

DOI: 10.5846/stxb202301150099

萨娜,赵金羽,寇旭阳,郑拴宁,陆兆华,付晓,何霄嘉,吴钢,桑卫国.“山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望.生态学报, 2023, 43 (11): 4333-4343.

Sa N, Zhao J Y, Kou X Y, Zheng S N, Lu Z H, Fu X, He X J, Wu G, Sang W G. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: framework, models and prospect. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (11): 4333-4343.

“山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望

萨娜^{1,2}, 赵金羽¹, 寇旭阳¹, 郑拴宁³, 陆兆华⁴, 付晓⁵, 何霄嘉^{6,*}, 吴钢⁵, 桑卫国¹

1 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

2 青岛农业大学园林与林学院, 青岛 266109

3 中国科学院城市环境研究所 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

4 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

5 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

6 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038

摘要:“山水林田湖草沙生命共同体”系统保护与修复是我国生态文明建设的重要内容。明确生命共同体的耦合机制,是科学地进行生态保护和修复工作的关键。针对当前生命共同体耦合机制不清、理论和方法不健全的问题,从耦合的视角出发,在小流域尺度上单一生态系统内部生态要素的耦合、流域尺度上不同生态系统之间的耦合、区域尺度上人与自然的耦合三个方面进行整合,在此基础上探讨了多尺度山水林田湖草沙耦合理论,提出了一般性的山水林田湖草沙耦合理论框架。梳理并比较了当前主要的生态系统模型、景观模型、统计学模型以及复合生态系统的多模型耦合方法,综合提出了一个适用于“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究方法。对进一步完善山水林田湖草沙一体化保护修复提出了建议,包括:一是构建多源信息数据库,推进量化耦合机制研究;二是开展全生命周期监测与评估,探索适应性治理路径;三是强化多元主体参与,完善协同保护机制。

关键词:山水林田湖草沙;复合生态系统;耦合模型;生态保护与修复

Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: framework, models and prospect

SA Na^{1,2}, ZHAO Jinyu¹, KOU Xuyang¹, ZHENG Shuanning³, LU Zhaohua⁴, FU Xiao⁵, HE Xiaojia^{6,*}, WU Gang⁵, SANG Weiguo¹

1 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

2 School of Landscape Architecture and Forest, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China

3 Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

4 School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

5 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

6 The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China

Abstract: The Systematic protection and restoration of full-array ecosystems (mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community) is an important content of China's ecological civilization construction. To carry out

基金项目:国家重点研究与发展规划项目(2022YFF1303202);国家高层次青年人才计划项目

收稿日期:2023-01-15; **网络出版日期:**2023-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hexj@acca21.org.cn

ecological protection and restoration in a scientific manner, it is crucial to clarify the coupling mechanism of life community. However, current issues such as unclear coupling mechanisms, unsound theories, and insufficient methods are still very prominent and need to be addressed as soon as possible, which is not only unfavorable to the development of coupling related theories, but also hinder the effectiveness of overall protection and restoration practice. In order to solve the above problems, this paper summarizes the existing research from three aspects: coupling of ecological elements in a single ecosystem on the small watershed scale, coupling between different ecosystems on the watershed scale, and coupling between human and nature on the regional scale. Based on the coupling theory, we proposed a general coupling framework and preliminarily discussed the multiscale complex ecosystem coupling theory. We also suggested a coupling research approach of the full-array ecosystems by sorting out and comparing existing models such as ecosystem models, landscape models, statistical models, and multi-model coupling approaches for complex ecosystems. Finally, some suggestions are put forward to improve the integrated protection and restoration of the mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands system. Firstly, construct multi-source information database based on observation data of natural ecosystem, remote sensing data, model simulation data and statistical data of social and economic system, to promote quantitative research of coupling mechanism. Secondly, carry out whole-life cycle monitoring and assessment, and explore adaptive governance paths. In addition, the network analysis method has great application potential, which is expected to reveal the network structure and change rules behind the mountain, water, forest, farmland, lake, grass and sandland system, and promote the adaptive governance of complex ecosystems. Thirdly, strengthen the participation of multiple subjects and improve the collaborative protection mechanism. Integrated conservation and restoration not only means that mountains, rivers, forests, fields, lakes, grass and sand are regarded as an organic whole in theoretical research, but also requires that the main bodies involved in conservation and restoration work, such as government departments, social organizations, scientific research institutions and enterprises, form a synergic working mechanism. In particular, the participation of the stakeholders in the whole process of ecological protection and restoration should be ensured. Under the guidance of a unified action framework, all parties should carry out integrated protection and restoration of various ecological elements. It is expected to help the relevant decision-makers clarify the coupling relationship between the elements and systems, enhance the scientific and effectiveness of governance, and promote the sustainable development of our country's society and environment.

Key Words: mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands system; complex ecosystem; coupled models; ecological protection and restoration

面对全球性的生态问题,修复受损退化的生态系统已经成为当前应对全球气候变化和社会挑战的重要任务^[1]。与过去针对单一目标或单一生态要素开展的生态保护修复工程不同,近年来,我国在“生命共同体”理念的指导下,积极开展了一系列山水林田湖草沙一体化生态保护修复工程(简称“山水工程”)。“山水工程”的实施对贯彻落实习近平生态文明思想、保障国家生态安全与绿色发展起到了重要作用,并于2022年12月入选联合国首批十大“世界生态恢复旗舰项目”,产生了积极的国际影响。“山水林田湖草沙生命共同体”可以看作在一定地理空间上各个生态系统之间相互联系、相互作用、相互影响而形成的复合生态系统,具有要素多元性、尺度嵌套性和非线性变化等特征,生命共同体内部各组分的生态过程及复合生态系统的耦合机制是“山水工程”实施的科学基础。

