



DOI: 10.20103/j.stxb.202402080331

刘羽,张珣,石金莲,刘爱军,韩芳,王瑜.基于文献计量的气候变化背景下生态系统服务研究综述.生态学报,2024,44(19):8922-8931.

基于文献计量的气候变化背景下生态系统服务研究综述

刘羽^{1,2,3},张珣^{1,2,4,*},石金莲²,刘爱军³,韩芳³,王瑜¹

1 北京工商大学计算机与人工智能学院,北京工商大学系统科学研究院,北京 100048

2 北京工商大学商学院,北京工商大学文化和旅游发展研究院,北京 100048

3 内蒙古自治区林业和草原监测规划院,内蒙古自治区草原遥感及应急技术储备重点实验室,呼和浩特 010020

4 和田师范专科学校,和田 848000

摘要:阐明气候变化对生态系统服务的影响,对于实现生态系统可持续发展至关重要。基于 WoS(Web of Science)核心合集科学引文索引扩展数据库,根据 CiteSpace 软件绘制的知识图谱,对气候变化背景下生态系统服务研究的趋势、热点以及前沿进行了分析。结果表明,气候变化背景下生态系统服务的研究已成为学术界重要研究议题之一,学者们从多个视角探讨这一议题,该领域的研究热点和前沿处于动态变化中。已有研究主要从气候变化对生态系统服务影响的评估、对权衡与协同关系的影响、影响机制以及优化管理措施等四个方面展开。未来研究应多关注气候变化背景下生态系统服务的阈值效应及文化服务的变化,加强气候变化对生态系统服务相互关系影响的研究,厘清未来气候变化影响生态系统服务的机制,以及推动人工智能与大数据技术在管理模拟研究中的应用。

关键词:气候变化;生态系统服务;知识图谱

作为链接人类社会和生态系统的桥梁,生态系统服务是指生态系统直接或间接向人类提供的惠益^[1]。包括供给服务,如食物和木材供给等;支持服务,如养分循环和土壤形成等;调节服务,如气候调节和水质净化等;以及文化服务,如景观美学和游憩娱乐等^[2-3]。作为人类赖以生存和发展的基础^[4],生态系统服务已被认为是推进联合国可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)的重要实现手段之一^[5]。然而,在全球变化和人口快速增长的背景下,近 60%的生态系统服务在过去 50 年中显著退化^[6];此外,生态系统服务有限供给与人类社会巨大需求之间的供需不平衡矛盾日益凸显^[7],这对人类可持续发展提出严峻考验。

气候变化是影响生态系统服务的主要因素之一^[8-9]。气候变化不仅影响生态系统服务的大小及分布,而且当气候变化加剧时,生态系统服务可能会出现阈值效应^[10-11]。与此同时,生态系统服务对气候变化具有反馈效应,能够减缓气候变化带来的负面影响。因此,气候变化背景下有关生态系统服务的研究已成为学者们广泛关注的重要议题之一。然而,该领域现有研究综述尚未覆盖到近几年研究成果,或基于知识图谱的分析略显不足。鉴于此,有必要系统梳理总结气候变化背景下生态系统服务研究的进展,并对未来研究趋势进行展望,以期增强对气候变化影响生态系统服务领域的认知,为制定对气候扰动更具韧性的生态保护政策提供科学依据。

基金项目:国家自然科学基金项目(42101470,72242106);新疆自然科学基金项目(2023D01A57);新疆社科基金项目(2023BTY128)

收稿日期:2024-02-08; **网络出版日期:**2024-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxun@btbu.edu.cn

本文基于 WoS 核心合集科学引文索引扩展 (SCI-E) 数据库,以“气候变化和生态系统服务”为主题进行检索。检索工作于 2023 年 12 月 3 日进行,检索时间范围设置为 2000—2023 年,选择文献类型为文章,限定语言为英语,排除会议论文、不相关论文以及重复论文,按照“完整记录和引用参考文献”格式保存为纯文本,最终收集到 7913 篇文献作为研究数据。采用 CiteSpace 软件对检索结果绘制知识图谱,梳理气候变化背景下生态系统服务研究发展脉络;在此基础上,提出该领域四个主要研究方向并进行总结论述;最后,针对当前研究现状,提出研究不足并对未来研究趋势进行展望(图 1)。

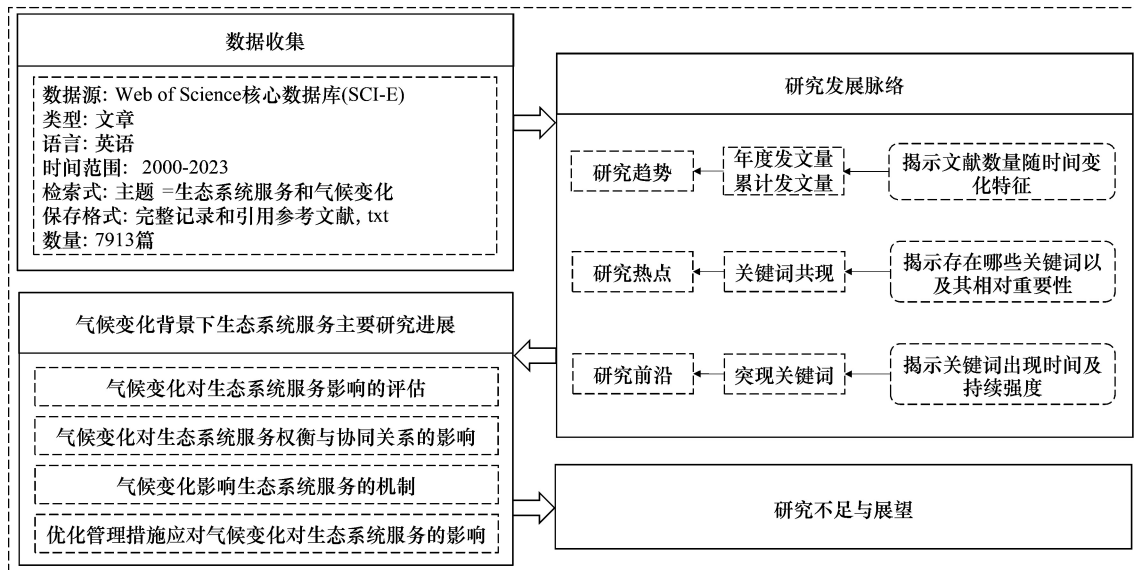


图 1 气候变化背景下生态系统服务研究技术流程图

Fig.1 Workflow of the study regarding ecosystem service in the context of climate change

