

DOI: 10.20103/j.stxb.202412223139

龚金玉, 胡琛, 何林轩, 崔璐瑶, 吴邦琪, 雷静品. 基于自然的解决方案探究气候变化对生态系统服务的影响、局限及展望. 生态学报, 2025, 45(13): - .

Gong J Y, Hu C, He L X, Cui L Y, Wu B Q, Lei J P. Nature-based Solutions explore the impacts, limitations and prospects of climate change on ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

基于自然的解决方案探究气候变化对生态系统服务的影响、局限及展望

龚金玉¹, 胡琛¹, 何林轩¹, 崔璐瑶¹, 吴邦琪¹, 雷静品^{1,2,*}

1 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

摘要: 全球气候变化对生态系统的结构和功能产生深远影响, 破坏了生态系统服务的供需平衡, 威胁人类福祉和社会的可持续发展。基于自然的解决方案(Nature-based Solutions; NbS)作为缓解和适应气候变化的重要途径, 能够有效的应对气候变化对生态系统的不良影响, 持续维持人类福祉和提升生物多样性效益。通过综述气候变化对全球生态系统的主要影响, 探讨 NbS 在提升生态系统服务方面的多重效益, 以期为生态系统的可持续管理提供理论支撑。具体而言, 主要综述了气候变化对生态系统结构和功能(生态系统服务供给)的影响, 阐释了 NbS 在增强生态系统服务中的作用与效益, 并基于 NbS 的实施现状, 探讨了其在缓解和适应气候变化中的挑战和局限。最后, 提出该方向的未来研究展望, 以期为我国生态恢复与社会可持续发展提供理论支撑。

关键词: 气候变化; 生态系统服务; 基于自然的解决方案; 可持续发展

Nature-based Solutions explore the impacts, limitations and prospects of climate change on ecosystem services

GONG Jinyu¹, HU Chen¹, HE Linxuan¹, CUI Luyao¹, WU Bangqi¹, LEI Jingpin^{1,2,*}

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

2 Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: With the intensification of global climate change, ecosystems are facing serious fragmentation and degradation, which poses a serious threat to biodiversity, ecosystem stability and human well-being. Climate change profoundly affects the structure and function of ecosystem, breaks the balance of supply and demand of ecosystem services, and then threatens the sustainable development of society. As an important ecological management strategy, nature-based solutions (NbS) have been widely concerned. Through the protection, restoration and sustainable management of ecosystems, NbS makes use of biodiversity and ecosystem functions to jointly respond to multiple social, economic and environmental challenges such as climate change, natural disasters, biodiversity loss and food security. As a way to mitigate and adapt to climate change, NBS can effectively respond to the adverse impacts of climate change on ecosystems. Improve the quality of ecosystems so that they can sustainably provide and sustain human well-being and biodiversity benefits. This study systematically discussed the main impacts of climate change on global ecosystems, and deeply analyzed the improvement benefits of NbS to a variety

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0112804)

收稿日期: 2024-12-23; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leijp@caf.ac.cn

of ecosystem services, which could provide theoretical support for sustainable ecosystem management. The impacts of climate change on ecosystem structure and function (including ecosystem service supply) are summarized, the basic theories related to NbS are reviewed, and the multiple ecological benefits of NbS in enhancing ecosystem resilience and function are assessed. In addition, the challenges and limitations of NbS in practical application are also discussed, which mainly involve the problems of fund shortage, policy constraints, and the adaptability of different ecosystems to the NbS program. Finally, the key directions of future NbS research are put forward, including: (1) establishing a systematic monitoring and evaluation system of NbS ecological benefits; (2) Strengthen multidisciplinary collaborative research to improve the scientific and effective response of NbS to climate change; (3) Strengthen policy support and public participation mechanisms to promote the large-scale application of NbS. These measures not only help to maximize the ecological and socio-economic benefits of NbS, but also provide important theoretical and practical guidance for ecological restoration and sustainable development in China and the world at large.

Key Words: climate change; ecosystem services; Nature-based Solutions; sustainable development

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的所有惠益,分为支持、调节、供给和文化四种类型^[1],它不仅是社会发展和人类福祉的基础,也是连接社会经济系统和自然生态系统的桥梁^[2-3]。在人类社会初期,生态系统受干扰程度较低,主要是为生物提供生存所必需的资源与避难所。然而,随着社会经济的快速发展和人类资源利用强度的增加,生态系统正面临严重的破碎化和退化^[4]。相比之下,健康的生态系统具备较强的调节能力,能够对外界干扰做出有效反馈,从而维持其结构和功能的稳定^[5]。调节服务是生态系统的一项重要功能,是指生态系统通过自然过程以及生态功能对环境进行调节,例如气候调节、水文调节、空气质量调节等^[3]。然而,随着人类活动和气候变化的加剧,生态系统的调节能力也逐渐衰退,直接威胁人类福祉与社会的可持续发展^[6]。

气候变化是指气候条件和温度模式的长期变化,是自然原因和人类活动共同作用的结果^[7]。自从工业革命以来,人类活动成为气候变化的主要驱动因素,尤其是不可再生资源和化石燃料的过度使用,导致大气二氧化碳浓度急剧上升,加剧了全球变暖^[8]。气候变化直接导致了干旱、野火、洪水以及传染性疾病等突发性事件,且随着气候变化的加剧,这些极端天气事件的频率、规模和强度显著增加^[7,9-10]。这些变化不仅威胁人类健康,也影响着生态安全。气候变化通过日益频繁的极端天气事件对粮食生产、水源供给以及疾病传播速率等产生重大影响,间接影响到物种生存与生态系统稳定性^[7,11]。因此,如何缓解和适应气候变化是目前全球面临的重要议题。

近年来,“基于自然的解决方案”(Nature-based Solutions, NbS)已被广泛认为是应对气候变化的重要策略,NbS强调通过保护、恢复或可持续管理自然生态系统来应对社会及气候挑战。然而,NbS在缓解气候变化对生态系统服务的多重影响中的作用与成效尚未得到全面系统的研究和评估^[12]。因此,有必要进行一项综述,以整合和分析现有的研究成果,揭示气候变化对各种生态系统服务的多维度影响,识别关键知识空白,并探讨NbS在应对这些影响中的应用潜力和局限性。本文旨在为后续研究提供理论框架和方向指引,也能为政策制定者和生态系统管理者提供科学指导,从而支持在气候变化背景下构建综合生态系统管理策略。

