

DOI: 10.20103/j.stxb.202406061311

祝晨佳,高吉喜,万华伟,郭雨桐,朱萨宁,杨雪,尤春赫.基于昆-蒙框架的 PSR 生物多样性评估方法构建.生态学报,2025,45(4):1854-1864.

Zhu C J, Gao J X, Wan H W, Guo Y T, Zhu S N, Yang X, You C H. The PSR biodiversity assessment indicator system of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1854-1864.

基于昆-蒙框架的 PSR 生物多样性评估方法构建

祝晨佳^{1,2}, 高吉喜^{2,*}, 万华伟², 郭雨桐^{1,2}, 朱萨宁², 杨 雪³, 尤春赫³

1 中国环境科学研究院, 北京 100012

2 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

3 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083

摘要:开展《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》(以下简称“《昆-蒙框架》”)评估对于解决全球生物多样性丧失问题、合理调整生物多样性保护管理政策以及进一步提升全球生物多样性保护管理水平都具有重要意义,但还未有统一的《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系用于常规和周期性的生物多样性状态监测及其变化评估。研究围绕 2022 年《生物多样性公约》第十五次缔约方大会(COP-15)提出的《昆-蒙框架》,借鉴国内外已有的生物多样性评估指标体系,充分考虑生物多样性变化、现状和保护要素的关系,采用压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)概念框架,构建了《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系,包括3个一级指标、13个主题指标和16个评估指标。基于综合评分法构建了评估指标体系的定量计算公式。同时分析了拟定评估指标体系与《昆-蒙框架》行动目标的相关性和指标数据的可获得性,结果表明,拟定评估指标体系能够很好地对《昆-蒙框架》生物多样性进行监测评估,也发现现有数据难以对行动目标20、21、22和23进行量化评估。讨论了当下《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系研究中存在的不足和展望,以期促进《昆-蒙框架》愿景早日实现。

关键词:生物多样性;《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》;评估;压力-状态-响应(PSR)

The PSR biodiversity assessment indicator system of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework

ZHU Chenjia^{1,2}, GAO Jixi^{2,*}, WAN Huawei², GUO Yutong^{1,2}, ZHU Saning², YANG Xue³, YOU Chunhe³

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2 Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Beijing 100094, China

3 School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Biodiversity encompasses the variety of living organisms, their ecological complexes, and related processes, serving as the material basis for human survival and as a fundamental guarantee for sustainable economic and social development. However, with the rapid pace of modernization, biodiversity loss has become a severe issue and is recognized by the United Nations as one of the three major global environmental crises. In response, many countries have intensified their biodiversity conservation efforts. At the fifteenth Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity (COP-15) in 2022, the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (KM-GBF) was unanimously adopted. This framework outlines 23 global action targets across three main areas: mitigating pressures on biodiversity, promoting sustainable use and benefit-sharing, and implementing measures and mainstreaming approaches. The KM-GBF aims to transform the relationship between society and biodiversity by 2030 and to achieve a vision of living in harmony with nature by 2050. However, there is currently a lack of an effective monitoring and evaluation system to accurately describe changes in biodiversity composition, status, and threats, and to coherently and transparently track and report progress toward global

基金项目:国家重点研发计划:草地生物多样性无伤害遥感监测技术与应用示范(2021YFB3901102)

收稿日期:2024-06-06; **网络出版日期:**2024-11-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gjx@nies.org

goals. To address this gap, this study draws on existing biodiversity evaluation systems, both domestic and international. Considering the complex relationships among biodiversity dynamics, statuses, and conservation elements, we have developed a robust array of biodiversity evaluation indices. Using the Pressure-State-Response (PSR) conceptual model, our system includes three core indicators, thirteen thematic indicators, and sixteen assessment indicators. A quantitative evaluation index system, supported by a comprehensive scoring methodology, has been crafted to facilitate efficient monitoring and evaluation of biodiversity within the KM-GBF framework. Furthermore, we have scrutinized the alignment between these indicators and the KM-GBF actionable targets, along with a thorough evaluation of the availability and relevance of pertinent data sources. The findings indicate that the proposed indicator system is well-suited for monitoring and evaluating biodiversity in line with KM-GBF objectives. However, challenges remain in quantitatively assessing action targets^{20, 21, 22, and 23}, primarily due to limitations in data availability and quality. In conclusion, the study highlights the effectiveness of the proposed indicator system in addressing the complexities of biodiversity assessment aligned with KM-GBF requirements and underscores the need to overcome existing methodological and data-related challenges. By identifying current research limitations and suggesting future research directions, this study aims to support the successful implementation of KM-GBF and enhance global biodiversity conservation efforts.

Key Words: biodiversity; Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework; evaluation; Pressure-State-Response (PSR)

生物多样性包括生物及其与环境形成的生态复合体 and 与此相关的各种生态过程,是人类生存的物质基础和经济社会可持续发展的根本保障^[1]。然而随着现代化进程的加快,生物多样性丧失问题严重,已被联合国列为全球三大环境危机之一^[2]。为进一步保护生物多样性,众多国家在 2022 年《生物多样性公约》第十五次缔约方大会(COP-15)中一致同意《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》(以下简称“《昆-蒙框架》”)^[3]。《昆-蒙框架》为全球生物多样性治理擘画了蓝图,但能否实现,实现的效果如何,需有一套行之有效的监测评估指标体系对生物多样性组成、变化和受威胁程度进行精确描述,以连贯、透明的方式跟踪和报告缔约方国家在实现全球目标方面的整体进展,否则“愿景”有可能变成像爱知目标一样的“空景”^[4]。

