

DOI: 10.5846/stxb202212083534

赵金羽, 萨娜, 付晓, 郑拴宁, 吴钢, 何霄嘉, 陆兆华, 桑卫国. 以疏勒河流域为例的“山水林田湖草”生态修复多尺度耦合框架及方法. 生态学报, 2023, 43(10): 3841-3854.

Zhao J Y, Sa N, Fu X, Zheng S N, Wu G, He X J, Lu Z H, Sang W G. Multi-scale coupling framework and method for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands ecological restoration projects: A case study of Shule River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 3841-3854.

以疏勒河流域为例的“山水林田湖草”生态修复多尺度耦合框架及方法

赵金羽¹, 萨娜¹, 付晓², 郑拴宁³, 吴钢², 何霄嘉^{4,*}, 陆兆华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 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

3 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021

4 中国 21 世纪议程管理中心, 北京 100038

5 中国矿业大学(北京), 北京 100083

摘要:为解决过去保护修复工程只考虑单要素、单一类型生态系统的问题,我国于 2016 年开展了“山水林田湖草”生态修复工程,旨在通过整体、系统、综合的方法对各类生态系统进行统筹治理。然而,目前的工程治理中仍然存在对系统内部及系统间耦合概念理解不充分、系统耦合机制不明晰、对“尺度”的关注不足、缺少科学的分析方法等问题,制约了保护修复的成效。对此,首先将多个尺度下的耦合研究方法进行归纳总结,并以国家重点冰川水源涵养区及生物多样性保护优先区——疏勒河流域为例,将耦合方法用于分析要素间、自然生态系统间的耦合关系,最后基于该实例研究,提出多尺度耦合分析框架与“升尺度”保护修复模式,以期帮助相关决策者明晰“山水工程”中要素、系统间的耦合关系,增强治理的科学性与有效性,进而推进我国社会与环境的可持续发展。

关键词:山水林田湖草;生态保护修复;疏勒河流域;多尺度耦合模型;耦合分析方法

Multi-scale coupling framework and method for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands ecological restoration projects: A case study of Shule River Basin

ZHAO Jinyu¹, SA Na¹, FU Xiao², ZHENG Shuanning³, WU Gang², HE Xiaojia^{4,*}, LU Zhaohua⁵, SANG Weiguo¹

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

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

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

5 China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract: With the advent of Anthropocene, the development of science and technology has made the man-land relationship increasingly close, and the contradiction between human and nature has become more and more obvious. Nowadays, how to deal with the relationship between socioeconomic development and environmental protection is at the top of the agenda of China as well as the rest of the world. In order to solve the problem that only one single element or only one type of ecosystem were considered in the traditional ecological conservation and restoration projects, China launched the mountains-

基金项目:重点研发项目(2022YFF1303202);国家高层次青年人才计划项目

收稿日期:2022-12-08; **采用日期:**2023-04-14

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

rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands ecological restoration projects in 2016 aiming to manage all kinds of ecosystems in a holistic, systematic and comprehensive way, which requires the active participation, common protection, and joint management of interested parties in various departments. At the same time, the guidance of scientific and systematic ecosystem theories and methods is also the premise for successfully and smoothly implementing these ecological restoration projects. And the final goal of the projects is to maintain the integrity of all kinds of ecological elements, and keep the resistance, resilience, and self-organization ability of ecosystem in good condition. However, there are still some problems in the process of current environmental governance, such as poor understanding of the concept and mechanism of coupling within and between different systems, insufficient attention to "scale", and lack of scientific analysis methods, which have restricted the effectiveness of protection and restoration. In this regard, the concept of coupling in the field of ecology, the mechanism of coupling within and between different systems, and models and methods that have been applied in the researches on coupling on three scales were introduced and summarized in this research. Then, the Shule River Basin, a national key glacier water conservation area and a priority area for biodiversity conservation, as well as one of the pilot areas of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands ecological restoration projects, was taken as an example to analyze the coupling relationship between ecological elements and between systems by applying the models and methods mentioned earlier. Finally, based on the case study, a multi-scale coupling analysis framework and an "up-scale" conservation and restoration pattern from the coupling perspective were proposed to help relevant decision makers to clarify the coupling relationship between ecological elements and between systems in Shule River Basin and other pilot areas, to enhance the scientific rationality and effectiveness of the overall environmental governance, and to promote the sustainable development of our society and environment.

Key Words: mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands; ecological protection and restoration; Shule River Basin; multi-scale coupling model; coupling analysis method

1 生态学视角下耦合的概念

“耦合”是来源于物理学的名词,指两个(或两个以上)性质相近的系统或运动形式通过各种相互作用而产生互相亲和趋势的现象^[1]。随着地球进入到由人类活动驱动的世代—人类世^[2],人类活动与临近及远程环境相互作用,物理学中“耦合”概念也从而被引入到人与自然关系的研究中,如生态学、地理学、气象学、水文学等。在不同的学科领域中,耦合的概念具有一个共同点,即研究系统的两个或多个部分在其过程上具有相互依赖性。因此生态学中的耦合总是与能量流动及物质交换等生态过程密不可分,且已有研究指出生态系统内部要素耦合关系越密切,生态系统捕获、转移和储存能量和物质的功能越强大^[3]。可见,小尺度下要素间的耦合关系变化会对大尺度下的生态系统功能产生影响,导致不同生态系统间的功能联系发生改变,而生态系统间功能耦合的变化反过来又能影响要素间的耦合关系。因此,对耦合的研究必须将“多尺度”纳入考虑,目前生态学领域的耦合研究涉及三个尺度:生态系统尺度、景观尺度和区域尺度,研究内容依次为生态系统内部各要素之间的耦合,如旱地生态系统中植物与土壤养分元素的相互响应机制^[4];自然景观中不同生态系统之间的耦合,如阿勒泰地区绿洲与荒漠生态系统通过能量与物质的流动与交换彼此联系^[5];自然系统与社会系统的耦合,如实施“退耕还林”政策后,自然生态系统功能与服务的变化及其对社会系统的反馈机制^[6]等。可见,“耦合”正成为生态学中探究多主体关系及互动的重要思路和方法。

2 不同尺度下的耦合研究方法 with 工具

2.1 生态系统尺度下要素间的耦合

生态学中的耦合研究方法包括直接观测和模型模拟与分析。通常,生态要素间的耦合属于小尺度研究,可以通过直接观测的方法进行耦合分析。具体方法如对所研究要素(如碳、氮、水、土壤、植被等)间动态变化过程进行监测;在某种要素变化的条件下,监测其他要素的响应,建立耦合要素间的逻辑或定量关系。要素间

的耦合是“山水工程”生态修复规划中场地尺度的研究重点,明确要素间的耦合机制不仅有利于借助要素间的协同、拮抗等相互作用关系来实现关键要素保护和修复,还是开展更大尺度下保护修复工作的基础。目前已有许多关于要素耦合的研究:如陆生生态系统中植被-土壤-水的关系^[7]、农田生态系统中土壤碳-氮的联系^[8]、植被覆盖率的变化对土壤碳的影响^[9]等。直接观测的耦合分析方法在小尺度上的可行性较强,往往能够明确定义要素间的耦合关系^[10]。