但是,当前对“山水林田湖草沙生命共同体”的研究多集中在其科学内涵、特征、实践路径^[2];要素关联性^[3];健康评价^[4];制度保障^[5]等方面,对山水林田湖草沙作为一个生命共同体的内在相互作用机制还没有深入认识,也尚未形成系统的研究方法,导致对“山水工程”的科学支撑有限,制约着相关实践的深入推进。因此,认识生命共同体生态要素之间、生态系统之间以及自然生态系统与人类社会之间的耦合机制,探索生命共同体多要素、多过程、多尺度耦合的定量分析方法是亟待解决的关键问题。

本文聚焦当前的研究瓶颈,从耦合的视角出发,系统综述了小流域尺度上生态要素的耦合、流域尺度上不同生态系统之间的耦合、区域尺度上人与自然耦合的研究现状,探讨了多尺度山水林田湖草沙耦合理论,提出

了一般性的山水林田湖草沙耦合框架。梳理并比较了当前多要素、多过程、多尺度耦合模型,初步探索了“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究方法,以期为我国“山水工程”的进一步实施提供科学支撑。

1 “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架

1.1 山水林田湖草沙复合生态系统耦合研究重点

源于物理学的“耦合”正随着科学研究逐步强调多要素、多过程的相互作用,被广泛运用于自然科学、社会科学和人文科学研究领域。地球系统科学的“耦合”常用于描述两个或多个独立系统间的相互作用产生的物质或能量交换过程^[6],如描述全球社会、经济、环境远距离相互作用的“远程耦合”概念^[7];社会科学的“耦合”指的是彼此联系的两种或两种以上社会现象之间不断相互作用,彼此推动共同前进的机制^[8]。生态学角度的“耦合”概念尚未正式定义,最近,Ochoa-Hueso 等^[9]将生态系统耦合定义为生态系统的生物和非生物要素在空间或时间上的有序连接,有耦合、解耦和反耦合三种方式,提出具有更紧密耦合关系的生态系统可以更有效地捕获、转移和储存能量和物质。由此可见,“耦合”正逐渐成为一套阐述多主体相互作用的重要思路和方法。

从“耦合”的视角出发,建立山水林田湖草沙复合生态系统耦合框架,认识复合生态系统内部各子系统之间在时间、空间、数量、质量、功能等方面的耦合过程,识别驱动这些过程的关键因素,对进一步理解复合生态系统功能,保持山水林田湖草沙复合生态系统稳定性和可持续性具有重要意义。由于复合生态系统的耦合过程高度依赖于研究尺度,在一个尺度上观察到的现象或关键要素在另一个尺度上并不总是有效或成立的,因此,本文将从小流域-流域-区域三个空间尺度上分别展开讨论。

1.2 “山水林田湖草沙生命共同体”的多尺度耦合

1.2.1 小流域尺度生态系统各要素的耦合

小流域是以分水岭和出水口断面为界形成的自然集水区域,面积一般不大于 50 平方公里,具有相对完整的水文、地貌和生态过程。小流域内部的自然生态系统与社会环境较为均质,适宜开展单一生态系统功能和过程的机理研究。比如,在我国 25 个重点生态功能区之一的黄土高原丘陵沟壑水土保持区,小流域一直是水土流失治理的基本单元^[10],在小流域尺度上开展的植被、土壤、水文、气候要素之间的耦合研究揭示了黄土高原地区实施生态工程以来对生态环境所产生的正负效应,明确了植被恢复与生态水文的耦合机制^[11],为提高黄土高原生态质量的持久性提供了科学依据。目前,针对单一生态系统各要素的耦合研究主要集中在生态系统内部的元素循环(如碳、氮等)^[12]和非生物要素(气候、水分等)对某一生物要素的影响^[13]两个方面。已有研究显示,陆地生态系统的碳、氮、水循环在土壤-植被、根系-植被、土壤-大气三个界面通过生物和非生物要素之间复杂的生物物理和生物化学过程紧密的耦合在一起^[14],但仍有一些耦合过程不够明晰。比如,耦合的生物要素多以植物为主,对动物和土壤微生物的研究较少^[15],而有研究认为土壤微生物及其代谢活动在陆地生态系统碳和养分循环中起着重要的作用,但还需要进一步评估和验证^[16]。在研究尺度上,由于土壤-植被-水文在不同的时空尺度上存在着双向耦合,植被的生物化学变化过程往往较迅速,而土壤过程则比较缓慢^[17],但是目前耦合的土壤过程多集中在较小的时空尺度,因此难以完全准确地刻画小流域尺度生态要素之间的耦合关系。

1.2.2 流域尺度生态系统之间的耦合

流域是由分水岭分割而成的一个相对封闭、边界清晰的自然地理单元^[18]。流域范围内涵盖了山、水、林、田、湖等多样的生态系统类型,这些在结构和功能上存在明显差异的生态系统通过生态系统间的物质循环和能量流动形成既相对独立又彼此依存的关系,因此,流域是研究“山水林田湖草沙生命共同体”各个生态系统之间耦合机制的理想尺度。流域尺度上各个生态系统之间存在着复杂的协同与权衡关系,一项在全国尺度上评估过去(2000—2016 年)和未来(2017—2035 年)我国森林面积增加对湿地面积影响的研究显示,湿地所在流域上森林面积增加会导致湿地面积退化,如果森林面积继续增加则湿地面积会不断退化,位于北方干旱区