目前国内外有许多生物多样性评估指标体系,涉及的指标不仅包括物种丰富度、稀有物种数量、外来物种入侵度等生物学指标,还包括景观破碎度、社会经济指标等非生物学指标^[5];评估对象也涵盖了森林^[6]、湿地^[7]、海洋^[8]等生态系统;空间尺度小到县、市^[9],大到跨省保护区乃至全国^[10],且评估指标的选取都因地制宜,考虑到生物多样性的层次性、复杂性以及区域的生境异质性^[7,11]。但正因如此,现有生物多样性评估指标体系地区异质性强,难以推广至全球使用;评估内容也更为注重物种多样性,评估指标的获取难度也较大,需要依靠大量的人力物力进行实地调查获取;最重要的是目前还未有针对《昆-蒙框架》行动目标内容的生物多样性评估指标体系。

本文参考已有生物多样性评估指标体系,结合<《昆-蒙框架》的监测框架>和《昆-蒙框架》行动目标内容,通过压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)概念框架,综合利用全球已有统计数据和遥感指数产品构建生物多样性评估指标体系,并讨论当下《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系研究中存在的不足和展望。以期通过该研究填充《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系构建方面的空白,研究结果有望用于揭示《昆-蒙框架》生物多样性保护的整体成效,进而为生物多样性保护和可持续发展管理提供科学依据。

1 基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估指标体系构建思路

1.1 PSR 评估指标体系概念框架

概念框架可以帮助整理生物多样性评估的理论基础、关键信息和研究对象,是支撑生物多样性评估的中流砥柱^[12]。由经济合作与开发组织(Organization of Economic Cooperation and Development, OECD)提出的 PSR 概念框架最为常用,其中压力指标表征造成生物多样性丧失的自然或人为因素,状态指标表征生物多样性在特定时间段内的状态和变化情况,响应指标表征社会和个人采取的保护或恢复生物多样性的措施^[13]。

压力、状态、响应指标紧密联系,清晰地阐释了社会-生态复合系统可持续变化的因果关系,可以回答“发生了什么、为什么发生、我们将如何做”3个可持续发展的基本问题(图1)。

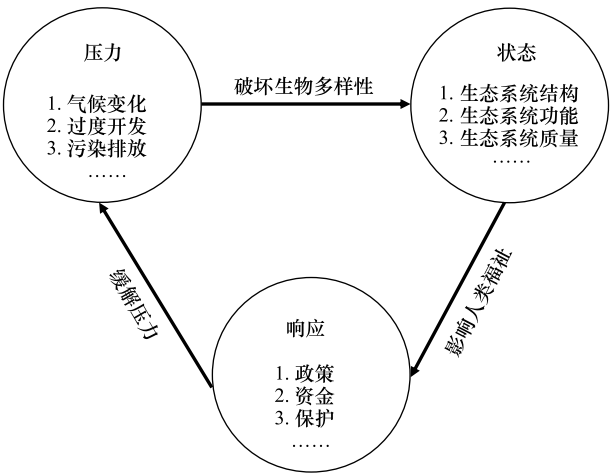


图1 PSR 概念框架

Fig.1 PSR framework

PSR: 压力-状态-响应 Pressure-State-Response

《生物多样性公约》采用 PSR 框架将 2010 年生物多样性目标评估指标框架的 7 个核心领域的 22 个标题指标划入其中,并用于 2010 年后生物多样性评估^[14]。而《昆-蒙框架》中亦有许多与生物多样性压力、状态和响应相关的目标内容,故基于 PSR 框架构建针对《昆-蒙框架》行动目标内容的生物多样性评估指标体系逻辑清晰,兼具科学性和完整性,也便于指标体系后期随需求改变进行动态调整^[15]。

1.2 PSR 评估指标体系筛选原则

本研究筛选评估指标时充分考虑指标的全面性、可行性和可推广性。全面性要求所选指标能与《昆-蒙框架》的一个或几个行动目标相关,评估指标体系尽量涵盖全部行动目标。另外,充分考虑《昆-蒙框架》的监测框架和《昆-蒙框架》行动目标内容,剔除相关性弱的指标并补充相关性强的指标,使用尽可能少而精的指标监测评估尽可能多而全的行动目标。可行性要求操作可行、获取可行和经济可行,即所选指标是客观存在的、可以被测量的,不随时空变化而发生质变,不随评估指标体系的使用对象变化而变化,收集和测量过程简单,涉及到的指标数据耗费的人力物力财力尽可能较低。可推广性要求所选指标简单易懂,适应不同地区,可被广泛认可、推广全球。

1.3 PSR 评估指标体系评估方法

综合评分法是一种综合考虑多个因素和指标来评估对象的方法,具体是通过对各项指标进行加权、综合评定,得出对评估对象的全面评价结论。评估结果可以在多个空间尺度进行比较,甚至可以在数据充足时对区域生物多样性变化趋势进行判断。综合评分法能够帮助识别出评估对象的优缺点,为进一步改进和优化评估指标体系提供参考^[12]。为有效评估《昆-蒙框架》生物多样性状况,本研究在有关专家的意见指导下,结合指标筛选原则筛选及调整《昆-蒙框架》生物多样性评估指标,构建基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估指标体系,最终通过综合评分法构建生物多样性压力、状态和响应指标得分计算公式,用以评估《昆-蒙框架》生物多样性整体保护成效^[16]。

2 基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估内容

2.1 《昆-蒙框架》内容

为更好的实现与自然和谐相处的愿景,《昆-蒙框架》对各履约国提出了 4 个长期目标以及 23 个行动目

标。长期目标分别为生物多样性状态、可持续利用生物多样性、公平公正分享惠益及提供执行保障。行动目标 1—8 为减少对生物多样性的威胁、目标 9—13 为通过可持续利用和惠益分享以满足人类需求、目标 14—23 为执行工作和主流化的工具和解决方案^[3](图 2)。

