

DOI: 10.20103/j.stxb.202211173328

杨青, 刘耕源, 杨志峰. 气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架. 生态学报, 2024, 44(3): 871-884.

Yang Q, Liu G Y, Yang Z F. A new framework for biodiversity system analysis driven by climate change and land use change. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 871-884.

气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架

杨 青¹, 刘耕源^{2,3,*}, 杨志峰^{2,4}

1 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院, 珠海 519087

2 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

3 北京市流域环境生态修复与综合调控工程技术研究中心, 北京 100875

4 广东工业大学生态环境与资源学院, 大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室, 广州 510006

摘要: 尽管目前已有大量关于生物多样性评估的研究, 但同时考虑生物多样性多维评估、多驱动因素对生物多样性变化的影响评估及生物多样性变化中长期动态模拟预测等研究仍相对缺乏, 这会引起对生物多样性不同维度变化水平的片面理解, 导致生物多样性保护工程管理决策失误。基于此, 综述现有生物多样性评估维度、驱动因素及历史评估的研究进展, 并基于现有研究存在的局限性提出生物多样性多维评估方法与人为耦合系统下生物多样性模拟模型构建思路, 基于此提出气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架。该框架包括: ①生物多样性“潜力-贡献-重要性”多维评估理论与方法构建; ②人为耦合系统下生物多样性模拟模型构建; ③人为耦合系统下生物多样性预测及生物多样性保护工程效果仿真与管理。该框架可为生物多样性保护工程管理及可持续开展提供科学建议。

关键词: 生物多样性保护; 气候变化; 土地利用变化; 生态工程效果仿真; 驱动机制; 工程管理与调控

A new framework for biodiversity system analysis driven by climate change and land use change

YANG Qing¹, LIU Gengyuan^{2,3,*}, YANG Zhifeng^{2,4}

1 Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China

2 State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Beijing Engineering Research Center for Watershed Environmental Restoration & Integrated Ecological Regulation, Beijing 100875, China

4 Key Laboratory of City Cluster Environmental Safety and Green Development of the Ministry of Education, School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China

Abstract: Substantial studies have shown that biodiversity assessment should include multiple dimensions. Individual biodiversity assessment index will confuse the understanding of different biodiversity levels, resulting in mistakes in the management and implementations of biodiversity conservation programs. Additionally, policy makers at national and local levels need more diversified information on biodiversity, and to integrate different types of biodiversity assessment results to make them more operable when guiding sustainable development of biodiversity conservation programs. Yet, it still lacks multi-dimensional biodiversity assessment studies. Moreover, quantitative simulations of biodiversity dynamics under interaction effects of climate-land use change are also still lacking, thereby it cannot determine and assess the short,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52100212, 52070021); 大湾区城市环境安全与绿色发展教育部重点实验室(广东工业大学)专项经费资助; 海南国家公园研究院科研项目(KY-23ZK02)

收稿日期: 2022-11-17; 网络出版日期: 2023-11-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn

medium, and long-term effects of biodiversity protection programs, which bring challenges to management and sustainable development of biodiversity conservation programs to adapt to interactions between continuous climate change and rapid land use change. Under such a circumstance, this study first summarizes the research progresses of existing biodiversity assessment dimensions, driving factors, and historical assessment, then, based on the limitations of current related studies, proposes the train of thoughts to build a multi-dimensional biodiversity assessment method and a biodiversity simulation model under the human-nature coupling system. Based on these, this study further proposes a new framework of biodiversity systematic analysis driven by interaction effects of climate change and land use change. This framework mainly includes three sections: (1) multi-dimensional assessment theory and method of biodiversity “potential-contribution-significance”. This study states that the three significant biodiversity assessment dimensions should include (a) biodiversity potential, which is the upper limit of biodiversity in a region, and also directly affects the upper limit of effects of biodiversity conservation programs; (b) contribution of biodiversity to human well-being or economy (such as domestication); (c) the significance of the existence of key species (such as rare species) to the survival of other species; (2) biodiversity dynamics simulation model establishment under a human-biological coupling system. This model mainly includes four modules: scenario design module, climate change simulation module, land use change simulation module, and biological diversity changes simulation module. Among them, the interaction of climate-land use changes constitutes a human-biological coupling system; (3) biodiversity projection under the human-biological coupling system, and effect simulation and management of biodiversity conservation programs. This study suggests to integrate different scenarios of climate-land use changes interactions with biodiversity conservation programs in a study case, to assess short, medium, and long-term effects of related programs. This framework can provide guidance for sustainable management and implementation for local biodiversity conservation programs.

Key Words: biodiversity conservation; climate change; land use change; ecological programs effect simulation; driving mechanism; program management and regulation

生物多样性评估仍是学术界研究的热点和难点,越来越多研究表明生物多样性评估应更加多元化而非单一维度。如有国内研究指出需构建中国生物多样性大数据平台,如构建多维度生物多样性(如物种多样性、功能性状多样性、群落多样性、生态系统多样性等)综合数据平台,以促进我国生物多样性资源保护^[1]。也有研究指出与单一指标相比,复合指标或多指标系统将提高生物多样性量化的有效性^[2]。国际上,2021年发表于 *Nature Ecology & Evolution* 的研究指出单一指标易导致对生物多样性不同维度变化的片面理解^[3],使得难以衡量生物多样性保护目标的完成情况^[4],且可能会影响生物多样性保护工程设计,引起生物多样性保护目标与实际保护行动效果的冲突^[5]。2021年发表于 *Nature Sustainability* 的两篇研究也指出亟需综合性、多元化、多维度的生物多样性评估,以促进政策制定者更高效、更精准地收集和分析数据,提高生态保护工程的可操作性^[6-7]。

基于此,本研究首先综述了现有研究中亟需的生物多样性评估维度并提出相应的评估方法设计思路,以回答需从哪些维度评估生物多样性及怎样构建生物多样性多维评估方法的问题。又因生物多样性受多重因素尤其是气候变化和土地利用变化因素的影响,本文再综述了气候变化与土地利用变化因素对生物多样性的影响评估以厘清两者相互作用对生物多样性变化的驱动机制。又进一步总结现有生物多样性历史评估与未来模拟预测研究存在的局限性,提出气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架,为未来生物多样性研究提供重要研究方向及生物多样性保护工程管理与持续开展提供科学参考。

1 生物多样性多维评估视角与方法设计

1.1 生物多样性评估的三重维度

研究发现生物多样性评估中以下几个方面至关重要:(1)生物多样性潜力^[8-10],这是一个地区生物多样

性的上限,也直接影响生物多样性保护工程的效果上限;(2)生物多样性对人类福祉或经济的贡献^[11-12]; (3)重点物种(如稀缺物种)的存在对其他物种生存产生的重要影响^[11-13]。

针对生物多样性潜力方面,《2020年后全球生物多样性框架》指出生态系统保护在遏制生物多样性丧失的目标中发挥着关键作用^[3]。其有三个保护目标:遏制生态系统面积损失、扭转生态系统完整性下降、预防生态系统崩溃^[3]。其中,第一个目标中生态系统面积损失会减少物种占据生态位的多样性,改变生态系统内资源的可用性,降低其对物种的承载能力,限制生态系统可支持的原生生物群落丰度和多样性潜力^[14-16]。因此,评估生物多样性的维度之一是评估生态系统面积可支持的生物多样性大小,即特定面积下的生物多样性潜力。但仅依据面积变化不足以掌握所有重要的生态系统变化特征。土地利用变化、资源开采、物种入侵与气候变化等驱动因素^[17-18]通过影响生态系统组成、结构和功能降低其完整性(即目标二)。即使生态系统面积不变,生态系统完整性的丧失可能最终导致生态系统崩溃(目标三),并增加物种灭绝的风险^[19-21]。因此评估生态系统可维持的生物多样性潜力时不仅需要生态系统面积内可维持的生物多样性潜力的静态评估方法,还需要可揭示生态系统完整性变化,如组成、结构、功能、物种间相互作用等变化引起的维持生物多样性潜力变化的动态评估方法。