另一个研究要素间耦合关系的方法为模型模拟与分析。模型能够克服观测实验在数据可获取性、重复性和连续性等方面的缺陷,并能有效提炼内在机制及诊断研究薄弱环节,成为系统性模拟与分析的重要手段^[11]。目前,大多数耦合模型都以“模块化”的方式建模,这种方式能够让研究者运用先前耦合模型所提供的基础模型库模块,经过重新组合、补充与改进,建立新的、适用性更强的耦合模型。如水分供需计算-碳模型(WaSSI-C模型),该模型具有较好的水文模拟能力,是较为可靠的系统内部水-碳资源管理和平衡评价的工具。刘宁等人曾利用该模型,通过水文过程的中间变量推导碳循环过程变量,并在原有模型的基础上分别对模型蒸散和融雪计算模块进行了补充改进,提高了模型在杂古脑河上游流域的适用性,之后基于气象中降水、温度等多个数据集成功模拟了上游流域内水-碳循环过程间的耦合关系,为区域水碳资源综合管理提供了科学支持^[12]。随着该领域研究的不断推进,能够获取各要素通量与循环过程基础数据的观测平台越来越多,如中国陆地生态系统通量观测研究网络(China FLUX)、站点—样带—区域生态系统通量多尺度综合观测技术体系(site-transect-region complex multi-scale flux observation system, FTR)、生态系统水—碳—氮通量与同位素通量综合观测系统(ecological-meteorological-isotopic measurement system, EMI)、亚洲通量网络(Asia FLUX)、全球通量观测研究网络(FLUXNET)去除 GFTCO 等^[13],可获数据集的质量也明显提高。因此,运用模型方法来分析、预测要素间的耦合关系前景十分广阔。具有代表性的几种要素耦合研究的模型及工具如表 1 所示。

表 1 要素间耦合模型

Table 1 Coupling models of ecological elements on ecosystem scale

序号 Number	名称 Model name	主要目的及特点 Main purposes and features	参考文献 References	具体应用 Application examples
1	遥感驱动 BEPS 模型	用于能量传输、碳氮循环、水循环和植物生理调节等过程的研究	[14]	模拟土壤水分随农作物生长以及降水变化的响应 ^[15]
2	ORCHIDEE 模型	模拟生态系统中植被、凋落物和土壤之间及生态系统与大气间的碳、氮、水通量	[16]	模拟预测稻田中植被生长期间植被与土壤土壤间氮、磷养分输移 ^[17]
3	WaSSI-C 模型	由水分供需计算模型(WaSSI)和水碳经验模型构成的月尺度生态系统集成水、碳耦合模型	[18]	基于气象中降水、温度等数据集模拟杂古脑河上游流域水-碳循环的耦合关系,为区域水碳资源综合管理提供支持 ^[12]
4	TVGM	多过程、多要素耦合的变尺度流域水系统模型,在生态系统碳、水通量研究中模拟误差较小、精度较高	[19]	结合光合作用-气孔导度模型与双源蒸散发模型,从植被水分利用效率(WUE)系数及气孔导度方面研究北京森林站地区水-碳耦合机制 ^[20]
5	WOFOST 模型	用于模拟植被-气候-土壤耦合的动态解释模型,以逐日气象数据为驱动,能够对在不同水分、土壤养分、温度等条件下植物基本生理过程进行模拟并预测其生产力	[21]	基于冬小麦发育期及产量、土壤养分、田间管理等资料模拟水分胁迫下冬小麦的生长,并确定适合保定地区冬小麦-气候-土壤耦合的最佳灌溉方案 ^[22]
6	土壤水-碳-微生物耦合模型	将生态系统内部生物地球化学循环、水文过程及土壤动态等整合为一个完整、连续的框架,有利于实现土壤水、碳、微生物各界面调控过程的准确模拟	[23]	模拟黄土高原植被恢复过程中植物生长、土壤碳循环及微生物代谢的耦合关系 ^[23]

BEPS:北部生态系统生产力模拟 boreal ecosystem productivity simulator; ORCHIDEE:动态生态系统碳-水组织 organizing carbon and hydrology in dynamic ecosystems; WaSSI-C:水分供需计算-碳 water supply stress index-carbon; TVGM:时变增益模型 time variant gain model; WOFOST:世界粮食研究 world food study

2.2 景观尺度下不同自然系统间的耦合

生态学中的景观指在一定空间内由不同生态系统类型构成的异质性地理单元,而反映气候、地理、生物、经济、文化等综合特征的景观复合体则构成区域^[24]。在科学研究中,不同自然生态系统间的耦合分析应从景观尺度着手,而在“山水工程”中,不同自然生态系统间的耦合则属于生态系统尺度的生态修复规划所应考虑的。在生态保护修复工作中,恢复面积、恢复手段、流域规模、气候等人为与自然因素都会对生态系统间的耦合关系产生影响,而生态系统间的耦合关系变化同样能够反映出保护修复工作的优劣。因此,明晰自然生态系统间的耦合关系对“山水工程”的规划、设计、实施、效益评估等阶段都具有重要意义。不同自然生态系统间的耦合研究多结合模型等工具,通过定量模拟与分析单个或多个生态要素的变化对生态系统过程(结构与功能)与景观格局的改变,来明确构成景观单元(各类生态系统)间的耦合关系,应注意合理选择模型,通过识别系统间的分异特征,最终实现大尺度、多因素的系统耦合模拟分析,为保护恢复工作提供科学支撑。具体研究如热力-水力-机械-生化过程(THMB)模型能够反映河道周围生态系统中不同土壤类型、植被覆盖、土地利用方式等对河流生态系统水分、养分动态的影响,利用该模型,定量模拟森林和草地变化对水文过程的影响。结果得出研究河段周围森林皆伐后,径流比由 0.15 增加至 0.44,年径流量增加 35%—65%,移除草地后年径流量增加 33%—91%。采伐面积和过度放牧面积与径流量间呈非线性且存在阈值效应^[25]。此类研究能够为优化不同生态系统的空间配置、提升整体景观功能提供科学依据。再如利用陆地生态系统生物地球化学循环模型(CENTURY),对 50 年间中国西北干旱区主体景观单元(绿洲、荒漠、农田生态系统)的土壤有机碳动态进行模拟,结果表明免耕种植、秸秆还田、科学施肥等保护性耕作措施能有效提高农田生态系统土壤固碳能力及作物产量,这对抑制农业用地扩张、荒漠绿洲化,进而改善研究区整体景观功能都有促进作用^[26]。再如对植被变化与径流动态关系研究发现森林覆盖度增加导致的河流径流变化存在统计上的不一致,且年径流量对森林覆盖变化的响应存在着尺度效应,即响应随流域规模的增大而减弱。此外,植被增加导致的径流减少在全球干旱、半干旱、半湿润区较为明显,但在湿润区可以忽略不计^[27]。上述的研究结果对“山水工程”具体保护与修复措施及工程建设具有重要意义。表 2 所列举的是目前较多使用的几种自然生态系统间耦合模型。

表 2 自然生态系统间耦合模型

Table 2 Coupling models of ecosystems on landscape scale

序号 Number	名称 Model name	主要目的及特点 Main purposes and features	参考文献 References	具体应用 Application examples
1	MIKE SHE 模型	模拟以及预测流域重要水文过程与其他环境因子(如大气、植被)的相互作用;模拟以水为载体的水-陆生态系统间的物质运输过程	[28]	通过模拟磷运输这一生态过程明确美国佛罗里达州大沼泽地国家公园水陆系统间耦合机制 ^[29]
3	CENTURY 模型	适用于模拟农田、草地、森林生态系统及大气系统间水、碳、氮动态联系,结合遥感和地理信息系统可实现更大尺度下的模拟	[30]	以降水为耦合节点,模拟 2004—2018 年浑善达克沙地草地生态系统初级生产力对气候变化的响应 ^[31]
4	EALCO 模型	模拟生态系统能量与物质通量;研究生态系统与气候之间相互作用;分析陆地生态系统碳水循环过程机制	[32]	对千烟洲通量站亚热带人工林生态系统的碳通量进行模拟,并探讨季节性的干旱气候对生态系统碳通量的影响 ^[33]
5	DLEM	动态耦合多个系统、多个影响因子和生态机制的过程机理模型,能够综合模拟预测植被动态与生物地球化学(主要为陆地生态系统碳、氮、水循环)过程	[34]	基于长期气候及土壤数据模拟环境因素变化(气候、土地利用和土地覆盖类型、大气 CO ₂ 浓度、氮沉降、臭氧浓度变化)与美国南部不同陆地生态系统 NPP、ET、WUE、水、氮、碳循环的相互作用 ^[35]
6	HYPE 模型	可模拟子流域尺度下的水文、水质变化,且引入了沿河道和沟渠等边缘地带,可用于研究流域不同地带的水陆生态系统物质和能量交换	[36]	模拟了黑河、水阳江、沱江三个不同流域由于流域地形、气候、堤岸土壤理化性质差异导致的河流水文、水质变化,可用以研究水陆生态系统耦合机制 ^[37]