《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》		
长期目标A: 生物多样性状态	行动目标1: 生物多样性空间规划 行动目标2: 30%退化生态系统恢复 行动目标3: 30%自然生态系统被保护 行动目标4: 降低人为干扰 行动目标5: 野生物种保护, 防止过度开发 行动目标6: 防止外来入侵物种 行动目标7: 降低污染风险 行动目标8: 减少气候变化和海洋酸化影响	行动目标1—8: 减少对生物多样性的威胁
长期目标B: 可持续利用生物多样性	行动目标9: 野生物种的可持续利用 行动目标10: 农林渔的可持续管理 行动目标11: 生态系统功能与服务 行动目标12: 城市蓝绿空间	行动目标9—13: 通过可持续利用和惠益分享满足人类需求
长期目标C: 公平公正分享惠益	行动目标13: 遗传资源获取和惠益	
长期目标D: 提供执行保障	行动目标14: 跨部门生物多样性主流化 行动目标15: 企业与生物多样性 行动目标16: 鼓励人们可持续消费 行动目标17: 生物安全 行动目标18: 减少有害激励措施 行动目标19: 资源调动 行动目标20: 能力建设/技术转让/合作 行动目标21: 数据、信息和知识的获取 行动目标22: 环境人权公平 行动目标23: 性别平等	行动目标14—23: 执行工作和主流化的工具和解决方案

图 2 《昆-蒙框架》目标内容与结构

Fig.2 The content and structure of Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework

2.2 基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估内容

2.2.1 生物多样性压力方面

早期生物多样性丧失的主要原因是气候、地理等自然因素,工业革命之后,生物多样性丧失的主要驱动力是人为活动^[17]。生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台(Intergovernmental Science-Policy Platform for Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES)评估报告称生物多样性丧失的直接驱动因素为土地利用变化、资源过度开发、气候变化、环境污染和外来物种入侵。《昆-蒙框架》行动目标 1、4、5、6、7 和 8 与生物多样性丧失的五大驱动力因素直接相关。因此,本研究也从生物多样性丧失五大驱动力评估《昆-蒙框架》生物多样性压力高低。

2.2.2 生物多样性状态方面

地球生物多样性观测网络(The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network, GEO BON)普遍采用 Pereira 等提出的生物多样性核心监测指标(Essential Biodiversity Variables, EBVs)评估生物多样性,主要从遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性三个层次和遗传组成、物种种群、物种性状、群落组成、生态系统功能与生态系统结构等 6 个大类进行评估,但遗传多样性和物种多样性在大尺度进行调研评估工作量巨大,难以实施^[18]。而遗传多样性是生物多样性的内在形式,物种多样性是生物多样性最直观的体现,生态系统的多样性是生物多样性的外在表现^[1]。故本文考虑遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性三个层次的内在逻辑关系及数据可获取性,通过物种多样性和生态系统多样性状态来反映生物多样性状态。

在物种多样性方面,相较于物种多度和物种相对丰度等传统生物多样性调查数据,《昆-蒙框架》更关心物种多样性的可持续性,如行动目标 4 和行动目标 5 要求对受威胁物种和野生物种的可持续保护;在生态系统

多样性方面,《昆-蒙框架》行动目标要求主要关于生态系统功能和服务、生态完整性,尤其行动目标 2、3 和 11 更是以生态系统功能和服务作为主要核心内容。综上,结合生物多样性自身定义以及《昆-蒙框架》行动目标内容,本文通过物种受威胁程度、生态系统类型、生态系统功能和生态系统结构等四个方面评估《昆-蒙框架》生物多样性状态。

2.2.3 生物多样性响应方面

《昆-蒙框架》中生物多样性响应主要是保护和恢复完整性较强的生态系统、促进生物多样性主流化、加大生物多样性资金投入和改进相应政策法律法规等手段。例如行动目标 2 要求恢复 30%退化生态系统;行动目标 3 要求保护 30%自然生态系统;行动目标 14—16 从政府、企业和群众三个层次加强生物多样性主流化;行动目标 17、18、22、23 从政策法规角度呼吁保护生物多样性;行动目标 19、20、21 更是要求从各个途径进行资源调动,充实生物多样性资金投入,协调多方信息资源。根据指标筛选原则,生物多样性响应评估方面应首先考虑高生物多样性地区保护与恢复的程度,同时可以选择生物多样性保护资金投入、社会对生物多样性认知度和公众满意度等用以表征生物多样性主流化程度。因此,本文通过保护地面积占比、资金投入、可持续经营管理和生物多样性主流化等四个方面评估《昆-蒙框架》生物多样性响应程度进行。

3 基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估指标体系构建

3.1 评估指标体系构建

遵循评估指标体系筛选原则,以《昆-蒙框架》生物多样性综合评估为目的,为“基于《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估内容”——匹配相应评估指标,形成《昆-蒙框架》的 PSR 生物多样性评估指标体系。该指标体系分为三级,一级指标为生物多样性压力、状态和响应指标,二级为能够反映一级指标优劣的主题指标,三级为能够反映指标层的单项数据变量的评估指标,它们是具有具体可采集并具有自身内涵的变量。最终指标体系共由 3 个一级指标,13 个主题指标和 16 个评估指标构成(表 1)。

表 1 《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系

Table 1 Biodiversity assessment indicator system of KM-GBF

一级指标 First-level indicator	主题指标 Subject indicator	评估指标 Evaluation indicator
压力 Pressure	气候变化	I1:极端气候事件
	外来物种入侵	I2:外来物种入侵度
	土地利用变化	I3:人类足迹
	环境污染	
状态 State	资源过度开发	
	物种受威胁程度	I4:红色名录指数
	生态系统类型	I5:自然生态系统占比
	生态系统功能	I6:净初级生产力
		I7:叶面积指数
		I8:植被覆盖
响应 Response	生态系统结构	I9:地上生物量
		I10:景观破碎度
	保护区比例	I11:聚集度指数
		I12:保护地面积占比
	资金投入	I13:生物多样性保护资金占 GDP 比例
	可持续经营管理	I14:FSC 认证森林面积
	生物多样性主流化	I15:有机农业面积
		I16:城市蓝绿空间占比