针对生物多样性对人类福祉贡献的维度,2021年发表于*Nature Sustainability*的研究批评当前生物多样性政策主要使用几个指标以评估各国采取的生物多样性保护措施对全球生物多样性保护目标的贡献;但这些指标通常与人类福祉无关,也难以满足面向人类需求的生物多样性保护工程的建设^[7]。也有研究指出生物多样性评估维度之一应揭示生物多样性对人类福祉的关键贡献作用^[6,22]。且人类可持续发展取决于生物多样性的健康和未来,将其作为评估维度之一有助于将生物多样性保护工程的管理政策纳入国家发展战略中。因此,生物多样性对人类福祉的贡献也是生物多样性评估的重要维度。

稀有物种在生物多样性多维评估中也至关重要。早在1998年,就有发表于*Nature*的研究指出稀有物种尤其值得关注^[23]。由于稀有种最有可能从生态系统中消失,从而造成生物多样性的减少,所以维持稀有种是维持全球生物多样性的最重要表征^[13]。虽然早期观点认为稀有种通常对生态系统服务贡献很少^[24],但越来越多研究对这一认识提出挑战。如有研究指出稀有物种支持着不可替代的独特功能性多样性^[20,25],而功能性多样性强烈地影响生态系统过程,在生态系统功能和相关服务中有超出其占比的贡献^[26-28]。2019年发表于*Trends in Ecology & Evolution*的研究也表明,稀有种可通过多种方式为某些生态系统服务做出实质性贡献,如产生促进性的种间关系或具有独特的生态功能,稀有物种虽丰度低但能产生大于预期的贡献^[13]。也有国内研究指出稀有物种是表征热带森林自然恢复质量的关键类群,如在恢复早期稀有物种丰富度高,则恢复后期群落的演替方向更接近原生林^[29]。评估稀有物种的保护效果也是了解全球变化导致生物多样性变化的重要手段^[30]。因此,量化局地稀有物种对维持全球生物多样性的贡献与重要性是生物多样性评估的重要维度。

1.2 生物多样性多维评估方法设计

针对目前研究中亟需从生物多样性潜力、生物多样性对本地经济的贡献及本地稀有物种对全球生物多样性维持的重要性三个维度评估生物多样性,本研究提出未来研究需构建生物多样性多维评估方法。第一维度即生物多样性潜力评估考虑本地生态系统中可更新资源(自然投入)可支持的生物多样性,可更新资源越多意味着可支持更多的生物多样性,即生物多样性潜力越大。生物多样性潜力评估包括静态和动态两种方法,静态方法考虑一个时间范围内区域总可更新资源投入,用当地生态系统可更新资源能量最大值度量。有研究基于巴塔哥利亚南部八个生态区的维管束植物物种绘制了当地生物多样性潜力地图,地图显示当地生物多样性“冷点”位于西部山区、“热点”位于南部和东部地区,高生物多样性潜力与高温和高植被归一化指数区域相一致,低生物多样性潜力和海拔与降水相关^[31]。动态方法侧重于揭示物种间相互作用、生态系统过程等特征,可用一定时间范围内区域顶级生态系统食物网络各营养级上物种所需的能量流总和度量。如有研究调查了美国佛罗里达半岛南部的大沼泽地国家公园内1033种植物、60种爬行动物、76种哺乳动物、432种鱼类、

349 种鸟类和 38 种两栖动物组成的生态系统食物网络的能量流动情况,结果显示大沼泽地中的禾草沼泽系统以理论上最大生态系统能量流对应的生物多样性的 42% 运行^[32]。第二维度,考虑生物多样性作为生态系统服务对人类福祉或经济的贡献,可用人类获益的价值或人类为利用和保护生物多样性资源而投入的成本(即人为投入)来计算。如有研究指出在全球 25 万多种被子植物中,仅约 2500 种(~1%)作物部分或全部驯化^[33]。这些被驯化的农作物是生物多样性对本地经济的贡献。第三维度,稀有物种的重要性,这种重要性应反映其维持全球生物多样性的重要性在局地的分摊。如有研究采用全球单位网格维持稀有物种所需的能值计算单位网格稀有物种对维持全球生物多样性的重要性^[34]。其中单位面积维持稀有物种所需的能值采用全球单位面积稀有物种数占总物种数的比值—即全球单位面积稀有物种指数—乘以全球单位面积可更新资源对应的能值。已发表的全球单位面积稀有物种指数^[35]和全球单位面积可更新资源对应的能值^[36]可为此方法提供数据支持。除稀有物种指数外,未来研究也可选择能同时反映物种相对多度、相对频度和相对显著度的物种重要值作为度量稀有物种或其他重点物种对维持全球生物多样性重要性的指标。基于构建的生物多样性多维评估方法,未来研究可选择案例区,评估其历史年份生物多样性潜力、贡献、重要性,揭示案例区生物多样性时空演变规律。

2 生物多样性变化的驱动因素

2005 年联合国发布的《千年生态系统评估报告》指出生物多样性主要受栖息地变化、气候变化、生物入侵、污染、资源过度开发利用等五个驱动因素的影响^[37]。2019 年生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(IPBES)进一步指出土地利用变化和气候变化是驱动生物多样性变化最主要的两个因素^[38]。因此,本研究主要综述气候变化和土地利用变化及其相互作用对生物多样性变化的影响评估研究进展。

2.1 土地利用变化是人为主导的生物多样性变化的重要驱动因素

根据 IUCN 红色名录,自 1900 年以来已有 198 种脊椎动物被证实“灭绝”,20 世纪脊椎动物物种的平均损失率是前人类时代的 22 倍^[39-40]。大量研究指出土地利用及其相关压力是这种生物多样性丧失的主要驱动力^[40-43],且多篇研究表明这一压力正在增加^[5,44]。土地利用变化对生物多样性的影响研究主要集中在农业用地或城市用地扩张等导致生物多样性丧失、不同土地利用强度对生物多样性的影响等^[37,40,45]。土地利用变化,通常为农业面积扩大,会直接导致栖息地丧失,同时伴随着栖息地破碎化等影响。随着全球人口到 2050 年朝 90—100 亿的目标迈进,对农产品需求的增加而产生的土地竞争会给生物多样性保护带来巨大压力^[46]。如有研究收集了全国 298 个农业景观样地的 15042 条物种记录,评估了我国农区不同土地利用强度对物种多样性的影响,结果表明无论是景观尺度还是局部管理尺度,随着农田土地利用强度的增加,生物多样性均呈显著下降趋势^[47]。国际上,有研究表明在共享社会经济路径(SSPs)中,到 2100 年(相对于 2010 年)全球农田预计扩张 25%、牧场扩大 6%(路径 SSP2),而森林和其他自然土地总面积预计到 2100 年比 2010 年减少 610 万 km²,这将导致生物多样性的严重丧失^[48]。高强度人类活动下的未来农用地扩张是全球生物多样性保护的重要威胁源^[49]。

快速城市扩张通过栖息地转变、退化、碎片化和物种灭绝等对全球生物多样性产生深远影响。如有研究将共享社会经济路径(SSPs)下城市扩张的空间预测与栖息地和陆地生物多样性(两栖动物、哺乳动物和鸟类)数据集相结合,探索未来城市扩张将如何影响全球生物多样性^[50]。结果表明,在 SSPs 情景下,到 2100 年,未来城市扩张将导致 1100—3300 万 hm² 自然栖息地的丧失,并将不成比例地导致自然栖息地大面积破碎化^[50]。当前关键生物多样性优先领域内的城市扩张预计将高于全球平均水平,如在世界自然基金会(WWF)选择的对保护全球生物多样性最重要的 200 个生态区中高出 37%—44%。此外,城市土地转换将使当地每 1 公里网格单元的物种丰富度减少 34%、物种丰度减少 52%,每 10 公里网格单元可能会损失 7—9 个物种^[50]。

土地利用强度不同会对生物多样性产生不同影响。如有研究分析了中国 1990—2010 年土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动程度,结果表明我国中东部地区人类扰动程度较大,西部地区人类扰动程度

