

DOI: 10.5846/stxb202205171398

孙宝娣¹, 于德湖², 崔东旭^{2,*}. 流域生态系统服务和水土资源匹配研究进展. 生态学报, 2023, 43(10): 4308-4318.

Sun B D, Yu D H, Cui D X. A review of ecosystem services and water-land matching for the river basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4308-4318.

流域生态系统服务和水土资源匹配研究进展

孙宝娣¹, 于德湖², 崔东旭^{2,*}

¹ 青岛理工大学, 青岛 266033

² 山东建筑大学, 济南 250101

摘要: 生态系统服务精确评估和水土资源匹配状态, 对统筹流域山水林田湖草一体化保护和修复, 以及构建流域国土空间开发保护新格局具有深远影响。以生态系统服务与水土资源的响应关系为出发点, 系统梳理了流域生态系统服务评估及水土资源匹配研究现状。主要贡献包括: ①筛选大尺度生态系统服务评估精确性方法及其优势阐述; ②提出将信息熵理论与多目标优化相结合的水土资源匹配模型算法; ③指出基于系统耦合协调理论进行流域生态系统服务与水土资源响应机理研究的必要性。研究以期阐明流域生态系统服务与水土资源的关联性及其响应机制, 为最终实现流域“土地利用经济-生态效益最大、缺水总量最小”的过程目标导向和“生态系统服务效益最大”的结果目标导向, 提供理论支撑和技术指导。

关键词: 生态系统服务; 水土资源匹配; 尺度转换模型; 多目标优化; 系统耦合协调

A review of ecosystem services and water-land matching for the river basin

SUN Baodi¹, YU Dehu², CUI Dongxu^{2,*}

¹ Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China

² Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China

Abstract: Accurate assessment of ecosystem services and the matching state of water-land resources have a far-reaching influence on the integrated protection and restoration of “mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses” for the river basin, and the construction of a new pattern of territorially spatial development and protection for the river basin. Based on the response relationship between ecosystem services and water-land resources, this paper systematically reviewed the research status of ecosystem services assessment and water-land resources matching for the river basin. The main contributions of this paper include: (1) Screening accurate methods for large-scale ecosystem services assessment and their advantages; (2) Proposing the matching model algorithm of water-land resources combined the information entropy theory with the multi-objective optimization algorithm; (3) Pointing out the necessary for researchers to study the response mechanism of ecosystem services and water-land resources based on system coupling and coordination theory. This study aims to clarify the correlation between ecosystem services and water-land resources and its response mechanism, so as to provide theoretical support and technical guidance for the process goal orientation of “maximum economic-ecological benefits of land use, and minimum total water shortage” and the result goal orientation of “maximum benefits of ecosystem services” for the river basin.

Key Words: ecosystem services; water-land resources matching; scale transformation modeling; multi-objective optimization; system coupling and coordination

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1100801); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020QC027); 青岛市哲学社会科学规划项目 (QDSKL2101181); 山东省高等学校青年创新团队项目 (2022KJ161)

收稿日期: 2022-05-17; **采用日期:** 2023-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cdx0109@sdjzu.edu.cn

流域是典型的山水林田湖草有机生命体。作为统筹城乡发展的纽带,流域在构建国土空间开发保护新格局、防洪安全屏障、生态景观廊道等方面发挥重要作用。如何有效提升流域生态系统服务,精准识别流域“山水林田湖草生命共同体”内在机理和规律^[1],开展系统保护与修复是当前我国流域生态保护工作中亟待解决的问题。流域生态系统服务与水土资源存在响应关系(图1),即水资源与土地资源作为驱动因素影响生态系统服务变化,而生态系统服务的价值动态变化和趋势预测,会促进专家学者和流域管理者对水土资源格局做出新调整。生态系统服务是指基于受益人考虑,生态系统为人类以及各种生物提供赖以生存的环境条件和自然效益,即人类本身以及产生的活动能够从生态系统中获得的利益^[2],水资源和土地资源作为复合生态系统中自然系统的一部分,也会受到社会系统与经济系统的影响,是流域重要的生产和生活要素,也是人类赖以生存和发展的物质基础。水土资源合理分配及匹配是指对水资源和土地资源进行时间、空间上的安排、设计、组合和布局,以提高水土资源利用效益,实现水土资源的可持续利用^[3-4]。

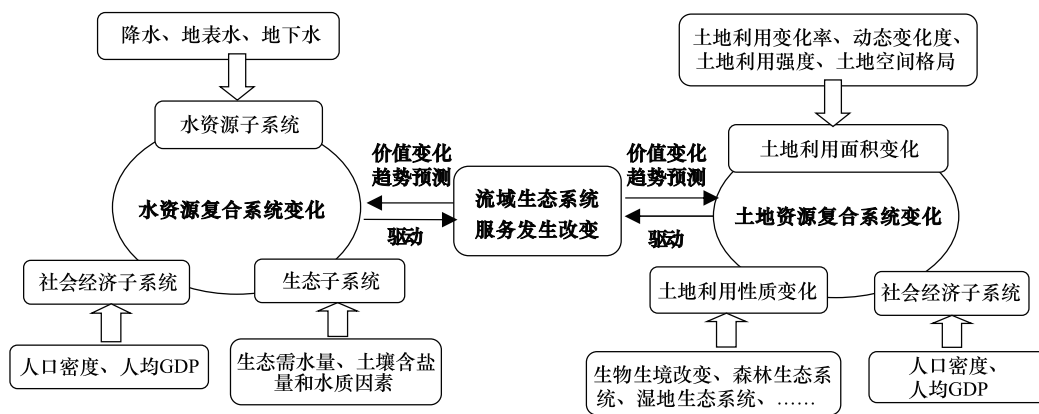


图1 流域生态系统服务与水土资源的响应关系图示

Fig.1 The map of response relationship between ecosystem services and water-land resources for the River Basin

其中,流域生态系统服务精确评估,可识别流域空间生态资源分布;水土资源匹配状态的确定对流域经济、政治、社会及生态环境的可持续发展具有深远影响^[5],即会驱动生态系统服务变化。深入开展流域生态系统服务与水土资源的耦合协调研究,是促进流域生态环境可持续发展的重要基础。