1 气候变化对生态系统的影响

气候变化对生态系统的影响是多方面的,它不仅深刻地改变了生态系统的结构和功能,还影响了生态系统服务的供给能力(表1)^[13]。首先,气候变化能够直接影响生物多样性,包括物种组成、分布范围、繁殖行为和遗传多样性等^[14-18]。这是因为生物群落在漫长的遗传进化过程中,已经与气候形成了稳定的关系,而温度和降水模式的大幅度变化破坏了两者的稳定关系,一些无法适应气候快速变化的物种极有可能面临灭绝^[17]。其次,气候变化对植被类型、分布范围以及种间生态位产生显著影响。这种影响通过改变物种栖息地

的分布与质量,间接地对物种结构和功能产生影响^[19-20]。例如,温度、光照以及水分条件的变化能够影响植物生长速率和光合效率,从而改变生态系统的初级生产力和固碳能力^[39]。此外,气候变化也能够对全球生态过程产生深远的影响,包括碳循环、养分循环和水循环等关键生态过程的动态变化。这种动态变化通过影响植物和土壤的生物地球化学过程,进一步作用于生态系统稳定性和服务供给能力^[40]。综上所述,生态系统结构的变化是功能变化的基础,而生态系统功能的改变又会反过来影响其结构的变化,从而形成复杂的反馈机制。这种相互作用表明,气候变化对生态系统的影响不仅是直接的,也是多层次的、长期的和复杂的。基于此背景下,缓解和适应气候变化成为全球性议题,NbS 逐渐成为应对全球生态和社会挑战的新兴策略。

表 1 气候变化对生态系统的影响

Table 1 Impacts of climate change on ecosystems

影响方向 Direction of influence	主要影响 The main effect	影响结果 Results	参考文献 References
结构 Structure	能够直接的影响生物多样性,包括物种结构、分布范围、繁殖和遗传行为等	物种组成和分布的变化 栖息地丧失 群落动态改变	[14—20]
服务功能 Service function	能够通过影响土壤形成、养分循环、生物多样性维持和初级生产力等支持服务,进而影响其他生态系统服务的稳定性和供给能力	土壤肥力下降 群落关键种丧失 生态循环失衡	[21—24]
	直接影响了生态系统对各类生态过程的调节能力,如碳循环、水循环等生态过程	碳储存与气候调节功能下降 水文调节能力减弱 病虫害频发直接	[25—28]
	直接影响农业生产、粮食安全及各种生存原材料的供给	农作物产量降低 水资源短缺 生物资源减少	[29—32]
	削弱了景观质量,改变了人类与自然之间的互动方式和相关的文化体验,降低了生态系统文化服务	景观价值下降 室外娱乐活动受限 文化遗产面临威胁	[17,33—38]

2 基于自然的解决方案

2.1 NbS 的定义及发展

NbS 是指通过保护、恢复、可持续管理生态系统,利用生物多样性以及生态系统功能,协同应对气候变化、自然灾害、生物多样性丧失以及粮食安全等多重社会、经济和环境挑战^[41]。NbS 的概念最早由世界银行在 2008 年发布的《生物多样性、气候变化和适应性》报告中提出,旨在更系统地理解人与自然的关系,并为可持续发展提供科学依据^[42]。此后,世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)进一步明确了 NbS 的核心目标,即通过反映文化和社会价值观的方式,支持社会发展目标的实现,保障人类福祉,同时增强生态系统的恢复力、自我更新和提供服务的能力^[43]。在 IUCN 的积极推动下,2016 年世界保护大会系统地阐述了 NbS 的概念与内涵,并强调了 NbS 在应对水安全、粮食安全、人类健康等全球挑战中的重要作用^[43]。2018 年,联合国政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)报告指出造林、再造林、生态系统修复、土地可持续经营管理等活动,对实现全球升温 1.5℃ 以内的目标具有重要作用^[44]。2020 年生物多样性大会进一步肯定了 NbS 在实现《巴黎协定》目标的关键作用^[45]。

目前,NbS 作为减缓和适应气候变化的途径,主要是通过增加碳吸收来降低与气候变化有关的灾害风险以及逆转生物多样性损失,维持社会的可持续发展和人类福祉(图 1)^[43,46],聚焦于与自然合作共赢,具有可持续性、系统性、尺度性和适应性四种特质,旨在为人类社会提供长期、可持续的解决方案^[47]。与工业化治理手段相比,NbS 具有低成本及高效益的特点^[41,48-49]。Griscom 等^[50]指出到 2030 年将升温控制在 2℃ 以内,NbS 能够提供约 30% 的具有成本效益的气候变化减缓。同时,NbS 也被认为是协调经济发展与生态系统管理的一种方式,也是实现业务多样化和转型以及可持续发展的一种手段^[48]。NbS 助力于实现 2030 年碳达峰以