1 研究发展脉络

1.1 研究趋势

文献数量是衡量研究领域活跃度和受关注的重要指标之一,其随时间分布可以直观揭示研究领域的演化趋势和特征,对于分析研究热点和预测前沿发展具有重要意义^[12]。图 2 所示为所检索主题的年度文献数量和累计文献数量。从图 2 可以看出相关研究大致分为三个时期,从 2000 年到 2010 年是初步探索期,年度文献数量呈缓慢增长趋势且年度总数量在 100 篇以内,2010 年年度文献数量为 77 篇;从 2011 年到 2020 年是快速发展期,年度文献数量平均每年增长 80 篇,2020 年年度文献数量为 918 篇;2021 年至今是高速产出期,年度文献数量均在 1000 篇以上。截至目前,2022 年年度文献数量最多,为 1233 篇。在 2000 年到 2023 年期间,累计文献数量持续增加。总体而言,气候变化背景下生态系统服务研究的关注度逐年提升,已成为学术界重要研究领域之一。

1.2 研究热点

关键词共现能够反映研究领域存在的关键词及其相对重要性,而关键词出现频次的高低可以反映该关键词是否为领域内的研究热点。从图 3 可以看出,出现频次最高的两个关键词是“气候变化 (climate change)”和“生态系统服务 (ecosystem services)”,频次均在 3000 次以上。此外,“生物多样性 (biodiversity)”、“管理 (management)”、“影响 (impacts)”、“保护 (conservation)”、“土地利用 (land use)”、“动态 (dynamics)”以及“植被 (vegetation)”等关键词出现的频次也较高,均在 450 次以上。总体而言,学者们从多视角探讨气候变化背景下的生态系统服务变化:不仅关注气候变化对森林、草原等陆地生态系统服务的影响,而且对海洋生态系统服务的影响也有研究;此外,气候变化通过改变土地利用进而影响生态系统服务的机制研究以及通过保护

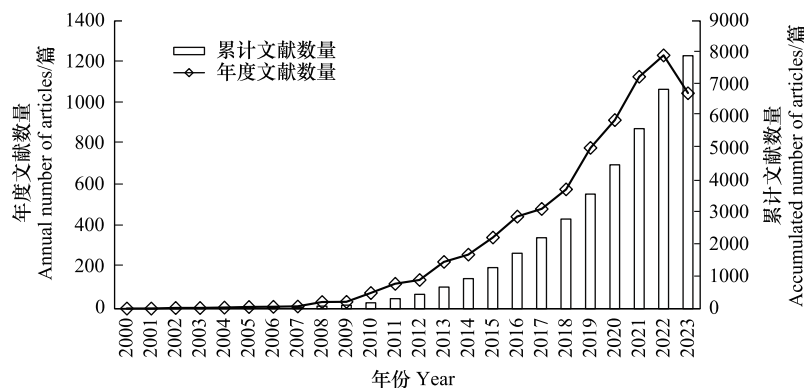


图2 气候变化背景下生态系统服务研究的年度及累计文献量

Fig.2 The annual and accumulated article number of the studies regarding ecosystem service in the context of climate change

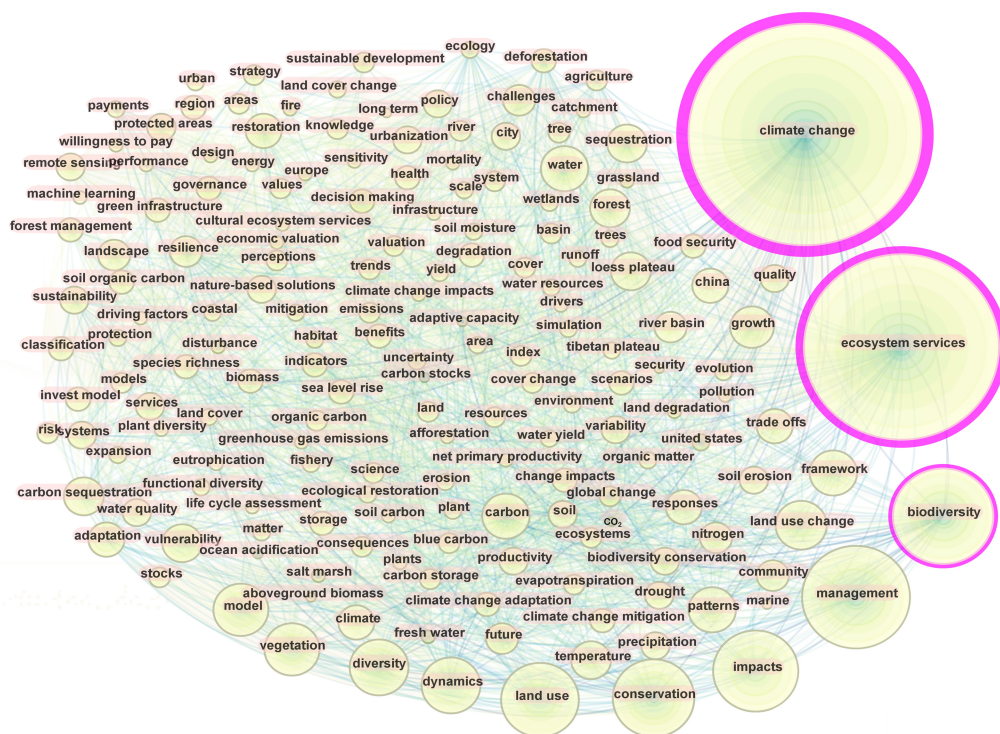


图3 气候变化背景下生态系统服务研究的关键词共现图谱

Fig.3 Knowledge graph of co-occurrence keywords of the studies regarding ecosystem service in the context of climate change