较低^[51]。也有研究模拟了基线、美丽青海、智慧青海、和谐青海 4 种情景下土地利用布局及其原生群落平均物种多样度的空间变化特征,结果显示美丽青海、智慧青海、和谐青海 3 种情景湿地、原生林等自然用地恢复较好,生物多样性因而得以较大提高^[52]。国际上,2015 年发表于 *Nature* 的研究对全球 11525 个地点的生物多样性进行了调查,并量化当地生物多样性对土地利用变化的反应。结果表明,在受影响最严重的栖息地中,土地利用变化使样方内物种丰富度、总丰度和稀有物种丰富度分别降低了 76.5%、39.5% 和 40.3%;在全球范围内,三个指标分别下降了 13.6%、10.7% 和 8.1%;在一切照旧的土地利用情景下,预计会出现进一步的生物多样性快速损失;到 2100 年,全球样方内丰富度预计将进一步下降 3.4%^[53]。有研究使用涵盖 303 项研究、12170 个地点和 4502 个授粉物种的本地规模数据库模拟土地利用强度对全球授粉媒介生物多样性的影响^[51]。结果表明,相对于主要植被基线,低土地利用强度可对传粉媒介生物多样性产生有益影响;在大多数人为土地利用类型中,强度增加与生物多样性减少显著有关,特别是在城市(与最小密集的城市地点相比,丰度降低 62%)和牧场(丰度降低 75%)地区^[54]。又有研究探索了土地利用强度对生物多样性的影响。结果表明,土地利用变化导致除荒野地区以外平均 5×5 弧分的景观和约 14% 的原生栖息地损失约 15% 的陆生脊椎动物物种,有全球灭绝风险的物种 556 个^[55]。

综上,预测研究主要集中在预测未来城市扩张对生物多样性变化的影响,而土地利用变化不仅仅局限于城市扩张,它同时伴随着农田扩张、林地、草地、湿地、未利用土地等的动态演变。这意味着需要模拟预测未来土地利用变化的整体情况以更加全面地揭示土地利用变化对生物多样性的影响。

2.2 气候变化是自然主导的生物多样性变化的重要驱动因素

气候变化正在成为生物多样性的主要威胁^[42,52,56-60]。联合国《生物多样性公约》秘书处副秘书长 David Cooper 指出,如果不缓解气候变化加快的趋势,它将成为生物多样性丧失的主因;全球升温达到 2℃,生物多样性丧失的速度将翻倍甚至更糟。根据 IPBES 评估,温度仅升高 2℃,就有 5% 的物种面临灭绝的风险,升高 4.3℃,这一比例将骤增至 16%^[38]。

气候变化对生物多样性的影响研究主要集中在评估气候变化如平均气候参数的增量变化、极端气候事件的频率和强度对物种的行为、分布格局、丰富度、种群大小、生态系统结构与功能、外来物种入侵、本地物种灭绝等产生的深刻影响^[61-62]。其中气候变化通过改变适宜的栖息地而影响生物多样性的研究相对丰富。如 1999 年就有发表于 *Nature* 的研究表明自 1880 年以来,全球平均升温 0.85℃,许多生物可能正在改变其分布以适应气候变化^[63]。国内也有类似研究,如全球升温使我国长白山岳桦原过渡带变宽^[64],使五台山高山草甸和林线过渡带中一些植物向高海拔迁移^[65]。对喜马拉雅-横断山报春花属 (*Primula*) 植物分布预测的研究发现,在未来气候变暖情景下,该属植物的垂直分布将沿海拔向上迁移^[66]。对我国亚热带山地贡嘎山种子植物随海拔变化的研究发现,自 20 世纪 80 年代中期以来,多数物种沿海拔向上迁移^[67]。气候变化还会影响自然保护区发挥保护生物多样性的作用,并使未来保护地的生物多样性保护面临巨大压力和挑战。如气候变化导致一些物种为寻找新的适宜栖息地而不断迁徙,有些物种甚至迁徙到保护区外,将不利于保护区对这些物种的有效保护。气候变化还可能导致保护区边界变得不再合适,进而导致原有的管理不再有效。气候变化对植物多样性影响最大的地区是那些物种栖息地相对固定、物种无法迁移的地区,因此种群较小且栖息地破碎的物种,或者呈岛屿型分布的物种对气候变化更加脆弱。随着气候变化的加剧,预计物种将继续通过改变其分布以跟踪气候变化在气候避难所中持续存在以及不断发展对气候变化的耐受性得以幸存^[68-69]。

除改变适宜栖息地的研究外,气候变化对生物多样性的影响研究也包括极端气候等对生物多样性丧失的影响。如 2007 年 IPCC 报告指出,预计未来全球升温幅度超过 1.5—2.5℃,目前已评估过的 20%—30% 的物种灭绝风险将增加;超过 2—3℃,目前地球上 25%—40% 的生态系统结构与功能将发生巨大改变^[70]。然而,未来气候变化可能会以前所未有的速度发生,全球二氧化碳排放量上升没有缓和的迹象,极端气候事件的频率可能会急剧上升^[71],并且发生在其它驱动因素的背景(如严重改变的景观、污染等),尤其是发生在已经因土地利用变化而高度改变的全球生态系统中,从而加剧其负面影响。即任何来自古代证据的灭绝动态的一

般性规律都需要在当前气候变化的速度下进行背景化,且需了解驱动因素之间的相互作用机制^[61]。因此,未来研究需要进一步定量模拟预测气候变化与土地利用变化耦合作用对生物多样性变化的影响,以提出相关预防、适应与保护措施。

2.3 气候变化和土地利用变化耦合对生物多样性的影响

现有研究多集中在评估历史年份气候变化及土地利用变化对生物多样性的影响,且案例区主要集中在热带或地中海等山区。如 2019 年发表于 *Nature* 的研究评估了气候变化和土地利用变化相互作用对热带山区生物多样性和生态系统功能的影响。结果表明,气候变化与土地利用变化相互作用平均解释了物种丰度、物种组成及生态系统功能变化的 54%,而单一气候或土地利用变化仅解释了变化的 30%^[72]。2020 年发表于 *Nature Ecology & Evolution* 的研究测试了生物群落生物多样性对气候变化和土地利用变化的反应是否不同,发现热带和地中海生物群落对二者有最强烈的负面反应^[73]。该研究进一步指出在受人类干扰最严重的土地利用类型中,物种丰富度下降幅度更大;而在气候季节性较不显著的地区和大部分物种接近其温度上限的地区,生物多样性对气候变化的反应更为负面。预测研究多集中在评估气候变化或土地利用变化单因素对生物多样性变化的影响,如有研究预测在共享社会经济路径(SSPs)下,到 2100 年,未来城市扩张将导致 1100—3300 万 hm^2 自然栖息地的丧失^[50]。

尽管人们已经认识到气候变化和土地利用变化是生物多样性变化的主要驱动因素^[52,74-76],定量评估气候变化和土地利用变化相互作用(如对抗性或协同)对生物多样性变化影响的研究仍相对缺乏。原因之一是人们对驱动因素的相互作用机制知之甚少,且探索相互作用需要仔细的实验和分析设计,这很难以足够的规模实现^[61]。然而,这种相互作用可能会对生物多样性产生巨大影响,并对栖息地和景观管理产生重要影响。有证据表明,这些驱动因素可能会产生协同作用,从而产生比它们独立作用时更大的反应^[61]。土地利用变化改变当地的气候条件,从而降低合适小气候的可用性,改变小气候的异质性和缓冲能力,并改变景观对物种追踪气候变化的渗透性^[61,77-80]。如 2022 年发表于 *Nature* 的研究表明相对于受干扰较少的栖息地中物种数量减少,历史气候变暖指数和集约化农业用地使用的相互作用与昆虫组合中物种数量减少的近 50%和 27%有关^[81]。

土地利用-气候变化相互作用的影响程度存在空间异质性。一般来说,热带物种被认为比温带物种对气候变化更敏感^[73,82]。因为与温带地区相比,热带地区温度相对稳定,热带物种经历的气候条件范围要窄得多,因此往往比温带物种具有更窄的热生态位^[82-83]。当气候变暖确实发生时,那些具有较窄热生态位的物种最有可能被区域气候变化或土地利用变化引起的小气候变化推向或超过其热极限^[82]。因此,土地利用与气候变化之间相互作用的影响可能在热带地区最为强烈^[81]。

综上,定量模拟预测气候变化与土地利用变化相互作用下的生物多样性变化研究仍相对缺乏,进而无法判别应对二者相互作用下的生物多样性保护工程的短中长期效果,给生物多样性保护工程持续开展与管理带来挑战。因此,需要模拟预测不同情景下气候变化与土地利用变化相互作用对生物多样性的影响,识别二者耦合作用对生物多样性变化的驱动机制,评估生物多样性保护工程短中长期效果,尤其需要热带、亚热带等地区的案例。