针对流域生态系统服务与水土资源已开展的研究,可归纳为三部分:①流域生态系统服务评估,采用生态系统服务分类体系和相应生态系统服务评估方法,如 Costanza 价值系数法^[6]、Glass 提出的 Meta 分析法^[7-8]、小波变换模型的探索与引入^[9-10],进行大尺度生态系统服务评估。②流域水资源或土地资源与生态系统服务关联性研究^[11],包括流域水资源与生态系统服务的关联研究^[12]、流域土地资源与生态系统服务的关联研究^[13]。③面向生态系统服务的水土资源匹配研究^[14],包括水资源配置、土地资源配置以及水土资源配置^[15],进而提升流域生态系统服务能力。

然而,仍有两个方面研究有待进一步探讨:一是流域尺度的生态系统服务评估方法选取和精确性验证,例如,较少从适用范围、对象属性以及结果精确性等方面对评估方法进行比较,导致难以精准识别生态空间资源分布,进而难以诊断生态敏感脆弱区及其成因。二是流域生态系统服务与水土资源耦合协调研究的深度和广度问题。深度即指构建科学量化的耦合协调模型,对生态系统服务与水土资源的内在关联性和响应机理进行的深入研究,广度即指研究的时空范围,应将流域生态系统与水土资源匹配进行耦合协调,从而对生态系统服务水平提升、实现“生态经济并重”目标导向的流域空间格局优化起到调控作用。

基于此,本文从流域生态系统服务评估、水土资源匹配模型算法、生态系统服务与水土资源耦合协调三个层面开展评述,着重分析了评估方法的精确性、水土资源匹配算法优化及其与生态系统服务的关联性等,指出了基于耦合协调理论的流域生态系统服务与水土资源利用响应机理研究的必要性,以期后续开展流域国土

空间开发保护新格局研究提供理论指导及决策支持。

1 生态系统服务评估的精确性研究

流域作为区域重要生态屏障,科学评估和精确量化其生态系统服务水平,识别流域生态系统质量、确定生态修复区域、构建生态安全格局,可以为构建可持续的山水林田湖草生命共同体提供可靠的建设方案。近年来,国内外学者多采用联合国“千年生态系统评估”的生态系统服务指标^[16-17],从供给、调节、支持和文化4方面对渭河流域^[18]、鄱阳湖流域^[19]、洞庭湖流域^[1]、闽江流域^[20]、延河流域^[21]、Jamuna River^[22]、Gulf of Kalloni^[23]、Ourika watershed^[17]、Pearl River^[24]等流域尺度的生态系统服务水平进行了评估。而在评估方法上介绍了 Costanza 价值系数法、Meta 分析法和小波变换模型等。

其中, Costanza 价值系数法,也称数值直接外推法^[25],来源于国外学者 Costanza 在 1997 年^[6]和 2008 年^[26]发表的关于全球尺度生态资产评估的理论体系和评估方法。由于其研究案例均来自于欧美发达国家,因此该方法的研究结论与发达国家的经济发展水平相适宜,对于发展中国家会产生生态系统服务评估价值偏高的现象。Glass 提出的 Meta 分析法^[8,27],通过调整函数来换算单位土地面积的生态系统服务价值,具有可重复操作、有效节约成本、评估程序简洁等优点。但该方法存在尺度转换中忽视空间异质性和缺乏空间非线性信息分析等问题,同时,限于时间和精力,国内研究大部分以小尺度案例作为数据基础,出现样本数量小、解释变量少、剔除不显著的变量和回归预测范围缩小等四种倾向,研究结论具有不确定性。

小波变换模型是多分辨率分析方法,具有良好的局部检测功能,适合表征数据变换的瞬态和奇异点特征,且保持频率特性品质因数恒定,常用于噪声祛除、多尺度趋势分析等地学和生态学过程。近年来,小波变换方法在生态水文参数的影响^[28]、湿地河岸线后退^[23]、沿海极端气温变化^[29]、湖泊富营养化^[30]、黄河流域径流变化与预测^[31]、鄱阳湖流域气候变化模式^[32]等研究中,体现了不同时空尺度下的变化程度、变化幅度、突变点以及周期等特点。

以李小梅^[33]和 Sun 等^[9]在生态系统评估中的研究为例,小波变换的研究思路是将大尺度数据原始信号(即流域)作为整体函数,亦即原始待分析函数,在对该函数进行近似分解(划分流域不同时空尺度的范围)基础上开展生态系统服务评估,进而通过叠加时空序列信号进行尺度上推和尺度重构,最终推演出流域尺度上生态系统服务的变换规律。Harr、Daubechies (DB)、Morlet、墨西哥帽等小波函数都有广泛的运用^[31,34-35],并依据研究因子的取值的尺度将小波变换划分为离散变换和连续变换两类,例如 Sun 等^[9]以空间连续采样方式对辽宁省域尺度的滨海湿地生态系统服务进行了评估,所以选取方法为连续小波变换模型。然而,我国流域干流、支流和水库等分布较为离散,空间异质性强,小波变换模型要达到更为精准的效果尚需考虑生态资源离散分布、空间异质性强的特征,并验证该方法可行性。

将小波变换研究思路和方法引入流域生态系统服务的量化分析和评估领域,具有较强的可行性。相比已有研究方法,小波变换模型方法的优势在于可将研究过程分解为三个步骤:①尺度分解,将流域生态地理空间局部化分解后,进行小尺度范围的生态系统服务评估,得出精确性的结果;②尺度扩展,将分解后的局部化生态地理空间进行尺度延伸,筛选适合小波函数识别适宜尺度的非线性空间;③尺度重构,即尺度上推,通过对“尺度分解”和“尺度扩展”的结果进行空间聚类 and 效果检验,对评价尺度进行层层上推,最终形成流域全尺度的生态系统服务核算和评估结论。小波变换分析的核心是“尺度分解-尺度扩展-尺度重构”的过程(图2),而在流域小尺度时空范围的研究中,科学筛选甄别小波函数权重和价值评估是构建离散型小波变换模型的重要技术环节。

鉴于流域干流、支流、水库等生态资源的空间特征既相互联系又离散分布,在后续研究中应积极加强离散型小波函数对生态系统服务评估精确性,通过不同地理单元数据的空间上推和检验,形成生态系统服务评估全流域尺度重构研究的理论框架,为科学识别生态空间资源分布进而诊断生态敏感脆弱区和开展生态保护修复提供技术支撑。