的湿地对植树造林的敏感性更高^[19]。这说明生态系统演变过程中某一要素的变化可能对流域内其它生态系统产生积极或消极的影响进而改变流域景观格局。因此,流域尺度上生态系统之间的耦合研究应该以流域景观格局的空间异质性为要点,从水文连接的角度揭示河流、湖泊、湿地等以“水”为主的生态系统与草地、森林、荒漠等以“土”为主的生态系统在流域中的景观格局演变及驱动因素。这种景观格局与生态过程之间的关系正是景观生态学的核心科学问题^[20],景观生态学的“格局-过程”耦合理论和方法^[21]能够帮助认识流域尺度上生命共同体不同生态系统之间的耦合机制。

1.2.3 区域尺度自然-社会系统的耦合

区域尺度上自然-社会系统的耦合体现在自然生态系统与人类社会经济、文化过程的互动与反馈,类似的概念有“人地耦合系统(CHANS)”^[22]、“人与环境耦合系统(CHES)”^[23]、“社会-生态系统(SES)”^[24]等。目前,自然-社会系统的耦合研究主要是从自然生态系统和人类社会系统中选出有代表性的要素,进行要素两两之间或三者之间的耦合分析,如“食物-能源-水”关联^[25]、“水-粮食-生态”关联^[26]、“区域经济-生态环境-旅游产业”耦合^[27]、“城市化-生态环境”耦合^[28]、“生态环境-社会经济”耦合^[29]等。总体来看,区域尺度上人与自然的耦合主要是通过各种“流”来实现的,如物质流、能量流、信息流、服务流等,这些“流”在子系统之间流动的方向和数量,可以反映人类社会系统与自然生态系统的相互作用方式,为量化探讨复合系统的耦合机制提供可能。值得注意的是,已有研究的空间范围多以省域、城市集群的行政区域划定,但是对于以生命共同体为理念的自然-社会系统耦合应该考虑自然地理单元的完整性、生态系统的关联性以及自然生态要素的综合性,以生态系统服务流作为区域生态系统服务供给与人类社会需求耦合的桥梁,在我国重要生态功能区(带)开展自然生态系统与人类社会系统的耦合机制研究。比如,在我国国家生态安全格局“三区四带”的东北森林带、北方防沙带和黄土高原生态屏障区,有研究评估并绘制了典型区主导生态系统服务的辐射效应及受益范围,在此基础上提出跨区域生态补偿方案,为实现区域主体功能提升与经济社会可持续发展提供理论依据^[30]。但由于生态系统服务流的通用研究框架尚未形成,也无统一的指标体系,在一定程度上限制了生态系统服务流在实证研究中的应用^[31],有待于在区域尺度自然-社会系统的耦合研究中进一步完善。

1.3 “山水林田湖草沙生命共同体”多尺度耦合框架

基于以上分析,本文提出“山水林田湖草沙生命共同体”多尺度耦合的基本框架(图1),包括三个层次:

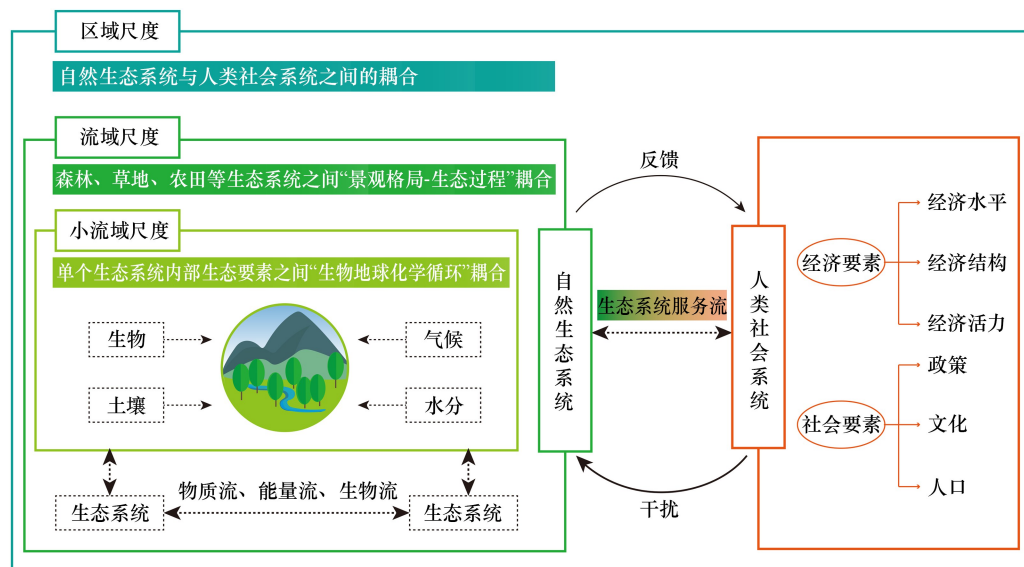


图1 山水林田湖草沙复合生态系统耦合框架

Fig.1 Coupling framework of full-array ecosystems

第一个层次是小流域尺度典型生态系统内部“水”“土”“气”“生”要素之间基于生物地球化学循环的耦合。在生态系统尺度上,认识单个生态系统所涵盖的生态要素及其相互作用关系、生态过程与功能是“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究的基础;第二个层次是流域尺度多个生态系统之间基于“景观格局-生态过程”的耦合,各类生态系统的空间分布和配置形成流域景观格局,各个生态系统之间通过物质流、能量流、生物流等生态过程连接在一起,分析流域景观格局与生态过程的对应关系,识别关键生态过程和驱动因子,避免因某个生态系统的改变,导致突破耦合系统的安全阈值而影响生命共同体的稳定,是“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究的关键;第三个层次是区域尺度自然生态系统与人类社会系统之间的耦合,体现在人类活动和社会经济因素对自然生态系统的干扰,如资源利用、土地利用等,以及自然生态系统对这种干扰的反馈,如生态系统服务的变化,这些变化又会影响到人类未来的决策和行为。明确人与自然之间的互动与反馈机制,根据生态系统服务的空间异质性,在重点区域提升生态系统服务功能,实现区域人与自然和谐发展,是“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究的目标。