I:指标 Index; GDP:国内生产总值 Gross domestic product; FSC:森林管理委员会 Forest stewardship council; KM-GBF:《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework

一级指标包括 3 个主要生物多样性指标:生物多样性压力指标 (Biodiversity Pressure Index, BPI), 全面反映区域生物多样性压力状况, BPI 越大, 生物多样性丧失情况越严重; 生物多样性状态指标 (Biodiversity State Index, BSI), 反映区域生物多样性变化的状况, 直接反映生物多样性本底值的丰富程度和生物多样性保护的好坏; 生物多样性响应指标 (Biodiversity Response Index, BRI), 反映区域人类对生物多样性变化采取的措施, BRI 越大表明生物多样性保护越好。

主题指标包括表征生物多样性压力的气候变化、外来物种入侵、土地利用变化、环境污染和资源过度开发等五个指标; 表征生物多样性状态的物种受威胁程度、生态系统类型、生态系统功能和生态系统结构等四个指标; 表征生物多样性响应的保护区比例、资金投入、可持续经营管理和生物多样性主流化等四个指标。

评估指标包括极端气候事件、外来物种入侵度、人类足迹、红色名录指数、自然生态系统占比、净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度、地上生物量、景观破碎度、聚集度指数、保护地面积占比、FSC 认证森林面积、有机农业面积和城市蓝绿空间占比等 16 个指标。

3.2 评估指标含义

3.2.1 生物多样性压力评估指标

极端气候事件包括极端温度、强降水、干旱、极端风暴、复合事件等, 一直是政府间气候变化专门委员会评估报告的重点内容^[19]。从数据可获取性、评估指标代表性和可操作性而言, 极端气候事件数据能够表征气候变化对生物多样性的压力, 与《昆-蒙框架》行动目标 8 息息相关。

外来物种入侵度是指非原生物种对当地生态系统的侵入和扩张程度, 通常用来衡量外来物种对当地生物多样性和生态系统功能的影响^[20], 根据定义可用于表征外来入侵物种对生物多样性的压力, 直接反映《昆-蒙框架》行动目标 6。

人类活动是引起资源过度开发、环境污染、土地利用变化的主要因素, 也对外来物种入侵和气候变化有着深远影响, 例如建筑、能源利用、交通和废弃物等就会引起土地利用变化、资源过度开发、气候变化和环境污染问题, 从而影响生物多样性。因此, 本研究特地引用遥感所得到的人类足迹数据表征由于人类活动带来的土地利用变化、环境污染和资源过度开发对生物多样性的压力^[21]。因此, 该评估指标与行动目标 1、4、5、7 强烈相关。

3.2.2 生物多样性状态评估指标

红色名录指数是依据世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 赋予物种的濒危等级在不同时间节点的变化, 用于评估物种濒危状况变化趋势, 如果指数上升, 则表示物种受威胁状况总体趋向变好^[22]。在《昆-蒙框架》的监测框架中, 红色名录指数也多次被作为行动目标的标题指标、组成指标和补充指标。

自然生态系统是指在特定时空范围内, 通过自我调节能力就能使自身保持相对稳定的生态系统。相较于人工生态系统, 自然生态系统具有较高生物多样性重要性, 为高度生态完整的生态系统。自然生态系统占比是指在研究区内自然生态系统占研究区总面积的比例, 能够反映高度生物多样性重要性区域和生态系统类型分布和比例, 与行动目标 1 和 3 的内容密切相关。

生态系统功能方面采用适用性较强、成本小且方法成熟的评估指标, 如净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度等遥感产品。净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 指植物将光能转化为生物能后, 除去呼吸作用消耗的能量后的剩余能量, 为生态系统循环提供能量, 是评价产品供给、生物多样性维持、水源涵养、防风固沙以及水土保持等生态系统服务功能的重要参数指标^[23]。生态系统 NPP 的时空分布对生物多样性的维护有重要的意义, 因为依据生产力假说, 高 NPP 的地区通常生物多样性更丰富, 因为这些地区提供了更多的生态位和资源, 支持更多种类的生物生存和繁衍。叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 是绿叶量和土壤量之间的比值, 是衡量辐射、降水、能量和水分交换四个过程的关键指标^[24]。植被覆盖度 (Fraction of Vegetation Cover, FVC) 是指植被地上部分的垂直投影面积与研究区总面积的百分比, 对降水、全球变化、生态系统稳定

性等具有重要意义,是影响土壤侵蚀与水土流失的主要因子^[25]。本研究中生物量指的是植被地上生物量(Above ground Biomass, AGB),AGB 是描述生态系统物质循环、能量流动、评价生态系统功能及其健康程度的重要指标之一^[26-27]。当前可基于遥感技术构建遥感影像多光谱波段特征与 AGB 之间的函数关系,以反映生态系统生物量。NPP、LAI、FVC 和 AGB 之间组合能够对特定生态系统服务功能进行定量评估^[28-29],如 NPP 和 FVC 能够反映植被的生长状态,而植被的生长状态变化是对生态系统退化最为敏感也最为直接的反应,故 NPP 和 FVC 可以间接监测行动目标 2 中生态系统退化区域恢复状况^[30]。由此可知,通过 NPP、FVC、LAI 和 AGB 等遥感指标能够支撑《昆-蒙框架》中与生态系统服务功能相关的行动目标中的监测评估。