和管理生态系统以应对气候变化亦是研究热点之一。

1.3 研究前沿

突现关键词是指某一时期内出现频次高的关键词,能够全面动态的反映该时期的研究热点、前沿趋势以及新的研究视角^[13]。从图4可以看出,“全球变化(global change)”、“气候变化(climate change)”以及“生物多样性保护(biodiversity conservation)”等突现强度大。“气候变化(climate change)”、“碳(carbon)”以及“碳汇(carbon sequestration)”突现持续时间长,均为9年。2020年以后突现词出现速度较快。仅2020年到2023年三年间出现5个突现词,分别为“草地(grassland)”、“植物(plant)”、“城市(urban)”、“基于自然的解决方案(nature-based solutions)”以及“设施(infrastructure)”。总体说来,气候变化对生态系统服务影响的研究热点和前沿一直处于动态变化中,研究关注点从评估气候变化对生态系统服务的影响逐步过渡到讨论如何管理生态系统,以减缓气候变化带来的负面影响。

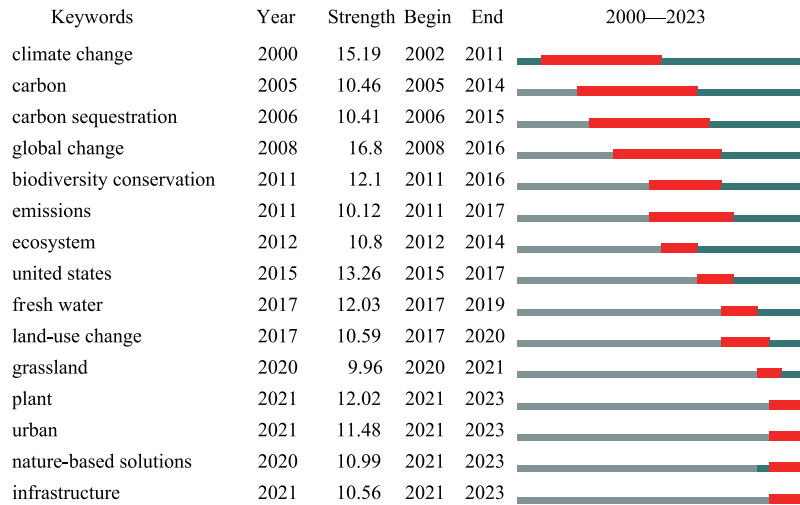


图 4 气候变化背景下生态系统服务研究的突现词图谱

Fig.4 Knowledge graph of burst terms of the studies regarding ecosystem service in the context of climate change

2 气候变化背景下生态系统服务主要研究进展

基于上述对研究趋势、热点以及前沿的分析,结合目前研究现状,提出该领域四个主要研究方向:气候变化对生态系统服务影响的评估、气候变化对生态系统服务权衡与协同关系的影响、气候变化影响生态系统服务的机制以及优化管理措施应对气候变化对生态系统服务的影响(图 5)。

2.1 气候变化对生态系统服务影响的评估

定量化评估气候变化影响下的生态系统服务经济效益或生态效益,有助于厘清生态系统服务本底、提高生态修复与补偿等管理决策水平^[14-15]。目前,已有研究主要关注气候变化对生境质量、土壤保持、固碳释氧、物质循环等生态系统服务的价值量或实物量的时空动态影响^[16]。

生态系统服务的价值量是指生态系统服务所具有的经济或货币价值^[17]。Costanza 等^[1]于 1997 年基于价值当量法核算全球生态系统服务总价值的研究被视为里程碑,其方法最常被有关生态系统服务价值量评估的研究采用。除了价值当量法,支付意愿法、生态足迹法、影子工程法、机会成本法、市场价值法也被用于生态系统服务价值量的计算^[7]。生态系统服务的实物量是指其存量的大小。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型、InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)模型、ARIES(Artificial Intelligence for Ecosystem Services)模型^[18]、MaxEnt(Maximum Entropy)模型以及 SolVES(Social Values for Ecosystem Services)模型等常被用于评估生态系统服务实物量。各个模型有各自的特点及适用范围。SWAT 模型多被用于流域尺度的研究中,适用于评估与有水相关的生态系统服务。InVEST 模型因其空间分析能力强、理论体系完善、操作简单以及集成多种生态系统服务评估功能而被广泛使用,多应用于评估产水量、碳固存、生境质量等生态系统服务供给水平^[19-20]。然而,在定量化评估生态系统服务需求方面,基于 InVEST 模型的研究尚显不足。ARIES 模型侧重于模拟生态系统服务流动,可以从供给和需求两个方面评估碳固存、洪水调节、淡水供给等服务。但该模型对数据要求较高,因而应用范围受到限制^[21],目前主要应用于北美洲和欧洲^[22]。MaxEnt 模型

