理可能作为自然保护地以外全球生物多样性保护的重要补充^[132-133]。因此,定量了解不同区域、不同管理措施对生物多样性的影响,对于协调生物多样性保护和经济利益至关重要^[81]。从保护角度,还需要研究管理对森林生物群落栖息地的气候适宜性^[134]。

5.4 优化森林管理的多维协同生态效应

优化森林管理的目标是形成完整的近自然林^[11],以增加结构异质性、保持大树和林冠间隙以促进多种生态系统服务的供给^[9],管理良好的完整森林对于稳定陆地碳储量、保护生物多样性、调节水文状况和提供其他生态功能极为重要^[135],也有助于减轻低收入区域的贫穷,支持联合国的可持续发展目标^[127]。如何优化森林管理获得协同生态效应,有待深入研究。

参考文献 (References):

- [1] Willemen L, Barger N N, Brink B T, Cantele M, Erasmus B F N, Fisher J L, Gardner T, Holland T G, Kohler F, Kotiaho J S, Von Maltitz G P, Nangendo G, Pandit R, Parrotta J A, Potts M D, Prince S D, Sankaran M, Brainich A, Montanarella L, Scholes R. How to halt the global decline of lands. *Nature Sustainability*, 2020, 3(3): 164-166.
- [2] Foley J A, DeFries R, Asner G P, Barford C, Bonan G, Carpenter S R, Chapin F S, Coe M T, Daily G C, Gibbs H K, Helkowski J H, Holloway T, Howard E A, Kucharik C J, Monfreda C, Patz J A, Prentice I C, Ramankutty N, Snyder P K. Global consequences of land use. *Science*, 2005, 309(5734): 570-574.
- [3] Brandis D. The management and protection of forests. *Nature*, 1896, 53(1380): 535-540.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Contribution of the Forestry Sector to National Economies, 1990-2011. Rome:

- FAO, 2014.
- [5] McGrath M J, Luyssaert S, Meyfroidt P, Kaplan J O, Bürgi M, Chen Y, Erb K, Gimmi U, McInerney D, Naudts K, Otto J, Pasztor F, Ryder J, Schelhaas M J, Valade A. Reconstructing European forest management from 1600 to 2010. *Biogeosciences*, 2015, 12(14): 4291-4316.
- [6] Paillet Y, Bergés L, Hjaltn J, Odor P, Avon C, Bernhardt-Römermann M, Bijlsma R J, De Bruyn L, Fuhr M, Grandin U, Kanka R, Lundin L, Luque S, Magura T, Matesanz S, Mészáros I, Sebastià M T, Schmidt W, Standovár T, Tóthmérész B, Uotila A, Valladares F, Vellak K, Virtanen R. Biodiversity differences between managed and unmanaged forests: meta-analysis of species richness in Europe. *Conservation Biology*, 2010, 24(1): 101-112.
- [7] Oldekop J A, Sims K R E, Karna B K, Whittingham M J, Agrawal A. Reductions in deforestation and poverty from decentralized forest management in Nepal. *Nature Sustainability*, 2019, 2(5): 421-428.
- [8] 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.
- [9] 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, Schrupp 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(1): 4839.
- [10] Runtig R K, Ruslandi, Griscom B W, Struebig M J, Satar M, Meijaard E, Burivalova Z, Cheyne S M, Deere N J, Game E T, Putz F E, Wells J A, Wilting A, Ancenaz M, Ellis P, Khan F A A, Leavitt S M, Marshall A J, Possingham H P, Watson J E M, Venter O. Larger gains from improved management over sparing-sharing for tropical forests. *Nature Sustainability*, 2019, 2(1): 53-61.
- [11] Watson J E M, Evans T, Venter O, Williams B, Tulloch A, Stewart C, Thompson I, Ray J C, Murray K, Salazar A, McAlpine C, Potapov P, Walston J, Robinson J G, Painter M, Wilkie D, Filardi C, Laurance W F, Houghton R A, Maxwell S, Grantham H, Samper C, Wang S, Laestadius L, Runtig R K, Silva-Chávez G A, Ervin J, Lindenmayer D. The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(4): 599-610.
- [12] MacDicken K G, Sola P, Hall J E, Sabogal C, Tadoun M, De Wasseige C. Global progress toward sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 2015, 352: 47-56.