续表

序号 Number	名称 Model name	主要目的及特点 Main purposes and features	参考文献 References	具体应用 Application examples
7	SWAT 模型	模拟并量化不同陆生生态系统对周边水生生态系统的影响,可用于水陆耦合机制的研究及主导影响因子的确定	[38]	量化 1990 年至 2020 年中国黄河流域不同土地利用类型对子流域水平衡的影响,揭示了黄河流域水陆系统间的耦合机理 ^[39]
8	THMB 模型	定量模拟水生生态系统及其周边生态系统间的相互作用,如植被覆盖率、土地利用方式、植被类型变化等对水文过程的影响	[40]	利用该模型定量模拟西非地区森林、稀树草原和草地变化对河流水文过程的影响 ^[25]
7	SiB2 模型	模型使用光合作用公式、气孔传导公式和参数化的呼吸公式模拟生态系统和大气之间能量、水和二氧化碳的交换过程。模型常与全球气候模型(GCM)耦合模拟,也可以与大尺度的水文模型进行耦合研究。	[41]	对长江三角洲低层大气物理化学过程与生态系统间的能量收支、CO ₂ 通量进行模拟,可用于探究大气系统与农田生态系统间的耦合关系 ^[42]

MIKE SHE:欧洲水文模型 Mike System Hydrological European;EALCO:土地及气候观测的生态模拟 ecological assimilation of land and climate observations;DLEM:陆地生态系统动态模型 dynamic land ecosystem model;HYPE:环境水文预测 hydrological predictions for the environment;SWAT:土壤水评价工具 soiland water assessment tool;THMB:热力-水力-机械-生化过程 thermal, hydraulic, mechanical and biochemical processes;SiB2:第二代简单生物圈模型 Simple Biosphere model version 2;GCM:全球气候模型 global climate model

2.3 区域尺度下社会系统与自然系统间的耦合

第三个耦合尺度为区域(流域)尺度,是“山水工程”总体保护修复目标制定时所考虑的单元。“山水工程”的实施范围不仅限于重点生态系统所在的生态空间,还包括与之密切关联的农业及城镇空间,是其与以往生态保护修复工程的重要不同点。因此研究社会系统与自然系统的耦合关系对如何综合运用科学、法律、政策、经济及公众手段,统筹自然生态系统结构功能稳定与社会经济可持续发展具有重要指导意义。该尺度下的耦合分析主要目的包括:维持或增加生态系统产品供应能力、通过社会、经济政策的制定改善退化生态系统、量化人类生活生产活动对区域生态环境的影响等。研究需要将自然及社会系统中多个因素如自然系统中大气、水、土壤、植被及社会系统中经济、人口、生产方式、文化、人类活动影响指数、社会发展指数等同时纳入考虑。目前,关于人与自然间的互馈关系及耦合机制的研究已有很多,如 Liu 等人提出的“远程耦合综合框架”^[43]已经用于多系统、多尺度、全方位的人地耦合研究分析,如水供应、粮食贸易、土地利用变化^[44-46]等。该框架由代理、原因、影响、流、发送系统、接收系统、外溢系统八个部分构成,其中的“流”可以是单向或双向流动的物质、信息、能量等,是系统间能否耦合的重要条件,同时也是人地耦合研究的重点。对“流”的研究可以推进社会、经济、生态三个系统的相关决策者们从整体视角出发,联合执行跨地域的环境政策,如基于“流”的耦合研究发现以减轻北京等城市的环境污染为目的的工厂搬迁会导致欠发达地区(接收地区)污染增加,总污染也随之增加,原因在于接收地区环境政策的缺失^[47]。常见的跨系统尺度耦合分析模型、框架、方法等如表 3 所示。

3 耦合研究方法及工具在山水工程中的应用

3.1 “山水工程”中“耦合理念”的发展历程

自 2013 年 11 月习近平总书记提出“山水林田湖生命共同体”理念^[5],人们便意识到保护修复需要同时对不同要素、不同系统进行综合考虑,打破以往不同部门、不同治理项目“各自为战”的局面,即“生态耦合”的概念构架初步形成。因此 2013—2016 年可被视为耦合治理研究的第一阶段。但这一时期的相关研究多是停留在理念层面,实际的治理仍面临着很多问题,如不少利用人工灌溉刻意拼盘,营造园艺性景观的工程,尚未明确水土耦合机理,无法长期维持系统活力,造成人力、物力和财力的浪费。2016 年我国发布了《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》并陆续开展了四批共 25 个山水林田湖草生态修复工程试点工作,相关

研究文献也在以爆发式增长^[60],耦合治理开始全面进入实践阶段,即 2017—2020 为耦合治理研究的第二阶段。随着 2020 年《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》与《山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)》的发布,“山水”生态修复工程的实施有了系统的规划,相关的方案制定、监管、验收、效果评价、技术指导也在逐步成熟,研究重点从理论的探讨转向对耦合机制的研究,为“山水工程”提供有力的科学技术支持是当下以及未来的研究重点,即 2021 年至今可视为耦合治理研究的第三阶段。由此可见,深刻理解“生态耦合”的内在含义、构建多尺度下的耦合框架、总结以区域内的一般性修复模式,对进一步理解复合生态系统功能、“山水工程”的科学合理推进、保持修复后生态系统的稳定性具有重要意义。

表 3 自然-社会系统间耦合模型及方法

Table 3 Coupling models and methods of social-ecological systems on region scale

序号 Number	名称 Model name	主要目的及特点 Main purposes and features	参考文献 References	具体应用 Application examples
1	耦合协调度模型	用于研究 2 个或以上的相互联系但又不同的系统间耦合程度及发展趋势,能够将自然及社会系统中多个因素纳入指标体系	[48]	定量分析 1980—2011 年京津冀地区城市化与生态环境的耦合过程与演进趋势,且证明了人口城市化和生态压力分别对城市化子系统与生态环境子系统的贡献最大 ^[49]
2	生命周期评价	将人类生产以及活动对自然的压力进行客观评价;它以能量和物质利用、废物排放为耦合节点	[50]	评价了秸秆成型燃料生产厂生命周期能耗和环境排放。表明秸秆压缩成型的能耗最大,且秸秆相比化石燃料具有较大的减排优势,为秸秆成型燃料利用与环境保护提供了基础性数据 ^[51]
4	ESAM 环境社会核算模型	该模型特别关注环境-经济界面,明确地捕捉生物地球化学循环中元素(如碳、氮、磷)在自然过程和人类过程之间的相互作用,能够量化全球经济通过生物地球化学过程将自然资源(即原材料)转化为剩余资源(即废物、污染物、排放)的程度	[52]	对内蒙古环境治理投入与经济产出及结构之间的关系进行模拟,结果得出经济发展对环境自我净化能力有负效应且应加强当地产业结构优化,该结论可为地区环境政策制定及环境综合治理提供理论依据 ^[53]
5	MuSIASEM 社会-生态代谢多尺度综合分析法	基于“流-基”(flow-fund)体系,将不同尺度和规模的社会经济和生态系统结合起来,是能源、粮食、水、土地利用和社会经济属性间纽带关系的分析工具	[54]	将 MuSIASEM 方法与能值结合,对上海产业结构进行分析,发现上海在城市代谢过程中的生态资源的真实价值流失量较大,基于以上研究结果,研究提出了实现上海市的可持续发展和低碳发展的政策性建议 ^[55]
6	社会-生态系统框架 (SES)	由资源系统、资源单位、行为者和治理系统四个子系统构成,且子系统与社会、经济、生态系统存在相互作用。可模拟人地系统间的互馈关系	[56]	将研究社会-生态系统与治理政策有机联系起来,可用于探究何种调整适应性治理结构能够持续保障人类福祉 ^[57]
7	DPSIR 框架	属于自适应管理工具,从制定政策这一视角出发,描述环境问题和相关社会经济系统的关系	[58]	用以探究 1981—2015 年中国城市扩张与相关土地政策间的互馈关系 ^[59]