3 生物多样性变化的动态模拟与预测

3.1 生物多样性变化的历史动态评估与情景预测

现有生物多样性评估多集中在短期静态评估(尤其是在全球尺度),生物多样性中长期动态模拟与预测等研究仍相对缺乏。如世界自然基金会(WWF)和联合国环境规划署(UNEP)提出生命星球指数,是衡量世界生物多样性变化的一个指标,目前包括全球 555 种陆地物种、323 种淡水物种和 267 种海洋物种的数据资料。1970—2000 年间生命星球指数下降了约 40%,陆地物种指数、淡水物种指数和海洋物种指数分别下降了约 30%、50%和 30%。《千年生态系统评估报告》指出通过多项生物多样性观测发现,目前生物多样性丧失速度比过去超出几个数量级,同时没有证据表明丧失速度将会减慢^[37]。2019 年,IPBES 指出多种人类驱动因素

已极大地改变了全球大部分地区的自然状况,绝大多数生态系统和生物多样性指标迅速下降:75%的陆地表面发生了巨大改变,66%的海域正经历越来越大的累积影响,85%以上的湿地(按面积)已经丧失。在大多数重要陆地生物群落中,本地物种的平均丰度至少下降了20%,这有可能影响生态系统过程,进而影响自然对人类的贡献;下降情况主要发生在1900年之后,并且速度可能正在加快。在所评估的动植物组别中平均约有25%的物种受到威胁,这意味着有大约100万种物种已经濒临灭绝。到2016年,在用于粮食和农业的6190种驯养哺乳动物中,有559种(占9%以上)已经灭绝,至少还有1000多种受到威胁^[38]。在国内,有研究利用空间叠加方法定量分析了我国24个重要生态功能区的生物多样性保护成效,结果表明全国重要生态功能区生境质量指数呈现出“西北低、东南高”的分布特征,而生物多样性保护成效呈现出“西北高、东南低”的空间差异性^[84]。也有研究运用物种分布模型Maxent模拟黄河流域70种濒危维管植物和陆地脊椎动物分布,并识别出濒危物种热点区;研究结果表明黄河流域现有国家级自然保护区和国家公园体制试点区覆盖了热点区面积的13.89%,并识别出保护空缺地主要出现在子午岭南部等地,研究结果可为自然保护地体系优化提供建议^[85]。这些历史年份生物多样性评估为我们准确掌握生物多样性现状及其变化趋势等提供了数据基础。

但伴随着栖息地变化、气候变化、入侵物种、资源过度利用、污染等多重驱动因素的影响,越来越多研究及政府部门指出亟需开发生物多样性预测预警模型,建立预警技术体系和应急响应机制,实现长期动态监控,以加强生物多样性对气候变化、栖息地变化等的适应能力并提出相关应对策略。也有研究预测了未来生物多样性变化,如《千年生态系统评估报告》中根据IMAGE模型预测了4种情景下土地利用变化导致的栖息地丧失将引起的生物多样性丧失。结果表明,1970—2050年,栖息地改造率为13%—20%,种群将随着残存栖息地的减少而导致局地 and 全球范围内的物种灭绝^[37]。也有研究通过综述全球和次大陆尺度生物多样性模型预测结果发现,气候变化导致的生物多样性丧失可能成为地球上第六次物种大灭绝。但该研究存在驱动因子的协同作用可能被低估等挑战^[86]。且目前关于多种驱动因素相互作用下模拟预测生物多样性中长期动态变化的研究仍相对缺乏,这给模拟预测生物多样性保护工程的中长期效果及其可持续开展带来困难。因此,未来研究亟需加强多驱动因素相互作用下的生物多样性中长期模拟预测研究。

3.2 人地耦合系统下生物多样性模拟模型构建

基于生物多样性历史评估的文献综述,应构建人地耦合系统下生物多样性模拟模型,纳入多驱动因素及构建耦合联动关系,用于模拟预测不同气候变化与土地利用变化相互作用情景下的生物多样性变化。该模型应主要包括四个模块:情景设计模块、气候变化模块、土地利用变化模块和生物多样性变化模拟模块,详见图1。气候变化与土地利用变化相互作用构成人地耦合系统。

(1)情景设计模块。可采用第六次国际耦合模型比较计划(World Climate Research Programme, CMIP6)中情景模式比较计划(Scenario MIP)的核心试验场景即SSP126、SSP245、SSP370和SSP585作为模拟不同气候变化与土地利用变化的情景。因为上述不同试验场景为共享社会经济路径(SSPs)与辐射强迫典型浓度路径(RCPs)的矩阵组合,矩阵每一行可看作在不同气候情景下采取不同发展方式所形成的不同气候变化影响后果,矩阵每一列可看作特定社会经济路径下,不同气候情景下所对应的社会经济发展状况。因此,SSPs和RCPs是未来社会经济发展的可能状态和气候情景的有机融合,在不同气候情景下,采取不同发展方式如人口政策、经济增长方式或环境政策等,会驱动土地利用变化(人口和GDP是城市扩张两个最基本的驱动力),从而实现不同情景下气候变化和土地利用变化相互作用的有机耦合。

(2)气候变化模块。在生物多样性多维评估理论与方法的基础上,识别影响生物多样性变化的气候因素。未来研究可从CMIP6数据库中选择空间分辨率较高且对案例区气候模拟较好的模式数据,提取案例区所需的气候因素数据,构建气候变化模块。

(3)土地利用变化模块。可利用系统动力学与未来土地利用模拟模型(Future Land Use Simulation Model, FLUS),结合案例区现有土地利用类型监测数据及未来人口和GDP预测数据,模拟和预测不同情景下未来土地利用类型及数量,构建土地利用变化模块。

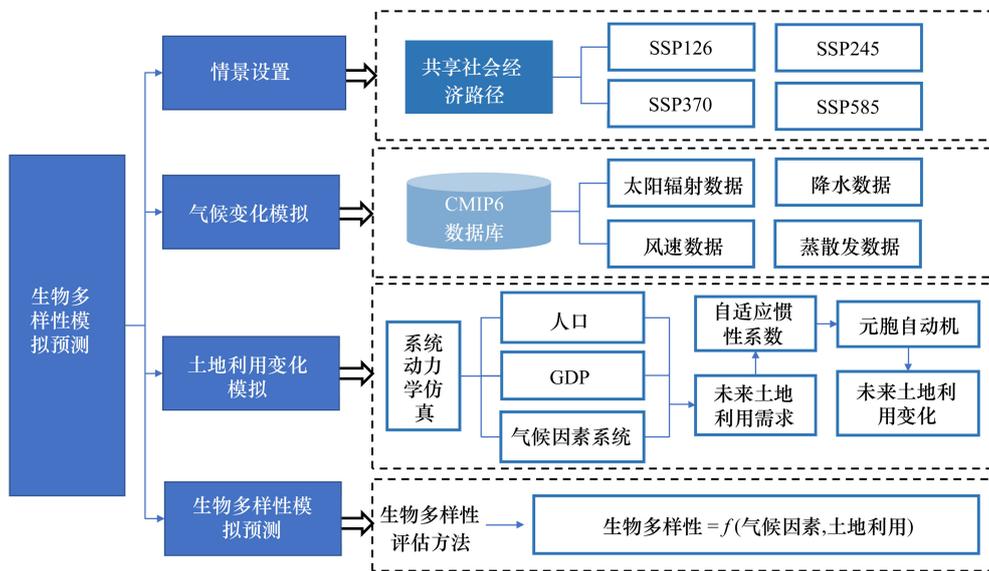


图 1 人地耦合系统下生物多样性模拟模型结构图

Fig.1 Structural diagram of biodiversity simulation model under the human-nature coupling system

(4) 生物多样性变化模拟模块。编写生物多样性多维评估方法的 Python 代码,调用气候变化模块和土地利用变化模块模拟的不同情景下未来气候变化和土地利用变化数据,模拟预测不同情景下未来生物多样性长时间序列变化。

3.3 基于生物多样性动态预测的工程效果仿真与管理

基于构建的人地耦合系统下生物多样性模拟模型,模拟与预测不同情景下未来生物多样性变化。本研究认为可将不同气候变化与土地利用变化相互作用情景与案例区生物多样性保护工程相结合,评估应对二者相互作用下的生物多样性保护工程短中长期效果(图 2)。具体地,可用案例区生物多样性保护工程对应的森