及 2060 年碳中和目标,并带来多种生态系统服务的协同增益。

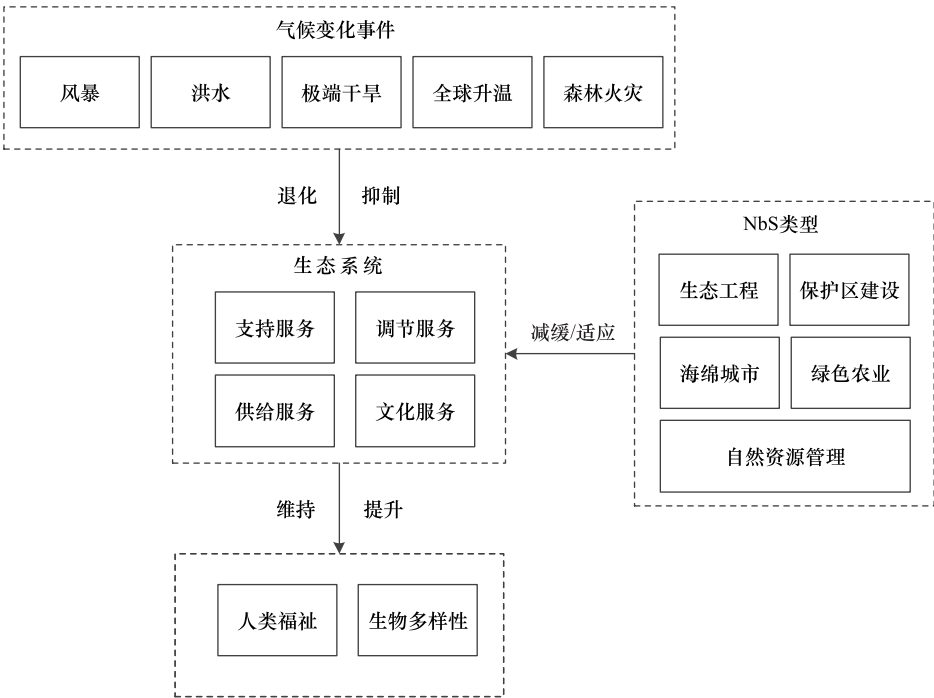


图 1 NbS、气候变化事件及生态系统之间的关系^[43,46]
Fig.1 The relationship between NbS, climate change events and ecosystems

2.2 NbS 的基础理论以及核心内涵

NbS 的理论基础涉及生态学、工程学、环境学等多个学科领域的交叉研究,这些相关学科的基础理论(表 2),为其概念的形成和应用提供了科学依据。同时,在 NbS 的设计和实施时过程中,通常又会涉及到空间规划、景观生态学和生态工程学等领域的知识。

表 2 NbS 相关的基础理论
Table 2 NbS related basic theory

基础理论 Basic theory	核心思想 Core ideology	与 NbS 的关系 Relationship with NbS	参考文献 Reference
生态系统服务理论 Ecosystem services theory	生态系统能为人类社会的生存和发展提供多种服务	NbS 的实施旨在利用或增强生态系统服务以解决人类面临的问题。例如,通过恢复湿地增强其洪水调节功能和水质净化能力	[3,51]
社会-生态理论 Socio-ecological theory	社会和生态系统相互依赖,构成复杂的适应性系统,必须协调二者的关系以实现可持续发展	NbS 强调社会和生态的协同效应,通过生态系统管理应对社会需求,如生物多样性保护与社区福祉的结合	[52]
自然资本理论 Natural capital theory	自然资本是指生态系统为人类提供的可以量化和评估的资源和服务,具有经济和社会价值	NbS 通过维护或提升自然资本储备,促进经济效益和生态效益的平衡。例如,森林恢复不仅提供碳汇功能,还提高了自然资本的长期经济回报	[53]
弹性理论 Theory of elasticity	生态系统在面对外界干扰时的恢复能力及其维持功能的能力,是衡量生态系统稳定性和适应性的关键	NbS 设计通常旨在增强生态系统的弹性,使其能够更有效地应对气候变化或其他环境压力,例如通过森林恢复提高生态系统抵御干旱和洪水的能力	[54]
可持续发展理论 Sustainable development theory	可持续发展强调经济增长、社会福祉和生态保护之间的平衡,要求满足当代需求而不损害后代的能力	NbS 作为可持续发展的实践路径,提供了在发展中保护自然、在保护中促进发展的解决方案,如可持续农业和绿色基础设施建设	[55]

续表

基础理论 Basic theory	核心思想 Core ideology	与 NbS 的关系 Relationship with NbS	参考文献 Reference
气候变化适应与减缓理论 Climate change adaptation and mitigation theory	通过人为干预降低气候变化的影响,同时提高社会和生态系统对气候变化的适应能力	NbS 作为气候变化适应与减缓的重要策略,通过自然过程降低温室气体浓度或缓解极端气候事件的影响,如通过植树造林提高碳汇功能	[56]
景观生态学理论 theory of landscape ecology	景观是由相互作用的生态单元组成的空间异质性系统,景观生态学研究这些单元之间的相互关系及其对生态功能的影响	NbS 应用需要从景观尺度设计解决方案,例如通过连接栖息地廊道提高生物多样性保护效果	[57—59]

2.3 NbS 的主要类型

作为减缓和适应气候变化的重要路径,NbS 已在实际生态管理中得到广泛的应用^[60]。NbS 具有多种实施路径和措施,包括造林、避免毁林和湿地恢复等^[61—62],但其具体方案设计需结合区域的气候条件、环境特征以及空间格局等因素。此外,根据实施的生态系统类型和针对的特定问题,将 NbS 划分为多种类型(表 3),从而为不同情境下的方案选择提供科学依据^[43]。

表 3 NbS 的常见分类及生态效益
Table 3 The common classification and ecological benefit of NbS

NbS 类型 NbS types	定义 Definition	应用实例 Application example	生态效益 Ecological benefits	参考文献 Reference
生态恢复 Ecological restoration	通常指利用生态系统恢复和保护的技术过程,使其恢复到健康、稳定的功能状态,可应用于各种尺度	三北防护林工程、天然林保护工程、长江流域湿地恢复工程等	增加植被覆盖面积、增加林业碳汇、改善栖息地质量、保护生物多样性等	[43,63—66]
针对具体问题的生态系统方法 Issue-specific ecosystem-related approaches	针对具体的社会或环境问题,利用生态系统功能或服务来提供解决方案的策略。这些策略通常是聚焦于一个明确的问题,如气候变化适应、减缓自然灾害等	退耕还林还草工程、密云水库流域综合治理等	改善具体的社会或环境问题,提升环境质量、改善人居环境等	[43,67]
绿色与自然基础设施相关方法 Green infrastructure and natural infrastructure approaches	指利用自然或人造基础设施,来改善生态系统状况的方法	屋顶花园、垂直绿化、海绵城市、水库、运河等基础设施	改善人居环境、缓解城市热岛效应、协调水资源分配等	[68—72]
生态系统保护方法 Ecosystem protection approaches	对尚未退化的生态系统进行保护,避免因人类活动或自然灾害导致的退化和衰退	三江源国家公园、大熊猫国家公园、西溪湿地等	保护生物多样性、改善栖息地质量等	[73—77]
基于生态系统管理方法 Ecosystem-based management approaches	通过全面的生态系统管理方法,协调资源分配、利用等,实现对自然资源的可持续利用,平衡生态保护和经济发展	长江流域生态系统管理、三江源地区综合管理、科尔沁沙地综合治理等	提升水质、洪水调节、生物多样性保护、风蚀控制等	[78—79]

