



DOI: 10.20103/j.stxb.202212213634

王一婷,陈利顶,李纯,李泞吕,易盛媛.面向可持续发展目标的社会-生态系统研究进展——基于文献计量分析.生态学报,2023,43(22): 9564-9575.

# 面向可持续发展目标的社会-生态系统研究进展 ——基于文献计量分析

王一婷<sup>1</sup>,陈利顶<sup>1,2,\*</sup>,李纯<sup>1</sup>,李泞吕<sup>1</sup>,易盛媛<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 云南大学生态与环境学院,昆明 650500

<sup>2</sup> 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

**摘要:**作为探索可持续发展实现路径的关键工具,社会-生态系统理论研究框架的重要性日益凸显,但截至目前,对如何运用社会-生态系统理论研究框架解读各项可持续发展目标(SDGs)还缺乏比较清晰的认识。概述了社会-生态系统的主要研究框架,基于文献计量软件和可视化手段系统分析了面向SDGs的社会-生态系统研究的现状和特点。结果表明:“SDG1-无贫困”、“SDG2-零饥饿”、“SDG8-体面工作和经济增长”、“SDG13-气候行动”和“SDG14-水下生物”是目前研究中关注的热点,涉及了多尺度的农林、淡水、海洋、城乡等典型系统,呈现出跨学科、数据多元化和方法集成化的显著特征;而有关“SDG4-优质教育”、“SDG5-性别平等”、“SDG7-经济适用的清洁能源”和“SDG10-减少不平等”等目标的研究相对较少;SDGs研究热点与国家发展阶段密切相关,基于社会-生态系统视角的多目标关联关系的研究较少,该领域研究主要为可持续发展目标提供了“分析框架、达标评估、趋势预测和管理决策”的支撑服务作用。未来亟需加强以下四个方面的研究:(1)基于社会-生态系统视角的SDGs关联关系研究;(2)构建因地制宜的社会-生态系统研究框架;(3)SDGs导向的社会-生态系统动态反馈机制研究;(4)学科融合和数据平台建设。为探索适宜中国SDGs的实现路径提供科学参考。

**关键词:**社会-生态系统;可持续发展目标;正负反馈;文献计量;交叉学科

日益增长的人类活动驱动着地球表层环境剧烈变化,目前气候变化和生物多样性丧失已经给当地、区域甚至全球的可持续发展带来前所未有的影响<sup>[1]</sup>。2015年9月,193个国家共同签署了《改变我们的未来:2030可持续发展议程》,17项可持续发展目标(Sustainable Development Goals,SDGs)和169项具体目标正式确立,SDGs的制定充分考虑了社会、经济和环境之间的密切联系和系统性<sup>[2]</sup>。作为探索SDGs实现路径的关键工具,社会-生态系统(Social-ecological systems,SES)理论研究框架为克服人类面临的各种挑战提供了跨学科、跨尺度的综合视角<sup>[3]</sup>。

SES的起源可以追溯到20世纪70年代。美国生态学家首次提出了“人类社会-生态系统”<sup>[4]</sup>,中国马世俊等<sup>[5]</sup>于1984年提出了“社会-经济-自然复合生态系统”概念框架,随后吴传钧<sup>[6]</sup>提出了“人地关系地域系统”的地理学研究核心概念;美国Ostrom<sup>[7]</sup>于21世纪初基于公共池塘资源管理提出了“社会-生态系统研究框架”;刘建国<sup>[8]</sup>等提出了“人类与自然耦合系统”概念框架。2012年王如松与欧阳志云<sup>[9]</sup>发展了社会-经济-自然复合生态系统的内涵,强调以“人与水-土-气-生-矿”关系为研究核心。由于全球化和科学技术的飞速发展,人类以前所未有的强度开发资源、改变自然环境<sup>[10]</sup>,不同科学学者已经达成“人与自然是不可分割的整体”

**基金项目:**国家自然科学基金项目(42201290);云南省教育厅科学研究基金项目(2022Y042)

**收稿日期:**2022-12-21; **采用日期:**2023-03-15

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: Liding@ynu.edu.cn

的共识<sup>[11]</sup>。因此,“由社会和生态子系统相互作用形成的非线性、自组织、动态的复杂系统”的 SES 概念的提出为整合环境问题、资源管理、生态危机、环境伦理等研究奠定了基础<sup>[12-13]</sup>。近年来,基于 SES 的研究通过解析系统内部组成和要素的耦合作用,为识别关键短板目标提供了理论支持和实践指导<sup>[14-15]</sup>,进而探索 SDGs 的实践方法和评估指标体系<sup>[16]</sup>,揭示阻碍 SDGs 实现的原因并针对减缓人类活动的负面影响给出建议,如探究人类应对气候变化的关键指标阈值<sup>[17]</sup>、重建海洋生物支持系统的研究<sup>[18]</sup>等,为实现 SDGs 提供了大量有价值的信息。

然而,《2022 年可持续发展目标报告》表明,受新冠疫情影响,全球极端贫困率 20 多年来首次上升、学校教育出现停顿、气候危机正在全球范围内显现,许多 SDGs 进展在世界各地停滞不前甚至出现倒退<sup>[19-20]</sup>。全球化使得各类子系统相互关联、耦合作用越发显著,不确定性和复杂性增强<sup>[21-22]</sup>,距离 SDGs 收官之年已不足十年,为特定区域提供解决短板 SDGs 的方案和策略迫在眉睫。虽然基于 SES 视角探索实现各项 SDGs 实现路径的文献正在持续增加<sup>[23]</sup>,但对如何运用 SES 理论研究框架解读各项 SDGs 还缺乏比较清晰的认识。因此,本文首先回顾了 SES 的主要研究框架,随后通过文献计量和系统性综述,回顾了面向 SDGs 的 SES 研究现状、特点和发展趋势等,总结了 SES 研究对实现 SDGs 的支撑作用。最后提出了研究空缺和未来发展的重点方向,可为中国实现 SDGs 和政策制定提供参考。

## 1 社会-生态系统(SES)的研究框架

依据学科需求,不同领域学者提出了不同的 SES 研究框架<sup>[24]</sup>,SES 受外部环境、内部要素相互作用变化的影响,显现出非线性、路径依赖性等复杂自适应系统的特性。因此,SES 研究既包含了系统组成、结构和功能等特征研究,也将系统内部的相互作用、互馈机制、稳态转换等动态过程识别纳入其中。