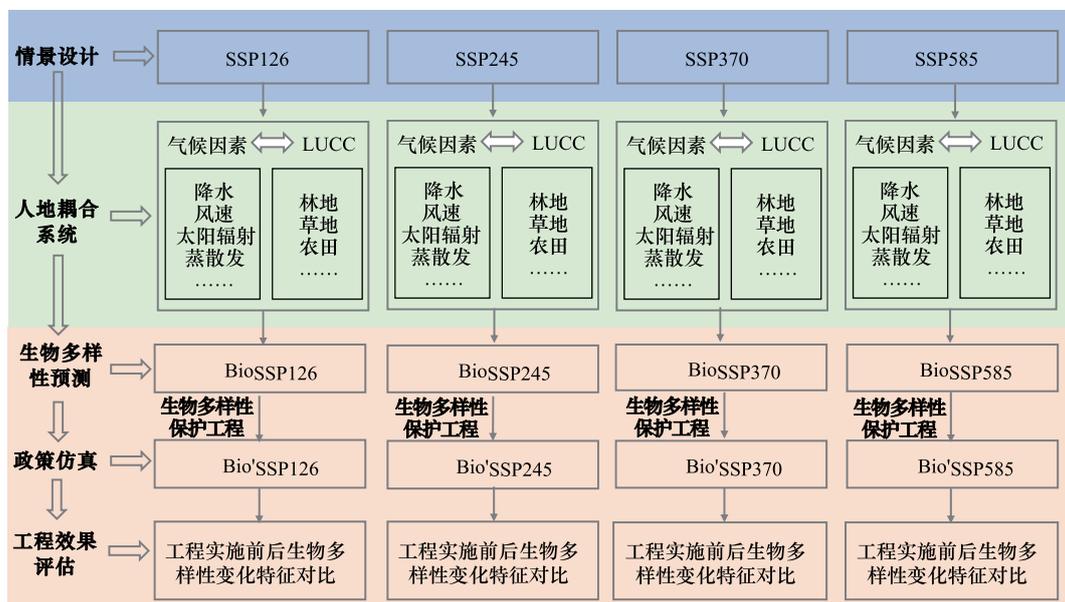


图 2 不同情景下生物多样性保护工程效果仿真框架图

Fig.2 The simulation framework of biodiversity conservation programs effect under different scenarios

SSPs:不同共享社会经济路径;LUCC:土地利用变化;Bio_{SSPs}和 Bio'_{SSPs}分别表示不同共享社会经济路径下生物多样性保护工程实施前、后生物多样性评估结果

林、草地、湿地和自然保护地等面积对土地利用变化模块模拟出的不同情景下案例区未来土地利用类型及数量进行校准,其余土地利用类型面积按照比例调整以适应区域中生态系统面积的变化。用校准后的案例区土地利用变化数据模拟生物多样性变化,对比生物多样性保护工程实施前后案例区生物多样性多维变化特征,评估案例区生物多样性保护工程的短中长期效果,为生物多样性保护工程管理及可持续开展提供指导。

4 气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架

为克服现有研究中生物多样性多维评估、气候变化与土地利用变化相互作用对生物多样性变化的影响评估及生物多样性中长期模拟预测研究相对缺乏的局限性,本研究提出气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架,详见图 3。该框架包括三个部分:①生物多样性“潜力-贡献-重要性”多维评估理论

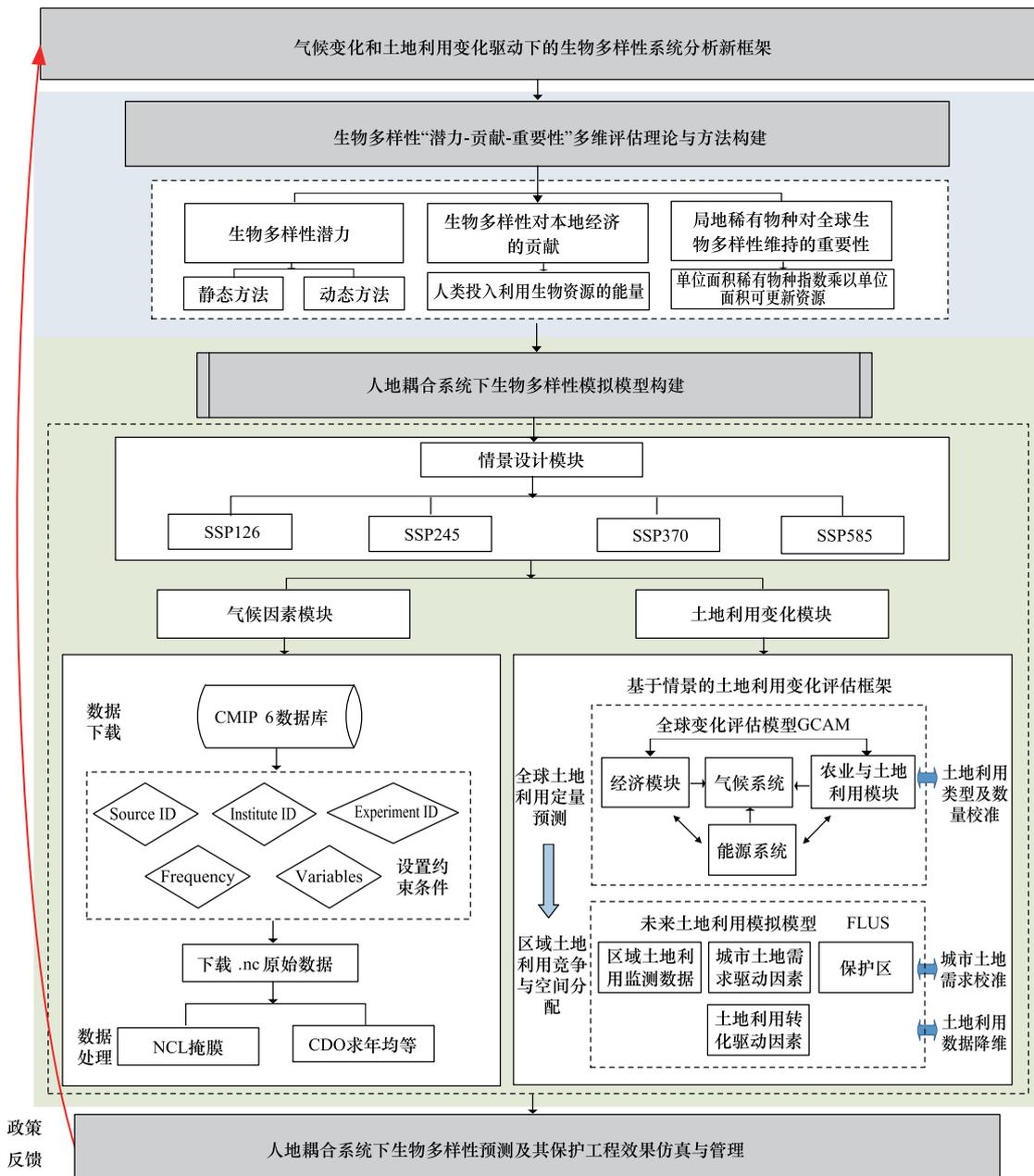


图 3 气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架

Fig.3 New framework of biodiversity system analysis driven by climate change and land-use change

与方法构建;②人地耦合系统下生物多样性模拟模型构建;③人地耦合系统下生物多样性预测及生物多样性保护工程效果仿真与管理。三个部分具有紧密逻辑联系,第一部分为历史年份生物多样性多维评估提供理论基础与技术支撑;第二部分为预测未来年份生物多样性时空演变提供技术支撑;第三部分选择案例区,预测其人地耦合系统下未来长时间序列生物多样性变化,为评估生物多样性保护工程短中长期效果提供应用案例,进而为当地生物多样性保护工程管理与持续开展提供科学建议。

5 结论

生物多样性多维评估仍是学术界研究的热点和难点,气候变化与土地利用变化相互作用下生物多样性变化驱动机制研究仍相当缺乏,进而无法判别生物多样性保护工程的短中长期效果,给应对持续气候变化与快速土地利用变化相互作用下的生物多样性保护工程及其持续开展带来挑战。为克服上述挑战,本研究综述了生物多样性评估维度、驱动因素及历史评估的研究进展,提出生物多样性多维评估方法与入地耦合系统下生物多样性模拟模型构建思路,并基于此提出气候变化和土地利用变化驱动下的生物多样性系统分析新框架,该框架包括①生物多样性“潜力-贡献-重要性”多维评估理论与方法构建;②人地耦合系统下生物多样性模拟模型构建;③人地耦合系统下生物多样性预测及生物多样性保护工程效果仿真与管理,以为生物多样性保护工程管理及持续开展提供政策建议。