ESAM:环境社会核算模型 Environmental Social Accounting Matrix; MuSIASEM:社会-生态代谢多尺度综合分析法 multiple-scale integrated assessment of societal and ecosystem metabolism; SES:社会-生态系统 Social-Ecological System; DPSIR:驱动力-压力-状态-影响-反应 Driving forces Pressure State Impact Response

3.2 山水工程治理中的系统耦合分析——以疏勒河流域为例

由于山水工程是以区域(流域)为单元来制定保护修复方案的,要素间及自然系统间的耦合是工程应重点进行考虑与分析的。本研究以疏勒河流域为例,尝试将本文所总结的耦合研究方法及其工具应用于分析流域中各要素间、系统间的耦合关系。

疏勒河地处我国西北内陆干旱区和青藏高原区的交汇地带,是黄河和青海湖的重要水源补给区,还是我国生物多样性保护的优先区^[61]。然而,流域内生态系统敏感而脆弱,面临的问题包括:水源涵养能力下降、草

地退化、山区森林覆盖率降低、生物多样性下降^[62]。因此,对疏勒河流域实施系统性保护修复工作对维护区域整体生态平衡及西北地区水源涵养功能具有重要意义。

3.2.1 要素间的耦合分析

首先,应根据保护修复目标确定纳入分析的各类生态系统及关键要素。据上文所述,可以确定应将森林、草地、河流及湖泊生态系统这四类自然系统作为系统性治理的主体。选择植物、土壤和水作为耦合分析的关键要素,原因在于:(1)土壤是联系水生生态系统与陆地生态系统的重要纽带,而植物的蒸腾、呼吸、光合等生理过程及各种水文过程则能够调节生态系统内部及系统间物质循环与能量流动。(2)人类的生产生活离不开土壤、水以及植物资源,基于三种要素实施保护修复意义十分重大。(3)土壤、植被和水在不同的时空尺度上都是耦合在一起的^[63],一个要素发生变化往往会引起另外两者的变化,如在北方地区实行不合理的人工植被建设会导致严重的土壤干化、河流径流减少等问题^[64]。因此,对植物、土壤和水的耦合机制进行研究能够为理解更大尺度上生态系统的耦合关系提供可靠的科学基础。对要素进行耦合分析时,应考虑它们在物质循环或能量流动方面的联系:如将碳循环和水循环作为分析切入点,本文借鉴黄土高原土壤水分-有机碳-微生物耦合模型^[23],基于疏勒河流域三个关键要素的耦合机制(图1),构建水-植被-土壤耦合模型框架,具体如图2所示。

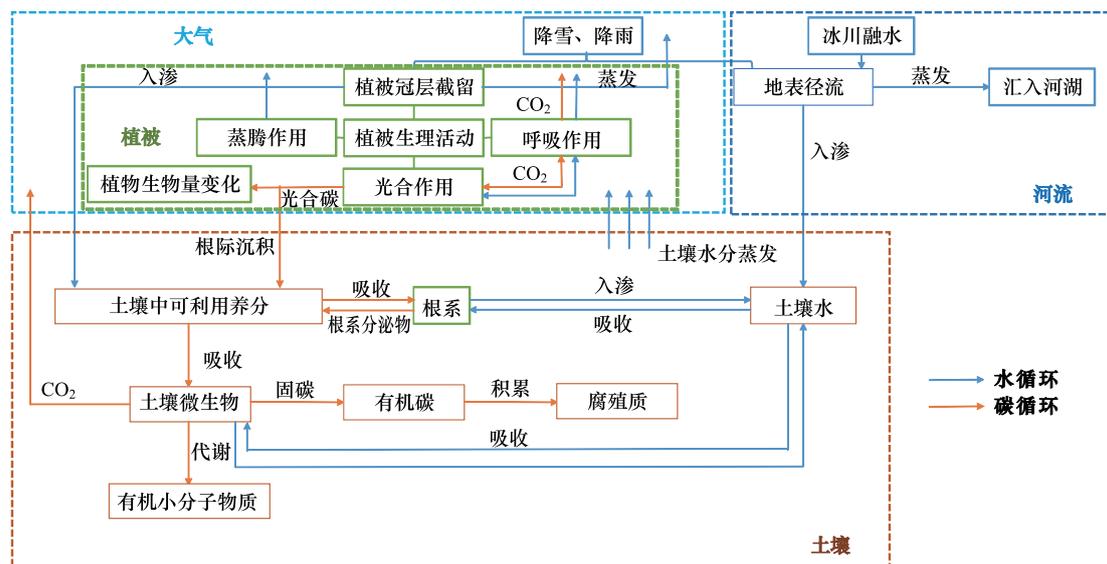


图1 水-植被-土壤耦合机制框架图;关键要素由水循环与碳循环实现耦合

Fig.1 Frame diagram of the coupling mechanism of water-vegetation-soil; The key elements are coupled by water cycle and carbon cycle

疏勒河流域的水循环主要涉及降水(降雪和降雨)、蒸发和土壤水三部分,其中植被覆盖能改变降水分配(如冠层截流、根系吸收等);蒸发包括植物蒸腾作用、土壤水分的物理蒸发等;土壤水影响植物生长、土壤碳循环及微生物代谢等重要生态过程^[23]。由此可见,水-植被-土壤间存在着密切的作用与反馈关系,有研究表明,植被密度与土壤入渗能力呈正相关关系,即植被增加能够加速雨水入渗,导致土壤含水量增加,进而实现植物自身生物量的增加、土壤微生物代谢活动增强等,形成生态系统内的正反馈;而裸地则易形成土壤结皮、下渗减少、径流增加,土壤水分匮乏,形成系统内的负反馈^[65]。这种要素间的正、负反馈不仅影响着生态系统的结构与功能,还能够影响更大尺度下的景观格局的形成。

碳循环也是实现关键要素耦合的重要生态过程,且碳循环与水循环紧密联系:研究表明土壤含水量过低时会严重限制土壤微生物及植物的固碳过程,含水量过高则会由于阻塞土壤孔隙而减少土壤中的二氧化碳,进而降低土壤微生物固碳量^[66]。碳循环过程包括碳输入:如植物光合作用、土壤微生物固碳;碳输出:生物呼吸作用、土壤微生物对有机碳的分解作用等,根据项目区环境条件,实施退耕还林、退牧还草、矿山修复等治理