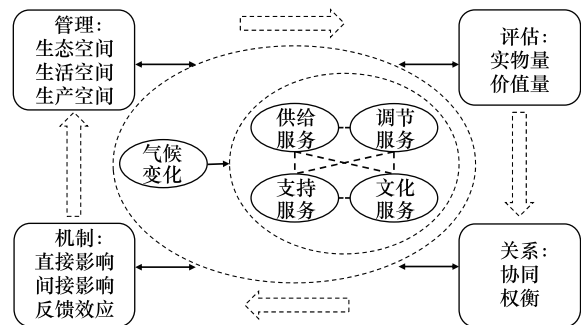


图 5 气候变化背景下生态系统服务的研究框架

Fig.5 Framework of the studies regarding ecosystem service in the context of climate change

聚焦于刻画环境变量与观测点之间的关系^[23],常用于预测物种的潜在分布范围。SolVES 模型侧重于量化评估生态系统向人类提供的文化服务^[24],例如美学和游憩服务,其评估过程中需要将参与式制图得到的社会价值点作为输入数据之一^[25]。对这些模型参数进行本地化训练是目前应用模型评估生态系统服务的关键所在。

气候变化不仅影响城市和农田等人工生态系统的生态系统服务,而且也影响森林、草地、湿地、海洋等自然生态系统的生态系统服务。

对城市生态系统而言,气候变化会改变其水文过程,特别是地表径流,而地表径流是城市内涝的主要影响因素之一。Ju 等^[26]基于空间模型,模拟了 2030 年气候变化和城市增长对京津冀城市群地表径流的影响,结果表明在气候变化和城市增长情景下,地表径流都有所增加。对农田生态系统而言,气候变化会影响其重要的供给服务,即作物产量。Droste 等^[27]基于样地的产量数据和气象数据以分析气候变化对农作物的影响,结果表明相对较高的温度会提高冬小麦产量。气候变化通过改变森林生态系统的面积与生产力从而影响其固碳等生态系统服务^[28]。Tian 等^[29]的研究表明,在未来不同气候情景下,森林面积及其碳储量存在差异。对草地生态系统而言,气候变化通过影响其生物多样性以及生物量等方面,进而影响草原生态系统的韧性以及牧业生产。Zarrineh 等^[30]的研究表明气候变化引起的生长季延长,会提高草原平均生产力,进而能够减缓冬季土壤流失。气候变化是湿地生态系统服务退化的主要驱动因素之一。Mehvar 等^[31]基于多种未来气候情景,定量评估了 2100 年孟加拉国西部沿海地区因海平面上升引发洪水导致的湿地生态系统服务价值损失。气候变化不仅会对海洋生态系统生物多样性、渔业供给等方面造成影响^[32],而且会引起海岸侵蚀。Paprotny 等^[33]的研究表明在未来气候情景下,海岸侵蚀会造成北海和地中海东部许多区域生态系统服务下降。

2.2 气候变化对生态系统服务权衡与协同关系的影响

气候变化会导致不同生态系统服务供给水平不同,进而会影响生态系统服务之间的权衡与协同关系^[34]。例如,Li 等^[35]的研究表明哈萨克斯坦在未来气候变化和社会经济发展情景下,产水量、碳固存和土壤保持之间的协同关系将被增强。权衡是指一个生态系统服务的提升对其他生态系统服务在时空尺度上产生负面影响^[36],而协同是指两种生态系统服务存在相同变化趋势的现象^[37]。阐明气候变化对不同时空尺度下生态系统服务间相互关系的影响,有助于提高生态系统服务管理水平,为实现生态系统服务的可持续供给提供理论依据。

常用于衡量生态系统服务权衡与协同关系的方法有皮尔逊(Person)或斯皮尔曼(Spearman)相关分析法、空间自相关分析法、偏相关分析法、均方根误差法(RMSE)以及地理加权回归法等。皮尔逊或斯皮尔曼相关分析法常用于识别时间序列上生态系统服务之间的权衡与协同关系,但对空间关系的表达能力有限。相关系数的值介于-1 到 1 之间;负值代表权衡关系,正值代表协同关系;绝对值越大,相关性越强^[38]。莫兰指数等空间自相关分析法则能反映生态系统服务相互之间的空间集聚特征与时空分异性,要求数据具有空间位置信息。偏相关分析法可以排除不相关因素的干扰^[39],更清晰地揭示时间序列上权衡与协同关系的变化,以及空间上的统计显著性差异^[40]。RMSE 方法将生态系统服务关系的识别从传统正负相关性分析延伸到刻画生态系统服务在相同方向上的非均匀变化^[41]。它不仅表明空间上的权衡与协同关系,还能衡量这些关系的强度^[42]。RMSE 值介于 0 到 1 之间。值越大,权衡关系越强;值越小,权衡关系越弱;当 RMSE 值为 0 时,表明两种生态系统服务之间的关系为协同^[43]。地理加权回归法不仅可以分析权衡与协同关系及其强度,还可以量化这些关系影响因素的空间异质性。上述方法的侧重点各有不同。然而,这些方法适用于探究两种生态系统服务之间的关系,对于两种以上生态系统服务间相互作用的分析还相对缺乏^[44]。

气候变化对生态系统服务间权衡与协同关系的影响存在尺度效应,即相同的两种生态系统服务间的相互关系在不同时空尺度下存在差异^[45-46]。例如,Luo 等^[47]以青藏高原为研究区,对原材料供给、碳固存、产水量以及土壤保持等四种生态系统服务之间的关系展开研究,结果表明未来气候情景下生态系统服务之间的协同作用在三个空间尺度上总体一致,但在流域尺度上具有更显著的协同效应。尺度效应的产生源于气候变化

以及人为活动等生态系统服务驱动因素在不同尺度上表现出的空间异质性差异,以及这些因素与生态系统服务间的非线性关系。一般而言,随着研究尺度的增大,气候变化对生态系统服务的影响变得更加突出;而在较小尺度上,生态系统服务的权衡与协同关系更多地受到以人为活动为主导的综合因素的影响。