景观破碎度是指一个地区内的自然景观或生态系统被人类活动或自然因素破坏、破碎或切割成多个零散片段的程度,反映生态系统空间结构多样性的同时还能反映外界干扰对生态系统功能、结构和过程的影响。聚集度指数指所有类型生态系统斑块的相邻概率,反映各类生态系统斑块的随机性或聚集程度,表征每一种景观类型斑块间的连通性,取值越小,景观越分散。故景观破碎度和聚集度指数能够表征生态系统结构的完整性和连通性,亦可反映生境的质量。而 Terrado 等^[31]发现模型计算的生境质量指数结果与生物多样性实测数据之间存在显著相关性,相关系数最高为 0.76。因此,景观破碎度和聚集度指数也可以侧面反映生境中物种多样性,而物种多样性作为遗传多样性的外在表现和载体,物种多样性高的地方遗传多样性也高,即可用来监测《昆-蒙框架》行动目标 1、2 和 4。

3.2.3 生物多样性响应评估指标

生物多样性响应层面通过较好获取的保护区面积占比和城市蓝/绿空间占比反映评估研究区的生物多样性保护与恢复程度以及政府和人们对生物多样性价值的认识程度,即《昆-蒙框架》“3030 目标”和生物多样性主流化程度。通过生物多样性保护资金占 GDP 比例反映各履约国对生物多样性的资金投入。

FSC 森林认证是一种通过市场机制来引导森林可持续经营,实现生态、社会和经济目标的工具。FSC 森林认证是从根本上解决政策失误、市场失灵和机构不健全带来的全球森林资源匮乏、生态环境日益恶化等问题,能够有效改善森林经营单位的经营水平,促进森林的可持续经营^[32]。有机农业是一种以自然生态系统为模板,尊重自然规律和生态平衡的农业生产方式,在生产过程中主要利用有机肥料、生物农药等有机来源的农业生产资料,注重保护土壤的生物多样性和微生物活性,避免环境污染和生态破坏,追求农产品的绿色、健康和安。因此,有机农业的发展可以避免合成化学农药、化肥、生长激素等农业生产物质带来的一系列生态环境问题,如严重的土壤侵蚀和土地质量下降,促进农业可持续发展,保护农田生态系统,提高农产品质量和农民收益,有极大的发展潜力,是可持续经营管理的有效途径^[33]。根据 FSC 森林认证和有机农业的基本概念和原理,本研究认为 FSC 认证森林面积和有机农业面积占比能够有效监测《昆-蒙框架》履约国的可持续经营状态。

3.3 评估指标计算方法

生物多样性压力、状态和响应是决定一个国家生物多样性好坏的三个重要方面,根据专家建议,通过该评估指标体系对《昆-蒙框架》生物多样性进行评估时,BPI、BSI、BRI 同等重要。依据三个指数的定义及与生物多样性好坏的相关关系,其中生物多样性压力与生物多样性呈负相关,故而生物多样性指数(Biodiversity Index, BI)计算公式如下:

$$BI = -\frac{1}{3} \times BPI + \frac{1}{3} \times BSI + \frac{1}{3} \times BRI$$

式中,BPI 为生物多样性压力指标,BSI 为生物多样性状态指标,BRI 为生物多样性响应指标,BI 值越高代表被评估对象的生物多样性越好。

本研究中的 BPI 是通过极端气候事件、外来物种入侵度和人类足迹三个评估指标监测评估,BSI 是由红色名录指数、自然生态足迹占比、净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖、地上生物量、景观破碎度和聚集度指数表征,BRI 则是通过保护地面积占比、生物多样性保护资金占 GDP 比例、FSC 认证森林面积、有机农业面积

和城市蓝绿空间占比等五个评估指标反映。结合评估指标自身含义、算法与一级指标的对应关系,式中每项评估指标的系数都取得是一级指标下主题指标的个数的倒数,即本研究认为每个主题指标对生物多样性压力/状态/响应的贡献一致。BPI、BSI 和 BRI 计算公式如下:

$$BPI = \frac{1}{5} \times EC + \frac{1}{5} \times \frac{N_i}{(N_v + N_p)} + \frac{3}{5} \times \frac{HF}{LA}$$

式中, EC 为研究区在研究时段内发生的极端气候事件次数; N_i 为研究区内外来入侵物种数, N_v 为研究区内野生动物的种数, N_p 为研究区内野生维管束植物的种数, $\frac{N_i}{(N_v + N_p)}$ 表示外来物种入侵度; HF 为研究区中人类足迹面积, LA 为研究区的总面积, $\frac{HF}{LA}$ 表示研究区内出现人类足迹的区域占比,表征人类活动对生物多样性的压力。

$$BSI = \frac{1}{4} \times \frac{RLI_i}{RLI_R} + \frac{1}{4} \times \frac{EL}{LA} + \frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{4} \times \frac{NPP_i}{NPP_R} + \frac{1}{4} \times \frac{LAI_i}{LAI_R} + \frac{1}{4} \times \frac{FVC_i}{FVC_R} + \frac{1}{4} \times \frac{AGB_i}{AGB_R} \right) - \frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{2} \times PD - \frac{1}{2} \times CI \right)$$