参考文献(References):

- [1] 马克平,朱敏,纪力强,马俊才,郭庆华,欧阳志云,朱丽. 中国生物多样性大数据平台建设. 中国科学院院刊, 2018, 33(8): 838-845.
- [2] 胡远洋. 生物多样性抵消的研究进展. 生物多样性, 2022, 30(2): 148-157.
- [3] Nicholson E, Watermeyer K E, Rowland J A, Sato C F, Stevenson S L, Andrade A, Brooks T M, Burgess N D, Cheng S T, Grantham H S, Hill S L, Keith D A, Maron M, Metzke D, Murray N J, Nelson C R, Obura D, Plumpton A, Skowno A L, Watson J E M. Scientific foundations for an ecosystem goal, milestones and indicators for the post-2020 global biodiversity framework. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(10): 1338-1349.
- [4] Green E J, Buchanan G M, Butchart S H M, Chandler G M, Burgess N D, Hill S L L, Gregory R D. Relating characteristics of global biodiversity targets to reported progress. *Conservation Biology*, 2019, 33(6): 1360-1369.
- [5] Díaz S, Zafra-Calvo N, Purvis A, Verburg P H, Obura D, Leadley P, Chaplin-Kramer R, De Meester L, Dulloo E, Martín-López B, Shaw M R, Visconti P, Broadgate W, Bruford M W, Burgess N D, Cavender-Bares J, DeClerck F, Fernández-Palacios J M, Garibaldi L A, Hill S L L, Isbell F, Khoury C K, Krug C B, Liu J G, Maron M, McGowan P J K, Pereira H M, Reyes-García V, Rocha J, Rondinini C, Shannon L, Shin Y J, Snelgrove P V R, Spehn E M, Strassburg B, Subramanian S M, Tewksbury J J, Watson J E M, Zanne A E. Set ambitious goals for biodiversity and sustainability. *Science*, 2020, 370(6515): 411-413.
- [6] Pascual U, Adams W M, Díaz S, Lele S, Mace G M, Turnhout E. Biodiversity and the challenge of pluralism. *Nature Sustainability*, 2021, 4(7): 567-572.
- [7] Soto-Navarro C A, Harfoot M, Hill S L L, Campbell J, Mora F, Campos C, Pretorius C, Pascual U, Kapos V, Allison H, Burgess N D. Towards a multidimensional biodiversity index for national application. *Nature Sustainability*, 2021, 4(11): 933-942.
- [8] Harvey E, Gounand I, Ward C L, Altermatt F. Bridging ecology and conservation: from ecological networks to ecosystem function. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54: 371-379.
- [9] Thompson R M, Brose U, Dunne J A, Hall R O, Hladys S, Kitching R L, Martínez N D, Rantala H, Romanuk T N, Stouffer D B, Tylianakis J M. Food webs: reconciling the structure and function of biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(12): 689-697.
- [10] Violle C, Thuiller W, Mouquet N, Munoz F, Kraft N J B, Cadotte M W, Livingstone S W, Mouillot D. Functional rarity: the ecology of outliers. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(5): 356-367.
- [11] Pollock L J, O'Connor L M J, Mokany K, Rosauer D F, Talluto M V, Thuiller W. Protecting biodiversity (in all its complexity): new models and methods. *Trends in Ecology & Evolution*, 2020, 35(12): 1119-1128.
- [12] Norris K, Terry A, Hansford J P, Turvey S T. Biodiversity conservation and the earth system: mind the gap. *Trends in Ecology & Evolution*, 2020, 35(10): 919-926.
- [13] Dee L E, Cowles J, Isbell F, Pau S, Gaines S D, Reich P B. When do ecosystem services depend on rare species? *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(8): 746-758.
- [14] Brooks T, Mittermeier R, Mittermeier C, da Fonseca G A D, Rylands A, Konstant W, Flick P, Pilgrim J, Oldfield S, Magin G, Hilton - Taylor

- C. Habitat loss and extinction in the hotspots of biodiversity. *Conservation Biology*, 2002, 16(4): 909-923.
- [15] Harpole W S, Tilman D. Grassland species loss resulting from reduced niche dimension. *Nature*, 2007, 446(7137): 791-793.
- [16] Shi J M, Ma K M, Wang J F, Zhao J Z, He K T. Vascular plant species richness on wetland remnants is determined by both area and habitat heterogeneity. *Biodiversity and Conservation*, 2010, 19(5): 1279-1295.
- [17] Bergstrom D M, Wienecke B C, Hoff J, Hughes L, Lindenmayer D B, Ainsworth T D, Baker C M, Bland L, Bowman D M J S, Brooks S T, Canadell J G, Constable A J, Dafforn K A, Depledge M H, Dickson C R, Duke N C, Helmstedt K J, Holz A, Johnson C R, McGeoch M A, Melbourne-Thomas J, Morgain R, Nicholson E, Prober S M, Raymond B, Ritchie E G, Robinson S A, Ruthrof K X, Setterfield S A, Sgrò C M, Stark J S, Travers T, Trebilco R, Ward D F L, Wardle G M, Williams K J, Zylstra P J, Shaw J D. Combating ecosystem collapse from the tropics to the Antarctic. *Global Change Biology*, 2021, 27(9): 1692-1703.
- [18] Gervais C R, Champion C, Pecl G T. Species on the move around the Australian coastline: a continental-scale review of climate-driven species redistribution in marine systems. *Global Change Biology*, 2021, 27(14): 3200-3217.
- [19] Di Marco M, Ferrier S, Harwood T D, Hoskins A J, Watson J E M. Wilderness areas halve the extinction risk of terrestrial biodiversity. *Nature*, 2019, 573(7775): 582-585.
- [20] Keith D A, Rodríguez J P, Rodríguez-Clark K M, Nicholson E, Aapala K, Alonso A, Asmussen M, Bachman S, Basset A, Barrow E G, Benson J S, Bishop M J, Bonifacio R, Brooks T M, Burgman M A, Comer P, Comín F A, Essl F, Faber-Langendoen D, Fairweather P G, Holdaway R J, Jennings M, Kingsford R T, Lester R E, Mac Nally R, McCarthy M A, Moat J, Oliveira-Miranda M A, Pisanu P, Poulin B, Regan T J, Riecken U, Spalding M D, Zambrano-Martínez S. Scientific foundations for an IUCN red list of ecosystems. *PLoS One*, 2013, 8(5): e62111.
- [21] 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, Runtung 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.
- [22] Pascual U, Balvanera P, Díaz S, Pataki G, Roth E, Stenseke M, Watson R T, Başak Dessane E, Islar M, Kelemen E, Maris V, Quaaas M, Subramanian S M, Wittmer H, Adlan A, Ahn S, Al-Hafedh Y S, Amankwah E, Asah S T, Berry P, Bilgin A, Breslow S J, Bullock C, Cáceres D, Daly-Hassen H, Figueroa E, Golden C D, Gómez-Baggethun E, González-Jiménez D, Houdet J, Keune H, Kumar R, Ma K P, May P H, Mead A, O'Farrell P, Pandit R, Pengue W, Pichis-Madruga R, Popa F, Preston S, Pacheco-Balanza D, Saarikoski H, Strassburg B B, van den Belt M, Verma M, Wickson F, Yagi N. Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 26/27: 7-16.
- [23] Gaston K J. Rarity as double jeopardy. *Nature*, 1998, 394(6690): 229-230.
- [24] Mouillot D, Bellwood D R, Baraloto C, Chave J, Galzin R, Harmelin-Vivien M, Kulbicki M, Lavergne S, Lavorel S, Mouquet N, Paine C E, Renaud J, Thuiller W. Rare species support vulnerable functions in high-diversity ecosystems. *PLoS Biology*, 2013, 11(5): e1001569.
- [25] Piipponen-Doyle S, Bolam F C, Mair L. Disparity between ecological and political timeframes for species conservation targets. *Biodiversity and Conservation*, 2021, 30(6): 1899-1912.
- [26] Chapman A S A, Tunnicliffe V, Bates A E. Both rare and common species make unique contributions to functional diversity in an ecosystem unaffected by human activities. *Diversity and Distributions*, 2018, 24(5): 568-578.
- [27] Jain M, Flynn D F, Prager C M, Hart G M, Devan C M, Ahrestani F S, Palmer M I, Bunker D E, Knops J M, Jouseau C F, Naem S. The importance of rare species: a trait-based assessment of rare species contributions to functional diversity and possible ecosystem function in tall-grass prairies. *Ecology and Evolution*, 2014, 4(1): 104-112.
- [28] Violle C, Navas M L, Vile D, Kazakou E, Fortunel C, Hummel I, Garnier E. Let the concept of trait be functional!. *Oikos*, 2007, 116(5): 882-892.
- [29] 李意德, 陈洁, 许涵, 刘世荣. 稀有物种的调控机制及其在生态修复中的应用启示. *陆地生态系统与保护学报*, 2021, 1(1): 1-11.
- [30] Ter Steege H, Pitman N C A, Killeen T J, Laurance W F, Peres C A, Guevara J E, Salomo R P, Castilho C V, Amaral I L, de Almeida Matos F D, de Souza Coelho L, Magnusson W E, Phillips O L, de Andrade Lima Filho D, de Jesus Veiga Carim M, Ireme M V, Martins M P, Molino J-F, Sabatier D, Wittmann F, López D C, da Silva Guimares J R, Mendoza A M, Vargas P N, Manzatto A G, Reis N F C, Terborgh J, Casula K R, Montero J C, Feldpausch T R, Honorio Coronado E N, Montoya A J D, Zartman C E, Mostacedo B, Vasquez R, Assis R L, Medeiros M B, Simon M F, Andrade A, Camargo J L, Laurance S G W, Nascimento H E M, Marimon B S, Marimon B-H, Costa F, Targhetta N, Vieira I C G, Brienen R, Castellanos H, Duivenvoorden J F, Mogollón H F, Piedade M T F, Aymard C. G A, Comiskey J A, Damasco G, Dávila N, García-Villacorta R, Diaz P R S, Vincentini A, Emilio T, Levis C, Schiatti J, Souza P, Alonso A, Dallmeier F, Ferreira L V, Neill D, Araujo-Murakami A, Arroyo L, Carvalho F A, Souza F C, Amaral D D do, Gribel R, Luize B G, Pansonato M P, Venticinque E, Fine P, Toledo M, Baraloto C, Cerón C, Engel J, Henkel T W, Jimenez E M, Maas P, Mora M C P, Petronelli P, Revilla J D C, Silveira M, Stropp J, Thomas-

