

将生态系统服务权衡纳入南四湖流域水环境管理的研究

胡欣琪^{1,2}, 王国强³, 苏 洁^{4*}, 王红旗^{2*}, 宋永会⁴, 朱 宜², 王海华¹

1. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875

4. 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: 生态系统服务是维持与影响流域水环境的重要因素, 促进生态系统服务之间的积极协同, 避免消极权衡, 对于流域水环境管理和可持续发展具有重要意义。针对南四湖流域水环境的突出问题, 以流域农业经济与水环境可持续发展为目标, 量化评估了 2005—2020 年流域关键生态系统服务 (作物供给、畜禽供给、水产供给、产水量、水质净化、土壤保持) 的时空特征, 并综合运用相关性分析和偏最小二乘回归方法, 探讨了生态系统服务间的权衡关系, 识别了流域水质净化服务的关键驱动因素, 并基于 K-means 空间聚类方法进行流域生态功能分区。结果表明: ①作物供给服务的高值区主要集中在流域西部的平原地区, 而产水量和土壤侵蚀的高值区, 以及总氮输出的低值区则主要分布在流域东部的山地丘陵地区。②南四湖流域作物供给与水质净化服务为显著的权衡关系。③农作物播种面积、农业机械总动力和化肥施用量是影响流域水质净化服务的关键驱动因素。④流域可划分为 3 个生态功能分区, 即农产品主产区、生态涵养区 and 水质安全区, 各分区对于农业发展和生态保护的侧重各有所不同。针对南四湖流域作物供给服务与水质净化服务间的显著权衡关系, 亟需加强利益相关部门的协作, 衔接主体功能区划与生态环境分区管控, 实施经济与水环境可持续发展的空间规划。通过优化调控各分区种植规模、结构及施肥方式等, 可以在提升流域经济效益的同时减少氮输出, 协调生态系统服务的权衡关系, 为流域水环境综合管理和可持续发展提供决策支持。

关键词: 生态系统服务; 水环境; 权衡关系; 驱动因素; 南四湖流域

中图分类号: X524

文章编号: 1001-6929(2024)12-2722-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.09.10

Incorporating Ecosystem Service Trade-Offs into Water Environment Management Research in the Nansihu Lake Basin

HU Xinqi^{1,2}, WANG Guoqiang³, SU Jie^{4*}, WANG Hongqi^{2*}, SONG Yonghui⁴, ZHU Yi², WANG Haihua¹

1. Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Ecosystem services play a crucial role in maintaining and influencing the water environment within a basin. Promoting positive synergies between ecosystem services and avoiding negative trade-offs are of significant importance for watershed water environment management and sustainable development. To address the significant water environment issues in the Nansi Lake Basin, and with the goal of achieving sustainable development of agricultural economy and water environment of the basin, the spatiotemporal characteristics of multiple ecosystem services (crop supply, livestock supply, aquatic supply, water yield, water purification, soil conservation) from 2005 to

收稿日期: 2024-04-21

修订日期: 2024-08-26

作者简介: 胡欣琪 (1988-), 女, 湖北随州人, 助理研究员, 博士, 主要从事水资源调查研究, huxinqi@mail.cgs.gov.cn

* 责任作者: ①苏洁 (1986-), 女, 山西侯马人, 工程师, 博士, 主要从事流域水环境研究, su.jie@craes.org.cn; ②王红旗 (1960-), 男, 浙江义乌人, 教授, 博士, 博导, 主要从事污染土壤修复、流域水环境研究, amba@bnu.edu.cn

基金项目: 中国地质调查项目“自然资源情报跟踪与研究”(No.DD20221794); 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目 (No.2022-YRUC-01-050204); 国家自然科学基金项目 (No.52470214)

Supported by China Geological Survey Project ‘Natural Resource Intelligence Tracking and Research’ (No.DD20221794); Joint Research Program for Ecological Conservation and High Quality Development of the Yellow River Basin, China (No.2022-YRUC-01-050204); National Natural Science Foundation of China (No.52470214)

2020 were quantitatively evaluated. The study utilized correlation analysis, Structural Equation Modeling, and Partial least squares regression to investigate the trade-off relationship between ecosystem services and identify the key drivers influencing water purification services in the watershed. Additionally, ecological function zoning of the watershed was conducted using the k-means spatial clustering method. The results revealed that: (1) The high-value areas of crop production were mainly distributed in the western plain area of the watershed, while the high-value areas of water yield and soil erosion, as well as the low-value areas of nutrient export were in the eastern hilly area of the watershed. (2) Trade-offs between crop supply service and water purification services were significant in the Nansihu Lake basin. (3) Sown crop area, total agricultural machinery power, and fertilizer application were the key drivers of water purification services in the watershed. (4) The watershed can be divided into three ecological function zones: the main agricultural production zone, the ecological conservation zone and the water quality safety zone, while the focus on agricultural development and ecological protection should be different in each zone. In view of the significant trade-offs between crop supply services and water purification in the Nansihu Lake Basin, it is urgent to strengthen the collaboration of stakeholder departments, integrate the main function zoning and ecological environment zoning control, and implement spatial planning for the sustainable development of the economy and the water environment. By optimizing and regulating the scale, structure, and mode of planting in each zoning area, we can reduce nitrogen export while improving the economic benefits of the basin, coordinate ecosystem service trade-offs, and provide decision-making support for the integrated management of the watershed's water environment and sustainable development.