2 “山水林田湖草沙生命共同体”耦合模型

耦合框架体现了“山水林田湖草沙生命共同体”在不同的空间尺度上有着不同的主导过程,发展用于分析和整合这些过程的模型对于认识生命共同体的耦合机制至关重要。本文对 3 个尺度的模型进行分析,并将这些模拟方法结合“山水林田湖草沙生命共同体”耦合背景,探讨模型的适用性、存在的问题及发展的方向。

2.1 小流域尺度生态要素耦合模型

用于表述小流域尺度生态要素和生态过程相互作用关系的模型主要有两种,一种是考虑环境条件(如温度、降水、太阳辐射、土壤结构和大气 CO₂ 浓度等因素)对生态系统元素循环过程影响的模拟模型,这一类模型数量多发展快,已经从单个过程模型发展到多尺度、多过程、多模式的综合模型,建立了丰富的基于生态系统动力学机制的生态系统过程机理模型^[32]。代表性的有 Biome 系列生物地理模型^[33]、简单生物圈模型(SiB)生物物理模型^[34]和 Biome-BGC 生物地球化学模型^[35],与前两个模型相比,Biome-BGC 模型从森林动力学模型发展而来,能够通过模拟生态系统的光合作用、呼吸作用及土壤微生物分解过程,计算植物、土壤、大气之间的碳和养分循环以及温室气体交换通量,适用于各种生态系统且可以应用于小流域尺度的生态要素耦合研究^[36]。

另一种是面向不同生态系统管理目标,针对特定生态要素(主要是不同的物种)和生态过程(如捕食、扰动)建立的基于数学方法的模型^[37]。例如,贝叶斯信念网络通将生态要素之间的相互作用表现为一连串的概率事件,显示一个生态要素的变化是如何影响另一个生态要素变化的概率,能够反映要素之间的相关关系和因果关系,被广泛应用于生态系统适应性管理^[38]。再有,集合生态系统模型整合了特定生态系统内部物种相互作用网络和动态群落模拟,可以用于确定对生态系统管理来说哪些生态要素最重要^[39]。比如,有研究用它来预测将动物(如狼 *Canis lupus*)重新引入美国黄石国家公园的生态系统后其他物种种群的变化,并且判定需要监测的物种^[40]。总体来看,这类模型的重点是对单一生态系统关键生态要素和过程的描述和模拟,能够实现从机理上认识要素间的耦合关系,并为适应性管理提供支持。

2.2 流域尺度“景观格局-生态过程”耦合模型

流域尺度上用于模拟景观格局变化的模型主要是土地变化模型(LCM),常用的有 CLUE-S 模型^[41]、元胞自动机模型(CA)^[42]、基于主体的模型(ABM)^[43]、系统动力学模型(SD)^[44]和未来土地利用模拟模型(FLUS)^[45]等,土地变化模型可以准确地对不同生态系统的格局动态做出模拟和预测,但由于不考虑生态过程,格局模型很难从机制上解释景观格局变化的原因^[46],需要与前文提到的生态过程模型进行耦合,实现对“景观格局-生态过程”耦合机制的认识。将格局模型与过程模型二者耦合的代表性模型是 PLM(Patuxent Landscape Model)模型^[47]。但是,目前的“景观格局-生态过程”耦合模型存在的问题在于对格局形成的机理认识不够,且很难将耦合的模型扩展到其他研究区使用。

随着对生态系统生态学认识的不断深入,融合了生物地球物理学、生物地球化学循环、水文过程、植被动态、自然干扰和人类活动的陆面生物圈模型如 LPJ^[48]、ORCHIDEE^[49]等已经成为研究大尺度陆地生态系统和环境变化问题的重要方法。并且随着建模技术的不断发展,有一些研究通过编写代码或利用建模工具等将两个或多个模型综合起来,为模型间的数据传递和共享建立联系,实现了模型功能的扩展,能够实现对不同生态系统间复杂过程的模拟。比如将陆面过程模型 ORCHIDEE-Hillslope 和流域水文模型 TOPMODEL 进行耦合,探究我国植树造林对湿地保护的影响^[19];通过陆面过程模型 SiB2 和地下水三维动力学模型地下水三维动力学模型(AquiferFlow)的耦合,构建 GWSiB 耦合模型对黑河中游能水过程进行模拟,证明了耦合模型能够有效提高地表能水过程的模拟精度^[50]等,这些方法为不同生态系统之间的耦合机制模拟提供了有效途径。

2.3 区域尺度自然-社会系统耦合模型

已有的自然-社会系统耦合研究多通过指标体系构建、耦合效应分析和耦合模型模拟三个方面展开。在指标体系方面,耦合研究的对象、目标和层次是指标选取的关键。比如,从生态系统脆弱性^[51]角度构建的“成因及结果表现”指标体系^[52]、“压力-状态-响应”(PSR)指标体系^[53]和“暴露-敏感-适应”(VSD)指标体系^[54]等。与其他指标体系相比,“压力-状态-响应”(PSR)框架能够有效表征人类活动对生态环境施加压力导致的生态环境状态发生变化,以及人类社会通过对生态环境变化作出的响应进而恢复生态环境质量的情况,目前已被广泛应用于人地关系和可持续发展研究等领域。