SES 概念框架总体上具有四个特征:第一,SES 的组成类别相似,但侧重点不同。大多数研究框架的系统组成均以社会、生态子系统为主,但对社会、生态子系统的关注程度存在差异,如社会-生态系统框架(SESF)更关注社会子系统,强调人为管理在系统中的作用,而将生态系统作为影响整个 SES 的大背景<sup>[25]</sup>。第二,等级结构与关联关系是构建 SES 的基础。各类研究框架通常用箭头或连线建立子系统之间的联系,并在概念图中标注出相互作用的方向和强度<sup>[26]</sup>。表 1 列出了经典 SES 概念框架的组成、结构、尺度、反馈描述等特征,并列出了较为经典的参考文献。

表 1 社会-生态系统概念框架的基本特征对比

Table 1 The comparison of basic characteristics among Social-ecological System Conceptual Frameworks

框架名称 Framework Name	组成 Composition	结构 Structure	尺度 Scale	反馈 Feedback	功能 Function	文献来源 References
社会-生态系统恢复力 Resilience of Social-ecological System, RoSES	社会、生态系统构成的整体	开发、保护、释放、更新	微观	社会、生态系统的恢复力	系统动态分析	[4]
社会-经济-自然复合生态系统 Social-economic-natural complex ecosystem	社会(政策、文化等);经济(产业、供需等);生态(动、植物等)系统	六边形	宏观 微观	社会系统对生态系统	城市/区域规划	[5,9]
社会-生态系统框架 Social-Ecological System Framework, SESF	资源系统、资源单位、管理系统、使用者;社会经济政治;相关生态系统;相互作用;结果	双向连接	宏观 微观	双向反馈	公共资源管理	[7]
人类与自然耦合系统 Coupled Human and Nature System, CHANS	人类系统、自然系统	内部/远程/近邻耦合	宏观 微观	双向反馈	贸易的本地/全球影响	[8]
地球系统分析 Earth Systems Analysis, ESA	生态(生态圈) 社会(人类圈)	双向连接	宏观	社会系统对生态系统	全球环境变化	[27]
可持续性生计框架 Sustainable Livelihoods Framework, SLF	社会(使用者、管理者) 生态(自然系统/资本)	五边形	宏观 微观	生态系统对社会系统	可持续生计、贫困	[28]

续表

框架名称 Framework Name	组成 Composition	结构 Structure	尺度 Scale	反馈 Feedback	功能 Function	文献来源 References
驱动-压力-状态-影响-响应模型 Driver, Pressure, State, Impact, Response, DPSIR	社会(社会、经济变量) 生态(考虑人的影响)	顺序连接	时间 尺度	社会系统对生 态系统	环境综合评估	[29]
生态系统服务评价 Ecosystem Service Assessment, ESA	生态子系统 人类子系统	单向箭头	宏观 微观	社会系统对生 态系统	生态系统评估 管理	[30]
人类-环境系统框架 Human-Environment System Framework, HES	社会(人类系统) 生态(环境)	双向连接	宏观 微观	双向反馈	分析社会生 态系统	[31]
管理和转换框架 Management and Transition Framework, MTF	生态(资源变量) 社会(社会学习)	双向连接	宏观 微观	双向反馈	复杂水资源 治理	[32]
脆弱性框架 Vulnerability Framework, VF	敏感度、暴露度下的人类 与环境	耦合连接	区域 尺度	双向反馈	气候变化下可 持续问题	[33]
基于自然的解决方案 Nature-based Solutions, NbS	生态系统 人类系统	生态过程原理 于经济、社会	宏观 微观	社会系统对生 态系统	生物多样性 保护	[34]

不同框架所关注的关键过程、反馈的界定程度存在差异,量化系统反馈、判断稳态转换和临界点识别一直是 SES 研究的前沿<sup>[35]</sup>。因此,第三个特征是:框架强调系统的非线性变化,即社会、生态子系统之间的正负反馈关系,但是对于反馈的理解和度量程度不同。较为经典的概念是恢复力理论,Holling 将物理学中的“弹性”(Resilience)概念引入生态学研究,提出了生态系统恢复力<sup>[36]</sup>,将其定义为生态系统在面对外来扰动和变化时维持状态不变的过程,认为 SES 经历开发、保护、释放和更新四个阶段的适应性循环,并通过系统的潜力、连通性和恢复力三个变量刻画各个阶段<sup>[37]</sup>。在其他研究框架中,并未深入剖析这一动态过程的特征。第四,关注外部干扰对系统整体的影响,强调宏观-微观相结合的研究。当这种适应性循环在不同等级尺度的系统中发生,产生跨尺度的联结和影响,就形成了扰沌现象<sup>[38]</sup>。除此之外,脆弱性框架(VS)强调了小尺度的干扰和胁迫对区域产生的影响,明确描述了因此产生的反馈<sup>[33]</sup>;人类与自然耦合系统(CHANS)研究框架集成了内部耦合、远程耦合和近邻耦合,如被用于研究国家政策的本地和跨区域影响<sup>[39]</sup>。

第四,不同研究框架的应用场景和功能各有侧重。各研究框架是在特定生态环境问题、社会问题和全球化背景下所产生的,社会学、经济学、生态学等学科差异导致框架的功能多样性。比如,SESF 在渔业、水和森林有关的资源治理方面的适应性较好;生态系统服务评价(ESA)更加关注生态系统给人类带来的惠宜,侧重于生态系统评估和管理方面的应用;基于自然的解决方案(NbS)是保护、可持续管理和恢复自然生态系统和改良生态系统的行动,以有效和适应性地应对社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性利益<sup>[34]</sup>,在气候变化下的生物多样性保护方面发挥了显著作用。

## 2 面向 SDGs 的社会-生态系统研究进展

为了解自《2030 可持续发展议程》通过以来,基于 SES 视角的 SDGs 研究的文献发表特征。首先,利用检索式“TS = (social-ecological system OR socio-ecological system)” AND “TS = (sustainable development goals OR SDG)”和“SU = ‘社会生态系统’ AND ‘可持续发展目标’”,分别在 Web of Science 核心合集数据库、CNKI 期刊数据库进行检索,共检索到论文 230 篇(检索时间为 2022 年 5 月 7 日,其中英文文献 219 篇,中文文献 11 篇)。随后,利用 R 语言中的 Bibliometrix 包<sup>[40]</sup>对 2015—2021 年期间的 168 篇英文文献进行发文趋势及来源、关键词词云以及主题图分析<sup>[41]</sup>,得到以下分析结果。

### 2.1 发文趋势及来源

2015—2021 年期间,虽然基于 SES 视角研究 SDGs 的英文文献数量仅有 168 篇,但总被引频次达到 3194 次,平均每篇文献被引 19 次;发文量逐年上升,年均增长率 39.9%,并在 2020 年后出现快速增长(图 1)。研