式中, EL 为研究区内除城镇和农田之外的所有生态系统类型面积, $\frac{EL}{LA}$ 表示自然生态系统占比; RLI_i 、 NPP_i 、 LAI_i 、 FVC_i 、 AGB_i 分别为研究区在研究时段的红色名录指数、净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度和地上生物量, RLI_R 、 NPP_R 、 LAI_R 、 FVC_R 、 AGB_R 分别为研究区在 2022 年相应时段的红色名录指数、净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度和地上生物量, $\frac{RLI_i}{RLI_R}$ 表示自《昆-蒙框架》通过以来,研究区红色名录指数的变化,以评估物种受威胁程度是否有改善; $\left(\frac{1}{4} \times \frac{NPP_i}{NPP_R} + \frac{1}{4} \times \frac{LAI_i}{LAI_R} + \frac{1}{4} \times \frac{FVC_i}{FVC_R} + \frac{1}{4} \times \frac{AGB_i}{AGB_R} \right)$ 表示自《昆-蒙框架》通过以来,研究区在研究时段内的净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度和地上生物量的变化程度,通过四者的和表示研究区在研究时段内的生态系统功能状态; PD 为研究区的景观破碎度, CI 为研究区的聚集度指数, PD 和 CI 同时决定生态系统结构状态。

$$BRI = \frac{1}{4} \times \frac{PA}{LA} + \frac{1}{4} \times \frac{BF}{GDP} + \frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{2} \times \frac{FSC}{LA} + \frac{1}{2} \times \frac{OAA}{LA} \right) + \frac{1}{4} \times \frac{UG}{LA_c}$$

式中, PA 为研究区内保护地面积, LA 为被研究区的总面积, $\frac{PA}{LA}$ 表示保护地面积占比; BF 为研究区内生物多样性资金, GDP 为研究区的经济生产总值, $\frac{BF}{GDP}$ 为生物多样性保护资金占 GDP 比例,表征研究区生物多样性资金投入状况; FSC 为研究区的 FSC 认证的森林面积, OAA 为研究区的有机农业面积, FSC 和 OAA 共同表征研究区可持续经营管理状况; UG 是为研究区城市蓝绿面积, LA_c 是为研究区内城市总面积, $\frac{UG}{LA_c}$ 为城市蓝绿空间占比,表征研究区生物多样性主流化。

3.4 评估指标数据可获得性

《昆-蒙框架》生物多样性评估指标体系部分数据需要通过调取政府部门或相关单位的统计数据,再进行计算处理和整理分析获得,如极端气候事件、外来物种入侵度、红色名录指数、保护地面积占比、生物多样性保护资金占 GDP 比例、FSC 认证森林面积和有机农业面积等指标;部分数据是基于遥感手段获取数据,对遥感影像进行预处理、监督分类或模型计算得来,如人类足迹、植被覆盖度、叶面积指数、净初级生产力、自然生态系统占比和城市蓝绿空间占比等(表 2)。

表 2 《昆-蒙框架》生物多样性评估指标数据来源

Tabel 2 Source of data for biodiversity assessment indicators of KM-GBF

评估指标 Evaluation indicator	数据来源 Data source
极端气候事件 Extreme climate	全球灾害数据平台 / IPCC 评估报告
外来物种入侵度 Degree of invasive alien species	全球入侵物种数据库
人类足迹 Human footprint	中国农业大学全球人类足迹数据集
红色名录指数 Red list index	IUCN 濒危物种红色名录数据库
自然生态系统占比 Proportion of natural ecosystems	30 米全球地表覆盖数据
净初级生产力 Net primary production	GLASS NPP 数据集
叶面积指数 Leaf area index	GLASS LAI 数据集
植被覆盖度 Fractional vegetation cover	GLASS FVC 数据集
生物量 Above ground biomass	CASA 模型计算
景观破碎度 Patch density	Fragstats 软件计算
聚集度指数 Clumping index	Fragstats 软件计算
保护地面积占比 Proportion of protected area	世界保护区数据库
生物多样性保护资金占 GDP 比例 Funding for biodiversity conservation of GDP	世界银数据库
FSC 认证森林面积 FSC certified forest area	联合国粮食及农业组织/FSC 数据
有机农业面积 Organic agricultural area	瑞士农业有机研究所与国际有机农业运动联盟
城市蓝绿空间占比 Urban blue and green space proportion	30 米全球地表覆盖数据

IPCC:联合国政府间气候变化专门委员会 Intergovernmental panel on climate change; IUCN:世界自然保护联盟 International union for conservation of nature; GLASS:全球陆表特征参量 Global land surface satellite; CASA:评估陆地生态系统植被净生产力的经典模型 Carnegie-ames-stanford approach

3.5 评估指标与《昆-蒙框架》相关性分析

为使评估指标体系被更多使用和推广,分析评估指标体系与《昆-蒙框架》行动目标之间的相关性。相关性评价标准定为:能够直接反映《昆-蒙框架》行动目标或表述一致的评估指标,则相关性较高;能够间接反映《昆-蒙框架》行动目标相关内容,但表述不完全相同的评估指标,则相关性中等;与《昆-蒙框架》行动目标仅能间接联系的评估指标,则相关性较低。

分析结果表明(图 3),除行动目标 13、20、21、22 和 23 外,每个行动目标都与评估指标体系存在相关性。从评估指标来看,每个评估指标都能直接或间接反映《昆-蒙框架》的一个或几个行动目标。例如人类足迹(I3)与行动目标 4 要求的减少人类对受威胁物种的干扰行为、行动目标 7 要求的减少污染以及行动目标 2 和 3 要求的生态系统恢复和保护都有直接关系,人类足迹少的区域,污染少,生态系统干扰弱,对生态系统的恢复和保护更有益;自然生态系统占比(I5)、景观破碎度(I10)和聚集度指数(I11)与行动目标 1、2 和 3 都存在强相关性,这是因为自然生态系统占比越大、景观破碎度越低、聚集度指数越高代表具有高度生物多样性的地区越多、生态系统完整性和连通性越强,这与行动目标的要求一致;NPP、LAI、FVC 和 AGB 这四个评估指标(I6–I9)能够表征生态系统的部分功能和服务,与行动目标 11 当中的“恢复、维持和增进自然对人类的贡献”要求一致;生物多样性响应评估指标(I12、I13、I14、I15 和 I16)则能在一定程度上反映行动目标 14—19。即本文拟定的评估指标体系和《昆-蒙框架》行动目标高度契合,能够有效监测评估《昆-蒙框架》生物多样性保护整体成效。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究基于全面性、可行性、推广性的指标筛选原则,结合《昆-蒙框架》行动目标内容构建了 PSR 生物多样性评估指标体系,为评估《昆-蒙框架》整体成效提供了工具。但在构建指标体系的过程中也发现,关于《昆-蒙框架》生物多样性保护整体成效评估研究方面仍存在一些实际问题需要得到进一步解决。