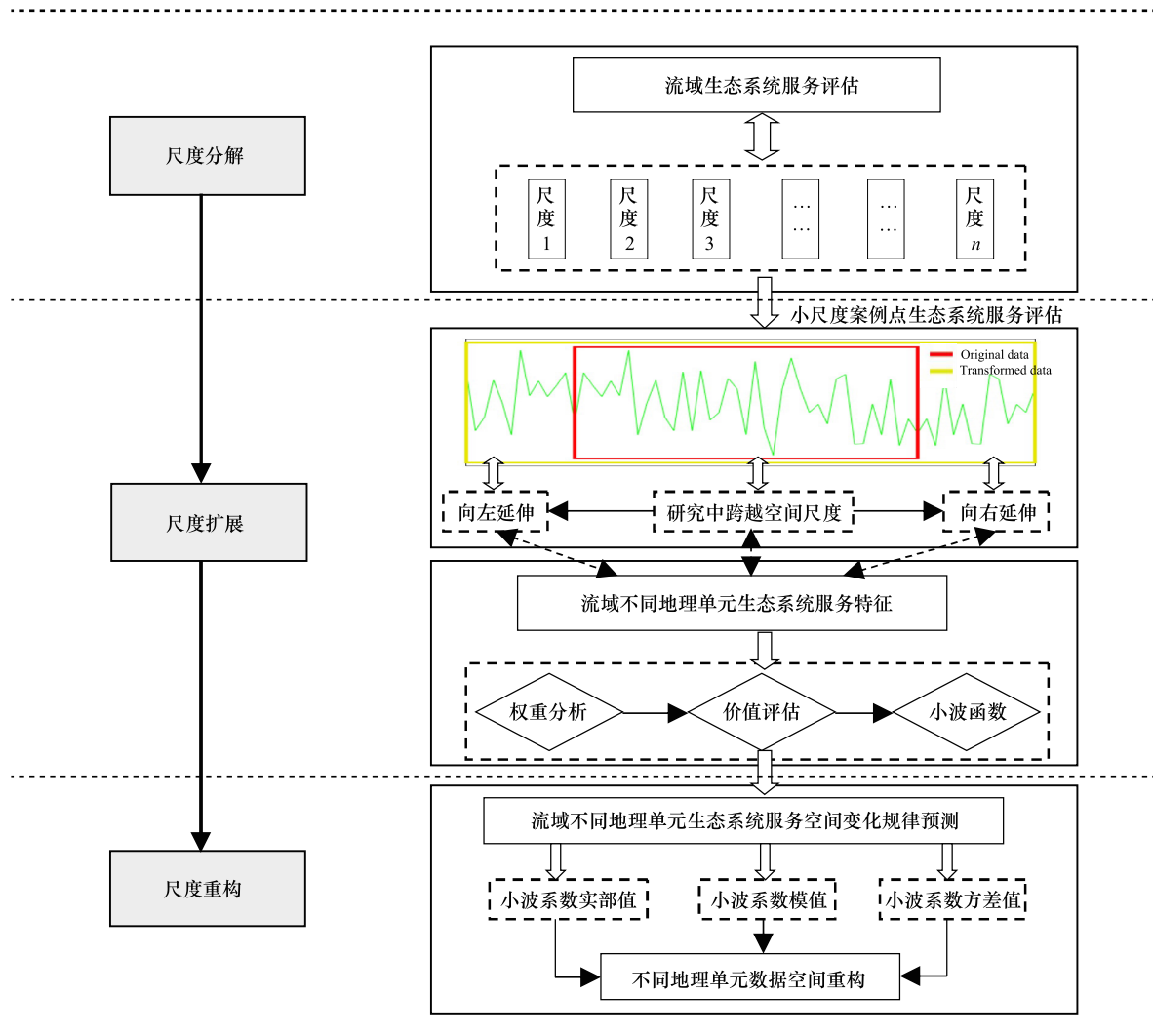


图 2 小波变换模型对流域空间尺度分解扩展重构过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of expansion and reconstruction process of spatial scale decomposition by wavelet transform modelling for the River Basin

2 流域水土资源匹配状态研究

作为生产和生活要素,“水资源、土地资源”是人类赖以生存和发展的物质基础^[36—37],其天然价值不言而喻。流域水土资源利用变化是生态系统服务变化的重要驱动力^[38],一些人类活动的结果,如水资源变化、用水结构、土地利用方式改变,都会引起生态系统服务结构和功能的变化。

水资源是指地下水、地表水和降雨等可资利用的水源,流域水资源则主要指河流的干流、支流可被利用的地表径流量和地下水,其合理配置包括在生态、生活与经济等方面的合理分配和使用。面对社会经济发展带来的用水需求增长和水资源匮乏、水生态环境下降之间的矛盾,越来越多的学者致力于研究水资源分配与生态环境的冲突与关联程度,包括量化地表水与地下水,通过评估水文整体状况分析水资源系统与生态环境系统的关系^[39];模拟地下水实时状态,并对水位进行控制,同时防止土地盐碱化^[40];通过响应曲面动态坐标搜索、灰色系统、不确定性分析等模型方法和虚拟水战略,结合生态用水规模和质量,进行水资源优化配置^[41—42];通过估算预留生态(含输沙)水量、下游南水北调及海水利用可替代黄河供水量及上中游部分产业发展需水,研究向黄河上中游分配更多水量指标的水资源战略配置方案,并提出完善水权转让与补偿制度、探

索用水指标与土地指标调控的联动机制^[43-44]。

土地资源主要通过土地利用面积变化、土地利用方式和土地利用空间格局 3 种方式,改变生物多样性、生态系统过程和变生境 3 种途径影响生态系统服务^[45-46]。所以,土地资源的重大变化通常会导致生态系统服务供应产生重大变化,其中,森林面积和生产力增加、农业集约化和生物能源生产的“剩余土地”,对生态系统服务变化是积极的或者说能够为生态系统服务能力提升提供机会;但若土壤肥力、水资源供应等生态系统供应减少,就会增加生态系统脆弱性,特别是在沿海和山区地带^[47]。近年来,越来越多的学者借助空间分析技术结合生态系统服务价值系数评估方法^[3,9,48],分析生态系统服务价值时空变化,以约束函数和转化规则为条件,优化土地数量结构和空间格局配置,改善和提高城乡生态系统服务价值。

目前,单一优化(面向生态环境功能的水资源格局优化或土地资源格局优化)居多,总体优化(水土资源总体优化配置)较少。而流域水资源和土地资源相互影响和渗透、且相互制约,水资源利用合理与否,直接影响土地资源的生产效率;而土地资源的利用程度同样也制约着水资源的利用。因此需要探索水、土资源配置同时达到优化的研究方法,以实现真正意义上的水土资源优化配置。