在耦合模型方面,主要有统计学模型和机理模型两类。统计学模型是根据环境因子、社会因子和各种生态学过程参数的统计学相关关系建立的,用以量化区域尺度复合生态系统各子系统的耦合效应。代表性的模型有耦合协调度模型^[28]、结构方程模型(SEM)^[55]、灰色关联分析(GRA)^[56]、地理探测器(GeoDetector)^[57]等。耦合协调度模型简便易算且结果直观,目前已广泛应用于研究区域尺度上的环境、经济、社会发展、城市化等诸多系统间耦合发展水平的实证研究中。由于耦合协调度模型体现的是子系统之间在数值上的关系,不能精确地剖析子系统之间的耦合强度,也无法深入揭示子系统之间的耦合机制,在实证研究中常与其他多变量统计方法如结构方程模型、灰色关联模型结合使用。

近年来,越来越多的研究尝试将生态系统模型与表征人类社会决策的模型耦合在一起,通过集成建模的方式来模拟和分析自然-社会系统的动态过程和相互作用机制^[58]。基于主体的模型(ABM)作为一种能够捕捉复杂系统中微观主体的决策和互动,并进一步刻画社会现象涌现的机理,常常被用来在人与自然的耦合系统对人类决策进行建模^[59]。如 Robinson 等^[60]在美国密歇根州东南部远郊土地系统建立的 DEED-BIOME-BGC 耦合模型,是将一个新的基于主体的(ABM)远郊住宅开发和土地管理决策模型土地管理决策模型(DEED)与陆地生态系统生物地球化学循环模型 BIOME-BGC 进行耦合,用于评估政策、土地管理偏好、土地市场动态如何影响(与被影响)土地利用和土地覆盖变化模式以及生态系统碳循环过程;Rammer 等^[61]开发了一个基于主体的模型(ABM)来解释森林的不同时空水平管理决策并将其与森林景观模型(iLand)进行耦合,来模拟长时间尺度上人类干预对森林生态系统的影响。

就现有研究来看,这些模型因为研究目标的不同,在指标体系、建模方法、模型的时间和空间尺度、模型适用度等方面有着显著差异。比如,当前学者们大多是尽可能全面地列出复合生态系统中与各个子系统相关的一系列指标,涉及范围广、但是缺乏针对性,无法较好的反映研究区域自然生态特征与社会现实情况。而且由于各个系统的指标格式多样、标准难以统一的特点,容易导致指标之间尺度不匹配、结果不可比的结果。更为重要的是,不同模型之间的耦合要同时考虑模型在时间和空间上的耦合,模型之间的尺度推移是耦合模型的关键^[62],并且随着模型耦合的复杂性提高,模拟误差也容易增加,最终会影响模拟结果的精度和准确性。这些都对“山水林田湖草沙生命共同体”多要素、多过程、多尺度耦合定量化研究提出了巨大挑战。

2.4 “山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究方法

基于以上分析,考虑到不同地区的自然地理条件、社会经济现实、生态系统退化程度的差异,本文提出适用于“山水林田湖草沙生命共同体”耦合研究的方法(图2),具体包括:

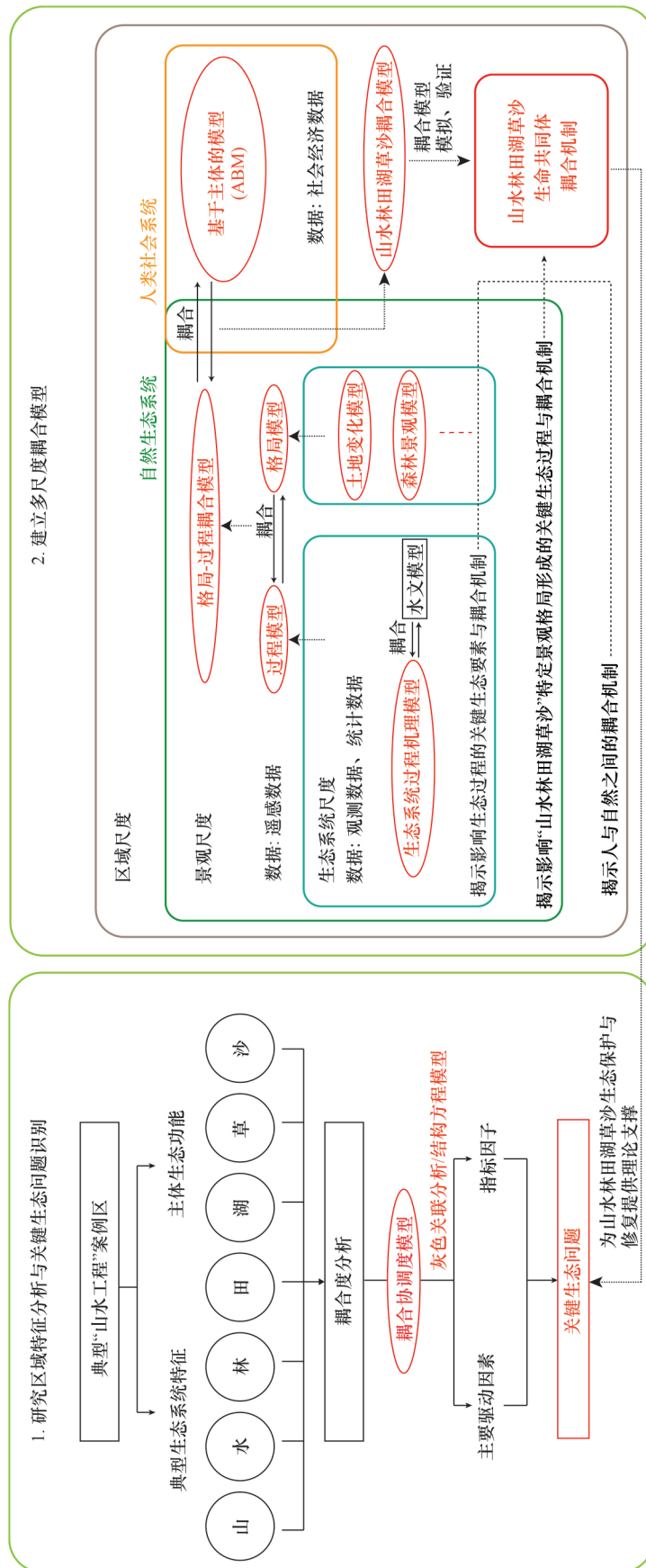


图 2 山水林田湖草沙复合生态系统耦合研究方法
Fig.2 Coupling research approach of the full-array ecosystems

(1) 确定研究区域,明确关键生态问题。以我国已实施的“山水工程”案例为基础,从自然地理单元的整体性出发,识别区域典型生态系统特征和主体生态功能。基于“压力-状态-响应”(PSR)框架构建耦合指标体系,运用耦合协调度模型和灰色关联模型或结构方程模型等多模型方法分析研究区山水林田湖草沙各要素耦合度,识别山水林田湖草沙耦合关联的主要驱动因素和指标因子,明确关键生态问题;(2) 建立多尺度耦合模型,在“小流域-流域-区域”三个尺度上开展耦合机制研究。在小流域尺度针对典型生态系统通过实地监测、控制实验和构建生态系统模型等方法研究生态系统内部土壤、植被、水文等生态要素之间的耦合机制,识别影响单一生态系统关键生态过程的生态要素;在流域尺度依托土地变化模型和陆面过程模型开发“景观格局-生态过程”耦合模型,分析不同生态系统的分布格局与生态过程的相互作用关系,识别影响特定景观格局形成的关键生态过程;在区域尺度构建能够体现自然-社会系统双向耦合的集成模型,对社会系统的模拟可以通过基于主体的(ABM)建模方式反映政策变化、行为转变、技术进步等对自然生态系统的影响,再与自然生态系统模型耦合,模拟自然-社会系统之间的双向反馈。最后,整合三个尺度的耦合模拟结果,并对模型进行应用检验,揭示“山水林田湖草沙生命共同体”耦合机制,实现在区域尺度上回答在哪修复和修复目标的问题,在流域尺度上回答不同生态系统修复主次与时序的问题,在小流域尺度上回答修复什么生态要素以及要素修复阈值的问题,形成一套科学、系统、整体的研究方法指导“山水工程”的具体实践。

3 研究展望

“山水林田湖草沙生命共同体”的耦合具有高度复杂性,对于耦合框架的应用以及模型的耦合途径有待于在实际研究中进一步完善。首先,本文提出的耦合框架在“小流域-流域-区域”三个空间尺度上对“山水林田湖草沙生命共同体”进行耦合分析,范围最大的空间尺度为“三区四带”重要生态屏障区,更多考虑的是近距离连接的自然生态系统与人类社会系统,而根据“远程耦合”理论^[63],区域尺度上“山水林田湖草沙生命共同体”与远距离的各个系统之间通过各种“流”也存在着复杂的联系,如何考虑系统外部的“流”对生命共同体耦合的影响有待进一步研究。其次,对“山水林田湖草沙生命共同体”耦合机制的模拟需要长期、大量观测数据的支持,而实现模型之间数据的集成通常需要计算机技术的支持,比如 Robinson 等^[58]为促进不同模型之间的交互和比较,提出了“耦合器”的概念,“耦合器”通常为已知的软件如 R 语言和其它编程语言 Java、C++、Fortran 等。因此,整合多尺度的生态数据并与社会经济数据集成是未来“山水林田湖草沙生命共同体”耦合模型研究的重点和难点。

面对研究中存在的问题,为促进“山水林田湖草沙生命共同体”的耦合研究从理论探讨走向实践应用,有效提升我国生态保护与修复的科学性和可持续性,实现山水林田湖草沙一体化保护和修复,本文对未来的工作建议如下:

(1) 构建多源信息数据库,推进定量化耦合机制研究。多源信息数据是开展耦合关系定量研究的基础,自然生态系统的观测数据、遥感数据以及模型模拟数据和社会经济系统的统计数据在时空尺度、数据格式等方面存在差异,为了更好地整合多源数据,可以采用数据空间化、数据同化以及数据衍生技术等集成各类数据^[64],建立与耦合框架相匹配的多元信息数据库。并且随着高性能计算技术的不断更新和发展,也为不同模型之间的连接提供更大可能^[65],能够提升耦合模型的模拟能力,推进定量化耦合机制研究。

(2) 开展全生命周期监测与评估,探索适应性治理路径。由于生态系统演替的复杂性,在不同的修复措施影响下,生态系统可能表现为正向演替也可能是逆向演替,对“山水林田湖草沙生命共同体”在多尺度上进行监测,构建修复效果评价体系,及时校正修复措施,是保障生态保护修复工程可持续性的必须。此外,近年来整合了生态系统和社会经济系统的网络分析方法在定量刻画社会-生态系统结构、分析系统动态变化、推动系统适应性治理等方面也体现出较大的应用潜力^[66],作为系统论思维的一种重要实现工具,网络分析方法有望揭示山水林田湖草沙复合生态系统背后的网络结构和变化规律,促进山水林田湖草沙复合生态系统的适应性治理。