3 NbS 在应对气候变化中的应用

3.1 NbS 在增强生态系统服务中的应用案例

NbS 作为协同应对气候、经济和社会挑战的重要策略,对多种生态系统服务均具有显著的改善作用,涵盖了森林、湿地、农业生态系统和城市绿地等多种生态系统类型。不同的生态系统恢复工程在提升生态系统服务方面各有侧重。表 4 总结了不同生态系统类型的 NbS 应用案例及其对应的生态系统服务提升类型。

表 4 NbS 在增强生态系统服务中的应用案例
Table 4 Application cases of NbS in enhancing ecosystem services

生态系统类型 Ecosystem-type	案例 Cases	提升的生态系统服务类型 Improved types of ecosystem services	参考文献 References
森林生态系统 Forest ecosystem	退耕还林还草工程	增强碳固定能力、保护生物多样性	[80]
湿地生态系统 Wetland ecosystem	洞庭湖山水林田湖草生态保护修复工程、长江中上游防护林体系建设工程	改善水质、洪水调节、水源涵养、环境质量提升	[81—82]
农业生态系统 Farmland ecosystem	东北黑土地保护性耕作行动计划	粮食供给、改善土壤质量、增强碳储量	[83—84]
城市绿地系统 Urban green space system	北京奥林匹克公园	降低城市热岛效应、改善人居环境	[85]
海岸带生态系统 Coastal ecosystem	沿海防护林体系建设工程	提升海岸抗侵蚀能力、防止水土流失	[86—87]
草原生态系统 Grassland ecosystem	内蒙古锡林浩特退化草原生态修复	增强草原生态系统碳固定能力,保护生物多样性	[88—89]
河流生态系统 River ecosystem	长江流域生态恢复工程、辽河流域综合治理防护林体系建设工程	改善水质、涵养水源增强河流生态系统生物多样性	[90—91]

3.2 NbS 对生态系统服务的多重效益

NbS 作为缓解气候变化的工具与途径,在各个国家都已有相关研究案例,并且越来越多的国家在提交的国家自主贡献中涉及自然解决方案^[41]。NbS 正在成为一种可以减少生态系统服务权衡和促进协同增效的综合方法^[92],同时通过增强生态系统韧性,NbS 能够缓解气候变化带来的压力。首先,生态恢复和保护项目通过增加植被面积来增加陆地生态系统的碳储量,减少大气中二氧化碳的浓度,从而缓解气候变暖^[93]。其次,可持续农业和保护性耕作能够改善土壤结构和有机质含量,提高土壤的碳储存能力^[94]。然后,湿地恢复以及沿海生态系统恢复与防灾工程能增强水文调节和水循环功能,增强生态系统抵御水相关的灾害能力^[95]。此外,气候变化加剧了生物多样性的丧失,而 NbS 通过增加栖息地面积改善栖息地质量,可以减缓物种丧失的速率。由此看来,NbS 的实施能够带来多种生态系统服务的提升,但对每种生态系统服务提升程度有所不同(表 5)。

表 5 NbS 对生态系统服务的多重效益^[96—98]
Table 5 Multiple benefits of NbS to ecosystem services^[96—98]

NbS 策略 NbS strategy	NbS 对生态系统多重效益及等级 Multiple benefits and levels of ecosystem in NbS							
	生物多样性保护	气候适应	土壤健康	产水量	极端事件减缓	粮食供应	文化服务	健康保障
避免森林转换 Avoided forest conversin	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
再造林 Reforestation	++	+++	++	++	++	++	+++	+++
人工林经营 Improved plantations	+	+++	+	+	++	+++	+	+
天然林管理 Natural forest management	+	++	+	+	++	++	-	-
保护性农业 Conservation agriculture	+	++	++	++	-	+++	-	-
农林复合 Trees in croplands	++	++	++	+	++	+++	-	-
避免泥炭地退化 Avoided peatland impacts	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
泥炭地恢复 Peatland restoration	+++	+	++	+++	+++	+	++	++
避免海岸退化 Avoided coastal impacts	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
海岸恢复 Coastal restoration	+	+++	+	+	+++	+++	+++	+++

+代表低效益,++代表中效益,+++代表高效益,-代表未统计

4 NbS 实施中的挑战和局限性

与工业化治理手段相比,NbS 具有低成本及高效益的特点,在应对气候变化和促进生态系统服务提升方

面展现了巨大的潜力,但在过去的气候变化政策和行动中,尚未得到充分的重视,在未来实际应用中仍面临多重挑战和局限。

4.1 实施挑战

NbS 的成功实施通常需要大量的资金投入、技术支持和政策保障,但现实中,这些条件往往难以全面满足。这是因为大型生态恢复项目的实施(如植树造林、湿地修复或流域治理等)通常是国家层面的决策,需要长期人力、物力和财力的投入^[99-100]。然而,NbS 对生态系统服务的提升是一个缓慢的过程,主要是因为生态系统对 NbS 实施的响应存在滞后效应,短期内无法看到 NbS 的经济效益,这也削弱了公众与决策者的积极性。另外,技术的缺失也是限制 NbS 实施的关键因素。NbS 涉及生态学、环境科学、工程学等多学科领域的技术支持,部分地区缺乏必要的技术和专业知识来进行系统的生态修复和有效的管理,最终可能无法取得预期的修复效果,甚至会对生态系统产生二次伤害^[41]。此外,强有力的政策支持也是 NbS 高效实施的重要因素,尤其是在土地使用管理、资金分配和监管方面,但许多地方由于政策法规的缺失或不完善,导致 NbS 项目难以长期推进^[101]。正是因为这些综合因素的影响,NbS 虽然具有巨大潜力,但在过去的气候变化政策和行动中,并未得到充分的重视。