- [13] 国家林业局. 全国森林经营规划(2016-2050 年). 北京: 国家林业局, 2016.
- [14] Bellassen V, Luyssaert S. Carbon sequestration: managing forests in uncertain times. *Nature*, 2014, 506(7487): 153-155.
- [15] Johnson D W, Curtis P S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 2001, 140(2/3): 227-238.
- [16] Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson D W, Minkinen K, Byrne K A. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 253-268.
- [17] Global Forest Resources Assessment 2015: How Are the World's Forests Changing? Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- [18] Lilles E B, Coates K D. An evaluation of the main factors affecting yield differences between single- and mixed- species stands. *Journal of Ecosystems and Management*, 2013, 14(2): 120-133.
- [19] Rozendaal D M A, Soliz-Gamboa C C, Zuidema P A. Timber yield projections for tropical tree species: the influence of fast juvenile growth on timber volume recovery. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(12): 2292-2300.
- [20] 陈科屹, 张会儒, 雷相东, 娄明华, 王全军, 毛建国. 基于目标树经营的抚育采伐对云冷杉针阔混交林空间结构的影响. *林业科学研究*, 2017, 30(5): 718-726.
- [21] Wang H, Liu S R, Wang J X, Shi Z M, Lu L H, Zeng J, Ming A G, Tang J X, Yu H L. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 4-13.
- [22] 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分结构和植物多样性的影响. *林业科学*, 2018, 54(1): 12-21.
- [23] Ratcliffe S, Holzwarth F, Nadrowski K, Levick S, Wirth C. Tree neighbourhood matters-tree species composition drives diversity-productivity patterns in a near-natural beech forest. *Forest Ecology and Management*, 2015, 335: 225-234.
- [24] McIntosh R. The history and multi-purpose management of Kielder forest. *Forest Ecology and Management*, 1995, 79(1/2): 1-11.
- [25] Vilà M, Vayreda J, Comas L, Ibáñez J J, Mata T, Obón B. Species richness and wood production: a positive association in Mediterranean forests. *Ecology Letters*, 2007, 10(3): 241-250.
- [26] D'Oliveira M V N, Guarino E S D, Oliveira L C, Ribas L A, Acuña M H A. Can forest management be sustainable in a bamboo dominated forest?

- A 12-year study of forest dynamics in western Amazon. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 672-679.
- [27] 明安刚, 张治军, 谌红辉, 张显强, 陶怡, 苏勇. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响. *林业科学*, 2013, 49(10): 1-6.
- [28] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Rudbeck Jepsen M, Penuelas J, Wigner 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. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 129.
- [29] Erb K H, Kastner T, Plutzer C, Bais A L S, Carvalhais N, Fetzel T, Gingrich S, Haberl H, Lauk C, Niedertscheider M, Pongratz J, Thurner M, Luysaert S. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 2018, 553(7686): 73-76.
- [30] Harper A B, Powell T, Cox P M, House J, Huntingford C, Lenton T M, Sitch S, Burke E, Chadburn S E, Collins W J, Comyn-Platt E, Daioglou V, Doelman J C, Hayman G, Robertson E, Van Vuuren D, Wiltshire A, Webber C P, Bastos A, Boysen L, Ciais P, Devaraju N, Jain A K, Krause A, Poulter B, Shu S J. Land-use emissions play a critical role in land-based mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications*, 2018, 9: 2938.
- [31] Watson J E M, Evans T D, Venter O, Maxwell S L. Manage forests as protection against warming. *Nature*, 2019, 567(7748): 311.
- [32] Luysaert S, Marie G, Valade A, Chen Y Y, Njakou Djomo S, Ryder J, Otto J, Naudts K, Lansø A S, Ghattas J, McGrath M J. Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 2018, 562(7726): 259-262.
- [33] 侯振宏, 张小全, 肖文发. 中国森林管理活动碳汇及其潜力. *林业科学*, 2012, 48(8): 11-15.
- [34] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y P, Hu H F, He N H, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, USA, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [35] Balboa-Murias M Á, Rodríguez-Soalleiro R, Merino A, Álvarez-González J G. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecology and Management*, 2008, 237(1/3): 29-38.
- [36] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, Curtis P S. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(5): 857-866.
- [37] James J, Harrison R. The effect of harvest on forest soil carbon: a meta-analysis. *Forests*, 2016, 7(12): 308.