现有的区域水土资源匹配格局研究方法,多采用基尼系数法或农业水土资源匹配系数测算模型表征水土资源时空匹配程度,包括对中亚各国^[49]、黄河三角洲^[50]、挠力河流域^[51]、山东省各地级市^[52]、the Gharehsoo River Basin^[53]、the Oder River Basin^[54]的水土资源匹配状况进行测算。上述两种方法通过农业用水资源量和耕地面积的量比关系进行水土资源匹配系数的测算,并未纳入生态水土资源匹配。而近年来引入的信息熵理论则可以同时考虑农业和生态的用水用地^[55]。具体纳入生态环境用水和生态用地的水土资源空间匹配格局测算示意图见图 3。信息熵的概念最早由美国数学家 Shannon^[56] 提出并使用,随后在生态学^[57]、景观设计学^[58]、土地资源科学^[59]等多领域广泛应用。“熵”源于热力学概念,在信息论中主要用于度量信息的无序度并表征系统的演变特征,即衡量系统的信息量、稳定程度和不确定性。如将信息熵理论(纳入生态的用水用地)结合神经网络模型、粒子群优化算法、多目标线性规划模型等方法(多目标优化算法),将“生态系统服务效益最大”作为结果目标函数、“土地利用经济-生态效益最大、缺水总量最小”作为过程目标函数,通过调整耕地、生态用地、农业用水和生态环境用水的分配比例,迭代产生一组非劣解即 Pareto 最优解集^[60-61],各解之间均不存在支配关系,相互独立,为决策管理者对流域水土资源优化提供方法支撑。

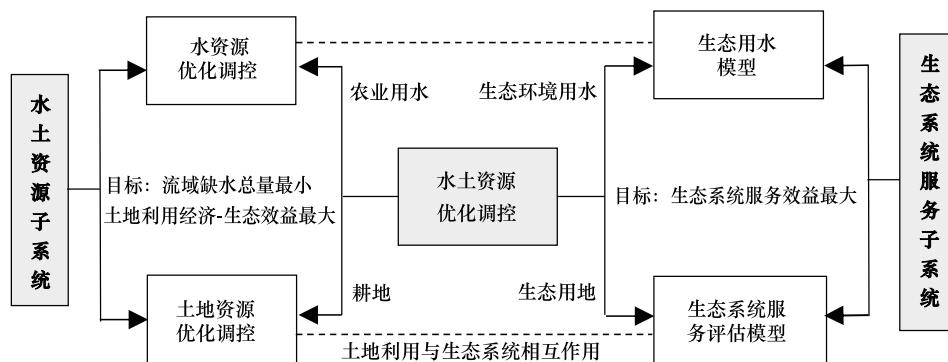


图 3 考虑生态环境用水和生态用地的水土资源优化配置图

Fig.3 Optimal allocation of water -land resources considering ecological water-land

其中,结果目标函数中的“生态系统服务效益”是指纳入流域经济、生态和社会等要素所产生的综合生态系统服务并进行量化表征。过程目标函数中的“土地利用的经济-生态效益”是指以土地利用结构与生态系统服务响应机制为基础,结合国土空间“三区三线”约束条件,表征土地利用过程中产生的经济效益和生态效益,为土地资源空间格局优化调控提供理论支撑。土地利用的经济效益是指目标年 GDP 总量来表征各项用地的单位经济产出;土地利用的生态效益是指土地利用过程对整个区域内生态系统平衡所造成的影响,进而

对人类的生活和生产环境产生的影响效应,以量化包括植被覆盖率、土壤肥力保持等在内的生态价值来表征各项用地的单位生态效益产出。此外,土地利用的社会效益是指在人口总量的约束下,涉及的经济效益、人民生活水平、社会文化以及社会保障等,但鉴于社会因素存在难以具体量化的客观事实,最终以“土地利用的经济效益最大、生态效益最大”为目标函数。

综合生态系统服务评估和流域水土资源空间格局优化配置研究,可看出目前的研究多集中在 1 个子系统(生态系统或水资源系统或土地资源系统)和 2 个子系统之间(水资源和土地资源系统、水资源和生态系统、土地资源和生态系统),相关研究总结见表 1,缺少将流域生态系统服务与水资源、土地资源 3 个子系统同时进行研究。

表 1 流域生态系统服务与水土资源匹配研究总结

Table1 Summaries of research on optimal allocation of water-land resources for ecosystem

参考文献 References	发表时间 Published time	研究对象 Research objects	子系统数量 Number of subsystems	备注 Notes
Schröter 等 ^[47]	2005 年	生态系统服务及其脆弱性研究	1	生态系统
Rost 等 ^[39]	2008 年	农业绿色、蓝色水的消耗及其对全球水系统的影响	1	水资源系统
栗晓玲等 ^[40]	2016 年	耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置	1	水资源系统
孔令桥等 ^[1]	2019 年	基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复	1	生态系统
Taie 等 ^[53]	2019 年	伊朗 Gharehsoo 流域地表-地下水的的作用机制	1	水资源系统
何改丽等 ^[55]	2019 年	美国坦帕湾流域土地开发利用强度研究	1	土地资源系统
Marszelewski 等 ^[54]	2020 年	中欧 Oder 流域水资源管理研究	1	水资源系统
杨超等 ^[59]	2021 年	广东省土地利用空演变特征分析	1	土地资源系统
姚海娇等 ^[49]	2013 年	中亚地区水土资源匹配研究	2	水资源系统、土地资源系统
王薇等 ^[50]	2014 年	黄河三角洲水土资源研究	2	水资源系统、土地资源系统
王军等 ^[45]	2015 年	土地利用变化与生态系统服务的影响关系研究	2	生态系统、土地资源系统
李晨洋等 ^[42]	2017 年	考虑生态的灌区水资源区间两阶段随机规划模型建立与应用	2	生态系统、水资源系统
Maharjan 等 ^[46]	2017 年	土地利用与土壤生态的影响关系	2	生态系统、土地资源系统
Chen 等 ^[57]	2019 年	中国土地利用/覆被变化与生态系统服务的空间关联研究	2	生态系统、土地资源系统
张莹等 ^[51]	2019 年	挠力河流域水土资源匹配研究	2	水资源系统、土地资源系统
李晓燕等 ^[52]	2020 年	山东省农业水土资源匹配研究	2	水资源系统、土地资源系统
贾绍凤等 ^[43]	2020 年	新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究	2	生态系统、水资源系统
孙梦华等 ^[48]	2021 年	黄河流域土地利用与生态系统服务的影响关系	2	生态系统、土地资源系统