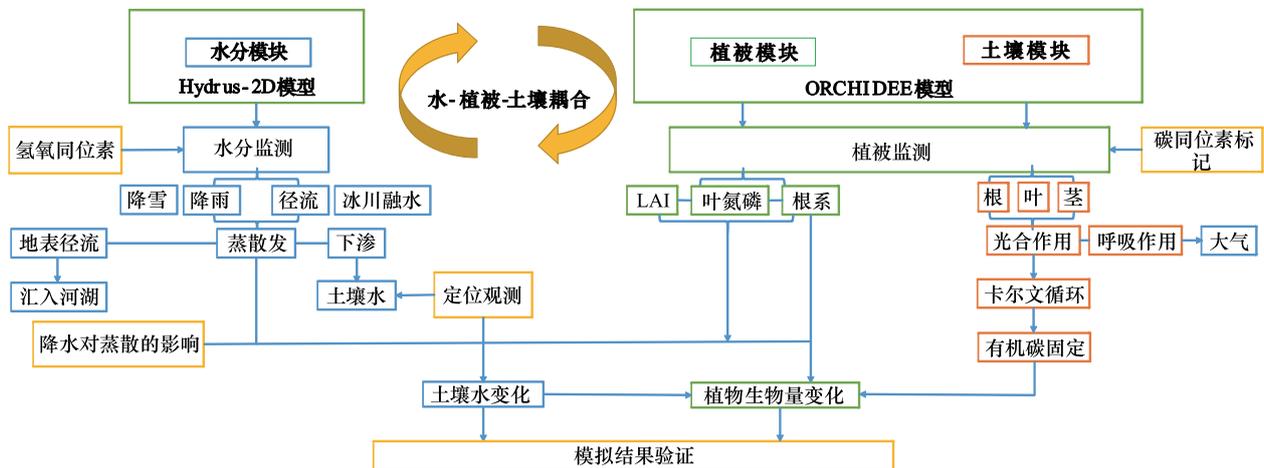


图2 水-植被-土壤耦合模型框架

Fig.2 Framework of coupling model of water-vegetation-soil

Hydrus-2D 模型:水文过程模型; ORCHIDEE 模型:动态生态系统碳-水模型

手段,改善水-植被-土壤间的耦合关系,实现碳输入与输出过程的平衡对生态系统稳定性维持、整体流域的可持续发展、减缓全球气候变化等都具有积极作用。

耦合模型框架中的水文过程(Hydrus-2D)模型用于模拟河湖径流与土壤水间的平衡过程^[23],动态生态系统碳-水(ORCHIDEE)模型则以碳为耦合节点,将土壤与植被进行耦合。框架中的水分模块包括了降水、蒸散和土壤水三部分,疏勒河流域的降水包括降雪和降雨,其中的植被覆盖会改变降水分配(如冠层截流、根系吸收等)土壤及植被模块中的碳动态包括植被、凋落物和土壤碳库、碳库间的碳通量和生态系统与大气之间的碳通量。借助耦合模型,能够实现疏勒河流域水-植被-土壤界面的物质交换与能量流动的调控过程的模拟,从而进一步明晰三大要素间的耦合关系,这为更大尺度下多生态系统的统筹治理提供了坚实的基础。除上述的基于碳、水循环过程构建水-植被-土壤耦合模型外,还可以尝试构建多要素、多过程的耦合模型,丰富疏勒河流域要素耦合的相关研究。

3.2.2 自然生态系统间的耦合分析

明确三个关键要素的耦合机制后,需要从景观尺度探究治理区域内不同自然生态系统间的耦合机制,推进保护修复单元的科学划分与工程子项目的合理布局。如基于疏勒河流域内自然系统要素的耦合、系统时空演变规律及环境分异特征,建立生态系统演化规律动态模型(DLEM),定量模拟分析耦合自然生态系统间的相互作用与反馈机制。

如图3所示,选取DLEM模型中的生物物理、植物生理、土壤生物地球化学过程及植被动态四个核心模块用于疏勒河流域主体生态系统间耦合关系的分析。生物物理模块可用于模拟主体生态系统间以及各生态系统与区域大气系统间的物质通量(主要为气体与水分)和能量流动的过程,如微气候影响下的森林-草地生态系统间水分转移与能量分配过程;土壤生物地球化学过程模块能够模拟土壤养分动态、微生物分解能力、土壤理化性质变化等过程,如修复退化森林生态系统过程中对系统内部及治理区内草地生态系统土壤碳、氮的影响;植物生理模块用于模拟光合作用、呼吸作用、碳、氮等的同化与分配等;植被动态模块模拟自然及人为影响导致景观格局变化后陆地生态系统中植被群落的恢复和演替过程^[31]。由此,借助DLEM模型,从景观尺度上明晰疏勒河流域自然生态系统间耦合机制、景观格局与生态过程间的相互作用,基于森林-草地-河流-湖泊生态系统间的耦合关系,采取多要素关联、多过程耦合的系统治理措施,实施通水、增绿、护土、保湖等一体化保护和修复工程,系统提升疏勒河流域生物多样性保育、碳固持和水源涵养等主体生态功能。

3.3 山水工程中的耦合治理框架及方法

以“整体保护”、“系统修复”、“综合治理”为核心的“山水林田湖草”生态修复工程尤其强调将系统内要

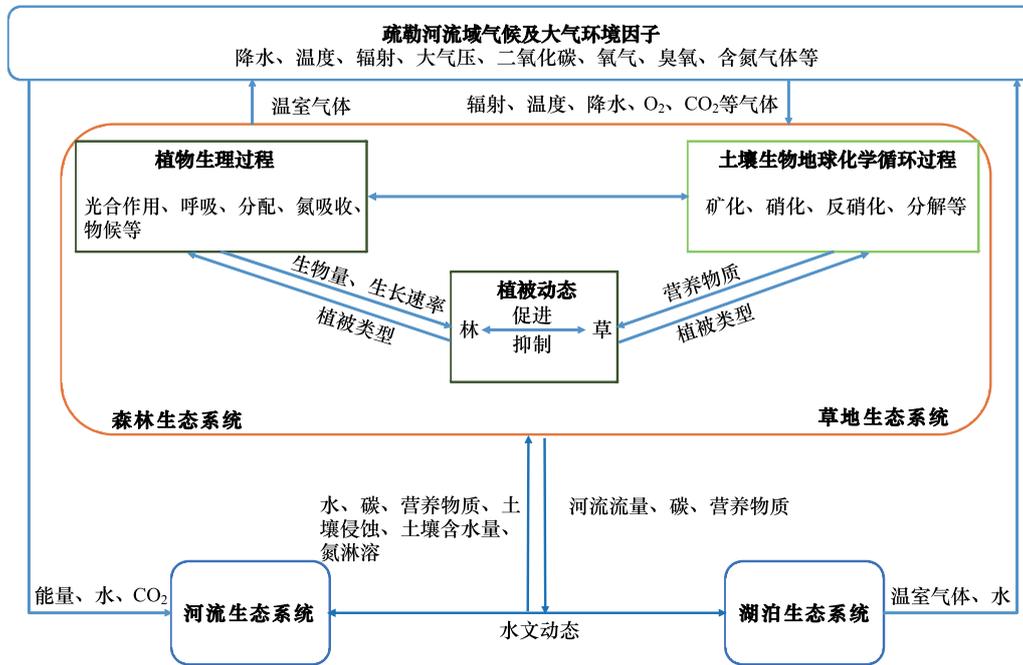


图3 陆地生态系统动态模型(DLEM)主要组成部分及疏勒河流域主体生态系统耦合关系

Fig.3 The main components of the Dynamic Land Ecosystem Model (DLEM) and the coupling relationships of the main ecosystems in Shule River Basin