- [38] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, Augusto L, Cécillon L, Ferreira G W D, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf J A, Vanguelova E I, Vesterdal L. Tamm review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [39] Mayer M, Sandén H, Rewald B, Godbold D L, Katzensteiner K. Increase in heterotrophic soil respiration by temperature drives decline in soil organic carbon stocks after forest windthrow in a mountainous ecosystem. *Functional Ecology*, 2017, 31(5): 1163-1172.
- [40] Achat D L, Fortin M, Landmann G, Ringeval B, Augusto L. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15991.
- [41] Achat D L, Deleuze C, Landmann G, Pousse N, Ranger J, Augusto L. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth-A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2015, 348: 124-141.
- [42] Clarke N, Gundersen P, Jönsson-Belyazid U, Kjónaas O J, Persson T, Sigurdsson B D, Stupak I, Vesterdal L. Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 2015, 351: 9-19.
- [43] Hume A M, Chen H Y H, Taylor A R. Intensive forest harvesting increases susceptibility of northern forest soils to carbon, nitrogen and phosphorus loss. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(1): 246-255.
- [44] Strukulj M, Brais S, Paré D. Nine-year changes in carbon dynamics following different intensities of harvesting in boreal aspen stands. *European Journal of Forest Research*, 2015, 134(5): 737-754.
- [45] Sun X D, Wang W N, Razaq M, Sun H L. Effects of stand density on soil organic carbon storage in the top and deep soil layers of *Fraxinus mandshurica* plantations. *Journal of Austrian Forest Science*, 2019, 136(1): 27-44.
- [46] Noh N J, Kim C, Bae S W, Lee W K, Yoon T K, Muraoka H, Son Y. Carbon and nitrogen dynamics in a *Pinus densiflora* forest with low and high stand densities. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 6(5): 368-379.
- [47] Hernández J, Del Pino A, Vance E D, Califa Á, Del Giorgio F, Martínez L, González-Barrios P. *Eucalyptus* and *Pinus* stand density effects on soil carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2016, 368: 28-38.
- [48] Moreno-Fernández D, Díaz-Pinés E, Barbeito I, Sánchez-González M, Montes F, Rubio A, Cañellas I. Temporal carbon dynamics over the rotation period of two alternative management systems in Mediterranean mountain Scots pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2015, 348: 186-195.

- [49] Chiti T, Perugini L, Vespertino D, Valentini R. Effect of selective logging on soil organic carbon dynamics in tropical forests in central and western Africa. *Plant and Soil*, 2016, 399(1/2): 283-294.
- [50] Zhang X Z, Guan D X, Li W B, Sun D, Jin C J, Yuan F H, Wang A Z, Wu J B. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: a meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 36-43.
- [51] Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 2014, 327: 251-264.
- [52] Silva Pedro M, Rammer W, Seidl R. Tree species diversity mitigates disturbance impacts on the forest carbon cycle. *Oecologia*, 2015, 177(3): 619-630.
- [53] Dawud S M, Raulund-Rasmussen K, Domisch T, Finér L, Jaroszewicz B, Vesterdal L. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? *Ecosystems*, 2016, 19(4): 645-660.
- [54] 张期奇, 董希斌. 抚育间伐强度对落叶松次生林水文生态功能的影响. *东北林业大学学报*, 2020, 48(6): 142-145.
- [55] 冯秋红, 刘兴良, 卢昌泰, 吴晓龙, 潘红丽, 马文宝, 刘世荣. 不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响. *生态学报*, 2016, 36(17): 5432-5439.
- [56] 贾芳, 贾忠奎, 马履一, 张博. 抚育间伐对北京山区油松幼龄人工林水源涵养功能的影响. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 235-239.
- [57] 韩恩贤, 韩刚, 薄颖生. 黄土高原沟壑区油松侧柏与沙棘混交的人工林的水文影响. *林业科学研究*, 2006, 19(6): 761-766.
- [58] 林业部科技司. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994.
- [59] 王勤, 张宗应, 徐小牛. 安徽大别山区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 59-62.
- [60] 陈海滨, 刘淑明, 党坤良, 安锋. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(II)——土壤水分有效性及其亏缺状况的分析. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 5-8.