3 流域生态系统服务与水土资源系统耦合协调研究

系统耦合协调理论,集“系统”、“耦合”与“协调”于一体。“系统”即流域整体概念,研究流域的系统、要素和环境三者相互关系及其动态规律,强调整体和局部、局部和局部、系统本身和外部环境的依存和制约的影响关系。“耦合”源于物理学概念,主要是指通过流域子系统间的良性互动,实现动态关联。“协调”是以实现系统总体演进为目标,流域两个或多个动态关联的系统之间相互协作、互为促进的一种良性循环态势及其控制过程。“系统耦合协调”研究流域内部序参量之间的协同作用,体现系统由无序向有序的变化特征。

自 20 世纪 80 年代,中国工程院院士任继周将“系统耦合”引入到农业科学研究中^[62-63],逐渐被广泛应用于经济社会及环境研究领域,包括“环境-经济”二维耦合视角^[64]、“环境-经济-社会”复合系统耦合视角等^[65-66]。系统耦合协调研究是区域或流域资源、经济与生态环境协调可持续发展的热点问题和趋势性问题,目前在流域资源利用(包括水资源、土地资源等)与其生态环境耦合协调研究领域,如何对流域有限的水土地

资源与生态系统服务进行耦合协调,探明流域生态环境与水土资源的系统耦合协调机理,进而提出以“生态系统服务效益发挥最大化、土地利用经济-生态效益最大化和区域缺水总量最小化”多目标为导向的流域水土资源空间格局优化调控路径是当前存在的难题,同时也可构建流域水土资源空间开发保护新格局提供新视角。

纳入生态环境用水和生态用地进行水土资源空间格局优化,可作为联系水土资源与生态环境的桥梁,寻求“生态系统服务效益最大化、土地利用经济效益-生态效益最大化、区域缺水总量最小化”生态经济并重的流域水土资源空间格局最优配置方案。目前,国内外学者大多分别从水资源或土地资源与生态环境的耦合关系进行研究。如 Rost 等^[39]、高奇等^[41]、李晨洋等^[42]等研究水资源与生态系统耦合关联的关系。Schröter 等^[47]、欧阳志云等^[1]、Barros 等^[67]、Bussi 等^[68]、李胜鹏等^[69]等研究土地资源与生态系统的耦合关联关系。缺少基于“系统耦合协调”理论将流域生态系统服务与水土资源空间分布格局相关联的深入研究,造成现有流域“生态系统服务效益最大、土地利用经济-生态效益最大、缺水总量最小”多目标优化调控效果不明显。

此外,现有的耦合关系研究仅是一种简单相关性研究,如 Rost 等^[39]通过量化地表水与地下水,评估水资源对农业以及非农业陆地生态系统的影响;Polasky 等^[70]研究水体质量下降对生态系统服务价值的影响;王洁等^[71]通过模拟重要生态廊道的结构,研究廊道土地利用格局与生态系统服务价值的耦合关系。乔斌等^[72]基于 3km×3km 网格单元,对青海玛多县土地利用与生态系统服务价值进行空间自相关分析;李胜鹏等^[69]基于土地利用情景,对福建省 2000—2026 年的生态经济系统协调度进行时空演变模拟。仍缺乏运用精确量化表达的系统耦合协调度模型对流域生态系统服务与水土资源进行研究。今后研究可通过格兰杰因果检验法^[73—75]、灰色系统原理^[76—77]和目标函数^[78—79]等方法 and 原理,对生态系统服务与水土资源的关联性和响应机理进行研究。具体研究步骤示意图见图 4。

4 结论与展望

4.1 结论

精确诊断生态空间资源分布进而识别生态敏感脆弱问题的成因,优化调控流域“生态系统服务、水资源、土地资源”多目标耦合效果,对开展流域系统保护修复和有效提升流域生态系统服务具有深远意义。本文系统梳理了流域生态系统服务评估及水土资源匹配研究,主要结论如下:

(1) 构建精准复杂的离散型尺度转换模型,是目前科学识别诊断流域尺度生态敏感脆弱区的技术瓶颈。需探索基于“尺度分解—尺度扩展—尺度重构”研究思路,加强离散型小波变换模型对生态系统服务精确性评估和可行性验证。

(2) 流域水土资源时空格局配置优化研究,需纳入生态环境用水和生态用地,并采用信息熵理论结合神经网络和多目标函数等方法进行。

(3) 需基于系统耦合协调理论,开展流域“生态系统服务-水资源-土地资源”多系统耦合协调及优化调控研究,实现“生态经济并重”的流域空间格局构建。

4.2 展望

基于现有研究和亟待解决的问题,流域生态系统服务与水土资源匹配研究可从以下 3 方面进一步发展:

(1) “尺度分解—尺度扩展—尺度重构”是流域生态系统服务量化核算和评估的基础,其中“尺度分解”是重点。如何进行尺度分解应充分考虑自然要素、功能要素、社会要素在空间上的反映,也应加强全流域视角下水土资源利用的生态效应研究,针对不同效应将流域上中下游分散研究^[80],通过综合集成和系统化识别流域生态保护战略点(夹点和障碍点),提高流域水土资源利用变化整体生态效应的集成研究水平。

(2) 服务流域高质量发展,突出提升生态系统服务质量和水土资源优化配置的同时,加强与社会、经济、文化等外部要素的协调共生^[81],进而探索和揭示流域生态保护与高质量发展耦合协调的客观规律、驱动因素、发展效应和机制设计。今后研究以“生态系统服务效益最大”作为结果目标导向、“土地利用经济-生态效