- Caesar R, Baker T R, Daly D, Paredes M R, da Silva N F, Fuentes A, Jrgensen P M, Schngart J, Silman M R, Arboleda N C, Cintra B B L, Valverde F C, Di Fiore A, Phillips J F, van Andel T R, von Hildebrand P, Barbosa E M, de Matos Bonates L C, de Castro D, de Sousa Farias E, Gonzales T, Guillaumet J-L, Hoffman B, Malhi Y, de Andrade Miranda I P, Prieto A, Rudas A, Ruschell A R, Silva N, Vela C I A, Vos V A, Zent E L, Zent S, Cano A, Nascimento M T, Oliveira A A, Ramirez-Angulo H, Ramos J F, Sierra R, Tirado M, Medina M N U, van der Heijden G, Torre E V, Vriesendorp C, Wang O, Young K R, Baider C, Balslev H, de Castro N, Farfan-Rios W, Ferreira C, Mendoza C, Mesones I, Torres-Lezama A, Giraldo L E U, Villarroel D, Zagt R, Alexiades M N, Garcia-Cabrera K, Hernandez L, Huamantupa-Chuquimaco I, Milliken W, Cuenca W P, Pansini S, Pauletto D, Arevalo F R, Sampaio A F, Valderrama Sandoval E H, Gamarra L V. Estimating the global conservation status of more than 15,000 Amazonian tree species. *Science Advances*, 2015, 1(10): e1500936.
- [31] Micaela R Y, Peri Pablo L, Vanessa L M, Romina L, Martínez Pastur Guillermo J. Improving the knowledge of plant potential biodiversity-ecosystem services links using maps at the regional level in Southern *Patagonia*. *Ecological Processes*, 2021, 10(1):53.
- [32] Brown M T, Cohen M J, Bardi E, Ingwersen W W. Species diversity in the *Florida* Everglades, USA: a systems approach to calculating biodiversity. *Aquatic Sciences*, 2006, 68(3): 254-277.
- [33] Stetter M G, Gates D J, Mei W B, Ross-Ibarra J. How to make a domesticate. *Current Biology*, 2017, 27(17): R896-R900.
- [34] Yang Q, Liu G Y, Casazza M, Gonella F, Yang Z F. Three dimensions of biodiversity: new perspectives and methods. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108099.
- [35] Enquist B J, Feng X A, Boyle B, Maitner B, Newman E A, Jørgensen P M, Roehrdanz P R, Thiers B M, Burger J R, Corlett R T, Couvreur T L P, Dauby G, Donoghue J C, Foden W, Lovett J C, Marquet P A, Merow C, Midgley G, Morueta-Holme N, Neves D M, Oliveira-Filho A T, Kraft N J B, Park D S, Peet R K, Pillet M, Serra-Diaz J M, Sandel B, Schildhauer M, Šímová I, Violle C, Wieringa J J, Wiser S K, Hannah L, Svenning J C, McGill B J. The commonness of rarity: global and future distribution of rarity across land plants. *Science Advances*, 2019, 5(11): eaaz0414.
- [36] Lee D J, Brown M T. Renewable empower distribution of the world. *Journal of Environmental Accounting and Management*, 2019, 7(1): 11-27.
- [37] (Program) M E A. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [38] IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services//Díaz S, Settele J, Brondizio E, Ngo H T, Guèze, M, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K, Butchart S, Chan K, Garibaldi L A, Ichii, K, Liu J, Subramanian S M, Midgley G F, Miloslavich P, Molnár Z, Obura D, Pfaff A, Polasky S, Purvis A, Razaque J, Reyers B, Chowdhury R R, Shin Y J, Visseren-Hamakers I J, Willis K J, Zayas C eds. Bonn: IPBES secretariat, 2019: 1-56.
- [39] Ceballos G, Ehrlich P R, Barnosky A D, Garcia A, Pringle R M, Palmer T M. Accelerated modern human-induced species losses: entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 2015, 1(5): e1400253.
- [40] Pereira H M, Navarro L M, Santos Martins I. Global biodiversity change: the bad, the good, and the unknown. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37: 25-50.
- [41] Oliver J. International union for conservation of nature's (IUCN) 2019 observer activities report. *IUCN Red List of Threatened Species*, 2019
- [42] Sala O E, Chapin F S 3rd, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [43] 白娥, 薛冰. 土地利用与土地覆盖变化对生态系统的影响. *植物生态学报*, 2020, 44(5): 543-552.
- [44] Tittensor D P, Walpole M, Hill S L L, Boyce D G, Britten G L, Burgess N D, Butchart S H M, Leadley P W, Regan E C, Alkemade R, Baumung R, Bellard C, Bouwman L, Bowles-Newark N J, Chenery A M, Cheung W W L, Christensen V, Cooper H D, Crowther A R, Dixon M J R, Galli A, Gaveau V, Gregory R D, Gutierrez N L, Hirsch T L, Hft R, Januchowski-Hartley S R, Karmann M, Krug C B, Leverington F J, Loh J, Lojenga R K, Malsch K, Marques A, Morgan D H W, Mumby P J, Newbold T, Noonan-Mooney K, Pagad S N, Parks B C, Pereira H M, Robertson T, Rondinini C, Santini L, Scharlemann J P W, Schindler S, Sumaila U R, Teh L S L, van Kolck J, Visconti P, Ye Y. A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science*, 2014, 346(6206): 241-244.
- [45] 吴建国, 吕佳佳. 土地利用变化对生物多样性的影响. *生态环境*, 2008, 17(3): 1276-1281.
- [46] Griggs D, Stafford-Smith M, Gaffney O, Rockström J, Öhman M C, Shyamsundar P, Steffen W, Glaser G, Kanie N, Noble I. Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 2013, 495(7441): 305-307.
- [47] 丰思捷, 陈宝雄, 刘云慧. 农区土地利用强度变化对生物多样性的影响. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(10): 1271-1280.
- [48] Fricko O, Havlik P, Rogel'j J, Klimont Z, Gusti M, Johnson N, Kolp P, Strubegger M, Valin H, Amann M, Ermolieva T, Forsell N, Herrero M, Heyes C, Kindermann G, Krey V, McCollum D L, Obersteiner M, Pachauri S, Rao S, Riahi K. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: a middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 251-267.