究主题主要涉及到环境科学与生态学、生物多样性保护、地理学、农学、公共管理等学科领域,文献主要来源于 *Sustainability, Ecology and Society* 和 *Sustainability Science* 等杂志。文章通讯作者国家主要集中在北美、欧洲、澳大利亚和中国(图 1)。从国际合作来看,来自阿根廷、葡萄牙、巴西和印度尼西亚的研究机构与其他国家机构合作发表论文的比例较高,表明这些地区的可持续发展问题受到了其他国家学者的关注。根据作者所在机构的识别,发现较为突出的代表性研究机构有斯德哥尔摩大学(瑞典,35 篇)、英属哥伦比亚大学(加拿大,20 篇)、伯尔尼大学(瑞士,17 篇)、吕纳堡大学(德国,16 篇)、斯泰伦博什大学(南非共和国,13 篇)和昆士兰大学(澳大利亚,12 篇)。

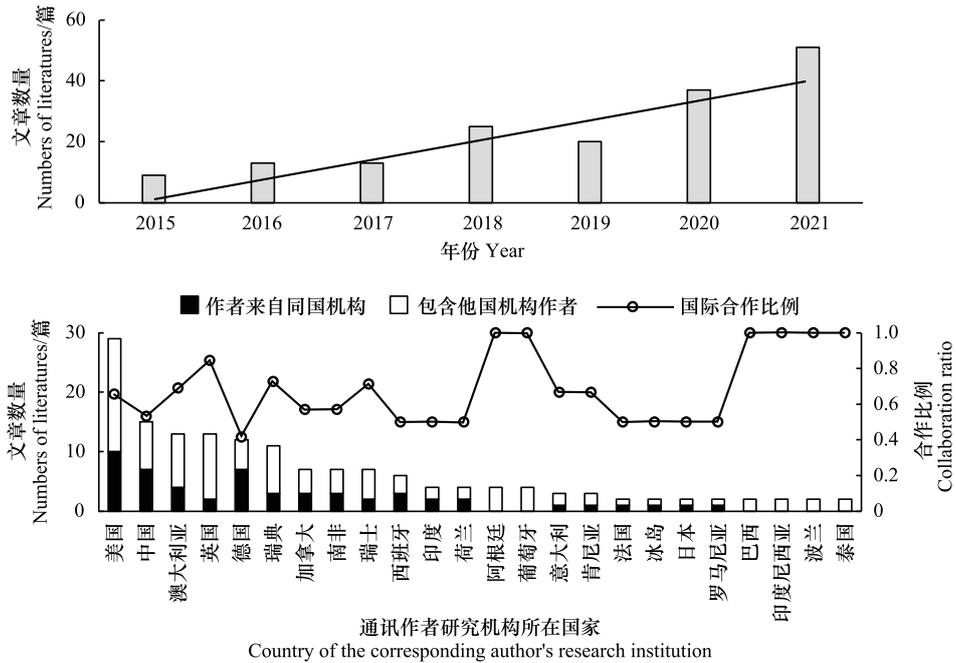


图 1 发文趋势与及国际合作情况

Fig.1 Trend of publications and international collaborations

### 2.2 研究现状与热点主题

关键词词云分析(图 2)提取了排名前 50 的关键词(共 672 个关键词),45 个关键词在 168 篇文献中使用了 5 次以上,其中高频关键词包括:“climate-change”、“framework”、“management”、“conservation”、“governance”、“biodiversity”和“resilience”,出现的概率分别为 17.9%、17.9%、17.3%、13.2%、12.5%、11.9%和 11.9%。关键词词频反映了气候变化和生物多样性丧失的紧迫性,以及对 SES 恢复力和 SES 管理的关注比较集中。

此外,根据发展度(Development degree)和集中性(Centrality)趋势将研究主题划分为:“主流主题”、“利基主题”、“边缘主题”和“基础主题”(图 3)。“主流主题”指发展良好且重要的主题,主要包括可持续发展、适应性研究、适应性管理;“利基主题”指发展较好,在个别领域相对重要的主题,主要包括土地利用变化、碳等主题;“边缘主题”指正在兴起(或者即将消失)的主题,



图 2 面向可持续发展目标的社会-生态系统研究关键词词云

Fig.2 Key word cloud of social-ecosystem researches for SDGs

如涌现的城市 SES 研究、生物多样性保护探索性研究;“基础主题”指的是十分重要、但发展缓慢的主题,其研究亟待进一步加强,如脆弱性、适应性、概念框架等基础理论主题。

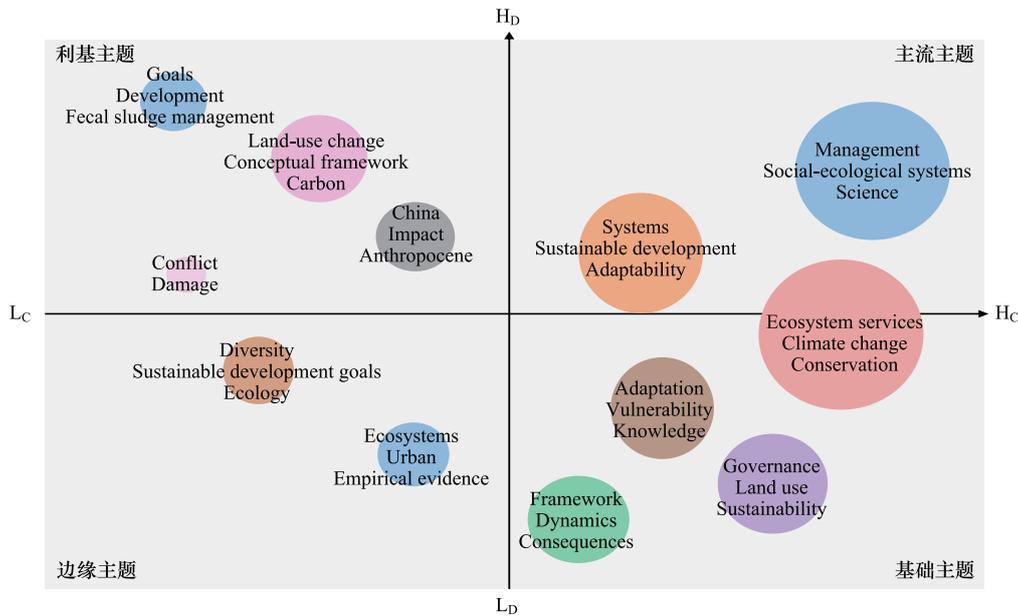


图3 面向可持续发展目标的社会-生态系统英文文献主题图

Fig.3 Topic map of social-ecological system literatures for SDGs in English

$H_D/L_D$ : High/Low development degree, 高、低发展度;  $H_C/L_C$ : High/Low centrality, 高、低集中度