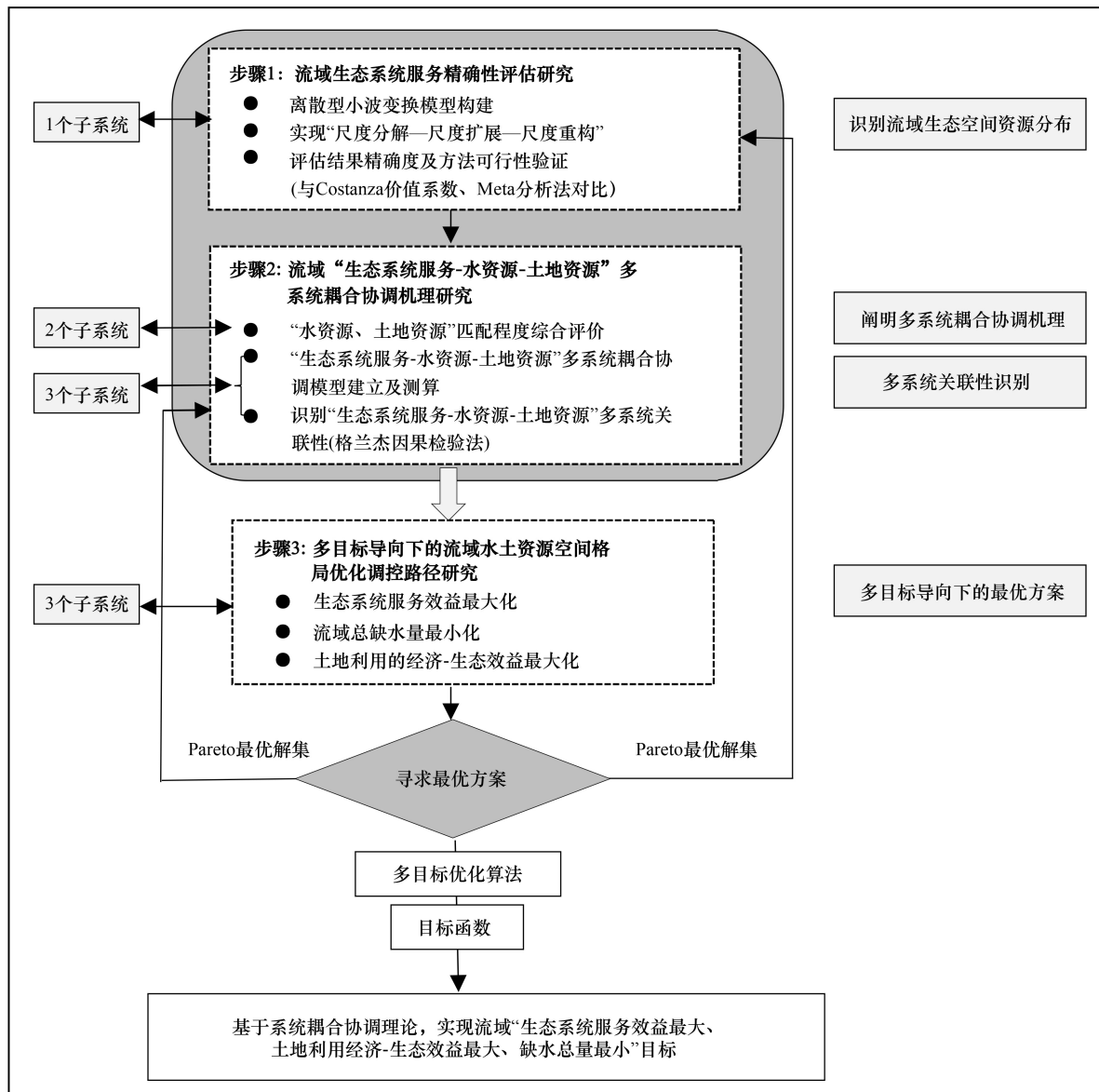


图4 流域“生态系统服务-水资源-土地资源”多系统耦合协调及优化调控示意图

Fig.4 Schematic diagram of multi-system coupling coordination and optimization regulation of "ecosystem services, water resources, land resources" in the River Basin

益最大、缺水总量最小”作为过程目标导向,统筹优化流域生产生活生态的用水用地结构。坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产,合理规划人口、城市和产业发展,加强流域水土资源、生态环境与经济高质量发展的协同共享,实现流域生态环境保护与高质量发展的耦合协调。

(3)体现“以人民为中心”的发展新理念,服务构建流域生态空间新格局。基于“地理识别-社会认同-治理可行”三个层次^[82],探索“地理-社会-治理”多层一体的流域空间治理路径;推进流域生态空间重组,即充分认识流域生态空间一体化保护和环境协同化治理的作用,优化生态空间布局进而对流域生态空间重构和生态资源重组。

此外,本论文以流域生态系统服务与水土资源(自然资源的重要组成部分:水是生命之源,土是生存之本)匹配研究,今后研究可进一步围绕生态系统多功能中的主导功能表征—生态系统服务簇^[83],研究其空间和功能变化及其更多的影响因素,并统筹流域水土资源多功能性,以期最终能实现理论和技术的差异化复制