- [49] 刘焱序, 于丹丹, 傅伯杰, 曹铭昌, 陈吉星. 生物多样性与生态系统服务情景模拟研究进展. 生态学报, 2020, 40(17): 5863-5873.
- [50] Li G D, Fang C L, Li Y J, Wang Z B, Sun S A, He S W, Qi W, Bao C, Ma H T, Fan Y P, Feng Y X, Liu X P. Global impacts of future urban expansion on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, 2022, 13: 1628.
- [51] 赵国松, 刘纪远, 匡文慧, 欧阳志云. 1990—2010 年中国土地利用变化对生物多样性保护重点区域的扰动. 地理学报, 2014, 69(11): 1640-1650.
- [52] 潘雯, 刘云慧, 武泽浩, 刘增力, 韩文轩, 宇振荣. 不同发展情景下青海省土地利用布局及生物多样性变化模拟. 生物多样性, 2022, 30(4): 103-116.
- [53] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Diaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhussseini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Shai M R, Novosolov M, Yuan P, Phillips H R P, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [54] Millard J, Outhwaite C L, Kinnersley R, Freeman R, Gregory R D, Adedjoja O, Gavini S, Kioko E, Kuhlmann M, Ollerton J, Ren Z X, Newbold T. Global effects of land-use intensity on local pollinator biodiversity. *Nature Communications*, 2021, 12: 2902.
- [55] Semenchuk P, Plutzer C, Kastner T, Matej S, Bidoglio G, Erb K H, Essl F, Haberl H, Wessely J, Krausmann F, Dullinger S. Publisher Correction; relative effects of land conversion and land-use intensity on terrestrial vertebrate diversity. *Nature Communications*, 2022, 13: 1820.
- [56] Spooner F E B, Pearson R G, Freeman R. Rapid warming is associated with population decline among terrestrial birds and mammals globally. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4521-4531.
- [57] Urban M C. Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 2015, 348(6234): 571-573.
- [58] Warren R, Price J, Graham E, Forstenhaeusler N, VanDerWal J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science*, 2018, 360(6390): 791-795.
- [59] 牛书丽, 万师强, 马克平. 陆地生态系统及生物多样性对气候变化的适应与减缓. 中国科学院院刊, 2009, 24(4): 421-427.
- [60] 魏辅文, 聂永刚, 苗海霞, 路浩, 胡义波. 生物多样性丧失机制研究进展. 科学通报, 2014, 59(6): 430-437.
- [61] Oliver T H, Morecroft M D. Interactions between climate change and land use change on biodiversity: attribution problems, risks, and opportunities. *WIREs Climate Change*, 2014, 5(3): 317-335.
- [62] 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.
- [63] Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill J K, Thomas C D, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent W J, Thomas J A, Warren M. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 1999, 399(6736): 579-583.
- [64] 周晓峰, 王晓春, 韩士杰, 邹春静. 长白山岳桦苔原过渡带动态与气候变化. 地学前缘, 2002, 9(1): 227-231.
- [65] 戴君虎, 潘娜, 崔海亭, 唐志尧, 刘鸿雁, 曹燕丽. 五台山高山带植被对气候变化的响应. 第四纪研究, 2005, 25(2): 216-223.
- [66] He X, Burgess K, Gao L, Li D Z. Distributional responses to climate change for alpine species of *Cyananthus* and *Primula* endemic to the Himalaya-Hengduan Mountains. *Plant Diversity*, 2019, 41: 26-32.
- [67] Zu K L, Wang Z H, Zhu X Y, Lenoir J, Shrestha N, Lyu T, Luo A, Li Y Q, Ji C J, Peng S J, Meng J H, Zhou J. Upward shift and elevational range contractions of subtropical mountain plants in response to climate change. *Science of the Total Environment*, 2021, 783: 146896.
- [68] Dawson T P, Jackson S T, House J I, Prentice I C, Mace G M. Beyond predictions: biodiversity conservation in a changing climate. *Science*, 2011, 332(6025): 53-58.
- [69] Willis K J, Bhagwat S A. Biodiversity and climate change. *Science*, 2009, 326(5954): 806-807.
- [70] 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.
- [71] IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-1535.
- [72] Peters M K, Hemp A, Appelhans T, Becker J N, Behler C, Classen A, Detsch F, Ensslin A, Ferger S W, Frederiksen S B, Gebert F, Gerschlauser F, Gütlein A, Helbig-Bonitz M, Hemp C, Kindeketa W J, Kühnel A, Mayr A V, Mwangomo E, Ngeresa C, Njovu H K, Otte I, Pabst H, Renner M, Röder J, Rutten G, Schellenberger Costa D, Sierra-Cornejo N, Vollstädt M G R, Dulle H I, Eardley C D, Howell K M, Keller A, Peters R S, Ssymank A, Kakengi V, Zhang J E, Bogner C, Böhning-Gaese K, Brandl R, Hertel D, Huwe B, Kiese R, Kleyer M, Kuzyakov Y, Nauss T, Schleuning M, Tschapka M, Fischer M, Steffan-Dewenter I. Climate - land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature*, 2019, 568(7750): 88-92.

- [73] Newbold T, Oppenheimer P, Etard A, Williams J J. Tropical and Mediterranean biodiversity is disproportionately sensitive to land-use and climate change. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(12): 1630-1638.
- [74] Kerr J, Pindar A, Galpern P, Packer L, Potts S, Roberts S, Rasmont P, Schweiger O, Colla S, Richardson L L, Wagner D, Gall L, Sikes D, Pantoja A. Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science*, 2015, 349: 177-180.
- [75] Maxwell S L, Fuller R A, Brooks T M, Watson J E M. Biodiversity: the ravages of guns, nets and bulldozers. *Nature*, 2016, 536(7615): 143-145.
- [76] Uhler J, Redlich S, Zhang J, Hothorn T, Tobisch C, Ewald J, Thorn S, Seibold S, Mitesser O, Morinière J, Bozicevic V, Benjamin C S, Englmeier J, Fricke U, Ganuza C, Haensel M, Riebl R, Rojas-Botero S, Rummeler T, Uphus L, Schmidt S, Steffan-Dewenter I, Müller J. Relationship of insect biomass and richness with land use along a climate gradient. *Nature Communications*, 2021, 12: 5946.
- [77] Peter S, Tim N, Jeremy K. Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents. *Science*; New York, N Y, 2020, 367(6478): 685-688.
- [78] González del Pliego P, Scheffers B R, Basham E W, Woodcock P, Wheeler C, Gilroy J J, Medina Uribe C A, Haugaasen T, Freckleton R P, Edwards D P. Thermally buffered microhabitats recovery in tropical secondary forests following land abandonment. *Biological Conservation*, 2016, 201: 385-395.
- [79] Senior R A, Hill J K, González del Pliego P, Goode L K, Edwards D P. A pantropical analysis of the impacts of forest degradation and conversion on local temperature. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(19): 7897-7908.
- [80] Williams J J, Newbold T. Local climatic changes affect biodiversity responses to land use: a review. *Diversity and Distributions*, 2020, 26(1): 76-92.
- [81] Outhwaite C L, McCann P, Newbold T. Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. *Nature*, 2022, 605(7908): 97-102.
- [82] Deutsch C A, Tewksbury J J, Huey R B, Sheldon K S, Ghalambor C K, Haak D C, Martin P R. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(18): 6668-6672.
- [83] Perez T M, Stroud J T, Feeley K J. Thermal trouble in the tropics. *Science*, 2016, 351(6280): 1392-1393.
- [84] 陈子琦, 董凯凯, 张艳红, 侯光雷, 刘兆礼. 全国重要生态功能区生物多样性保护成效区域对比评估. *生态学报*, 2022, 42(13): 5264-5274.
- [85] 任月恒, 朱彦鹏, 付梦娣, 闻丞, 张明海, 于胜祥, 江建平, 李俊生. 黄河流域濒危物种保护热点区与保护空缺识别. *生态学报*, 2022, 42(3): 982-989.
- [86] 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.