2.3 气候变化影响生态系统服务的机制

气候变化是驱动生态系统服务变化的重要因素之一。例如,温度升高会加速地表水分蒸发,导致土壤微生物组成和数量的变化,进而影响土壤固碳能力以及植被生产力;而过量的降雨量可能加剧水土流失,降低土壤肥力。生态系统服务的变化通常是多种气候变化因子共同作用的结果。Kumar 等^[48]以南亚植被为研究对象,指出气候变化和二氧化碳浓度升高会导致生物量、树木高度和冠层覆盖的增加,从而可能增加生态系统的碳汇服务。Vandendorj 等^[49]预测干旱强度对澳大利亚东部林地生态系统服务的影响,结果表明除了有效磷,干旱度增加对土壤有机碳、有效氮以及植被生物量累积以及分解均具有抑制作用。Meng 等^[50]基于四种共享社会路径情景,分析了 2040 年至 2100 年的气候趋势对青藏高原生态系统服务的影响,结果表明草地、灌木林和针叶林的分布将发生变化,而这些植被格局的改变会影响未来青藏高原沙尘暴防护服务。

除了直接影响,气候变化还通过改变土地利用从而间接影响生态系统服务。例如,Liu 等^[51]以关中-天水经济区为例,模拟 2050 年 16 种气候情景下的土地利用变化,结果表明气候变化通过改变土地利用从而对碳固存、土壤保持和产水量等三种生态系统服务产生显著影响。Wang 等^[52]以新疆博尔塔拉蒙古自治州为研究区,比较了不同气候情景下的不同土地利用状况,并进一步探讨了这些土地利用状况与碳固存的内在关联。

与此同时,生态系统服务对气候变化具有反馈效应,即生态系统服务能够影响区域生物地球化学循环过程。例如,由城市植被所组成的生态系统能够提供降温作用,有助于减少城市热岛效应的负面影响^[53]。Rötzer 等^[54]通过基于过程的生长模型 CityTree 分析和模拟了当前以及未来气候条件下中欧城市的树木生长和生态系统服务,发现城市树木可以显著改善城市气候并缓解气候变化的影响,但具体改善程度取决于树种、树龄以及特定环境,因此在城市生态系统可以采取种植适宜的树种来抵御气候变化带来的影响。此外,作为一种重要的生态系统服务,生物多样性能够提高生态系统对气候变化的抵抗力^[55]。Isbell 等^[56]的研究表明生物多样性提高了草地生态系统对极端气候的韧性。Sidibé 等^[57]在撒哈拉以南非洲雨养农业的研究表明,土壤生物多样性保护措施可以通过调节土壤湿度以应对干旱可能性不断增加带来的风险,这对于与保障农业生产力和粮食安全等有关的生态系统服务至关重要。

2.4 优化管理措施应对气候变化对生态系统服务的影响

气候变化为生态系统管理带来了新挑战和新议题。如何管理生态系统,更好地发挥生态系统服务以应对气候变化的影响,已经引起了学术界广泛讨论。针对“生态-生产-生活”空间,制定有效的管理策略将有助于提高生态系统服务供给水平,增强生态系统对气候变化的抵御能力,进而提升人类福祉^[44]。

对于海洋、草地等生态空间,可以通过自然保护区划定、可持续管理以及生态修复等手段缓解气候变化带来的负面影响。Roberts 等^[58]认为设置海洋保护区是一种可行且技术门槛低并具有成本效益的策略,其指出管理得当的海洋保护区有助于海洋生态系统及人类适应气候变化。Li 等^[59]基于 2000—2019 年锡林郭勒典型草原气候因素、放牧压力和生态系统服务的时空格局,探讨了过去 20 年气候变化和放牧压力对草原生态系统服务的驱动机制和相对贡献,结果表明减少放牧压力对改善区域生态系统服务起着重要作用,有助于提高生态系统在不利气候条件下的韧性。Rodrigues 等^[60]在葡萄牙西北部一个森林地区,评估当前和未来气候变化情景下年土壤流失量,结果表明气候变化情景会增加降雨侵蚀力从而促进水蚀过程,而不同的森林管理模式会造成不同的土壤流失潜力。Huang 等^[61]以长期实施生态修复的北京-天津沙源区为例,研究结果表明生态修复可以提高碳固存、土壤保持等生态系统服务供给水平,植树造林对生态系统服务的促进作用大于种植草地。

对于城市等生活空间,绿色基础设施可以通过蒸发、渗透以及拦截等功能改变水文过程,而被用来提高城市韧性以应对城市内涝以及城市热岛等问题^[62-63]。绿色基础设施通常是指在城市地区提供生态和社会功能

的自然及人工绿地系统^[64]。在气候变化背景下如何优化绿色基础设施已成为研究热点。Ou等^[65]以人口稠密的大都市地区—长江三角洲为例,提出了一种将社会生态系统风险耦合到未来绿色基础设施优化中以应对气候变化的框架。Liu和Russo^[66]的研究表明,通过调整城市绿地组成和空间布局而引起的城市生态系统服务的协同或权衡作用,可以在决策中被有效评估,这将有助于提高城市应对气候变化的能力。

对于农田等生产空间,改变作物种植格局、增加作物多样性、防止水土流失等可持续农业管理措施被用来解决气候变化带来的不确定性问题^[67]。Degani等^[68]的研究表明在不同的气候条件下,通过增加作物多样性的管理措施可以在减少外部投入的情况下维持产量,而多样化的作物轮作可以形成更具韧性的系统,提高对气候因子的胁迫抗性。针对气候变化引起降水强度增加进而提高水土流失风险的问题,Koth等^[69]采用基于物理侵蚀3D模型对不同农田管理措施的水土流失风险进行评估,指出采取土壤保护及农田多样性措施可以提高土壤健康和气候适应性。