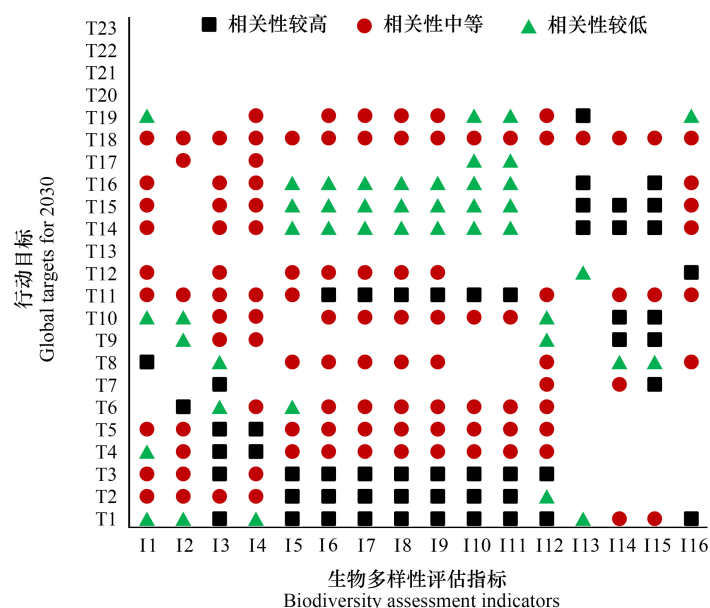


图3 拟定指标与《昆-蒙框架》行动目标相关性热图

Fig.3 Heat map of the correlation between the proposed indicator and KM-GBF target

行动目标参看图2, I1:极端气候事件; I2:外来物种入侵度; I3:人类足迹; I4:红色名录指数; I5:自然生态系统占比; I6:净初级生产力; I7:叶面积指数; I8:植被覆盖; I9:地上生物量; I10:景观破碎度; I11:聚集度指数; I12:保护地面积占比; I13:生物多样性保护资金占GDP比例; I14:FSC认证森林面积; I15:有机农业面积; I16:城市蓝绿空间占比

1) 指标设置方面。本研究的指标体系是依据《昆-蒙框架》行动目标内容以及PSR概念框架设计的,但对于指标之间存在的耦合性却没有合理的解决办法,只能采用权重分配去削弱耦合性带来的影响。此外,研究中仍有部分未考虑指标,如生态系统功能方面仅通过植被指数反映,未考虑立地条件的影响以及生态系统的恢复性功能指标,也未考虑海洋生态系统功能;指标体系中与行动目标20—23相关的指标也较少,相应指标属于难以获取或缺乏相对简便度量的评估方法,故未纳入本次评估体系中,有待后续研究。遥感数据产品在大尺度生物多样性监测评估中有极大优势,但目前能够与《昆-蒙框架》行动目标内容相匹配的还较少,本研究中采取了全球人类足迹数据、植被覆盖度、净初级生产力等,希望未来随着遥感技术的发展,会有更多成熟且精准的生物多样性遥感数据产品能够应用于《昆-蒙框架》生物多样性保护整体成效评估。

2) 权重设置方面。本研究在与专家讨论后认为生物多样性压力、状态、响应对《昆-蒙框架》生物多样性保护整体成效评估同等重要,但这还需要经过实践应用进一步检验,再根据实际需要因地制宜地调整各指标之间的权重,以便更好地使用该指标体系评估《昆-蒙框架》生物多样性保护整体成效,为生物多样性保护政策调整提供科学依据。

4.2 结论

1) 《昆-蒙框架》行动目标内容与PSR框架之间存在很好的对应关系,为基于《昆-蒙框架》的PSR生物多样性评估指标体系构建提供了理论基础。在生物多样性压力方面,《昆-蒙框架》行动目标1、4、5、6、7和8与生物多样性丧失的五大驱动力因素(土地利用变化、气候变化、环境污染、资源过度开发和外来物种入侵)直接相关。在生物多样性状态方面,《昆-蒙框架》更多的关注物种多样性和生态系统多样性状态,强调遗传多样性的分享,如行动目标4和行动目标5要求对受威胁物种和野生物种的可持续保护;《昆-蒙框架》行动目标在生态系统多样性方面主要强调生态系统功能和服务、生态完整性,尤其行动目标2、3和11更是以生态系统功能和服务作为主要核心内容。而对于生物多样性响应,《昆-蒙框架》行动目标内容主要是要求保护和恢复完整性较强的生态系统、促进生物多样性主流化、加大生物多样性资金投入和改进相应政策法规,例如行动目标2要求恢复30%退化生态系统、行动目标3要求保护30%自然生态系统、行动目标14—16从政府、企业

和群众三个层次加强生物多样性主流化;行动目标 17、18、22、23 从政策法规角度呼吁保护生物多样性;行动目标 19、20、21 更是要求从各个途径进行资源调动,充实生物多样性资金投入,协调多方信息资源。