推广,为整体提升区域或流域生态系统服务提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 孔令桥, 郑华, 欧阳志云. 基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复——以洞庭湖流域为例. 生态学报, 2019, 39(23): 8903-8910.
- [2] 刘洋, 毕军, 吕建树. 生态系统服务分类综述与流域尺度重分类研究. 资源科学, 2019, 41(7): 1189-1200.
- [3] Sun B D, Tang J C, Yu D H, Song Z W. Coupling coordination relationship between ecosystem services and water-land resources for the Daguhe River Basin, China. *PLoS One*, 2021, 16(9): e0257123.
- [4] 褚钰. 考虑用水主体满意度的流域水资源优化配置研究. 资源科学, 2018, 40(1): 117-124.
- [5] 张弛, 王明君, 于冰, 周惠成, 李昱. 松辽流域水资源综合调控研究进展与四大难题探究. 水利学报, 2021, 52(11): 1379-1388.
- [6] 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. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [7] Glass G V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. *Educational Researcher*, 1976, 5(10): 3-8.
- [8] Sun B D, Cui L J, Li W, Kang X M, Pan X, Lei Y R. A meta-analysis of coastal wetland ecosystem services in Liaoning Province, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 349-358.
- [9] Sun B D, Cui L J, Li W, Kang X M, Zhang M Y. A Space-Scale Estimation Method based on continuous wavelet transform for coastal wetland ecosystem services in Liaoning Province, China. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 157: 138-146.
- [10] Sun B D, Lei Y R, Cui L J, Li W, Kang X M, Zhang M Y. Addressing the modelling precision in evaluating the ecosystem services of coastal wetlands. *Sustainability*, 2018, 10(4): 1136.
- [11] Maes J, Barbosa A, Baranzelli C, Zulian G, Silva F B E, Vandecasteele I, Hiederer R, Liquete C, Paracchini M L, Mubareka S, Jacobs-Crisioni C, Castillo C P, Lavallo C. More green infrastructure is required to maintain ecosystem services under current trends in land-use change in Europe. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 517-534.
- [12] 杨海乐, 危起伟, 陈家宽. 基于选择容量价值的生态补偿标准与自然资源资产价值核算——以珠江水资源供应为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3218-3228.
- [13] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [14] Saskia, Keesstra. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2018, 610/611: 997-1009.
- [15] Vila-Garcia D, Morat J, Prez-Maussan A I, Santilln-Carvantes P, Alvarado J, Comn F A. Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Ro Grande de Comitn-Lagos de Montebello watershed, Mexico. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101179.
- [16] Assessment M E. *Ecosystems and human well-being*. Washington, D.C.: Island Press, 2005.
- [17] Kusi K K, Khattabi A, Mhammdi N, Lahssini S. Prospective evaluation of the impact of land use change on ecosystem services in the Ourika watershed, Morocco. *Land Use Policy*, 2020, 97: 104796.
- [18] 陈登帅, 李晶, 杨晓楠, 刘岩. 渭河流域生态系统服务权衡优化研究. 生态学报, 2018, 38(9): 3260-3271.
- [19] 于秀波, 夏少霞, 何洪林, 鄢帮有, 方豫. 鄱阳湖流域主要生态系统服务综合监测评估方法. 资源科学, 2010, 32(5): 810-816.
- [20] 兰紫橙, 贾岚, 程煜. 闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系. 生态学报, 2020, 40(12): 3909-3920.
- [21] 房平, 马云, 申杰, 张泽. 延河流域水生态环境存在问题及对策. 人民黄河, 2022, 44(1): 80-82, 88.
- [22] Mount N J, Tate N J, Sarker M H, Thorne C R. Evolutionary, multi-scale analysis of river bank line retreat using continuous wavelet transforms; Jamuna River, Bangladesh. *Geomorphology*, 2013, 183: 82-95.
- [23] Theodoros C, Ourania T, Cooper D M, Maria-Adamantia E, B Vassilis. Ecosystem service evaluation of streams for nutrient and bacteria purification in a grazed watershed. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2017, 26(12A): 7849-7859.
- [24] Liu W, Zhan J, Zhao F, Wang C, Zhang F, Teng Y M, Chu X, Kumi M. Spatio-temporal variations of ecosystem services and their drivers in the Pearl River Delta, China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 337: 130466.
- [25] 孙宝娣, 崔丽娟, 李伟, 康晓明, 张曼胤. 湿地生态系统服务价值评估的空间尺度转换研究进展. 生态学报, 2018, 38(8): 2607-2615.
- [26] Costanza R. Ecosystem services: multiple classification systems are needed. *Biological Conservation*, 2008, 141: 350-352.
- [27] Chaikumbung M, Doucouliagos H, Scarborough H. The economic value of wetlands in developing countries: a meta-regression analysis. *Ecological Economics*, 2016, 124: 164-174.
- [28] 李兴华, 武文杰, 张存厚, 郭瑞清. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 114-119.

- [29] 王晓利, 侯西勇. 1961—2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析. *生态学报*, 2017, 37(21): 7098-7113.
- [30] 潘佳敏, 冯禹昊, 谢平, 方精云. 基于小波—神经网络耦合模型对云南星云湖富营养化气象驱动因子的分析. *湖泊科学*, 2021, 33(2): 428-438.
- [31] 范玉龙, 胡楠, 丁圣彦. 小浪底大坝运行前后黄河径流变化与预测研究. *中国农村水利水电*, 2022(1): 64-70.
- [32] 李克诚, 陆建忠, 张可睿, 陆呈瑜, 陈璞, 袁明坤. 基于改进 U-Net 的 CMIP5 全球气候模式降尺度方法及其在鄱阳湖流域的应用. *湖泊科学*, 2022, 34(1): 320-333.
- [33] 李小梅, 沙晋明, 连江龙. 基于小波变换的 NDVI 区域特征尺度. *生态学报*, 2010, 30(11): 2864-2873.
- [34] 李双成, 赵志强, 高江波. 基于空间小波变换的生态地理界线识别与定位. *生态学报*, 2008, 28(9): 4313-4322.
- [35] Ezzati R, Sadatrasoul S M. On numerical solution of two-dimensional nonlinear Urysohn fuzzy integral equations based on fuzzy Haar wavelets. *Fuzzy Sets and Systems*, 2017, 309: 145-164.
- [36] 苏贤保, 李勋贵, 赵军峰. 水资源-水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究. *资源科学*, 2018, 40(5): 1016-1025.
- [37] Kolinjivadi V, Adamowski J, Kosoy N. Recasting payments for ecosystem services (PES) in water resource management: a novel institutional approach. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 144-154.
- [38] Wardrop D H, Glasmeier A K, Peterson-Smith J, Eckles D, Ingram H, Brooks R P. Wetland ecosystem services and coupled socio-economic benefits through conservation practices in the Appalachian Region. *Ecological Applications*, 2011, 21(sp1): S93-S115.
- [39] Rost S, Gerten D, Bondeau A, Lucht W, Rohwer J, Schaphoff S. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research*, 2008, 44(9): 137-148.
- [40] 栗晓玲, 宋悦, 刘俊民, 党永仁, 田智. 耦合地下水模拟的渠井灌区水资源时空优化配置. *农业工程学报*, 2016, 32(13): 43-51.
- [41] 高奇, 师学义, 张琛, 张美荣, 马桦薇. 县域农业生态环境质量动态评价及预测. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 228-237, 293.
- [42] 李晨洋, 于伟铭, 陈正锐, 曹梦珂, 郭婷婷. 考虑生态的灌区水资源区间两阶段随机规划模型建立与应用. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 105-114.
- [43] 贾绍凤, 梁媛. 新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究. *资源科学*, 2020, 42(1): 29-36.
- [44] 陈琛, 郭甲嘉, 沈大军. 黄河流域水量分配和再分配. *资源科学*, 2021, 43(4): 799-812.
- [45] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 798-808.
- [46] Maharjan M, Sanaullah M, Razavi B S, Kuzyakov Y. Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113: 22-28.
- [47] Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice I C, Araújo M B, Arnell N W, Bondeau A, Bugmann H, Carter T R, Gracia C A, de la Vega-Leinert A C, Erhard M, Ewert F, Glendinning M, House J I, Kankaanpää S, Klein R J T, Lavorel S, Lindner M, Metzger M J, Meyer J, Mitchell T D, Reginster I, Rounsevell M, Sabatés S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes M T, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B. Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752): 1333-1337.
- [48] 孙梦华, 牛文浩, 张蚌蚌, 耿庆玲, 于强. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应——以陕甘宁地区为例. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3913-3922.
- [49] 姚海娇, 周宏飞, 苏凤春. 从水土资源匹配关系看中亚地区水问题. *干旱区研究*, 2013, 30(3): 391-395.
- [50] 王薇, 吕宁江, 王昕, 孙力. 黄河三角洲水土资源空间匹配格局探析. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 66-70.
- [51] 张莹, 雷国平, 张弘强, 林佳. 微观尺度分析挠力河流域耕地利用水土资源匹配时空动态. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 185-194.
- [52] 李晓燕, 郝晋琨, 陈爱琪. 山东省农业水土资源时空匹配格局及评价研究. *中国农业大学学报*, 2020, 25(11): 1-11.
- [53] Semirami M T, Koch M. Analysis of spatio-temporal variability of surface-groundwater interactions in the Gharehsoo River Basin, Iran, using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(6): 201.
- [54] Marszelewski W, Piasecki A. Changes in water and sewage management after communism: example of the Oder River Basin (central Europe). *Scientific Reports*, 2020, 10: 6456.
- [55] 何改丽, 李加林, 刘永超, 史小丽, 马静武, 浦瑞良, 郭乾东, 冯佰香, 黄日鹏. 1985—2015 年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析. *自然资源学报*, 2019, 34(1): 66-79.
- [56] Elwood Shannon C, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [57] Chen W X, Chi G Q, Li J F. The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the County level in China, 1995-2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 459-470.
- [58] Rescia A J, Bárbara A W, María F S, Aguilera P A. Changes in land uses and management in two Nature Reserves in Spain: Evaluating the socio-ecological resilience of cultural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2010, 98(1): 26-35.
- [59] 杨超, 张少伟, 陈万旭, 钟明星. 广东省土地利用结构信息熵时空演变特征分析. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 251-259.
- [60] Lin J C W, Lv Q, Yu D H, Srivastava G, Chen C H. Adaptive particle swarm optimization model for resource leveling. *Evolving Systems*, 2022: 1-