值得一提的是,生态修复、绿色基础设施等都是基于自然的解决方案的重要组成部分。基于自然的解决方案是指为有效应对气候变化以及粮食安全等风险挑战,通过对生态系统进行保护、可持续管理、修复及改善等近自然和仿自然措施,实现保护生物多样性以及提升人类福祉的目的^[70]。当前,这一理念已被学术界广泛认同为其在未来提高生态系统韧性、抵御气候变化方面具有巨大应用潜力。

上述研究主要探讨了针对生态系统的单一管理措施。然而,在应对气候变化时,应当考虑同时采用多种管理措施。例如,对于草地生态系统,可以在减少放牧的前提下进行土壤改良^[71];对于林地生态系统,则应结合功能分区以及混交林种植的方法^[72]。在实施这些综合管理措施时,需考虑不同措施之间的相互作用,以确保它们能够协同有效地应对气候变化^[73]。

3 研究不足及展望

(1) 气候变化背景下生态系统服务阈值效应及文化服务变化的研究

作为生态系统服务非线性变化的关键特性,阈值效应是指在阈值状态下,微小的影响因素变化可能导致生态系统服务的显著改变。然而,现有研究对气候变化背景下生态系统服务的阈值效应关注不足。提升气候变化对生态系统服务影响的阈值是否存在的界定能力与准确刻画能力不仅是研究领域的难点,亦是管理调控的基础。此外,已有研究主要集中在气候变化对生态系统供给、调节与支持服务的影响,而其对文化服务以及人类福祉的影响研究却有待加强。例如,可以通过挖掘带有图片或视频、文字标签、地理位置等多模态社交媒体大数据来分析气候变化对景观美学等文化服务的影响。

(2) 气候变化对生态系统服务相互关系的影响研究

虽然已有研究在气候变化对生态系统服务权衡与协同关系的影响方面关注较多,但在明确生态系统服务关系基础上,如何增强有效协同、减缓不必要权衡方面的讨论仍然较少。将权衡与协同关系纳入科学管理决策是实现可持续发展的重要前提。例如,基于“气候变化-权衡和协同关系-土地利用规划”的级联框架,将权衡与协同关系纳入土地利用不同规划管理过程中,通过对比分析选择对气候变化更具韧性的景观格局。此外,亟需加强对气候变化影响多种生态系统服务间关系的探讨。例如,将多种生态系统服务抽象为图论中的节点,节点之间的联系及权重代表生态系统服务之间的关系及强度,从而厘清多种生态系统服务之间的相互作用机制。同时,要关注气候变化对不同尺度下生态系统服务间相互关系的影响,识别跨尺度关联机制^[74],才能更好的应对气候变化带来的挑战。

(3) 未来气候变化影响生态系统服务的机制研究

现有研究多关注历史气候变化对生态系统服务影响的机制,而对未来气候变化情景的关注却略显不足。可以通过构建“未来气候情景-土地利用-生态系统服务”耦合关系来剖析未来气候变化与生态系统服务的内在作用机制。然而,作为未来气候变化情景数据的第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6),在被应用到区域尺度的研究时,存在空间分辨率不足的问题,从而会

引入较大不确定性。对 CMIP6 模式进行降尺度模拟是这一研究方向的难点与重点。

(4) 气候变化背景下生态系统服务管理的模拟研究

在“双碳”背景下,为应对气候变化,以应用为导向的生态系统服务管理显得愈发重要。管理途径不仅包括土地利用规划,同时包括生态补偿、生态修复等措施手段。如何在有限资金的背景下选择实施更有效的管理方案及评估其管理效果是当前亟待解决的关键问题之一。通过引入人工智能与大数据等技术手段降低试错成本。例如,可以借助数字孪生技术模拟不同生态修复方案的可行性及效果为生态系统服务管理调控提供科学依据。此外,管理调控也不应仅限于单一要素的生态系统服务,而是要建立全要素综合管理理念^[75]。

4 结论

阐明气候变化对生态系统服务的影响,可以为制定对气候变化具有韧性的生态保护和生态管理措施以及实现区域可持续发展提供科学依据。基于知识图谱的结果表明,气候变化背景下生态系统服务的研究已成为学术界重要研究领域之一;学者们从多个视角探讨气候变化背景下的生态系统服务变化,包括气候变化对生态系统服务供给水平的影响、影响机制,以及如何通过生态系统的保护和管理应对气候变化;研究关注点处于动态变化中,从评估气候变化对生态系统服务的影响逐步过渡到讨论如何管理生态系统。基于上述分析,本文从气候变化对生态系统服务影响的评估、对权衡与协同关系的影响、气候变化影响生态系统服务的机制以及优化管理措施应对气候变化四个方面进行文献综述。针对现有研究不足,提出未来应进一步加强对气候变化背景下生态系统服务阈值效应及文化服务变化的研究,深入剖析气候变化对生态系统服务相互关系的影响,厘清未来气候变化影响生态系统服务的机制,并推动人工智能与大数据等技术在模拟管理方面的应用。

参考文献 (References):