Keywords: ecosystem services; water environment; trade-offs; drivers; Nansihu Lake Basin

随着我国流域水环境质量的整体改善和点源污染的有效控制,流域水环境保护正从传统的污染物末端治理转向人与自然耦合系统的综合调控^[1-2]。这一转变旨在通过协调水环境与系统内各主体和要素的关系,实现经济与水环境的可持续发展^[3-5]。生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益,是连接人类与自然系统的桥梁,对于人类福祉和可持续发展至关重要,为解析人与自然系统耦合作用关系提供了系统分析的视角^[6]。权衡是指当一种生态系统服务增加时另一种生态系统服务减少,协同则是两种生态系统服务同时增加或减少的现象^[7-8]。流域提供的一系列生态系统服务类型,包括农产品供给、产水、水质净化、水土保持等,直接或间接地影响着流域水环境状况^[9-10]。高强度的农业生产重视农产品供给服务,忽视对环境调节型服务的负面影响,造成供给和调节服务之间权衡关系的加剧,会引发非点源污染等水环境问题^[11-12]。避免生态系统服务间的消极权衡,促进积极协同,是解决流域水环境问题的有效方法。

近年来,诸多学者开展了与水有关的生态系统服务权衡研究。如 Wu 等^[13]综述了优化土地利用模式,增强流域生态系统服务的协同作用,以减少非点源污染; Zheng 等^[14]强调了河岸带保护在减少密云水库流域生态系统服务之间权衡关系上的重要性;何刘洁等^[15]开展了长江经济带产水、水土保持、碳固定和粮食供给 4 项生态系统服务权衡关系及驱动机制分析,以促进多种生态系统服务的协同发展;刘洋等^[16]开展了太湖流域产水量、水质净化和水土保持服务的量化评估及驱动力分析;叶敦雨等^[17]分析了南四

湖流域近 45 年水质净化服务的时空演变,以及土地利用和景观格局等因素对其的影响;张文静等^[18]分析了南四湖流域产水量、水质净化、水土保持、碳存储、生物多样性维持和授粉等 6 类关键生态系统服务的时空变化和不同尺度的权衡关系;王飞儿等^[19]开展了基于生态系统服务价值评估的浙江省水生态环境分区分类管控;孔令桥等^[20]以洞庭湖流域为例,开展了基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复。目前有关生态系统服务与水环境关系的研究仍以理论探索为主,针对具体水质问题,将生态系统服务权衡应用于指导流域污染排放行为和水环境管理的研究相对缺乏。

南四湖流域是山东省和我国北方地区的重要农产品主产区,同时也是我国南水北调东线工程的重要流经区域,而总氮(TN)污染是流域水环境的突出问题^[21-22]。如何兼顾流域农业发展与水质安全是南四湖流域可持续发展面临的重要挑战,是涉及人与自然耦合作用的复杂系统工程。本文将生态系统服务权衡纳入南四湖流域水环境管理,选取流域内影响农业与水环境的关键生态系统服务类型,开展南四湖流域生态系统服务权衡特征和驱动因素分析,并在此基础上进行流域生态功能分区,提出流域分区分管和农业活动优化调控措施,从而为协调流域生态系统服务权衡关系,促进流域经济与水环境可持续发展提供决策支持。

1 研究区域概况及研究方法

1.1 研究区概况

南四湖是我国北方最大的淡水湖泊,是南水北

调工程东线的重要蓄水池。南四湖流域位于江苏、山东、河南、安徽 4 省交界处 (34°24'N~35°59'N、114°52'E~117°42'E), 流域总面积共 $3.17\times10^4\text{ km}^2$, 主要分布在山东省西南部。本文以山东境内的南四湖流域为研究区域, 流域面积为 $2.62\times10^4\text{ km}^2$, 覆盖山东省济宁市、菏泽市、枣庄市和泰安市宁阳县三市一县, 共计 27 个地区。流域内有大小 53 条河流从四周呈辐射状汇入南四湖, 湖泊出水南下进入淮河。南四