### 2.3 目前研究特点

为了准确剖析该主题研究下的具体特点,通过阅读中英文文献全文并根据以下标准:“①是否基于 SES 的研究视角?”、“②是否将 SES 理论或方法直接指向 SDGs?”对检索到的文献进行筛选,同时提取研究地区、研究目的、SES 类型、SDGs 类型、数据类型以及研究方法等信息,共筛选出 85 篇符合标准的文献,并依据文献信息进行系统性综述和数据可视化分析,结果如下。

#### 2.3.1 不同 SDGs 受关注程度存在差异,相互之间的关联作用研究较弱

如图 4 所示,目前基于 SES 的研究热点集中在“SDG2-零饥饿”、“SDG13-气候变化”、“SDG1-无贫困”以及“SDG14-水下生物”上;在 85 篇文献中的占比分别为 55.3%、52.9%、51.8%和 48.2%。其次是“SDG8-体面工作和经济增长”、“SDG3-良好健康与福祉”、“SDG15-陆地生物”和“SDG6-清洁饮用水和卫生设施”,分别在 45.9%、43.5%、43.5%和 42.4%的文献中有所涉及。较多研究对“SDG11-可持续的城市和社区”、“SDG5-性别平等”、“SDG9-产业、创新和基础设施”和“SDG12-负责任的消费和生产”进行了关注,占比分别为 38.8%、37.6%、37.6%和 37.6%。而受关注较少的目标为“SDG4-优质教育”、“SDG7-经济适用的清洁能源”以及“SDG10-减少不公平”、“SDG16-和平、正义和强大机构”和“SDG17-促进目标实现的伙伴关系”,仅有 30.6%、29.4%、28.2%、25.9%和 21.2%的文献分别对其进行了报道。此外,85 篇文献中,同一篇文章同时关注的目标数量之间存在较大差异。同时关注 1 项、2 项、3 项和 17 项目标的文献较多,分别占比 27.05% (23 篇)、12.94% (11 篇)、10.59% (9 篇)以及 20% (17 篇);其中,SDG1、SDG2、SDG15 受到研究者同时关注的比例很高。同时关注多项 SDGs 的研究多集中于全球或区域尺度,而当地尺度的基于 SES 视角的多项 SDGs 关系研究较为缺乏。

#### 2.3.2 侧重于与人类福祉有关的生态系统,但因国家和地区而异

“问题导向型”是 SES 研究的主要特征,也是提升特定地区 SDGs 实现能力的关键突破口。在 85 篇文献中,城市/乡村 (22.3%)、全球 (20%)、农业 (17.6%) 和海洋 (16.4%) 系统成为研究的主要对象,重点关注农村



图4 面向可持续发展目标的社会-生态系统研究中各目标受关注程度

Fig.4 The degree of attention to each goal in social-ecological researches for SDGs

饮用水供给<sup>[42]</sup>、生态基础设施建设<sup>[43]</sup>、畜牧业的可持续性发展<sup>[44]</sup>和海洋保护与管理<sup>[45]</sup>,均与人类福祉密切相关。根据联合国2020年人类发展报告,人类发展指数(Human Development Index, HDI)将全球国家或地区划分为四种类型,分别为极高、高、中等和低HDI国家或地区<sup>[46]</sup>。在HDI极高的国家,如澳大利亚、瑞典、冰岛等,研究者多聚焦于气候变化下的渔业资源和海洋生物多样性保护,具体目标为SDG14、SDG7、SDG12和SDG15;在高HDI国家如中国、伊朗、南非和秘鲁等,多以基础设施建设、水资源可持续利用、山区农业发展为主,关注的目标主要有SDG6、SDG13和SDG11;而在中等或低HDI的国家/地区,如孟加拉国、印度、乌干达和撒哈拉以南非洲地区等,研究者主要关注区域生计问题、粮食安全和性别平等问题,对应的目标为SDG2、SDG3以及SDG5。

### 2.3.3 研究数据和研究方法多样化、交叉性

用于SES研究的数据主要包括4类,分别为实证数据、统计数据、资料数据和空间数据。其中实证数据包括问卷调查数据和实地采样数据;统计数据则涵盖了全球和国家公开发布的社会经济统计数据,如国家、部门统计数据等;资料数据包括文献数据、历史记载数据和政府评估报告;空间数据则涵盖各种类型的影像数据、资源空间分布数据以及互联网大数据。调查或者实证数据多用于了解农户尺度的生计信息、探究各子系统中具体指标的数量和大小等,以及利益相关者对决策和管理的态度和意见;统计数据、评估报告和空间数据通常用于目标的横向或纵向比较与评估;资料数据被研究者用于提出针对性的科学问题的系统动态变化研究。此外,研究方法主要包括社会生态系统框架、恢复力/韧性理论、生态系统服务/生态系统服务流、非线性动力学、耦合人与自然系统、适应性循环等,在具体运用过程中各种方法常交叉使用。其中,SES分析框架、恢复力理论、生态系统服务评估以及适应性管理等方法在研究中被广泛使用<sup>[47-50]</sup>。

### 2.3.4 社会-生态系统研究对SDGs的支撑作用

通过深入阅读85篇文献,将SES研究对SDGs的支撑作用归纳为:分析框架构建、目标达标评估、趋势预

测和决策服务(图 5)。其中,37 篇(43.5%)基于 SES 针对不同 SGD 和问题提出了更加精确的分析框架,即充分运用定量分析理解系统的组成、相互作用方式。针对目标评估的研究占 23.5%(20 篇),如为了避免因实现 SDG1 和 SDG2 子目标而影响海洋保护,研究人员针对以渔业为生的地区,重点构建了包含社会、经济、生态的综合评估指标体系<sup>[51]</sup>。基于 SES 理论框架进行趋势预测的研究有 10 篇(10 篇,11.8%),如研究人员基于情景分析预测了不同气候变化背景下水资源供给<sup>[52]</sup>、生物多样性保护<sup>[53]</sup>和山地农业的可持续性<sup>[54]</sup>。基于 SES 理论为实现 SDGs 提供决策服务的文献有 18 篇(21.2%),如通过公众参与促进科学家、决策者的知识交流,将不确定性纳入决策过程,为实现水资源可持续利用识别出关键指标清单<sup>[55]</sup>;再如通过融合社会和生物物理因素制定科学有效的管理策略<sup>[56]</sup>。