素及系统间的耦合关系进行统筹考虑,其原因在于“山水林田湖草生命共同体”可被视为一定空间上由各类生态系统耦合而成的复合生态系统,具有多要素、多尺度等特点。然而,随着山水工程的开展,一些问题也逐渐显露出来^[67]。其中,缺乏对生态耦合机制的理解,导致“多要素简单加和就是综合治理”成为制约治理成效的一大难题。为解决“山水工程”生态修复面临的问题,已有许多相关框架及方法被提出,如社会-生态系统(SES)框架在钱塘江源头区的应用,在SES框架下,可对研究区进行关键问题识别、因素分析、治理情景预测及评价体系构建,进而为钱塘江源头区“山水工程”生态修复面临的问题提供系统的解决方案^[68]。再如基于广东粤北南岭山区矿山开采、植被退化、水质下降等生态问题所构建的粤北南岭废土堆立体生态修复模式,该修复模式兼顾了水流疏导、地形重塑与边坡稳固,对研究区及类似区域的多要素系统共治具有重要指导意义^[69]。此外,针对西北干旱区广泛分布的山地-绿洲-荒漠耦合生态系统,有研究以塔里木河重要流源区为例,提出“一核心、两源头、三阶梯”系统保护修复模式,该模式对于推进我国西北干旱区山水林田湖草沙系统治理具有重要意义^[70]。但从总体上看,目前的模型及方法对“多尺度”关注较少,对此,本节基于前文对疏勒河多尺度下的耦合关系分析及耦合机制研究,提出具有“多尺度”特点的“山水工程”一般性耦合治理框架及方法。

3.3.1 构建保护修复多尺度耦合分析框架

从疏勒河流域自然生态系统的耦合分析中可以看出,由于时滞效应、生态系统复杂性、要素间、系统间存在普遍联系与互馈等特点,亟须构建一套以生态要素与功能耦合机制与模式为基础,以景观格局-生态过程关系及其稳定性维持为目标的多尺度耦合分析框架(图4),为识别“山水工程”保护修复区的内在耦合机制和模式分析提供整体思路,并为一体化保护和修复模式提供科学支持。

耦合分析应首先考虑区域中的关键生态问题与主体生态功能,结合定位观测、遥感官测等方法确定保护修复的关键生态要素。借助模型模拟等方法,明确山水要素演变及其驱动机制,随后基于要素耦合,探究景观尺度下各类自然生态系统的耦合关系,构建出能够定量模拟分析特定修复区系统间耦合机制的模型(如生态系统演化规律动态模型),最终探究区域尺度下社会-经济系统与自然生态系统间的耦合程度及发展趋势。基

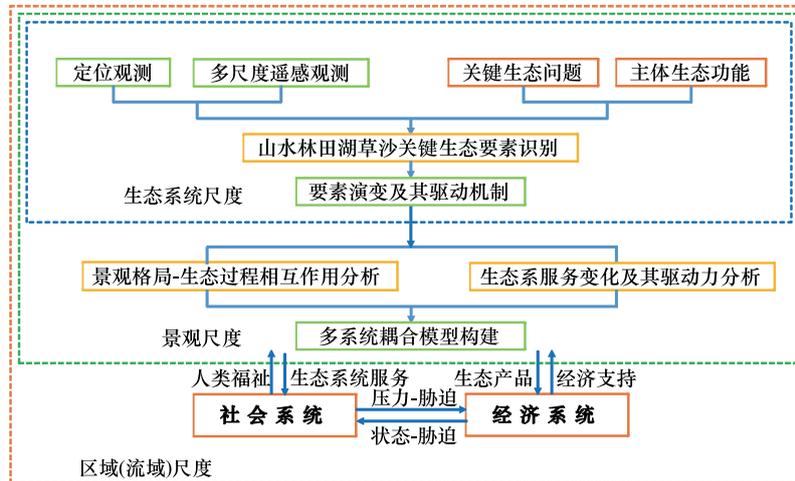


图4 保护修复多尺度耦合分析框架

Fig.4 Multi-scale coupling analysis framework for ecological protection and restoration

于上述各尺度下的耦合关系实施一体化保护和修复工程,实现经济、社会、自然系统同步发展,具体保护修复模式见下节。

3.3.2 耦合视角下的“升尺度”保护修复模式

结合耦合原理,系统性修复治理要求将小尺度下生态系统中的各种要素、中尺度下的各类生态系统(景观内的自然生态系统)、大尺度下的自然-经济-社会系统统筹考虑。因此在规划试点区域治理方案时,要尤其注意尺度的选择,明确不同尺度下的保护修复重点。建议从源头实施治理,即从小尺度的要素间耦合着手,生态保护修复区面临的生态问题可能包括流域“水质下降”、“植被覆盖率降低”、“土地沙化”等,借助小尺度的耦合工具对“水”、“林”、“土”子要素耦合机制进行研究,在明晰要素间的能量交换和物质循环机理后,进一步扩大研究尺度,即基于生态介质的扩展,借助中尺度耦合模型及方法,进行空间、时间升尺度,基于物质循环与能量流动等过程将流域中各类生态系统有机耦合,统筹实施通水、育林、护土、保湖等相关工程,并根据生态系统退化程度科学选择保护保育、自然恢复、辅助再生、生态重建等修复模式提升区域自然生态系统服务和生态屏障功能。最后,进一步扩大尺度,将社会、经济系统纳入治理范畴,合理制定生态补偿政策,改进当地居民生产生活方式,倡导绿色农业、无废工业、生态旅游等,促进整个区域内自然、经济、社会的可持续发展。利用大尺度耦合工具与模型,如耦合协调度模型,明确自然-经济-社会系统间的耦合程度,预测未来发展趋势。此外还应建立合理的评价体系,对保护修复工作既有成果进行评估,对治理方案实行动态调整。具体保护修复模式制定流程图如图5所示。

4 结论与建议

本文对生态学中耦合的概念、不同尺度下的耦合研究内容、方法及工具进行介绍,同时以山水工程保护修复区——疏勒河流域为例,对如何借助模型等方法分析自然系统内部及系统之间的耦合关系进行了总结。最后,基于对实例的研究,文章提出了耦合视角下的“升尺度”保护修复模式与保护修复多尺度耦合分析框架,以为疏勒河流域以及类似区域的多要素、多尺度、多过程统筹治理提供科学支持。地球已经进入人类世,科学技术的发展也使人地联系愈发紧密,彼此的相互作用关系愈发复杂。在这种大背景下,如何处理好社会经济发展与生态环境保护的关系成为当今各国的首要议题。“山水林田湖草修复工程”具有综合性、系统性、整体性三大特点,要求各个部门的利益相关者多方参与、共同保护、联合治理。各部门需要在生态系统理论和方法的指导下来进行综合治理,兼顾山水林田湖草多个系统,最终做到生态系统各要素完整,系统健康、抵抗力、恢复力与自组织能力达到良性状态。结合生态耦合原理,未来有关“山水工程”研究的相关建议如下:

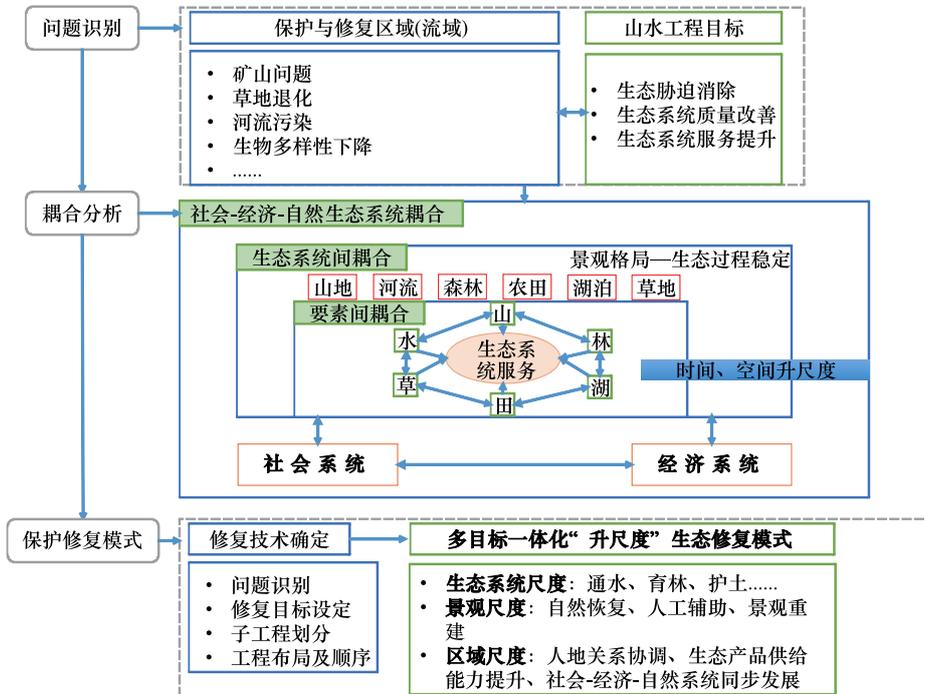


图5 “升尺度”生态修复模式制定流程图

Fig.5 Flow chart of “up-scale” conservation and restoration pattern

(1) 考虑多尺度耦合关系。借助合适的耦合模型及工具,明确山水林田湖草系统各要素间的耦合机制,进而明确不同自然系统间的联系,最后分析自然系统与社会系统中各要素的交互耦合关系,尤其关注多系统间的反馈。