4.2 生态系统的响应存在不确定性

自然生态系统对气候变化和人类活动的响应具有极大的不确定性,不同区域或不同物种组成的生态系统对气候变化和人类活动等驱动因子的响应各异^[102]。一方面,生态系统的供给能力和自身的恢复潜力因地理条件和物种组成不同而具有显著差异,可能会导致相同的 NbS 在不同区域实施时产生不同的生态效益。另一方面,生态系统变化具有滞后效应,一些 NbS 的实施可能在短期内带来负面的生态效应,但长期来看可能会实现预期的生态效益^[100,103]。例如,林业恢复工程实施初期,植被的碳吸收速率较慢,因为森林的碳固存效应是一个长期的过程^[104]。

4.3 生态系统服务间的权衡关系

生态系统服务间存在着复杂的权衡关系,有时 NbS 无法同时满足提升多种生态系统服务需求^[105-106]。例如,碳储量与产水量之间的权衡关系,植树造林工程实施初期,随着植被幼苗的生长,大量的碳被固定,但同时也有大量的水分被消耗^[107]。过量的水分消耗,又会导致地下水资源减少,不利于农业和人类用水需求的满足。同样,生物多样性保护与粮食安全之间的权衡关系也是需要重点考虑的问题。通常的生态恢复项目是通过增加森林面积来提高生物多样性,但同时会减少耕地面积,从而影响粮食产量。

5 未来研究方向与建议

随着气候问题的加剧以及人类社会的发展,如何缓解气候变化及遏制生态系统衰退是当今社会亟待解决的全球性问题,NbS 作为缓解和适应气候变化的主要手段,虽然已经有了一些相关的研究基础,但在多变的未来气候下,还需要深入研究生态系统对 NbS 的反馈,监测与评估 NbS 的生态效益。

5.1 建立 NbS 生态效益的监测与评估体系

基于生态系统服务间复杂的权衡关系以及生态系统对气候变化响应的不确定性,NbS 的生态效益很难在短时间内完全显现,且不同区域的生态系统响应存在较大差异,因此有必要对 NbS 生态效益进行长期监测与定量化评估^[108]。对 NbS 进行动态监测与定量化评估能够帮助识别实施过程中出现的问题,避免生态系统服务间的权衡发展,优化管理策略,促进协同增益。首先,建立不同生态系统服务功能的监测指标体系,确定数据收集与监测技术的相关方法。其次,建立长期的跟踪机制,评估生态系统服务的变化趋势,最终精确地评估生态效益。最后,基于监测数据持续动态改进相关方法,最终实现 NbS 生态效益的精确评估。

5.2 开展多学科协同研究

气候变化是一个复杂的环境和社会问题,利用 NbS 缓解气候变化的策略是生态学、地理科学、工程学及社会科学等综合学科的知识。首先,为了充分发挥 NbS 的潜力,建议进行更多研究,以识别成本有效的 NbS

优先领域,并促进跨领域的 NbS 协同管理。其次,可以针对不同区域的 NbS 实施建立多学科研究团队,开发跨学科模型和工具,将气候变化预测、生态系统服务模拟和社会经济影响综合起来,为 NbS 的实施提供多维度的数据支撑。此后,需加强跨区域和跨尺度的 NbS 生态效益比较研究,以识别 NbS 在不同区域与尺度上缓解气候变化普适性规律和特异性响应,将有助于政府相关部门生态恢复决策的制定和执行。

5.3 强化政策支持与公众参与机制

在应对气候变化和提升生态系统服务的背景下,将 NbS 作为适应和缓解气候变化的策略是可行的,且具有实际意义的方案。但在 NbS 实施过程中需要系统性的政策支持以及广泛的公众参与,以保证项目的可持续实施和长期效益的实现。强有力的政策扶持不仅能提供资金和技术支持,还能够通过政策引导和法律规范促进 NbS 标准化和科学化实施。公众的广泛参与还能够增强项目的本地适应性,提高人们的环保意识,实现生态保护和社区发展的双重目标。政策支持与公众的有效参与能够形成良好的协同效应,可以有效地进行 NbS 的普及与推广,增强社区的气候适应能力,进而实现生态系统服务的可持续供给。

6 结论

NbS 作为缓解与适应气候变化的重要策略,能够缓解因气候变化而引起的生态系统衰退,能够提升生态系统对多种生态系统服务的供给能力。与其他生态治理手段相比,NbS 具有低成本与高效益、负面影响较小、长期效益显著等优点,同时 NbS 具有滞后效应以及生态响应的不确定性等限制性缺点。因此在未来的相关研究中,应加强政策支持与公众参与机制,推动 NbS 的规模化实施、开展多学科的协同研究,深入揭示 NbS 缓解气候变化的内在机制,建立 NbS 生态效益的监测与评估体系,为科学决策提供依据,通过以上努力,可以更全面地发挥 NbS 在应对气候变化中的潜力,促进生态系统的可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997: 454-464.
- [2] 于德永, 郝蕊芳. 生态系统服务研究进展与展望. 地球科学进展, 2020, 35(8): 804-815.
- [3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] 尹彩春, 赵文武. 应对气候和生态环境危机 促进全球可持续发展——UNEP 与自然和谐共处报告简述. 生态学报, 2021, 41(23): 9536-9542.
- [5] 刘羽, 张珣, 石金莲, 刘爱军, 韩芳, 王瑜. 气候变化背景下生态系统服务研究的发展脉络、进展及展望. 生态学报, 2024, 44(19): 1-11.
- [6] FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture-Systems at breaking point. Synthesis report 2021, 2021.
- [7] IPCC. Summary for policymakers. In: climate change 2023: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023: 1-34.
- [8] Al-Ghussain L. Global warming: review on driving forces and mitigation. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019, 38(1): 13-21.
- [9] Reuveny R. Climate change-induced migration and violent conflict. Political Geography, 2007, 26(6): 656-673.
- [10] Papalexiou S M, Montanari A. Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. Water Resources Research, 2019, 55(6): 4901-4914.
- [11] Zhang W X, Zhou T J. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming. Science Bulletin, 2020, 65(3): 243-252.
- [12] Kumar P, Debele S E, Sahani J, Rawat N, Marti-Cardona B, Alfieri S M, Basu B, Basu A S, Bowyer P, Charizopoulos N, Gallotti G, Jaakko J, Leo L S, Loupis M, Menenti M, Mickovski S B, Mun S J, Gonzalez-Ollauri A, Pfeiffer J, Pilla F, Pröll J, Rutzinger M, Santo M A, Sannigrati S, Spyrou C, Tuomenvirta H, Zieher T. Nature-based solutions efficiency evaluation against natural hazards: Modelling methods, advantages and limitations. Science of the Total Environment, 2021, 784: 147058.
- [13] 牛书丽, 陈卫楠. 全球变化与生态系统研究现状与展望. 植物生态学报, 2020, 44(5): 449-460.
- [14] 吴建国. 气候变化对陆地生物多样性影响研究的若干进展. 中国工程科学, 2008, 10(7): 60-68.
- [15] 陈宝红, 周秋麟, 杨圣云. 气候变化对海洋生物多样性的影响. 台湾海峡, 2009, 28(3): 437-444.
- [16] 吴建国, 吕佳佳, 艾丽. 气候变化对生物多样性的影响:脆弱性和适应. 生态环境学报, 2009, 18(2): 693-703.
- [17] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F. Impacts of climate change on the future of biodiversity. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365-377.
- [18] Fraser D, Soul L C, Tóth A B, Balk M A, Eronen J T, Pineda-Munoz S, Shupinski A B, Villaseñor A, Andrew Barr W, Behrensmeier A K, Du