(3) 强化多元主体参与,完善协同保护机制。一体化的保护和修复不仅仅是指在理论研究上将山水林田湖草沙看作是一个有机整体,在行动管理上也要求参与保护修复工作的主体,如政府部门、社会组织、科研院校和企业等形成协同联动的工作机制,尤其是要保障与生态保护修复利益相关大众的全过程参与,各方在统一的行动框架指导下,开展山水林田湖草沙一体化保护修复。

参考文献 (References):

- [1] 付战勇, 马一丁, 罗明, 陆兆华. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. 生态学报, 2019, 39(23): 9008-9021.
- [2] 王波, 王夏晖, 张笑千. “山水林田湖草生命共同体”的内涵、特征与实践路径——以承德市为例. 环境保护, 2018, 46(7): 60-63.
- [3] 于恩逸, 齐麟, 代力民, 于大炮, 赵福强, 周莉, 周旺明, 朱琪, 毛诚瑞, 吴钢. “山水林田湖草生命共同体”要素关联性分析——以长白山地区为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8837-8845.
- [4] 苏维词, 杨吉. 山水林(草)田湖生命共同体健康评价及治理对策——以长江三峡水库重庆库区为例. 水土保持通报, 2020, 40(5): 209-217.
- [5] 张杨, 杨洋, 江平, 邓红蒂, 祁帆, 李强, 常献伟, 程鹏. 山水林田湖草生命共同体的科学认知、路径及制度体系保障. 自然资源学报, 2022, 37(11): 3005-3018.
- [6] 宋长青, 程昌秀, 杨晓帆, 叶思菁, 高培超. 理解地理“耦合”实现地理“集成”. 地理学报, 2020, 75(1): 3-13.
- [7] Liu J G, Hull V, Batistella M, DeFries R, Dietz T, Fu F, Hertel T W, Izaurre R C, Lambin E F, Li S X, Martinelli L A, McConnell W J, Moran E F, Naylor R, Ouyang Z, Polenske K R, Reenberg A, de Miranda Rocha G, Simmons C S, Verburg P H, Vitousek P M, Zhang F S, Zhu C Q. Framing sustainability in a telecoupled world. *Ecology and Society*, 2013, 18(2): art26.
- [8] 丁莹. 洛阳市旅游产业集聚与区域经济耦合发展研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- [9] Ochoa-Hueso R, Delgado-Baquerizo M, Risch A C, Schrama M, Morriën E, Barmantlo S H, Geisen S, Hannula S E, Resch M C, Snoek B L, van der Putten W H. Ecosystem coupling: a unifying framework to understand the functioning and recovery of ecosystems. *One Earth*, 2021, 4(7): 951-966.
- [10] 袁和第, 信忠保, 侯健, 李宗善, 杨磊. 黄土高原丘陵沟壑区典型小流域水土流失治理模式. 生态学报, 2021, 41(16): 6398-6416.
- [11] 金钊. 黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性. 地球环境学报, 2022, 13(2): 121-131.
- [12] 黄玫, 王娜, 王昭生, 巩贺. 磷影响陆地生态系统碳循环过程及模型表达方法. 植物生态学报, 2019, 43(6): 471-481.
- [13] Wang S P, Duan J C, Xu G P, Wang Y F, Zhang Z H, Rui Y C, Luo C Y, Xu B, Zhu X X, Chang X F, Cui X Y, Niu H S, Zhao X Q, Wang W Y. Effects of warming and grazing on soil N availability, species composition, and ANPP in an alpine meadow. *Ecology*, 2012, 93(11): 2365-2376.
- [14] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 刘世荣, 申卫军. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 1-13.
- [15] 杨阳, 刘良旭, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安韶山. 黄土高原土壤水分-有机碳-微生物耦合作用研究进展. 生态学报, 2023, 43(4): 1714-1725.
- [16] Wieder W R, Bonan G B, Allison S D. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nature Climate Change*, 2013, 3(10): 909-912.
- [17] 李中恺, 李小雁, 周沙, 杨晓帆, 付永硕, 缪驰远, 王帅, 张光辉, 吴秀臣, 杨超, 邓元红. 土壤-植被-水文耦合过程与机制研究进展. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.
- [18] 程国栋, 李新. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(6): 811-819.
- [19] Xi Y, Peng S S, Liu G, Ducharme A, Ciais P, Prigent C, Li X Y, Tang X T. Trade-off between tree planting and wetland conservation in China. *Nature Communications*, 2022, 13: 1967.
- [20] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1-10.
- [21] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 陈利顶. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新. 生态学报, 2021, 41(1): 415-421.
- [22] 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.
- [23] Yang Y, Li X Y, Dong W, Poon J P H, Hong H, He Z, Liu Y. Assessing China's human-environment relationship. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(8): 1261-1283.
- [24] McGinnis M D, Ostrom E. Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art30.