12.

- [61] Yu D H, Lv Q, Srivastava G, Chen C H, Lin J C W. Multiobjective evolutionary model of the construction industry based on network planning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(2): 2173-2182.
- [62] 任继周. 草地生态系统及我国南方草地开发问题. *大自然探索*, 1985(4): 5-10.
- [63] 任继周, 万长贵. 系统耦合与荒漠—绿洲草地农业系统——以祁连山—临泽剖面为例. *草业学报*, 1994, 3(3): 1-8.
- [64] Wang R, Cheng J, Zhu Y, Lu P. Evaluation on the coupling coordination of resources and environment carrying capacity in Chinese mining economic zones. *Resources Policy*, 2017, 53: 20-25.
- [65] 易平, 方世明. 地质公园社会经济与生态环境效益耦合协调度研究——以嵩山世界地质公园为例. *资源科学*, 2014, 36(1): 206-216.
- [66] Cui D, Chen X, Xue Y, Li R, Zeng W. An integrated approach to investigate the relationship of coupling coordination between social economy and water environment on urban scale: A case study of Kunming. *Journal of Environmental Management*, 2019, 234: 189-199.
- [67] Barros C, Guéguen M, Douzet R, Carboni M, Boulangeat I, Zimmermann N E, Münkemüller T, Thuiller W. Extreme climate events counteract the effects of climate and land-use changes in Alpine treelines. *The Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(1): 39-50.
- [68] Bussi G, Whitehead P G, Gutiérrez-Cánovas C, Ledesma J L J, Ormerod S J, Couture R M. Modelling the effects of climate and land-use change on the hydrochemistry and ecology of the River Wye (Wales). *The Science of the Total Environment*, 2018, 627: 733-743.
- [69] 李胜鹏, 柳建玲, 林津, 范胜龙. 基于土地利用情景的福建省生态经济系统协调度时空演变模拟. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 234-241.
- [70] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: a case study in the state of Minnesota. *Environmental and Resource Economics*, 2011, 48(2): 219-242.
- [71] 王洁, 李锋, 钱谊, 殷春雪. 基于生态服务的城乡景观生态安全格局的构建. *环境科学与技术*, 2012, 35(11): 199-205.
- [72] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 肖建设, 扎西拉旦, 颜玉倩, 陈国茜, 史飞飞. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [73] 范传棋, 范丹. 格兰杰因果检验中不同检验方法的功效比较. *统计与决策*, 2017(23): 9-13.
- [74] 郑鹏, 马耀峰, 王洁洁, 李天顺. 基于格兰杰因果检验的陕西省国际旅游消费与地区经济增长关系研究. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(12): 190-195.
- [75] Ega B, Jbh C, Km D. Testing a large set of zero restrictions in regression models, with an application to mixed frequency Granger causality. *Journal of Econometrics*, 2020, 218(2): 633-654.
- [76] Nguyen N T, Le V A B, Tran T T. Vietnamese real estate corporations' performance using the hybrid model of data envelopment analysis and grey system theory. *Neural Computing and Applications*, 2021, 33(24): 17209-17222.
- [77] Joanna M, Marek G, Wadysław M. The concept of the quality and grey system theory application in marketing information quality cognition and assessment. *Central European Journal of Operations Research*, 2020, 28(2): 817-840.
- [78] 陈秀秀, 叶盛, 洪艳艳, 潘海龙, 冉启华. 黄河骨干水库水沙调度的目标函数构建和应用. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 727-739.
- [79] Lyakhov K A, Pechen' A N. Objective function in the problem of optimal laser-assisted separation of isotopes by the method of selective retardation of condensation. *Journal of Mathematical Sciences*, 2021, 252(1): 60-64.
- [80] 陈琼, 张懿锂, 刘峰贵, 周强, 汪生珍, 成艺, 郭蓉, 支泽民, 许震戈. 黄河流域河源区土地利用变化及其影响研究综述. *资源科学*, 2020, 42(3): 446-459.
- [81] 刘曙光, 许玉洁, 王嘉奕. 江河流域经济系统开放与可持续发展关系——国际经典案例及对黄河流域高质量发展的启示. *资源科学*, 2020, 42(3): 433-445.
- [82] 乔杰, 洪亮平, 迈克·克朗, 李晓峰. 乡村小流域空间治理: 理论逻辑、实践基础和实现路径. *城市规划*, 2021, 45(10): 31-44, 77.
- [83] 潘莹, 郑华, 易齐涛, 李若男. 流域生态系统服务簇变化及影响因素——以大清河流域为例. *生态学报*, 2021, 41(13): 5204-5213.