- A, Tyler Faith J, Gotelli N J, Graves G R, Jukar A M, Looy C V, Miller J H, Potts R, Kathleen Lyons S. Investigating biotic interactions in deep time. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(1): 61-75.
- [19] McGuire J L, Lawler J J, McRae B H, Nuñez T A, Theobald D M. Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(26): 7195-7200.
- [20] Wang Y, Pineda-Munoz S, McGuire J L. Plants maintain climate fidelity in the face of dynamic climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(7): e2201946119.
- [21] Furtak K, Wolińska A. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture; a review. *Catena*, 2023, 231: 107378.
- [22] Yan Y J, Hu Z Y, Wang L J, Jiang J, Dai Q H, Gan F L, Almaliki A H, Hashim M A, Hussein E E, Ghoneim S S M. Impact of extreme rainfall events on soil erosion on Karst Slopes: a study of hydrodynamic mechanisms. *Journal of Hydrology*, 2024, 638: 131532.
- [23] Chatterjee D, Das S R, Saha S, Sarkar A, Pathak H. Impacts of climate change on soil processes//*Climate Change Impacts on Soil-Plant-Atmosphere Continuum*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, (78): 3-36.
- [24] Díaz S, Settele J, Brondizio E S, Ngo H T, Gueze M, Agard J, Ameth A, Balvarena P, Brauman K, Butchart S, Chan K, Garibaldi L, Ichii K, Liu J, Subramanian S, Midgley G, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Zayas C. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. IPBES secretariat, Bonn, Germany, 2019.
- [25] Xie G Z, Sun W D. The retreat of the permafrost line during the interglacial maximum. *Science Bulletin*, 2023, 68(21): 2544-2547.
- [26] Corlett R T. The impacts of droughts in tropical forests. *Trends in Plant Science*, 2016, 21(7): 584-593.
- [27] Zheng B, Ciais P, Chevallier F, Chuvieco E, Chen Y, Yang H. Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Science Advances*, 2021, 7(39): eabh2646.
- [28] Yang Y, Li T, Pokharel P, Liu L X, Qiao J B, Wang Y Q, An S S, Chang S X. Global effects on soil respiration and its temperature sensitivity depend on nitrogen addition rate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 174: 108814.
- [29] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 2016, 529(7584): 84-87.
- [30] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, Li S S, Liu Y X, Ma Y Q. Agricultural drought monitoring: Progress, challenges, and prospects. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(6): 750-767.
- [31] Wang C Y, Linderholm H W, Song Y L, Wang F, Liu Y J, Tian J F, Xu J X, Song Y B, Ren G Y. Impacts of drought on maize and soybean production in NorthEast China during the past five decades. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(7): 2459.
- [32] He N Y, Chen L S, Sun A Z, Zhao Y, Yin S N, Guo F Q. A nitric oxide burst at the shoot apex triggers a heat-responsive pathway in Arabidopsis. *Nature Plants*, 2022, 8(4): 434-450.
- [33] Hughes T P, Kerry J T, Álvarez-Noriega M, Álvarez-Romero J G, Anderson K D, Baird A H, Babcock R C, Beger M, Bellwood D R, Berkelmans R, Bridge T C, Butler I R, Byrne M, Cantin N E, Comeau S, Connolly S R, Cumming G S, Dalton S J, Diaz-Pulido G, Eakin C M, Figueira W F, Gilmour J P, Harrison H B, Heron S F, Hoey A S, Hobbs J A, Hoogenboom M O, Kennedy E V, Kuo C Y, Lough J M, Lowe R J, Liu G, McCulloch M T, Malcolm H A, McWilliam M J, Pandolfi J M, Pears R J, Pratchett M S, Schoepf V, Simpson T, Skirving W J, Sommer B, Torda G, Wachenfeld D R, Willis B L, Wilson S K. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, 2017, 543(7645): 373-377.
- [34] 李睿, 朵海瑞, 史林鹭, 周延, 焦盛武, 秋培扎西, 雷光春. 可可西里 1970—2013 年气候变化特征及其对景观格局的影响. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12): 59-68.
- [35] Inglis N C, Vukomanovic J. Climate change disproportionately affects visual quality of cultural ecosystem services in a mountain region. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101190.
- [36] 翟睿洁, 赵文武, 华廷. 面向人类世的自然与社会:景观生态学的挑战与展望——第十届国际景观生态学大会述评. *生态学报*, 2020, 40(5): 1834-1837.
- [37] Manley K, Ego B N. Climate and biodiversity change constrain the flow of cultural ecosystem services to people: a case study modeling birding across Africa under future climate scenarios. *Science of the Total Environment*, 2024, 919: 170872.
- [38] Brady E. Environmental aesthetics and global climate change//*Handbook of the Philosophy of Climate Change*. Cham: Springer International Publishing, 2023: 395-414.
- [39] Dusenge M E, Duarte A G, Way D A. Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. *New Phytologist*, 2019, 221(1): 32-49.
- [40] 王志恒, 刘玲莉. 生态系统结构与功能: 前沿与展望. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1033-1035.
- [41] Seddon N, Chausson A, Berry P, Girardin C A J, Smith A, Turner B. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2020, 375(1794): 20190120.
- [42] Mackinnon K, Sobrevila C, Hickey V. Biodiversity, climate change, and adaptation: nature-based solutions from the World Bank portfolio. *The World Bank*, 2008.