- [61] 贾忠奎, 温志勇, 贾芳, 公宁宁, 游伟斌, 汪加魏, 马履一. 北京山区侧柏人工林水源涵养功能对抚育间伐的响应. *水土保持学报*, 2012, 26(1): 62-66, 71-71.
- [62] Woodward C L. Soil compaction and topsoil removal effects on soil properties and seedling growth in Amazonian Ecuador. *Forest Ecology and Management*, 1996, 82(1/3): 197-209.
- [63] 李侃. 秦岭南坡不同间伐强度下锐齿栎林和油松林水量平衡研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [64] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 黄梦虹. 鼎湖山森林地表水水质状况分析. *生态学报*, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [65] 韩琴. 不同间伐方式下三峡库区马尾松林主要生态功能的动态变化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [66] 周晓光. 抚育间伐强度对马尾松公益林群落结构和生态服务功能的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [67] 吕瑞恒. 抚育间伐对针叶人工林凋落物分解的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [68] 杨新兵, 张伟, 张建华, 宋庆丰, 曹云生, 姚卫星. 生态抚育对华北落叶松幼龄林枯落物和土壤水文效应的影响. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 119-122.
- [69] 管惠文, 董希斌, 张甜, 曲杭峰, 王智勇, 阮加甫. 间伐强度对大兴安岭落叶松天然次生林水文性能的影响. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2018, 42(6): 68-76.
- [70] Rahmat A, Noda K, Onishi T, Senge M. Runoff characteristics of forest watersheds under different forest managements. *Reviews in Agricultural Science*, 2018, 6: 119-133.
- [71] 朱道光, 蔡体久, 姚月峰, 琚存勇. 小兴安岭森林采伐对河川径流的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(12): 2259-2262.
- [72] 刘元. 抚育间伐对森林生态系统水文生态功能的影响. *辽宁林业科技*, 2019, (3): 46-49.
- [73] 孟庆旭. 间伐强度对秦岭华山松林理水功能的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [74] Huang Y Y, Chen Y X, Castro-Izaguirre N, Baruffol M, Brezzi M, Lang A, Li Y, Härdtle W, Von Oheimb G, Yang X F, Liu X J, Pei K W, Both S, Yang B, Eichenberg D, Assmann T, Bauhus J, Behrens T, Buscot F, Chen X Y, Chesters D, Ding B Y, Durka W, Erfmeier A, Fang J Y, Fischer M, Guo L D, Guo D L, Gutknecht J L M, He J S, He C L, Hector A, Hönig L, Hu R Y, Klein A M, Kühn P, Liang Y, Li S, Michalski S, Scherer-Lorenzen M, Schmidt K, Scholten T, Schuldt A, Shi X Z, Tan M Z, Tang Z Y, Trogisch S, Wang Z W, Welk E, Wirth C, Wubet T, Xiang W H, Yu M J, Yu X D, Zhang J Y, Zhang S R, Zhang N L, Zhou H Z, Zhu C D, Zhu L, Bruehlheide H, Ma K P, Niklaus P A, Schmid B. Impacts of species richness on productivity in a large-scale subtropical forest experiment. *Science*, 2018, 362(6410): 80-83.
- [75] Liang J J, Crowther T W, Picard N, Wiser S, Zhou M, Alberti G, Schulze E D, McGuire A D, Bozzato F, Pretzsch H, De-Miguel S, Paquette A, Hérault B, Scherer-Lorenzen M, Barrett C B, Glick H B, Hengeveld G M, Nabuurs G J, Pfautsch S, Viana H, Vibrans A C, Ammer C, Schall P, Verbyla D, Tchebakova N, Fischer M, Watson J V, Chen H Y, Lei X D, Schelhaas M J, Lu H C, Gianelle D, Parfenova E I, Salas C, Lee E, Lee B, Kim H S, Bruehlheide H, Coomes D A, Piotta D, Sunderland T, Schmid B, Gourlet-Fleury S, Sonké B, Tavanir R, Zhu J, Brandt S, Vayreda J, Kitahara F, Searle E B, Neldner V J, Ngugi M R, Baraloto C, Frizzera L, Bałazy R, Oleksyn J, Zawila-Niedzwiecki T, Bouriaud O, Bussotti F, Finér L, Jaroszewicz B, Jucker T, Valladares F, Jagodzinski A M, Peri P L, Gonnadje C, Marthy W, O'Brien T, Martin E H,

- Marshall A R, Rovero F, Bitariho R, Niklaus P A, Alvarez-Loayza P, Chamuya N, Valencia R, Mortier F, Wortel V, Engone-Obiang N L, Ferreira L V, Odeke D E, Vasquez R M, Lewis S L, Reich P B. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, 2016, 354(6309): aaf8957.