2) 本研究构建了三个层次的评估指标体系,其中一级指标包括生物多样性压力指标、生物多样性状态指标和生物多样性响应指标。具体主题指标涵盖了气候变化、外来物种入侵、土地利用变化、环境污染和资源过度开发等五个压力方面;物种受威胁程度、生态系统类型、功能与结构等四个状态方面;以及保护区比例、资金投入、可持续管理和生物多样性主流化等四个响应方面。此外,具体的评估指标包括极端气候事件、外来物种入侵度、人类足迹、红色名录指数、自然生态系统占比、净初级生产力、叶面积指数、植被覆盖度、地上生物量、景观破碎度、聚集度指数、保护地面积占比、FSC 认证森林面积、有机农业面积和城市蓝/绿空间占比等 16 个评估指标。并分析了指标体系与《昆-蒙框架》行动目标相关性,为实施生物多样性监测提供了全面的依据。

参考文献 (References):

- [1] 马克平. 试论生物多样性的概念. 生物多样性, 1993, (1): 20-22.
- [2] Diaz S, Settele J, Brondizio E S, Ngo H T, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman K A, Butchart S H M, Chan K M A, 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, Razzaque J, Reyers B, Chowdhury R R, Shin Y J, Visseren-Hamakers I, Willis K J, Zayas C N. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 2019, 366(6471): eaax3100.
- [3] 徐靖, 王金洲. 《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》主要内容及其影响. 生物多样性, 2023, 31(4): 3-11.
- [4] Xu H G, Cao Y, Yu D D, Cao M C, He Y X, Gill M, Pereira H M. Ensuring effective implementation of the post-2020 global biodiversity targets. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(4): 411-418.
- [5] 肖能文, 赵志平, 李果, 高晓奇, 吉晟男, 徐靖, 刘冬梅, 李俊生. 中国生物多样性保护优先区域生物多样性调查和评估方法. 生态学报, 2022, 42(7): 2523-2531.
- [6] 彭萱亦, 吴金卓, 栾兆平, 冯亮. 中国典型森林生态系统生物多样性评价综述. 森林工程, 2013, 29(6): 4-10, 43.
- [7] 白春昱. 云南湿地生物多样性评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [8] 付秀梅, 姜琴, 王东亚, 王娜. 青岛海域海洋生物多样性现状与安全度评估研究. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 21-27.
- [9] 李冠稳, 高晓奇, 肖能文, 吉晟男. 基于遥感技术的青海省玛多县生物多样性监测与评估. 环境科学研究, 2021, 34(10): 2419-2427.
- [10] 徐德琳, 邹长新, 林乃峰, 王燕, 徐梦佳, 吴丹, 曹秉帅. 生态保护红线保护成效评估指标体系构建. 生态与农村环境学报, 2020, 36(12): 1562-1568.
- [11] 杨宇明, 王娟, 田昆, 王涇, 王建皓. 云南生物多样性评估方法与测评指标体系研究//中国生物多样性保护与研究进展VI-第六届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集, 2004: 35-47.
- [12] 李果, 吴晓蕾, 罗遵兰, 李俊生. 构建我国生物多样性评价的指标体系. 生物多样性, 2011, 19(5): 497-504.
- [13] 唐德灵. 生物多样性保护成效评估指标体系构建及案例研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2023.
- [14] 曹铭昌, 乐志芳, 雷军成, 徐海根. 全球生物多样性评估方法及研究进展. 生态与农村环境学报, 2013, 29(1): 8-16.
- [15] 王琦, 史娜娜, 韩煜, 肖能文. 中国陆域生物多样性综合评估指标体系构建. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2773-2782.
- [16] 傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. 生态学报, 2017, 37(2): 341-348.
- [17] Johnson C N, Balmford A, Brook B W, Buettel J C, Galetti M, Lei G C, Wilmschurst J M. Biodiversity losses and conservation responses in the Anthropocene. *Science*, 2017, 356(6335): 270-275.
- [18] 任涓, 陶胜利, 胡天宇, 杨海涛, 关宏灿, 苏艳军, 程凯, 陈梦玺, 万华伟, 郭庆华. 中国生物多样性核心监测指标遥感产品体系构建与思考. 生物多样性, 2022, 30(10): 260-275.
- [19] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
- [20] 李飞飞, 郝强, 崔夏, 马金双. 对《重点管理外来入侵物种名录》中植物物种的解析与思考. 植物科学学报, 2024, 42(2): 266-274.
- [21] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 176.
- [22] Butchart S H M, Stattersfield A J, Baillie J, Bennun L A, Stuart S N, Akçakaya H R, Hilton-Taylor C, Mace G M. Using Red List Indices to measure progress towards the 2010 target and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2005, 360(1454): 255-268.
- [23] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-639.
- [24] 赵俊芳, 曹云, 马建勇, 姜月清. 基于遥感和 FORCCHN 的中国森林生态系统 NPP 及生态服务功能评估. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1585-1592.
- [25] 苏文森. 呼伦贝尔草地生态系统服务功能多维度遥感评价[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [26] 李德仁, 王长委, 胡月明, 刘曙光. 遥感技术估算森林生物量的研究进展. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012, 37(6): 631-635.
- [27] 魏雪梅. 多源数据支持下的森林地上生物量估算方法. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(9): 1385-1390.
- [28] 孙灏, 胡佳琪, 崔雅静, 杨楠, 蔡创创. 基于多源遥感数据的生态系统服务功能时空演变趋势分析. 测绘通报, 2021(4): 1-7.
- [29] 卫亚星, 王莉雯, 刘闯. 基于遥感技术的土壤侵蚀研究现状及实例分析. 干旱区地理, 2010, 33(1): 87-92.
- [30] 马姜明, 刘世荣, 史作民, 刘兴良, 缪宁. 退化森林生态系统恢复评价研究综述. 生态学报, 2010, 30(12): 3297-3303.
- [31] 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.
- [32] 刘小丽, 校建民, 杨慧, 马利超, 王艳艳. FSC 森林经营联合认证标准最新修订及其对我国的影响. 世界林业研究, 2021, 34(6): 116-120.
- [33] 陈源泉, 高旺盛. 国内外有机农业发展趋势与战略对策思考. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 1-7.