- [43] IUCN. Nature-based solutions to address global societal challenges. IUCN; Gland, Switzerland, 2016, 97; 2016-2036.
- [44] IPCC. Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge: Cambridge University Press, 2022
- [45] 马克平.《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》是重要的全球生物多样性保护议程. 生物多样性, 2023, 31(4): 1-2.
- [46] Dunlop T, Khojasteh D, Cohen-Shacham E, Glamore W, Haghani M, van den Bosch M, Rizzi D, Greve P, Felder S. The evolution and future of research on Nature-based Solutions to address societal challenges. Communications Earth & Environment, 2024, 5: 132.
- [47] 顾恬玮, 彭建. 基于自然的碳达峰、碳中和解决方案: 关键议题. 生态学报, 2023, 43(9): 3384-3391.
- [48] Calliari E, Staccione A, Mysiak J. An assessment framework for climate-proof nature-based solutions. Science of the Total Environment, 2019, 656: 691-700.
- [49] Nelson D R, Bledsoe B P, Ferreira S, Nibbelink N P. Challenges to realizing the potential of nature-based solutions. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2020, 45: 49-55.
- [50] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, Houghton R A, Lomax G, Miteva D A, Schlesinger W H, Shoch D, Siikamäki J V, Smith P, Woodbury P, Zganjar C, Blackman A, Campari J, Conant R T, Delgado C, Elias P, Gopalakrishna T, Hamsik M R, Herrero M, Kiesecker J, Landis E, Laestadius L, Leavitt S M, Minnemeyer S, Polasky S, Potapov P, Putz F E, Sanderman J, Silvius M, Wollenberg E, Fargione J. Natural climate solutions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(44): 11645-11650.
- [51] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [52] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. Science, 2009, 325(5939): 419-422.
- [53] Daly H E. Toward some operational principles of sustainable development. Ecological Economics, 1990, 2(1): 1-6.
- [54] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [55] Cassen R H. Our common future: report of the world commission on environment and development. International Affairs, 1987, 64(1): 126.
- [56] MacKay A. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Journal of Environmental Quality, 2008, 37: 2407.
- [57] Farina A. Principles for landscape conservation, management, and design//Principles and Methods in Landscape Ecology. Cham: Springer International Publishing, 2022: 303-337.
- [58] Farina A. Principles of landscape dynamics//Farina A. Principles and methods in landscape ecology: An agenda for the second millennium. Cham: Springer International Publishing, 2006: 269-302.
- [59] Farina A. Methods in landscape ecology//Farina A. Principles and methods in landscape ecology: An agenda for the second millennium. Cham: Springer International Publishing, 2022: 401-439.
- [60] Girardin C A J, Jenkins S, Seddon N, Allen M, Lewis S L, Wheeler C E, Griscom B W, Malhi Y. Nature-based solutions can help cool the planet—if we act now. Nature, 2021, 593: 191-194.
- [61] 田惠玲, 朱建华, 李宸宇, 肖文发. 基于自然的解决方案: 林业增汇减排路径、潜力与经济性评价. 气候变化研究进展, 2021, 17(2): 195-203.
- [62] 张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案. 气候变化研究进展, 2020, 16(3): 336-344.
- [63] 纪平, 邵全琴, 王敏, 刘华, 王晓慧, 凌成星, 侯瑞霞. 中国三北防护林工程第二阶段生态效益综合评价. 林业科学, 2022, 58(11): 31-48.
- [64] 张丹妮, 陈西雅, 臧传富. 三北防护林体系建设工程区宜林潜力. 林业科学, 2021, 57(5): 184-194.
- [65] 王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 杨红. 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别. 生态学报, 2024, 44(3): 1231-1241.
- [66] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 李海奎. 天然林保护工程区近 20 年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.
- [67] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 张童越, 鲁亚楠, 龚直文, 王怡菲. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844.
- [68] 魏艳, 赵慧恩. 我国屋顶绿化建设的发展研究——以德国、北京为例对比分析. 林业科学, 2007, 43(4): 95-101.
- [69] 邵天然, 李超骥, 曾辉. 城市屋顶绿化资源潜力评估及绿化策略分析——以深圳市福田区为例. 生态学报, 2012, 32(15): 4852-4860.
- [70] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 傅微, 乔青, 王思思. “海绵城市”理论与实践. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36.
- [71] 姜之点, 彭立华, 杨小山, 姚灵烨, 朱春磊. 街区尺度屋顶绿化热效应及其与城市形态结构之间的关系. 生态学报, 2018, 38(19): 7120-7134.
- [72] 李兰, 李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考. 生态学报, 2018, 38(7): 2599-2606.
- [73] 李睿, 戎良. 杭州西溪国家湿地公园生态旅游环境容量. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2301-2307.
- [74] 黄宝荣, 王毅, 苏利阳, 张丛林, 程多威, 孙晶, 何思源. 我国国家公园体制试点的进展、问题与对策建议. 中国科学院院刊, 2018, 33(1): 76-85.
- [75] 唐芳林, 王梦君, 李云, 张天星. 中国国家公园研究进展. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2018, 17(3): 17-27.
- [76] 吕忠梅. 以国家公园为主体的自然保护地体系立法思考. 生物多样性, 2019, 27(2): 128-136.