- [76] Xu W B, Svenning J C, Chen G K, Zhang M G, Huang J H, Chen B, Ordonez A, Ma K P. Human activities have opposing effects on distributions of narrow-ranged and widespread plant species in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(52): 26674-26681.
- [77] Laurance W F, Useche D C, Rendeiro J, Kalka M, Bradshaw C J A, Sloan S P, Laurance S G, Campbell M, Abernethy K, Alvarez P, Arroyo-Rodriguez V, Ashton P, Benítez-Malvido J, Blom A, Bobo K S, Cannon C H, Cao M, Carroll R, Chapman C, Coates R, Cords M, Danielsen F, De Dijn B, Dinerstein E, Donnelly M A, Edwards D, Edwards F, Farwig N, Fashing P, Forget P M, Foster M, Gale G, Harris D, Harrison R, Hart J, Karpanty S, Kress W J, Krishnaswamy J, Logsdon W, Lovett J, Magnusson W, Maisels F, Marshall A R, McClearn D, Mudappa D, Nielsen M R, Pearson R, Pitman N, Van Der Ploeg J, Plumptre A, Poulsen J, Quesada M, Rainey H, Robinson D, Roetgers C, Rovero F, Scatena F, Schulze C, Sheil D, Struhsaker T, Terborgh J, Thomas D, Timm R, Urbina-Cardona J N, Vasudevan K, Wright S J, Arias-G J C, Arroyo L, Ashton M, Auzel P, Babaasa D, Babweteera F, Baker P, Banki O, Bass M, Bila-Isia I, Blake S, Brockelman W, Brokaw N, Brühl C A, Bunyavechewin S, Chao J T, Chave J, Chellam R, Clark C J, Clavijo J, Congdon R, Corlett R, Dattaraja H S, Dave C, Davies G, Beisiegel B D M, Da Silva R D N P, Di Fiore A, Diesmos A, Dirzo R, Doran-Sheehy D, Eaton M, Emmons L, Estrada A, Ewango C, Fedigan L, Feer F, Fruth B, Willis J G, Goodale U, Goodman S, Guix J C, Guthiga P, Haber W, Hamer K, Herbing I, Hill J, Huang Z L, Sun I F, Ickes K, Itoh A, Ivanauskas N, Jackes B, Janovec J, Janzen D, Mo J M, Jin C, Jones T, Justiniano H, Kalko E, Kasangaki A, Killeen T, King H B, Klop E, Knott C, Koné I, Kudavidanage E, da Silva Ribeiro J L, Lattke J, Laval R, Lawton R, Leal M, Leighton M, Lentino M, Leonel C, Lindsell J, Ling-Ling L, Linsenmair K E, Losos E, Lugo A, Lwanga J, Mack A L, Martins M, McGraw W S, McNab R, Montag L, Thompson J M, Nabe-Nielsen J, Nakagawa M, Nepal S, Norconk M, Novotny V, O'Donnell S, Opiang M, Ouboter P, Parker K, Parthasarathy N, Pisciotta K, Prawiradilaga D, Pringle C, Rajathurai S, Reichard U, Reinartz G, Renton K, Reynolds G, Reynolds V, Riley E, Rödel M O, Rothman J, Round P, Sakai S, Sanaïotti T, Savini T, Schaab G, Seidensticker J, Siaka A, Silman M R, Smith T B, De Almeida S S, Sodhi N, Stanford C, Stewart K, Stokes E, Stoner K E, Sukumar R, Surbeck M, Tobler M, Tschamtkke T, Turkalo A, Umapathy G, Van Weerd M, Rivera J V, Venkataraman M, Venn L, Verec A, De Castilho C V, Walther M, Wang B, Watts D, Weber W, West P, Whitacre D, Whitney K, Wilkie D, Williams S, Wright D D, Wright P, Lu X K, Yonzon P, Zanzani F. Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. *Nature*, 2012, 489(7415): 290-294.