(2) 以区域或流域(即以自然地理单元)作为保护修复单元,跨越行政边界实施治理。其中流域是联系水陆生态系统的重要单元,且我国有七大流域,基于“水流”逐步进行“升尺度”研究,对整个河流流域,包括河流的支流系统、“季节性”河流、周围湿地、农田、森林等实施保护修复。该方法对我国的粮食安全、水安全、整体生态保护与社会经济发展具有重要意义。基于研究单元的自然-经济-社会基本状况构建指标体系,建立相应的人地耦合模型,发现能够促进社会与自然协调发展的保护修复模式。

(3) 对保护修复过程进行监测评估。权衡修复子工程的相关举措对于社会经济与自然环境的影响,如建立自然保护区对生物多样性的保护与当地经济的影响,可设立基于影响性质(消极、中性或积极)的评价体系,对工作进程进行监测预警,及时调整不合理的保护修复政策,从宏观角度做到自然-经济-社会的协调、可持续发展。

(4) 对保护修复成果构建综合评价体系。如统筹兼顾自然系统的结构、功能、格局、提供的服务价值以及社会系统中社会发展指数、人类活动影响指数等,构建评价方法和评价体系,对保护修复成果进行评估。同时,将评价体系纳入当地政府的绩效考核中,有助于提高保护修复工作的可持续性,保证修复工作的质量。

今后,我国的生态保护修复工作还需要结合中国基本国情,处理好自然资源利用增加和城乡生态保护问题,化解人类生产活动与自然保护修复间的矛盾。未来需要重点结合耦合原理与方法,深入研究山水林田湖草生态修复理论、方法、技术、标准和模式,最终构建一体化保护修复理论体系。此外,还应开展对人类活动密集区的城市生态系统修复工作,加强自然-经济-社会理论的指导作用,最终实现山、水、林、田、湖、草等自然要素与城、村、矿等社会要素的和谐发展有机统一。

参考文献 (References):

- [1] Vefie L. The Penguin Dictionary of Physics. Beijing: Foreign Language Press, 1996.
- [2] Raúl O H, Manuel D B, Risch Anita C, Maarten S, Elly M, Henrik B S, Stefan G, Emilia H S, Carol R M, Snoek Basten L, van der Putten Wim H. Ecosystem coupling: a unifying framework to understand the functioning and recovery of ecosystems. *One Earth*, 2021, 4(7): 951-966.
- [3] Lewis S L, Maslin M A. Defining the anthropocene. *Nature*, 2015, 519(7542): 171-180.
- [4] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, Bowker M A, Wallenstein M D, Quero J L, Ochoa V, Gozalo B, García-Gómez M, Soliveres S, García-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Escolar C, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Carreira J A, Chaieb M, Conceição A A, Derak M, Eldridge D J, Escudero A, Espinosa C I, Gaitán J, Gatica M G, Gómez-González S, Guzman E, Gutiérrez J R, Florentino A, Hepper E, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jankju M, Liu J S, Mau R L, Miriti M, Moneris J, Naseri K, Noumi Z, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramírez E, Ramírez-Collantes D A, Romão R, Tighe M, Torres D, Torres-Díaz C, Ungar E D, Val J, Wamiti W, Wang D L, Zaady E. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands. *Nature*, 2013, 502(7473): 672-676.
- [5] 李依, 刘煜杰, 张强, 朱粟锋, 刘浩, 刘淑芳. 基于山水林田湖草耦合视角的阿勒泰地区生态保护修复对策研究. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 791-800.
- [6] Yang H B, Lupi F, Zhang J D, Chen X D, Liu J G. Feedback of telecoupling: the case of a payments for ecosystem services program. *Ecology and Society*, 2018, 23(2): art45.
- [7] 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.
- [8] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 刘智, 杨玲, 尹宇静, 张卫建. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 57-60.
- [9] Boix-Fayos C, de Vente J, Albaladejo J, Martínez-Mena M. Soil carbon erosion and stock as affected by land use changes at the catchment scale in Mediterranean ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 133(1): 75-85.
- [10] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法. *地球科学进展*, 2010, 25(7): 673-681.
- [11] 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.
- [12] 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣, 孙阁. 流域水碳过程耦合模拟——WaSSI-C 模型的率定与检验. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 492-502.
- [13] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [14] Liu J M, Chen J, Cihlar W M, Park A. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(2): 158-175.
- [15] 刘昭, 周艳莲, 居为民, 高苹. 基于 BEPS 生态模型模拟农田土壤水分动态. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 67-72.
- [16] Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudre N, Ogee J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice I C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system-art. no. GB1015. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): B1015.
- [17] 王晟. 极端降雨条件下水稻田氮、磷径流流失特征与影响因素探究[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [18] Sun G, Caldwell P, Noormets A, McNulty S G, Cohen E, Moore Myers J, Domec J C, Treasure E, Mu Q Z, Xiao J F, John R, Chen J Q. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J05.
- [19] 夏军, 王纲胜, 谈戈, 叶爱中, 黄国和. 水文非线性系统与分布式时变增益模型. *中国科学 D 辑*, 2004, 34(11): 1062-1071.
- [20] 张琦, 占车生, 胡实, 刘梁美子. 基于改进 TVGM 的水-碳耦合机制研究——以北京森林站研究区为例. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2020, 56(3): 394-401.
- [21] Suipit I, Hoojer A A, Diepen C A V. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: theory and algorithms. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 1994.
- [22] 朱津辉, 郭建茂, 毛留喜. 基于 WOFOST 模型的河北省保定市冬小麦最佳灌溉方案研究. *气象*, 2014, 40(11): 1398-1407.
- [23] 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(04): 1-12.
- [24] Pickett S T A, Cadenasso M L. Landscape Ecology: spatial heterogeneity in ecological systems. *Science*, 1995, 269(5222): 331-334.
- [25] Li K Y, Coe M T, Ramankutty N, Jong R D. Modeling the hydrological impact of land-use change in West Africa. *Journal of Hydrology*, 2007, 337(3): 258-268.
- [26] 许文强, 陈曦, 罗格平, 张清, 张豫芳, 唐飞. 基于 CENTURY 模型研究干旱区人工绿洲开发与管理模式变化对土壤碳动态的影响. *生态*