- [1] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [3] Munang R, Thiaw I, Alverson K, Liu J, Han Z. The role of ecosystem services in climate change adaptation and disaster risk reduction. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(1): 47-52.
- [4] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [5] Keesstra S, Nunes J, Novara A, Finger D, Avelar D, Kalantari Z, Cerda A. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2018, 610: 997-1009.
- [6] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [7] 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.
- [8] Kim S, Song W, Joo W, Choi J, Park C. Utilization of ecosystem services in future vision decision-making for climate-resilient cities. *Landscape and Ecological Engineering*, 2024, 20(1): 53-64.
- [9] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I C, Araújo M B, Arnell N W, Bondeau A, Bugmann H, Carter T R, Gracia C A, de la Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendining M, House J I, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M J, Meyer J, Mitchell T D, Reginster I, Rounsevell M, Sabaté S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes M T, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752): 1333-1337.
- [10] Grimm N B, Groffman P, Staudinger M, Tallis H. Climate change impacts on ecosystems and ecosystem services in the United States: process and prospects for sustained assessment. *Climatic Change*, 2016, 135(1): 97-109.
- [11] Norberg J, Urban M C, Vellend M, Klausmeier C A, Loeuille N. Eco-evolutionary responses of biodiversity to climate change. *Nature Climate Change*, 2012, 2(10): 747-751.
- [12] 景晓栋, 田贵良, 班晴晴, 胡豪, 张钰宁. 基于文献计量的 21 世纪以来我国生态系统服务研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2023, 43(17): 7341-7351.
- [13] 董海宾, 刘思博, Bolormaa Damdinsuren, 侯向阳. 基于 CiteSpace 的国内生态补偿研究. *生态学报*, 2022, 42(20): 8521-8529.
- [14] 刘世梁, 董玉红, 王方方, 刘华, 赵奕菲. 生态系统服务价值评估在生态修复中的应用. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1343-1354.
- [15] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [16] 侯鹏, 王桥, 申文明, 翟俊, 刘慧明, 杨旻. 生态系统综合评估研究进展: 内涵、框架与挑战. *地理研究*, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [17] 史雪威, 陈绪慧, 蔡明勇, 张新胜, 申振, 邵文飞, 申文明, 李静, 肖桐. 宁夏全区及生态保护红线生态系统服务价值变化评估. *地球信*

- 息科学学报, 2023, 25(5): 999-1011.
- [18] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360-3367.
- [19] 王培家, 章锦河, 徐冬, 马小宾, 周乐莹. 国外土地生态系统服务研究进展及其对国内的启示. 地理与地理信息科学, 2023, 39(4): 77-85.
- [20] 梁甜, 黄茜, 杨霏, 毛怡然, 罗胤晨, 文传浩, 任晓红. 基于 InVEST-PLUS 模型的三峡库区(重庆段)生境质量演变及预测. 长江流域资源与环境, 2023, 32(10): 2184-2195.
- [21] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [22] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [23] 李永钧, 张单阳, 王珂, 黄璐. 乡村生态系统文化服务供需关系研究——以浙江省湖州市为例. 生态学报, 2022, 42(17): 6888-6899.
- [24] 潘健峰, 马月伟, 蔡思青, 陈艳, 陈玉美. SolVES 模型在生态系统服务功能社会价值评估中的应用. 世界林业研究, 2023, 36(1): 20-25.
- [25] 夏哲一, 刘黎明, 袁承程, 魏雪, 黄家嗣, 王怡. 基于社会-生态耦合视角的城市边缘区生境服务评估与分区. 生态学报, 2024, 44(4): 1501-1513.
- [26] Ju X H, Li W F, Li J R, He L, Mao J Q, Han L J. Future climate change and urban growth together affect surface runoff in a large-scale urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104970.
- [27] Droste N, May W, Clough Y, Börjesson G, Brady M V, Hedlund K. Soil carbon insures arable crop production against increasing adverse weather due to climate change. *Environmental Research Letters*, 2020, 15: 124034.
- [28] Shaw M R, Pendleton L, Cameron D R, Morris B, Bachelet D, Klausmeyer K, MacKenzie J, Conklin D R, Bratman G N, Lenihan J, Haunreiter E, Daly C, Roehrdanz P R. The impact of climate change on California's ecosystem services. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 465-484.
- [29] Tian L, Tao Y, Fu W X, Li T, Ren F, Li M Y. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China. *Remote Sensing*, 2022, 14(10): 2330.
- [30] Zarrineh N, Abbaspour K C, Holzkämper A. Integrated assessment of climate change impacts on multiple ecosystem services in Western Switzerland. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135212.
- [31] Mehvar S, Filatova T, Sarker M H, Dastgheib A, Ranasinghe R. Climate change-driven losses in ecosystem services of coastal wetlands; a case study in the West coast of Bangladesh. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 169: 273-283.
- [32] Cavanagh R D, Melbourne-Thomas J, Grant S M, Barnes D K A, Hughes K A, Halfter S, Meredith M P, Murphy E J, Trebilco R, Hill S L. Future Risk for Southern Ocean Ecosystem Services Under Climate Change. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 7: 615214.
- [33] Paprotny D, Terefenko P, Giza A, Czapliński P, Voudoukas M I. Future losses of ecosystem services due to coastal erosion in Europe. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 144310.
- [34] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [35] Li J Y, Chen X, Kurban A, Van de Voorde T, De Maeyer P, Zhang C. Coupled SSPs-RCPs scenarios to project the future dynamic variations of water-soil-carbon-biodiversity services in Central Asia. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107936.
- [36] Mouchet Maud A, Pénélope L, Berta M L, Emilie C, Pierre G, Coline B, Sandra L. An interdisciplinary methodological guide for quantifying associations between ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 28: 298-308.
- [37] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [38] 胡宇霞, 龚吉蕊, 朱趁趁, 矢佳昱, 张子荷, 宋靓苑, 张魏圆. 基于生态系统服务簇的内蒙古荒漠草原生态系统服务的空间分布特征. 草业学报, 2023, 32(4): 1-14.
- [39] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [40] 王修文, 于书霞, 史志华, 王玲. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 7002-7014.
- [41] Feng Q, Zhao W W, Hu X P, Liu Y, Daryanto S, Cherubini F. Trading-off ecosystem services for better ecological restoration: a case study in the Loess Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120469.
- [42] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [43] 卫彦宏, 乔旭宁, 张仲伍, 杨永菊, 牛海鹏. 基于气候带与农业区划的农田生态系统服务权衡及驱动机制. 农业工程学报, 2022, 38(20): 220-228.
- [44] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 郭旭东. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望. 中国土地科学, 2018, 32(12): 82-89.
- [45] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 高江波. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望. 地球科学进展, 2015, 30(11): 1250-1259.
- [46] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [47] Luo Y Y, Yang D W, O'Connor P, Wu T H, Ma W J, Xu L X, Guo R F, Lin J Y. Dynamic characteristics and synergistic effects of ecosystem services under climate change scenarios on the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientific Reports*, 2022, 12: 2540.
- [48] Kumar D, Pfeiffer M, Gaillard C, Langan L, Scheiter S. Climate change and elevated CO₂ favor forest over savanna under different future scenarios in South Asia. *Biogeosciences*, 2021, 18(9): 2957-2979.
- [49] Vandandorj S, Eldridge D J, Travers S K, Delgado-Baquerizo M. Contrasting effects of aridity and grazing intensity on multiple ecosystem functions