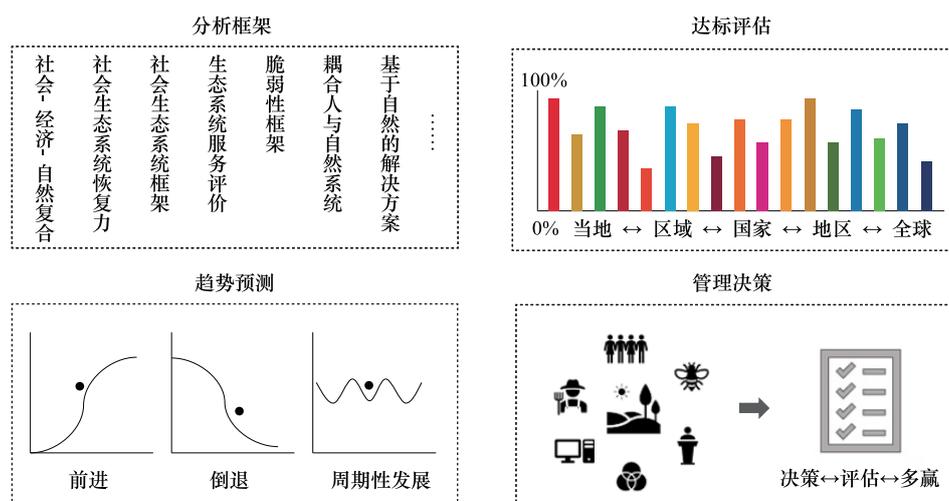


图 5 社会-生态系统研究对可持续发展目标的支撑作用

Fig.5 Underpinning function of social-ecological system researches for SDGs

### 3 研究存在的不足和空缺

#### 3.1 各项 SDGs 受关注的程度存在较大差异

依据词云和系统综述结果,关乎人类生存与发展的基础性目标(SDG1-无贫穷、SDG2-零饥饿)、全球变化相关的目标(SDG13-气候变化、SDG14-水下生物等)一直是研究者关注的核心,并受到研究者所在国家、环境经济和社会背景的影响<sup>[57]</sup>。气候变化、生物多样性保护尤其受到高 HDI 国家或地区学者的关注,反映了 SDG13、SDG14 和 SDG15 等目标的研究很大程度上依赖于社会经济发展水平。再如对“SDG10-减少不公平”、“SDG7-经济适用的清洁能源”和“SDG5-性别平等”目标,中国和许多中等 HDI 国家一样存在较大空缺,而在高 HDI 国家或区域受到高度关注,如德国学者高度关注生物能源供应链的可持续性<sup>[58]</sup>、意大利学者重点探讨了海洋渔业发展中的性别平等问题等<sup>[59]</sup>。

此外,SDGs 受关注的程度也受限于数据的可获得性。常被关注的 SDGs 多通过易获得、代表性好的社会、经济、人口统计数据进行量化而实现评估,一些地区因缺少资金而无法开展大规模调查,由此导致相关 SDGs 涉及到的数据难以全面覆盖,从而影响到对 SDGs 的全面研究。为了消除这一困境,相关学者提出了通过卫星影像来识别社会-生态指标的替代方案,准确率可达到 60%以上<sup>[60]</sup>。在今后研究中,可以参考这些方式弥补数据方面的空缺。中国科学院地球大数据科学工程(CAS Earth)、通量观测生态大数据平台<sup>[61]</sup>为我国乃至全球的 SDGs 研究提供了关键数据平台,将极大推动我国在实现 SDGs 方面的研究。

#### 3.2 缺乏 SDGs 间关联机制的系统性研究

SDGs 及其 169 项具体目标存在固有的内在联系<sup>[62]</sup>,但不同背景下 SDGs 的关联作用存在差异。正如没

有一种通用的法则能够适用于所有复杂系统的治理<sup>[7]</sup>一样,实现 SDGs 很大程度上取决于对特定系统演化过程的解析和相互作用的精准把握<sup>[63]</sup>。利用统一的标准和评价体系将会因数据限制或 SES 的差异错判 SDGs 的发展状态;目前,许多研究只分析了单一 SDG 的社会-生态背景及相关指标,同时关注 17 项 SDGs 及其指标相互作用的研究也仅限定在全球尺度<sup>[64]</sup>,SDGs 之间特殊的权衡、协同关系在实际研究过程中常常被忽略。中国学者利用安全公正空间框架分别对徐州<sup>[65]</sup>、太湖流域进行了安全阈值的评估<sup>[66]</sup>,突出了目标的协同作用。因此,在今后的国土空间规划、生态保护修复以及城乡人居环境更新等研究中,亟需加强与“SDG11-可持续城市与社区”相关的其他目标与子目标间的联系<sup>[67]</sup>。在 SDGs 关联关系研究上,以淡水渔业管理为例,考虑到淡水渔业 SES 自然生物量恢复目标而忽略了生产、生存和文化相关目标的可持续性,有研究者据此提出了综合考虑人类、渔业和环境相互作用的评估方法<sup>[68]</sup>,提出了流域尺度跨区管理、可持续性治理的基本框架,为其他地区的渔业管理提供了借鉴。

### 3.3 SDGs 导向的 SES 动态研究较为薄弱

以 SDGs 为导向的 SES 研究目的更加明确,有助于制定有针对性的行动和实施方案<sup>[69]</sup>。包括中国在内的许多国家,已经针对气候变化、生物多样性丧失等问题做了国家层面的战略规划<sup>[70-71]</sup>,但识别 SES 子系统之间的动态反馈机制受制于各种因素,由此导致社会、生态变量以及社会生态变量之间存在着二元线性、多元线性或者非线性的复杂关系,目前受到较少关注。研究表明,提高公众参与程度、合作多样性以及集体行动有效性是增强 SES 可持续性的关键<sup>[72-73]</sup>,对于 SDG13、SDG14、SDG15 相关的系统类型,需要积累丰富的生物物理过程经验,制定有针对性的分析框架,才能够更加清晰表达目标背后的诉求<sup>[74]</sup>。恢复力是实现 SES 可持续的基本特征,是了解系统动态的基础<sup>[75]</sup>,深度学习等具备高维非线性复杂特征自动提取的新手段,正与 SES 非线性动态关系的识别的需求相吻合<sup>[76]</sup>,通过利用关键已知变量数据进行探索生产高精度的替代数据将会是未来的探究方向。此外,在南半球的许多地方,解决可持续发展和公平问题的事项经常以恢复力框架<sup>[77]</sup>、侧重社会经济指标的可持续生计框架等作为指导方针,因此将目标本地化、降尺度化以及针对不同问题定制特定的方案还面临着巨大挑战,基于 SES 视角进行 SDGs 的动态反馈还有待加强。

## 4 结论与展望

社会-生态系统理论框架为可持续发展提供了强大的理论支撑和综合全面的方法论体系。复杂系统的剧烈变化、对可持续发展的殷切期待一定会使系统动态分析成为未来研究热点,也给 SES 的研究带来了新的挑战,亟需加强以下几个方面的研究:

(1) 基于 SES 视角的目标关联关系研究,尤其是短板目标。在特定问题背景、具体目标导向下,利用 SES 分析框架识别子目标和具体评估指标之间的直接和间接联系,能避免做出不利决策以确保系统的可持续性。需要加强对多项 SDGs 的关联关系分析,通过细化指标体系、关系网络构建、情景模拟分析等手段充分识别短板目标及其具体影响要素<sup>[78]</sup>,随后通过适应性管理来增强协同效应、降低权衡作用,进而识别 SES 系统中容易忽略但易受威胁的要素和目标,以免过度强调简单易行的目标而威胁到其他目标的实现。

(2) 构建因地制宜的 SES 分析框架。需要加强与利益相关者进行充分沟通的 SES 研究,一方面有助于理解特定 SES 的恢复力机制;另一方面构建更紧密、更复杂的系统组成要素的联系来克服理论与现实的差距<sup>[79]</sup>;这就需要在社区尺度构建 SDGs 导向的 SES 研究框架,即通过自上而下,表征 SDGs 的差距以及 SDGs 如何分配到具体执行单元上;自下而上,如何把社会调查数据真实反映到政策制定上,从而推动正向的 SES 适应性管理和可持续发展。从学科发展角度,需要社会科学和自然科学领域的交叉融合,充分考虑社会经济发展条件、资源禀赋,构建适宜不同地区的 SES 综合分析框架。

(3) 目标导向的 SES 动态反馈机制研究。各项 SDGs 所对应的 SES 相互影响并存在动态反馈,同一目标、不同尺度的非线性动态影响和约束机制千差万别,因此,亟需 SES 理论在 SDGs 监测和评估指标上的应用和创新,梳理目标驱动下的 SES 的相互作用和反馈模型,来预测多种环境变化、政策变化和人类活动的潜在影

响;并加强理论、模型和数据之间的联系,充分整合各学科研究方法和资源,通过对 SES 动态变化过程的深入理解来推进 SDGs 的实现。

(4)加强学科融合和数据平台建设。生态系统的监测和社会系统的数据记录对于深刻理解复杂系统至关重要。随着调查方法、研究手段的丰富,可利用的数据时间跨度和空间尺度的不断拓展,监测记录、统计调查数据、影像数据、历史地理数据和古气候、生态、生物记录数据使得有效的长时间序列和跨尺度动态 SES 研究成为可能,如何整合、利用和管理这些数据也是未来需要迫切关注的课题。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] Kastner T, Matej S, Forrest M, Gingrich S, Haberl H, Hickler T, Krausmann F, Lasslop G, Niedertscheider M, Plutzer C, Schwarzmüller F, Steinkamp J, Erb K H. Land use intensification increasingly drives the spatiotemporal patterns of the global human appropriation of net primary production in the last century. *Global Change Biology*, 2022, 28(1): 307-322.
- [ 2 ] Selomane O, Reyers B, Biggs R, Tallis H, Polasky S. Towards integrated social-ecological sustainability indicators: exploring the contribution and gaps in existing global data. *Ecological Economics*, 2015, 118: 140-146.
- [ 3 ] Clark W C, Harley A G. Sustainability science: toward a synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 2020, 45: 331-386.
- [ 4 ] Ratzlaff E. Applications of Engineering Systems Analysis to the Human Social-Ecological System, 1970.
- [ 5 ] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [ 6 ] 吴传钧. 论地理学的研究核心——人地关系地域系统. *经济地理*, 1991, 11(3): 1-6.
- [ 7 ] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [ 8 ] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, Alberti M, Folke C, Moran E, Pell A N, Deadman P, Kratz T, Lubchenco J, Ostrom E, Ouyang Z Y, Provencher W, Redman C L, Schneider S H, Taylor W W. Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 2007, 317(5844): 1513-1516.
- [ 9 ] 王如松,欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. *中国科学院院刊*, 2012, 27(3): 337-345, 403.
- [ 10 ] Steffen W, Broadgate W, Deutsch L, Gaffney O, Ludwig C. The trajectory of the anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2015, 2(1): 81-98.
- [ 11 ] Reyers B, Folke C, Moore M L, Biggs R, Galaz V. Social-ecological systems insights for navigating the dynamics of the anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 2018, 43: 267-289.
- [ 12 ] Preiser R, Biggs R, De Vos A, Folke C. Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches. *Ecology and Society*, 2018, 23(4): art46.
- [ 13 ] 张萌萌,王帅,傅伯杰,刘焱序,武旭同. 社会-生态网络方法研究进展. *生态学报*, 2021, 41(21): 8309-8319.
- [ 14 ] 周晓芳. 社会-生态系统恢复力的测量方法综述. *生态学报*, 2017, 37(12): 4278-4288.
- [ 15 ] Pulver S, Ulibarri N, Sobocinski K L, Alexander S M, Johnson M L, McCord P F, Dell'Angelo J. Frontiers in socio-environmental research: components, connections, scale, and context. *Ecology and Society*, 2018, 23(3): art23.
- [ 16 ] Xu Z C, Chau S N, Chen X Z, Zhang J, Li Y J, Dietz T, Wang J Y, Winkler J A, Fan F, Huang B R, Li S X, Wu S H, Herzberger A, Tang Y, Hong D Q, Li Y K, Liu J G. Assessing progress towards sustainable development over space and time. *Nature*, 2020, 577(7788): 74-78.
- [ 17 ] Hoegh-Guldberg O, Jacob D, Taylor M, Guillén Bolaños T, Bindi M, Brown S, Camilloni I A, Diedhiou A, Djalante R, Ebi K, Engelbrecht F, Guiot J, Hijioka Y, Mehrotra S, Hope C W, Payne A J, Pörtner H O, Seneviratne S I, Thomas A, Warren R, Zhou G. The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw6974.
- [ 18 ] Duarte C M, Agusti S, Barbier E, Britten G L, Castilla J C, Gattuso J P, Fulweiler R W, Hughes T P, Knowlton N, Lovelock C E, Lotze H K, Predragovic M, Poloczanska E, Roberts C, Worm B. Rebuilding marine life. *Nature*, 2020, 580(7801): 39-51.
- [ 19 ] Killion A K, Ramirez J M, Carter N H. Human adaptation strategies are key to cobenefits in human-wildlife systems. *Conservation Letters*, 2021, 14(2): e12769.
- [ 20 ] Sachs J. from crisis to sustainable development: the SDGs as roadmap to 2030 and beyond. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [ 21 ] Tromboni F, Liu J G, Ziaco E, Breshears D D, Thompson K L, Dodds W K, Dahlin K M, LaRue E A, Thorp J H, Viña A, Laguë M M, Maasri A, Yang H B, Chandra S, Fei S L. Macrosystems as metacoupled human and natural systems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2021, 19(1): 20-29.