- 学报, 2010, 30(14): 3707-3716.
- [27] Zhang M F, Liu N, Richard H, Li Q, Liu K, Wei X H, Ning DY, Hou Y P, Liu S R. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 44-59.
- [28] Neil R, Viney H, Bormann L, Breuer A, Bronstert B F W, Croke H, Frede T, Graeff L, Hubrechts J A, Huisman A J, Jakeman G W, Kite J, Lanini G, Leavesley D P, Lettenmaier G, Lindstroem J, Seibert M, Sivapalan P, Willems. Assessing the impact of land use change on hydrology by ensemble modelling (luchem) II: Ensemble Combinations and Predictions. *Advances in water resources*, 2009, 32(2): 147-158.
- [29] Long S A, Tachiev G I, Fennema R, Cook A M, Sukop M C, Miralles-Wilhelm F. Modeling the impact of restoration efforts on phosphorus loading and transport through Everglades National Park, FL, USA. *The Science of the Total Environment*, 2015, 520: 81-95.
- [30] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [31] 李永利, 张存厚, 王英, 张立, 温建伟. 浑善达克沙地地上净初级生产力动态及对气候变化的响应. *草业科学*, 2021, 38(1): 1-10.
- [32] Wang S, Grant R F, Verseghy D L, Black T A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS-the Canadian Land Surface Scheme. *Ecological Modelling*, 2001, 142(1/2): 135-154.
- [33] 米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 温学发, 孙晓敏, 张雷明, 宋霞, 王树森. 基于 EALCO 模型对中亚热带人工针叶林 CO₂ 通量季节变异的模拟. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1119-1131.
- [34] 田汉勤, 刘明亮, 张弛, 任巍, 徐小锋, 陈广生, 吕超群, 陶波. 全球变化与陆地系统综合集成模拟——新一代陆地生态系统动态模型 (DLEM). *地理学报*, 2010, 65(9): 1027-1047.
- [35] Tian, H., Chen, G., Liu, M., Zhang, C., Sun, G., Lu, C., Chappelka, A. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. *Forest ecology and management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [36] Namugize Jean N, Jewitt Graham P W, Clark David, Strmqvist Johan. Assessment of the Hype Model for Simulation of Water and Nutrients in the Upper uMngeni River Catchment in South Africa. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017.
- [37] 孙雪纯, 宁少尉, 宋凡, 陈元芳. HYPE 水文模型在中国不同气候区域的应用研究. *水文*, 2021, 41(3): 57-62, 48.
- [38] Arnold J G. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology*, 1996, 176(1/2/3/4): 57-77.
- [39] Liu Z, Rong L, Wei W. Impacts of land use/cover change on water balance by using the SWAT model in a typical loess hilly watershed of China. *Geography and Sustainability*, 2023, 4(1): 19-28.
- [40] Michael T Coe. Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: testing the accuracy of an atmospheric GCM. *American Meteorological Society*, 2000, 13(4): 686-704.
- [41] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Berry J A, Field C B, Dazlich D A, Zhang C, Collelo G D, Bounoua L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. part I: model formulation. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [42] 高志球, 卞林根, 陆龙骅, 丁国安. 水稻不同生长期稻田能量收支、CO₂ 通量模拟研究. *应用气象学报*, 2004, 15(2): 129-140.
- [43] Liu J G, Hull V, Batistella M, DeFries R, Dietz T, Fu F, Hertel T W, Izaurralde 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.
- [44] Zheng H, Robinson B E, Liang Y C, Polasky S, Ma D C, Wang F C, Ruckelshaus M, Ouyang Z Y, Daily G C. Benefits, costs, and livelihood implications of a regional payment for ecosystem service program. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(41): 16681-16686.
- [45] Xu Z C, Chen X Z, Liu J G, Zhang Y, Chau S, Bhattarai N, Wang Y, Li Y J, Connor T, Li Y K. Impacts of irrigated agriculture on food-energy-water-CO₂ nexus across metacoupled systems. *Nature Communications*, 2020, 11: 5837.
- [46] Yao G, Hertel T, Taheripour F. Economic drivers of telecoupling and terrestrial carbon fluxes in the global soybean complex. *Global Environmental Change*, 2018, 50: 190-200.
- [47] Wang X, Fu M C. Coordination of the Industrial Relocation and the Cultural and Creative Industries in the Post-industrial Age in Beijing. *Proceedings of the 2016 International Conference on Management Science and Management Innovation*. August 13-14, 2016. Guilin, China. Paris, France: Atlantis Press, 2016.
- [48] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- [49] 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.
- [50] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. *中国科学基金*, 2021, 35(4): 504-509.
- [51] 朱金陵, 王志伟, 师新广, 杨树华, 何晓峰, 雷廷宙. 玉米秸秆成型燃料生命周期评价. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 262-266.

- [52] Smith N J, McDonald G W, Patterson M G. Biogeochemical cycling in the anthropocene: Quantifying global environment-economy exchanges. *Ecological Modelling*, 2020, 418: 108816.
- [53] 杨新吉勒图, 杨毕力格, 杨艳丽. 基于环境社会核算矩阵的内蒙古环境治理投入与经济发展的实证研究. *内蒙古工业大学学报: 自然科学版*, 2014, 33(1): 74-80.
- [54] Mario G, Kozo M, Jesus R M. Multi-scale integrated analysis of societal and ecosystem metabolism (MuSIASEM): theoretical concepts and basic rationale. *Energy*, 2009, 34(3): 313-322.
- [55] 韩文懿. 基于 MuSIASEM 与能值的特大城市代谢研究——以上海、东京为例[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [56] Ostrom E. A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science*, 2009, 325(5939): 419-422.
- [57] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会—生态系统适应性治理研究进展与展望. *地理学报*, 2019, 74(11): 2401-2410.
- [58] Gari S R, Newton A, Icely J D. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 103: 63-77.
- [59] Qu S, Hu S, Li W, Wang H, Zhang C, Li Q. Interaction between urban land expansion and land use policy: an analysis using the DPSIR framework. *Land Use Policy*, 2020, 99: 104856.
- [60] 赵俊楠, 夏爽, 霍丽娟, 杨改强. 基于 Citespace 的山水林田湖理念国内研究进展分析. *甘肃农业*, 2022(1): 94-98.
- [61] 张妹婷, 翟永洪, 张志军, 唐文家, 马燕, 聂学敏, 丁玲玲. 三江源区草地生态系统质量及其动态变化. *环境科学研究*, 2017, 30(1): 75-81.
- [62] 丁明军, 张懿铨, 刘林山, 王兆锋, 杨续超. 青藏高原植被覆盖对水热条件年内变化的响应及其空间特征. *地理科学进展*, 2010, 29(4): 507-512.
- [63] Simone F, Christoforos P, Valeriy Y I. Modeling plant-water interactions: an ecohydrological overview from the cell to the global scale. *WIREs Water*, 2016, 3(3): 327-368.
- [64] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78-85.
- [65] Zuo F L, Li X Y, Yang X F, Ma Y J, Shi F Z, Liao Q W, Li D S, Wang Y, Wang R D. Linking root traits and soil moisture redistribution under *Achnatherum splendens* using electrical resistivity tomography and dye experiments. *Geoderma*, 2021, 386: 114908.
- [66] Scott N A, Tate K R, Ford-Robertson J, Giltrap D J, Smith C T. Soil carbon storage in plantation forests and pastures: land-use change implications. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1999, 51(2): 326-335.
- [67] 陈艳华, 赖庆标. 探索“山水林田湖”生命共同体村庄综合整治之路——福建省长汀县南山下村和半坑村的创新实践. *中国土地*, 2017(1): 46-48.
- [68] 叶艳妹, 林耀奔, 刘书畅, 罗明. 山水林田湖草生态修复工程的社会-生态系统(SES)分析框架及应用——以浙江省钱塘江源头区域为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8846-8856.
- [69] 罗明, 周妍, 鞠正山, 魏洪斌, 张世文. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估——基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架. *生态学报*, 2019, 39(23): 8911-8919.
- [70] 李正, 赵林. 西北干旱区山水林田湖草沙系统治理研究实践 ——以塔里木河重要源流区为例. *中国国土资源经济*, 2022, 35(12): 13-18, 63.