- [77] 臧振华, 张多, 王楠, 杜傲, 孔令桥, 徐卫华, 欧阳志云. 中国首批国家公园体制试点的经验与成效、问题与建议. *生态学报*, 2020, 40(24): 8839-8850.
- [78] 陈述, 纪勤, 颜克胜, 陈云. 长江流域水资源-经济-生态系统的耦合协调及影响因素研究. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(3): 28-36.
- [79] 杨荣金, 孙美莹, 傅伯杰, 张乐, 赵文武, 张钰莹. 长江流域生态系统可持续管理策略. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1091-1099.
- [80] 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.
- [81] 张林, 王礼茂, 王睿博. 长江中上游防护林体系森林植被碳储量及固碳潜力估算. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(2): 111-115.
- [82] 杨胜苏, 刘卫柏. 基于恢复生态学的洞庭湖区“山水林田湖草”生态修复研究. *生态学报*, 2021, 41(16): 6430-6439.
- [83] 张帆, 韩鹏, 贝金娣. 黑土地保护政策的变迁历程与演进特征. *中国农业大学学报*, 2025, 30(1): 234-249.
- [84] Wang S, Xu L, Adhikari K, He N P. Soil carbon sequestration potential of cultivated lands and its controlling factors in China. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167292.
- [85] 潘剑彬, 董丽, 廖圣晓, 乔磊, 晏海. 北京奥林匹克森林公园空气负离子浓度及其影响因素. *北京林业大学学报*, 2011, 33(2): 59-64.
- [86] 廖宝文, 郑松发, 陈玉军, 李玫. 红树林湿地恢复技术的研究进展. *生态科学*, 2005, 24(1): 61-65.
- [87] 叶功富, 罗美娟, 卢昌义. 海岸带退化生态系统的恢复与海岸带综合管理. *世界林业研究*, 2006, 19(4): 5-10.
- [88] Ren Y J, Lü Y H, Fu B J. Quantifying the impacts of grassland restoration on biodiversity and ecosystem services in China: a meta-analysis. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 542-550.
- [89] 耿国彪, 宋峥. 加强草原保护修复改善草原生态状况——全国草原工作会议在内蒙古锡林浩特召开. *绿色中国*, 2019, (15): 8-12.
- [90] Hein T, Schwarz U, Habersack H, Nichersu I, Preiner S, Willby N, Weigelhofer G. Current status and restoration options for floodplains along the Danube River. *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 778-790.
- [91] 袁哲, 许秋瑾, 宋永会, 魏健, 段亮, 郜玉楠, 傅金祥. 辽宁省辽河流域水生态完整性恢复的实践与启示. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 48-55.
- [92] Seddon N, Turner B, Berry P, Chausson A, Girardin C A J. Grounding nature-based climate solutions in sound biodiversity science. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 84-87.
- [93] 赵东升, 王珂, 崔耀平. 植被变化对气候的反馈机制及调节效应. *生态学报*, 2023, 43(19): 7830-7840.
- [94] 吕晓, 辛宗斐, 彭文龙, 牛善栋. 农业可持续集约化评价的研究进展与展望. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3205-3212.
- [95] 杨帆, 张丽雪, 石琳. 沿海防护林体系建设工程区生态系统服务权衡/协同及驱动力. *生态学报*, 2023, 43(23): 9952-9966.
- [96] UNEP, IUCN. Nature-based solutions for climate change mitigation. Nairobi and Gland. 2021.
- [97] Miralles-Wilhelm F. Nature-based solutions in agriculture: Sustainable management and conservation of land, water and biodiversity. FAO and TNC, 2021.
- [98] Seymour F, Langer P G. Consideration of nature-based solutions as offsets in corporate climate change mitigation strategies. World Resources Institute, 2021.
- [99] Sudmeier-Rieux K, Arce-Mojica T, Boehmer H J, Doswald N, Emerton L, Friess D A, Galvin S, Hagenlocher M, James H, Laban P, Lacambra C, Lange W, McAdoo B G, Moos C, Mysiak J, Narvaez L, Nehren U, Peduzzi P, Renaud F G, Sandholz S, Schreyers L, Sebesvari Z, Tom T, Triyanti A, van Eijk P, van Staveren M, Vicarelli M, Walz Y. Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 803-810.
- [100] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [101] Debele S E, Leo L S, Kumar P, Sahani J, Ommer J, Buccignani E, Vranić S, Kalas M, Amirzada Z, Pavlova I, Shah M A R, Gonzalez-Ollauri A, Di Sabatino S. Nature-based solutions can help reduce the impact of natural hazards: a global analysis of NBS case studies. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 165824.
- [102] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320(5882): 1458-1460.
- [103] Gong H X, Wang G Y, Fan C Q, Zhuo X W, Sha L N, Kuang Z X, Bi J R, Cheng T T. Temporal accumulation and lag effects of precipitation on carbon fluxes in terrestrial ecosystems across semi-arid regions in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 356: 110189.
- [104] Yao L, Liu T, Qin J, Jiang H, Yang L, Smith P, Chen X, Zhou C H, Piao S L. Carbon sequestration potential of tree planting in China. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 8398.
- [105] Wang X Y, Peng J, Luo Y H, Qiu S J, Dong J Q, Zhang Z M, Vercruysse K, Grabowski R C, Meersmans J. Exploring social-ecological impacts on trade-offs and synergies among ecosystem services. *Ecological Economics*, 2022, 197: 107438.
- [106] Mazziotto A, Lundström J, Forsell N, Moor H, Eggers J, Subramanian N, Aquilué N, Morín-Ordóñez A, Brotons L, Snäll T. More future synergies and less trade-offs between forest ecosystem services with natural climate solutions instead of bioeconomy solutions. *Global Change Biology*, 2022, 28(21): 6333-6348.
- [107] Peng S Z, Terrer C, Smith B, Ciais P, Han Q G, Nan J L, Fisher J B, Chen L, Deng L, Yu K L. Carbon restoration potential on global land under water resource constraints. *Nature Water*, 2024, 2: 1071-1081.
- [108] Epelde L, Mendizabal M, Gutiérrez L, Artetxe A, Garbisu C, Feliu E. Quantification of the environmental effectiveness of nature-based solutions for increasing the resilience of cities under climate change. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 67: 127433.