- [22] Wu X T, Fu B J, Wang S, Song S, Li Y J, Xu Z C, Wei Y P, Liu J G. Decoupling of SDGs followed by re-coupling as sustainable development progresses. *Nature Sustainability*, 2022, 5(5): 452-459.
- [23] Sachs J D, Schmidt-Traub G, Mazzucato M, Messner D, Nakicenovic N, Rockström J. Six transformations to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 2019, 2(9): 805-814.
- [24] Binder C R, Hinkel J, Bots P W G, Pahl-Wostl C. Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2013, 18(4): art26.
- [25] Colding J, Barthel S. Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 2019, 24: art2.
- [26] Partelow S, Schlüter A, von Wehrden H, Jänig M, Senff P. A sustainability agenda for tropical marine science. *Conservation Letters*, 2018, 11(1): e12351.
- [27] Schellnhuber H, Crutzen P, Clark W C, Hunt J. Earth system analysis for sustainability. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 2005, 47: 10-25.
- [28] Scoones I. Sustainable rural livelihoods: a framework for analysis. IDS Working Paper No, 1998.
- [29] Eurostat. Towards Environmental Pressure Indicators for the EU. 1999.
- [30] 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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [31] Scholz R W, Binder C R. The Paradigm of Human-Environment Systems, 2003.
- [32] Pahl-Wostl C, Holtz G, Kastens B, Knieper C. Analyzing complex water governance regimes; the Management and Transition Framework. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(7): 571-581.
- [33] Turner B L 2nd, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [34] Albert C, Spangenberg J H, Schröter B. Nature-based solutions: criteria. *Nature*, 2017, 543(7645): 315.
- [35] Barnes M L, Wang P, Cinner J E, Graham N A J, Guerrero A M, Jasny L, Lau J, Sutcliffe S R, Zamborain-Mason J. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nature Climate Change*, 2020, 10(9): 823-828.
- [36] Holling C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 2001, 4(5): 390-405.
- [37] Walker B, Holling C S, Carpenter S R, Kinzig A P. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004, 9(2): art5.
- [38] Ostrom E. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems. *Ecological Economics*, 2004, 49(4): 488-491.
- [39] Downing A S, Wong G Y, Dyer M, Aguiar A P, Selomane O, Jiménez Aceituno A. When the whole is less than the sum of all parts-Tracking global-level impacts of national sustainability initiatives. *Global Environmental Change*, 2021, 69: 102306.
- [40] Aria M, Cuccurullo C. bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 2017, 11(4): 959-975.
- [41] Blondel V D, Guillaume J L, Lambiotte R, Lefebvre E. Fast unfolding of communities in large networks. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2008, 2008(10): P10008.
- [42] Foster T, Hope R. A multi-decadal and social-ecological systems analysis of community waterpoint payment behaviours in rural Kenya. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47: 85-96.
- [43] Cumming T L, Shackleton R T, Förster J, Dini J, Khan A, Gumula M, Kubiszewski I. Achieving the national development agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs) through investment in ecological infrastructure: a case study of South Africa. *Ecosystem Services*, 2017, 27: 253-260.
- [44] van Noordwijk M. Agroforestry-based ecosystem services: reconciling values of humans and nature in sustainable development. *Land*, 2021, 10(7): 699.
- [45] Loos J. Reconciling conservation and development in protected areas of the Global South. *Basic and Applied Ecology*, 2021, 54: 108-118.
- [46] Programme U N D. Human Development Report 2021/2022: Uncertain Times, Unsettled Lives: Shaping our Future in a Transforming World. New York. 2022.
- [47] Mastrúngelo M E, Pérez-Harguindeguy N, Enrico L, Bennett E, Lavorel S, Cumming G S, Abeygunawardane D, Amarilla L D, Burkhard B, Egoh B N, Frishkoff L, Galetto L, Huber S, Karp D S, Ke A, Kowaljow E, Kronenburg-García A, Locatelli B, Martín-López B, Meyfroidt P, Mwampamba T H, Nel J, Nicholas K A, Nicholson C, Oteros-Rozas E, Rahlao S J, Raudsepp-Hearne C, Ricketts T, Shrestha U B, Torres C,