- and services in Australian woodlands. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(7): 2098-2108.
- [50] Meng N, Yang Y Z, Zheng H, Li R N. Climate change indirectly enhances sandstorm prevention services by altering ecosystem patterns on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7): 1711-1724.
- [51] Liu J Y, Li J, Qin K Y, Zhou Z X, Yang X N, Li T. Changes in land-uses and ecosystem services under multi-scenarios simulation. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 522-526.
- [52] Wang Z Y, Li X, Mao Y T, Li L, Wang X R, Lin Q. Dynamic simulation of land use change and assessment of carbon storage based on climate change scenarios at the city level: a case study of Bortala, China. *Ecological Indicators*, 2022, 134: 108499.
- [53] Chiabai A, Quiroga S, Martinez-Juarez P, Higgins S, Taylor T. The nexus between climate change, ecosystem services and human health: towards a conceptual framework. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1191-1204.
- [54] Rötzer T, Rahman M A, Moser-Reischl A, Pauleit S, Pretzsch H. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 651-664.
- [55] 邓楚雄, 刘俊宇, 李忠武, 肖海兵, 聂小东, 张宇婷, 周咪. 近 20 年国内外生态系统服务研究回顾与解析. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 2119-2128.
- [56] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruelheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526: 574-577.
- [57] Sidibé Y, Foudi S, Pascual U, Termansen M. Adaptation to climate change in rainfed agriculture in the global south: soil biodiversity as natural insurance. *Ecological Economics*, 2018, 146: 588-596.
- [58] Roberts C M, O'Leary B C, McCauley D J, Cury P M, Duarte C M, Lubchenco J, Pauly D, Sáenz-Arroyo A, Sumaila U R, Wilson R W, Worm B, Castilla J C. Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(24): 6167-6175.
- [59] Li X B, Lyu X, Dou H S, Dang D L, Li S K, Li X, Li M Y, Xuan X J. Strengthening grazing pressure management to improve grassland ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 31: e01782.
- [60] Rodrigues A R, Botequim B, Tavares C, Pécuro P, Borges J G. Addressing soil protection concerns in forest ecosystem management under climate change. *Forest Ecosystems*, 2020, 7(1): 34.
- [61] Huang B B, Lu F, Wang X K, Wu X, Zheng H, Su Y B, Yuan Y F, Ouyang Z Y. The impact of ecological restoration on ecosystem services change modulated by drought and rising CO₂. *Global Change Biology*, 2023, 29(18): 5304-5320.
- [62] Chatzimentor A, Apostolopoulou E, Mazaris A D. A review of green infrastructure research in Europe: challenges and opportunities. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 198: 103775.
- [63] 周伟奇, 朱家蓓. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述. *生态学报*, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [64] Pamukcu-Albers P, Ugolini F, La Rosa D, Grădinaru S R, Azevedo J C, Wu J G. Building green infrastructure to enhance urban resilience to climate change and pandemics. *Landscape Ecology*, 2021, 36(3): 665-673.
- [65] Ou X Y, Lyu Y S, Liu Y, Zheng X, Li F Z. Integrated multi-hazard risk to social-ecological systems with green infrastructure prioritization: a case study of the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108639.
- [66] Liu O Y, Russo A. Assessing the contribution of urban green spaces in green infrastructure strategy planning for urban ecosystem conditions and services. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 68: 102772.
- [67] 王淳一, 赵明月, 赵运成, 许吟隆. 气候变化对农业生态系统服务的影响及适应对策. *生态学杂志*, 2023, 42(5): 1214-1224.
- [68] Degani E, Leigh S G, Barber H M, Jones H E, Lukac M, Sutton P, Potts S G. Crop rotations in a climate change scenario: short-term effects of crop diversity on resilience and ecosystem service provision under drought. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 285: 106625.
- [69] Koch T, Deumlich D, Chiffard P, Panten K, Grahmann K. Using model simulation to evaluate soil loss potential in diversified agricultural landscapes. *European Journal of Soil Science*, 2023, 74(1): e13332.
- [70] Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S, Walters G. Nature-based solutions to address global societal challenges. Gland: IUCN, 2016.
- [71] Diaz-Pereira E, Romero-Diaz A, de Vente J. Sustainable grazing land management to protect ecosystem services. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(8): 1461-1479.
- [72] Galicia L, Potvin C, Messier C. Maintaining the high diversity of pine and oak species in Mexican temperate forests: a new management approach combining functional zoning and ecosystem adaptability. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(10): 1358-1368.
- [73] Eekhout J, de Vente J. Assessing the effectiveness of Sustainable Land Management for large-scale climate change adaptation. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 85-93.
- [74] 韩会庆, 张娇艳, 马庚, 张新鼎, 白玉梅. 气候变化对生态系统服务影响的研究进展. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 184-190.
- [75] 傅伯杰. 国土空间生态修复亟待把握的几个要点. *中国科学院院刊*, 2021, 36(1): 64-69.