- [78] Ehbrecht M, Schall P, Ammer C, Seidel D. Quantifying stand structural complexity and its relationship with forest management, tree species diversity and microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 242: 1-9.
- [79] Chaudhary A, Burivalova Z, Koh L P, Hellweg S. Impact of forest management on species richness: global meta-analysis and economic trade-offs. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23954.
- [80] Elek Z, Kovács B, Aszalós R, Boros G, Samu F, Tinya F, Ódor P. Taxon-specific responses to different forestry treatments in a temperate forest. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 16990.
- [81] Martin P A, Newton A C, Pfeifer M, Khoo M, Bullock J M. Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: a meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2014, 356: 224-233.
- [82] Ferreira J, Lennox G D, Gardner T A, Thomson J R, Berenguer E, Lees A C, Mac Nally R, Aragão L E O C, Ferraz S F B, Louzada J, Moura N G, Oliveira V H F, Pardini R, Solar R R C, Vieira I C G, Barlow J. Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. *Nature Climate Change*, 2018, 8(8): 744-749.
- [83] Fenton N J, Bergeron Y. Does time or habitat make old-growth forests species rich? Bryophyte richness in boreal *Picea mariana* forests. *Biological Conservation*, 2008, 141(5): 1389-1399.
- [84] Wei L P, Archaux F, Hulin F, Bilger I, Gosselin F. Stand attributes or soil micro-environment exert greater influence than management type on understory plant diversity in even-aged oak high forests. *Forest Ecology and Management*, 2020, 460: 117897.
- [85] 毛志宏, 朱教君, 刘足根, 谭辉, 曹波. 间伐对落叶松人工林内草本植物多样性及其组成的影响. *生态学杂志*, 2006, 25(10): 1201-1207.
- [86] 马履一, 李春义, 王希群, 徐昕. 不同强度间伐对北京山区油松生长及其林下植物多样性的影响. *林业科学*, 2007, 43(5): 1-9.
- [87] Haughian S R, Frego K A. Short-term effects of three commercial thinning treatments on diversity of understory vascular plants in white spruce plantations of northern New Brunswick. *Forest Ecology and Management*, 2016, 370: 45-55.
- [88] 郭海洋, 王涛, 贾伟玮. 抚育间伐对林口林业局主要针叶树种生长结构及生物多样性的影响. *东北林业大学学报*, 2019, 47(12): 1-6.
- [89] 罗应华, 孙冬婧, 林建勇, 郭文福, 卢立华, 温远光. 马尾松人工林近自然化改造对植物自然更新及物种多样性的影响. *生态学报*, 2013, 33(19): 6154-6162.

- [90] 柏广新, 张命军. 不同抚育间伐强度对长白山硬阔叶林林下植物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(12): 27-29, 73-73.
- [91] 陈东莉, 郭晋平, 杜宁宁. 间伐强度对华北落叶松林下生物多样性的影响. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 37-38, 118-118.
- [92] 于立忠, 朱教君, 孔祥文, 胡万良, 谭学仁. 人为干扰(间伐)对红松人工林林下植物多样性的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3757-3764.
- [93] 任立忠, 罗菊春, 李新彬. 抚育采伐对山杨次生林植物多样性影响的研究. 北京林业大学学报, 2000, 22(4): 14-17.
- [94] 李春义, 马履一, 徐昕. 抚育间伐对森林生物多样性影响研究进展. 世界林业研究, 2006, 19(6): 27-32.
- [95] 段劼, 马履一, 贾黎明, 贾忠奎, 公宁宁, 车文瑞. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响. 生态学报, 2010, 30(6): 1431-1441.
- [96] Augustynczyk A L D, Asbeck T, Basile M, Bauhus J, Storch I, Mikusiński G, Yousefpour R, Hanewinkel M. Diversification of forest management regimes secures tree microhabitats and bird abundance under climate change. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2717-2730.
- [97] Petermann J S, Roberts A L, Hemmerling C, Bajerski F, Pascual J, Overmann J, Weisser W W, Ruess L, Gossner M M. Direct and indirect effects of forest management on tree-hole inhabiting aquatic organisms and their functional traits. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135418.
- [98] França F M, Frazão F S, Korasaki V, Louzada J, Barlow J. Identifying thresholds of logging intensity on dung beetle communities to improve the sustainable management of Amazonian tropical forests. *Biological Conservation*, 2017, 216: 115-122.