- Winkler K J, Zoeller K. Key knowledge gaps to achieve global sustainability goals. *Nature Sustainability*, 2019, 2(12): 1115-1121.
- [48] Orchard S, Glover D, Karki S T, Ayele S, Sen D, Rathod R, Rowhani P. Exploring synergies and trade-offs among the sustainable development goals: collective action and adaptive capacity in marginal mountainous areas of India. *Sustainability Science*, 2019, 15: 1665-1681.
- [49] Schaafsma M, Eigenbrod F, Gasparatos A, Gross-Camp N, Hutton C, Nunan F, Schreckenberg K, Turner K. Trade-off decisions in ecosystem management for poverty alleviation. *Ecological Economics*, 2021, 187: 107103.
- [50] Li Q R, Samimi C. Sub-Saharan Africa's international migration constrains its sustainable development under climate change. *Sustainability Science*, 2022, 17(5): 1873-1897.
- [51] Nash K L, Blythe J L, Cvitanovic C, Fulton E A, Halpern B S, Milner-Gulland E J, Addison P F E, Pecl G T, Watson R A, Blanchard J L. To achieve a sustainable blue future, progress assessments must include interdependencies between the sustainable development goals. *One Earth*, 2020, 2(2): 161-173.
- [52] Perera K T N, Wijayaratna T M N, Jayatillake H M, Manatunge J M A, Priyadarshana T. Framework for the sustainable development of village tanks in cascades as an adaptation to climate change and for improved water security, Sri Lanka. *Water Policy*, 2021, 23(3): 537-555.
- [53] Harrison P A, Harmáčková Z V, Aloe Karabulut A, Brotons L, Cantele M, Claudet J, Dunford R W, Guisan A, Holman I P, Jacobs S, Kok K, Lobanova A, Morán-Ordóñez A, Pedde S, Rixen C, Santos-Martín F, Schlaepfer M A, Solidoro C, Sonrel A, Hauck J. Synthesizing plausible futures for biodiversity and ecosystem services in Europe and Central Asia using scenario archetypes. *Ecology and Society*, 2019, 24(2): art27.
- [54] Bola A D, Ralph C V, Emile B. Potential for sustainable mountain farming: challenges and prospects for sustainable smallholder farming in the maloti-Drakensberg mountains. *Mountain Research and Development*, 2020, 40(1): A1-A11.
- [55] Varady R G, Zuniga-Teran A A, Garfin G M, Martín F, Vicua S. Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 21: 70-77.
- [56] Dallimer M, Stringer L C. Informing investments in land degradation neutrality efforts: a triage approach to decision making. *Environmental Science & Policy*, 2018, 89: 198-205.
- [57] Oteros-Rozas E, Ruiz-Almeida A, Aguado M, González J A, Rivera-Ferre M G. A social-ecological analysis of the global agrifood system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(52): 26465-26473.
- [58] Pehlken A, Wulf K, Grecksch K, Klenke T, Tsydenova N. More sustainable bioenergy by making use of regional alternative biomass? *Sustainability*, 2020, 12(19): 7849.
- [59] Gissi E, Portman M E, Hornidge A K. Un-gendering the ocean: why women matter in ocean governance for sustainability. *Marine Policy*, 2018, 94: 215-219.
- [60] Watmough G R, Marcinko C L J, Sullivan C, Tschirhart K, Mutuo P K, Palm C A, Svenning J C. Socioecologically informed use of remote sensing data to predict rural household poverty. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(4): 1213-1218.
- [61] Yu G R, Chen Z, Zhang L M, Peng C H, Chen J M, Piao S L, Zhang Y J, Niu S L, Wang Q F, Luo Y Q, Philippe C, Dennis B D. Recognizing the scientific mission of flux tower observation networks—lay the solid scientific data foundation for solving ecological issues related to global change. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(2): 115-120.
- [62] Norström A V, Dannenberg A, McCarney G, Milkoreit M, Diekert F, Engström G, Fishman R, Gars J, Kyriakopoulou E, Manoussi V, Meng K, Metian M, Sanctuary M, Schlüter M, Schoon M, Schultz L, Sjöstedt M. Three necessary conditions for establishing effective Sustainable Development Goals in the Anthropocene. *Ecology and Society*, 2014, 19(3): art8.
- [63] 范冬萍. 社会生态系统的存在、演化与可持续发展. *科学技术与辩证法*, 1996, 13(5): 11-14, 18.
- [64] Pham-Truffert M, Metz F, Fischer M, Rueff H, Messerli P. Interactions among Sustainable Development Goals: knowledge for identifying multipliers and virtuous cycles. *Sustainable Development*, 2020, 28(5): 1236-1250.
- [65] 黎心泽, 陈诗越, 强柳燕. 基于“美丽徐州”建设的社会生态系统安全公正空间. *江苏师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 39(3): 14-19.
- [66] 苏彦瑜, 董旭辉. “安全公正空间”框架在区域环境管理中的应用——以太白湖流域为例. *地球环境学报*, 2020, 11(5): 562-573.
- [67] 王志芳, 简钰清, 黄志彬, 付宏鹏. 基于自然解决方案的研究视角综述及中国应用启示. *风景园林*, 2022, 29(6): 12-19.
- [68] Nguyen M, Vaikuntanathan S. Design principles for nonequilibrium self-assembly. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(50): 14231-14236.
- [69] Chan K M A, Boyd D R, Gould R K, Jetzkowitz J, Liu J G, Muraca B, Naidoo R, Olmsted P, Satterfield T, Selomane O, Singh G G, Sumaila R, Ngo H T, Boedhihartono A K, Agard J, de Aguiar A P D, Armenteras D, Balint L, Barrington-Leigh C, Cheung W W L, Díaz S, Driscoll J,

- Esler K, Eyster H, Gregr E J, Hashimoto S, Hernández Pedraza G C, Hickler T, Kok M, Lazarova T, Mohamed A A A, Murray-Hudson M, O'Farrell P, Palomo I, Saysel A K, Seppelt R, Settele J, Strassburg B, Xue D Y, Brondizio E S. Levers and leverage points for pathways to sustainability. *People and Nature*, 2020, 2(3): 693-717.
- [70] Friedman J, York H, Graetz N, Woyczynski L, Whisnant J, Hay S I, Gakidou E. Measuring and forecasting progress towards the education-related SDG targets. *Nature*, 2020, 580(7805): 636-639.
- [71] 吕永龙, 王一超, 苑晶晶, 贺桂珍. 可持续生态学. *生态学报*, 2019, 39(10): 3401-3415.
- [72] Balbi S, Alvarez-Rodriguez U, Latora V, Antonioni A, Villa F. A game theory model to explore the role of cooperation and diversity in community food security: the case of Southern Malawi. *Regional Environmental Change*, 2020, 20(2): 63.
- [73] Lauterio Martínez C L, Huber-Sannwald E, Hernández Valdéz S D, Leyva Aguilera J C, Lucatello S, Martínez Tagüeña N, Mata Póez R I, Reyes Gómez V M, Seingier G. Collective methods to weave the pathway from desertification to sustainable development: Participatory Social-Ecological Observatories. *Ecosistemas*, 2021, 30(3): 2232.
- [74] Rees S E, Foster N L, Langmead O, Pittman S, Johnson D E. Defining the qualitative elements of Aichi Biodiversity Target 11 with regard to the marine and coastal environment in order to strengthen global efforts for marine biodiversity conservation outlined in the United Nations Sustainable Development Goal 14. *Marine Policy*, 2018, 93: 241-250.
- [75] Folke C, Carpenter S R, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 2010, 15(4): art20.
- [76] 郭庆华, 金时超, 李敏, 杨秋丽, 徐可心, 巨袁臻, 张菁, 宣晶, 刘瑾, 苏艳军, 许强, 刘瑜. 深度学习在生态资源研究领域的应用: 理论、方法和挑战. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(10): 1354-1373.
- [77] Woods P J, Macdonald J I, Búrðarson H, Bonanomi S, Boonstra W J, Cornell G, Cripps G, Danielsen R, Färber L, Ferreira A S A, Ferguson K, Holma M, Holt R E, Hunter K L, Kokkalis A, Langbehn T J, Ljungström G, Nieminen E, Nordström M C, Oostdijk M, Richter A, Romagnoni G, Sguotti C, Simons A, Shackell N L, Snickars M, Whittington J D, Wootton H, Yletyinen J. A review of adaptation options in fisheries management to support resilience and transition under socio-ecological change. *ICES Journal of Marine Science*, 2022, 79(2): 463-479.
- [78] 张军泽, 王帅, 赵文武, 刘焱序, 傅伯杰. 可持续发展目标关系研究进展. *生态学报*, 2019, 39(22): 8327-8337.
- [79] Reed J, Barlow J, Carmenta R, van Vianen J, Sunderland T. Engaging multiple stakeholders to reconcile climate, conservation and development objectives in tropical landscapes. *Biological Conservation*, 2019, 238(4): 108229.