- [25] 林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 傅伯杰. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望. 地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604.
- [26] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 李琰, 赵文武, 李长嘉. 旱区人地耦合系统水-粮食-生态关联研究述评. 地理研究, 2021, 40(2): 541-555.
- [27] 周成, 冯学钢, 唐睿. 区域经济—生态环境—旅游产业耦合协调发展分析与预测——以长江经济带沿线各省市为例. 经济地理, 2016, 36(3): 186-193.
- [28] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [29] 郝梦露, 彭守璋. 宁南山区生态环境与社会经济的耦合协调发展. 水土保持通报, 2021, 41(5): 319-326, 372.
- [30] 苏凯. 北方国家生态屏障区生态系统格局、质量、服务及其辐射效应评估研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
- [31] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [32] 于贵瑞, 张黎, 何洪林, 杨萌. 大尺度陆地生态系统动态变化与空间变异的过程模型及模拟系统. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2653-2665.
- [33] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, Leemans R, Monserud R A, Solomon A M. Special paper: a global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, 19(2): 117.
- [34] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, Dalcher A. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505-531.
- [35] Chiesi M, Maselli F, Moriondo M, Fibbi L, Bindi M, Running S W. Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes. *Ecological Modelling*, 2007, 206(1/2): 179-190.
- [36] 李书恒, 侯丽, 史阿荣, 陈兰, 朱显亮, 白红英. 基于 Biome-BGC 模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应研究. 生态学报, 2018, 38(20): 7435-7446.
- [37] Geary W L, Bode M, Doherty T S, Fulton E A, Nimmo D G, Tulloch A I T, Tulloch V J D, Ritchie E G. A guide to ecosystem models and their environmental applications. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(11): 1459-1471.
- [38] McCann R K, Marcot B G, Ellis R. Bayesian belief networks: applications in ecology and natural resource management. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(12): 3053-3062.
- [39] Baker C M, Bode M, Dexter N, Lindenmayer D B, Foster C, MacGregor C, Plein M, McDonald-Madden E. A novel approach to assessing the ecosystem-wide impacts of reintroductions. *Ecological Applications*, 2019, 29(1): e01811.
- [40] Baker C M, Gordon A, Bode M. Ensemble ecosystem modeling for predicting ecosystem response to predator reintroduction. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2017, 31(2): 376-384.
- [41] 王芳, 陈芝聪, 谢小平. 太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力. 生态学报, 2018, 38(9): 3300-3310.
- [42] 赵莉, 杨俊, 李闯, 葛雨婷, 韩增林. 地理元胞自动机模型研究进展. 地理科学, 2016, 36(8): 1190-1196.
- [43] Bitterman, P., and D. A. Bennett. 2016. Constructing stability landscapes to identify alternative states in coupled socioecological agent-based models. *Ecology and Society* 21(3):21.
- [44] 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 李晓兵, 李京, 李月臣, 李景刚. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2005, 35(5): 464-473.
- [45] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [46] 徐延达, 傅伯杰, 吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究. 生态学报, 2010, 30(1): 212-220.
- [47] Voinov A, Costanza R, Wainger L, Boumans R, Villa F, Maxwell T, Voinov H. Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling & Software*, 1999, 14(5): 473-491.
- [48] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [49] 彭书时, 岳超, 常锦峰. 陆地生物圈模型的发展与应用. 植物生态学报, 2020, 44(4): 436-448.
- [50] Tian W, Li X, Cheng G D, Wang X S, Hu B X. Coupling a groundwater model with a land surface model to improve water and energy cycle simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(12): 4707-4723.
- [51] 朱琪, 王亚楠, 周旺明, 周莉, 于大炮, 齐麟. 东北森林带生态脆弱性时空变化及其驱动因素. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3474-3482.
- [52] 邓伟, 袁兴中, 孙荣, 张跃伟. 基于遥感的北方农牧交错带生态脆弱性评价. 环境科学与技术, 2016, 39(11): 174-181.
- [53] 赵丹阳, 佟连军, 仇方道, 郭付友. 松花江流域城市用地扩张的生态环境效应. 地理研究, 2017, 36(1): 74-84.
- [54] 田亚平, 向清成, 王鹏. 区域人地耦合系统脆弱性及其评价指标体系. 地理研究, 2013, 32(1): 55-63.
- [55] Li C J, Fu B J, Wang S A, Stringer L C, Wang Y P, Li Z D, Liu Y X, Zhou W X. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(12): 858-873.

- [56] 熊建新, 张志业, 赵迪, 周扬, 许建伟. 城镇化过程中生态承载力耦合关系的时空演变——以洞庭湖区为例. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 111-119, 156.
- [57] 周鹏, 邓伟, 彭立, 张少尧. 典型山地水土要素时空耦合特征及其成因. 地理学报, 2019, 74(11): 2273-2287.
- [58] Robinson D T, Di Vittorio A, Alexander P, Arneth A, Barton C M, Brown D G, Kettner A, Lemmen C, O'Neill B C, Janssen M, Pugh T A M, Rabin S S, Rounsevell M, Syvitski J P, Ullah I, Verburg P H. Modelling feedbacks between human and natural processes in the land system. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 895-914.
- [59] An L. Modeling human decisions in coupled human and natural systems: review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 2012, 229: 25-36.
- [60] Robinson D T, Sun S P, Hutchins M, Riolo R L, Brown D G, Parker D C, Filatova T, Currie W S, Kiger S. Effects of land markets and land management on ecosystem function: a framework for modelling exurban land-change. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45: 129-140.
- [61] Rammer W, Seidl R. Coupling human and natural systems: Simulating adaptive management agents in dynamically changing forest landscapes. *Global Environmental Change*, 2015, 35: 475-485.
- [62] 程国栋, 李新. 黑河流域模型集成. 北京: 科学出版社, 2019: 107-131.
- [63] Liu J G. Integration across a metacoupled world. *Ecology and Society*, 2017, 22(4): art29.
- [64] 刘宪锋, 傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望. 地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.
- [65] 王天一, 姜金荣, 迟学斌, 张贺, 何卷雄, 郝卉群. 地球系统模式 CAS-ESM 2.0 性能评估与分析. 计算机系统应用, 2021, 30(6): 9-17.
- [66] Metzger J P, Fidelman P, Sattler C, Schröter B, Maron M, Eigenbrod F, Fortin M J, Hohlenwerger C, Rhodes J R. Connecting governance interventions to ecosystem services provision: a social-ecological network approach. *People and Nature*, 2021, 3(2): 266-280.