- [99] Burivalova Z, Sekercioglu Ç H, Koh L P. Thresholds of logging intensity to maintain tropical forest biodiversity. *Current Biology*, 2014, 24(16): 1893-1898.
- [100] Phalan B T, Northrup J M, Yang Z Q, Deal R L, Rousseau J S, Spies T A, Betts M G. Impacts of the Northwest Forest Plan on forest composition and bird populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(8): 3322-3327.
- [101] Putz F E, Zuidema P A, Synnott T, Peña-Claros M, Pinard M A, Sheil D, Vanclay J K, Sist P, Gourlet-Fleury S, Griscom B, Palmer J, Zagt R. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. *Conservation Letters*, 2012, 5(4): 296-303.
- [102] Burivalova Z, Lee T M, Giam X, Şekercioglu Ç H, Wilcove D S, Koh L P. Avian responses to selective logging shaped by species traits and logging practices. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015, 282(1808): 20150164.
- [103] Griscom B W, Goodman R C, Burivalova Z, Putz F E. Carbon and biodiversity impacts of intensive versus extensive tropical forestry. *Conservation Letters*, 2018, 11(1): e12362.
- [104] Ratcliffe S, Wirth C, Jucker T, Van Der Plas F, Scherer-Lorenzen M, Verheyen K, Allan E, Benavides R, Bruehlheide H, Ohse B, Paquette A, Ampoorter E, Bastias C C, Bauhus J, Bonal D, Bouriaud O, Bussotti F, Carnol M, Castagneyrol B, Čećko E, Dawud S M, De Wandler H, Domisch T, Finér L, Fischer M, Fotelli M, Gessler A, Granier A, Grossiord C, Guyot V, Haase J, Hättenschwiler S, Jactel H, Jaroszewicz B, Joly F X, Kambach S, Kolb S, Koricheva J, Liebersgesell M, Milligan H, Müller S, Muys B, Nguyen D, Nock C, Pollastrini M, Purschke O, Radoglou K, Raulund-Rasmussen K, Roger F, Ruiz-Benito P, Seidl R, Selvi F, Seiferling I, Stenlid J, Valladares F, Vesterdal L, Baeten L. Biodiversity and ecosystem functioning relations in European forests depend on environmental context. *Ecology Letters*, 2017, 20(11): 1414-1426.
- [105] Tomao A, Bonet J A, Castaño C, De-Miguel S. How does forest management affect fungal diversity and community composition? Current knowledge and future perspectives for the conservation of forest fungi. *Forest Ecology and Management*, 2020, 457: 117678.
- [106] Blaser S, Prati D, Senn-Irlet B, Fischer M. Effects of forest management on the diversity of deadwood-inhabiting fungi in Central European forests. *Forest Ecology and Management*, 2013, 304: 42-48.
- [107] Putz F E, Sist P, Fredericksen T, Dykstra D. Reduced-impact logging: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(7): 1427-1433.
- [108] Sist P, Mazzei L, Blanc L, Rutishauser E. Large trees as key elements of carbon storage and dynamics after selective logging in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, 2014, 318: 103-109.
- [109] West T A P, Vidal E, Putz F E. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. *Forest Ecology and Management*, 2014, 314: 59-63.
- [110] Miller S D, Goulden M L, Hutrya L R, Keller M, Saleska S R, Wofsy S C, Figueira A M S, Da Rocha H R, De Camargo P B. Reduced impact logging minimally alters tropical rainforest carbon and energy exchange. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(48): 19431-19435.
- [111] Griscom B, Ellis P, Putz F E. Carbon emissions performance of commercial logging in East Kalimantan, Indonesia. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 923-937.
- [112] Naudts K, Chen Y Y, McGrath M J, Ryder J, Valade A, Otto J, Luyssaert S. Europe's forest management did not mitigate climate warming. *Science*, 2016, 351(6273): 597-600.

- [113] Evaristo J, McDonnell J J. RETRACTED ARTICLE: global analysis of streamflow response to forest management. *Nature*, 2019, 570(7762): 455-461.
- [114] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [115] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 1996, 176(1/4): 79-95.
- [116] Filoso S, Bezerra M O, Weiss K C B, Palmer M A. Impacts of forest restoration on water yield: a systematic review. *PLoS One*, 2017, 12(8): e0183210.
- [117] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806-820.
- [118] Kirchner J W, Berghuijs W R, Allen S T, Hrachowitz M, Hut R, Rizzo D M. Streamflow response to forest management. *Nature*, 2020, 578(7749): E12-E15.
- [119] McDonnell J J, Evaristo J, Bladon K D, Buttle J, Creed I F, Dymond S F, Grant G, Iroume A, Jackson C R, Jones J A, Maness T, McGuire K J, Scott D F, Segura C, Sidle R C, Tague C. Water sustainability and watershed storage. *Nature Sustainability*, 2018, 1(8): 378-379.
- [120] Anderson C J, Lockaby B G. Research gaps related to forest management and stream sediment in the United States. *Environmental Management*, 2011, 47(2): 303-313.
- [121] Webb A, Dragovich D, Jamshidi R. Temporary increases in suspended sediment yields following selective eucalypt forest harvesting. *Forest Ecology and Management*, 2012, 283: 96-105.
- [122] Walsh P, Jakeman A, Thompson C. The effects of selective timber harvesting in buffer strips along headwater channels using best management practices on runoff, turbidity and suspended sediment yield in an intensively cut eucalypt forest in southeastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2020, 458: 117812.
- [123] Triviño M, Juutinen A, Mazziotta A, Miettinen K, Podkopaev D, Reunanen P, Mönkkönen M. Managing a boreal forest landscape for providing timber, storing and sequestering carbon. *Ecosystem Services*, 2015, 14: 179-189.
- [124] Herbst M, Mund M, Tamrakar R, Knohl A. Differences in carbon uptake and water use between a managed and an unmanaged beech forest in central Germany. *Forest Ecology and Management*, 2015, 355: 101-108.
- [125] Kovács B, Tinya F, Németh C, Ódor P. Unfolding the effects of different forestry treatments on microclimate in oak forests: results of a 4-yr experiment. *Ecological Applications*, 2020, 30(2): e02043.
- [126] Yang K J, He R Y, Yang W Q, Li Z J, Zhuang L Y, Wu F Z, Tan B, Liu Y, Zhang L, Tu L H, Xu Z F. Temperature response of soil carbon decomposition depends strongly on forest management practice and soil layer on the eastern Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4777.
- [127] Lewis S L, Wheeler C E, Mitchard E T A, Koch A. Restoring natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. *Nature*, 2019, 568(7750): 25-28.
- [128] Grassi G, House J, Kurz W A, Cescatti A, Houghton R A, Peters G P, Sanz M J, Viñas R A, Alkama R, Arneeth A, Bondeau A, Dentener F, Fader M, Federici S, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Koven C D, Lee D, Nabel J E M S, Nassikas A A, Perugini L, Rossi S, Sitch S, Viovy N, Wiltshire A, Zaehle S. Reconciling global-model estimates and country reporting of anthropogenic forest CO₂ sinks. *Nature Climate Change*, 2018, 8(10): 914-920.
- [129] Knoke T, Paul C, Hildebrandt P, Calvas B, Castro L M, Härtl F, Döllerer M, Hamer U, Windhorst D, Wiersma Y F, Curatola Fernández G F, Obermeier W A, Adams J, Breuer L, Mosandl R, Beck E, Weber M, Stimm B, Haber W, Fürst C, Bendix J. Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications*, 2016, 7: 11877.
- [130] Lindenmayer D B, Margules C R, Botkin D B. Indicators of biodiversity for ecologically sustainable forest management. *Conservation Biology*, 2000, 14(4): 941-950.
- [131] Duguid M C, Ashton M S. A meta-analysis of the effect of forest management for timber on understory plant species diversity in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2013, 303: 81-90.
- [132] Edwards D P, Tobias J A, Sheil D, Meijaard E, Laurance W F. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(9): 511-520.
- [133] 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(5): 379-388.
- [134] De Frenne P, Zellweger F, Rodríguez-Sánchez F, Scheffers B R, Hylander K, Luoto M, Vellend M, Verheyen K, Lenoir J. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(5): 744-749.
- [135] Maxwell S L, Evans T, Watson J E M, Morel A, Grantham H, Duncan A, Harris N, Potapov P, Runtz R K, Venter O, Wang S, Malhi Y. Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax2546.