湖位于流域东南部, 湖区总面积为 $1\,266\text{ km}^2$, 是呈西北-东南走向的狭长水域, 南北全长 126 km, 东西宽 5~25 km。南四湖流域主要用地是农业用地, 占流域总面积的 69.5%。流域内平均气温为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均降雨量为 700 mm, 潜在蒸散发量为 1 400 mm。在南水北调工程实施前后, 政府实施了许多水环境保护和修复的项目, 使得流域水质得到有效改善, 但总氮 (TN) 情况仍然不太理想^[23]。流域地理位置如图 1 所示。

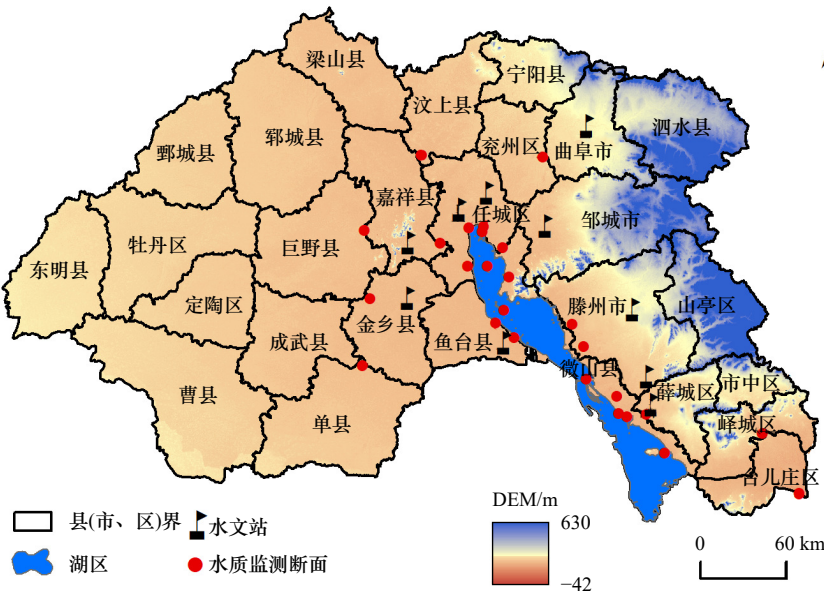


图 1 南四湖流域地形以及监测站点分布

Fig.1 Distribution of topography and monitoring sites in Nansihu Lake Basin

1.2 数据来源

该研究使用的气象数据、地形数据、土地利用类型数据、土壤属性数据、行政区划边界及社会经济数据的来源及特征如表 1 所示。气象数据 (1980—2020 年) 包括降水量、温度、风速、太阳辐射、相对湿度等数据, 采用 ANUSPLIN4.5 模型进行空间差值

得到气象要素的空间栅格数据。土壤属性数据包括土壤参考深度、土壤容重、砂砾、粉粒、黏粒及有机碳的百分比含量等。社会经济数据 (2005—2020 年) 包括人口、GDP、作物产量、畜禽饲养量、水产品产量、化肥施用量等, 主要来源于各地市统计局所发布的地区统计年鉴。

表 1 生态系统服务评估所需数据及其来源

Table 1 Datasets needed for ecosystem services assessment

数据	分辨率	数据来源
地形(DEM)	30 m	美国航天局(NASA)发布的数据产品NASADEM(https://lpdaac.usgs.gov/news)
气象	30 m	中国气象科学数据共享服务网(http://data.cma.gov.cn)
土壤属性	1 km	世界土壤数据库HWSD(Harmonized World Soil Database version 1.1)(https://www.fao.org/soils-portal/en)
土地利用类型	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
行政区划边界		中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
社会经济	年度	山东省统计局、济宁市统计局、菏泽市统计局、泰安市统计局、枣庄市统计局

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务评估

本文以南四湖流域农业与水环境可持续发展为

目标, 共选取 6 项与流域农业和水环境密切相关的生态系统服务指标进行评估, 具体指标及评估方法见表 2。作物供给服务用县域行政单元每年的农作物

产量来表征。农作物包含小麦、稻谷、玉米、豆类、薯类等粮食作物,以及油料、棉花、蔬菜、瓜果、水果等经济作物。畜禽供给服务用县域行政单元每年的畜禽饲养量来表征。水产供给服务用各县单位水域面积对应的水产品产量来表征,水产品包括草鱼、鲢鱼等鱼类产品,虾蟹等甲壳类以及贝类等。

表 2 南四湖流域生态系统服务评估指标及评估方法
Table 2 Ecosystem service assessment indicators and methods in Nansihu Lake Basin

分类	生态系统服务	评估指标	单位	评估方法
供给服务	产水服务	产水量	mm	InVEST 3.10.0-产水量模块(WY)
	作物供给	作物产量	t	统计数据 and GIS
	畜禽供给	畜禽饲养量	头	统计数据 and GIS
	水产供给	水产品产量	t	统计数据 and GIS
调节服务	水质净化(TN)	TN输出	kg	InVEST 3.10.0-污染物运移模块(NDR)
	土壤保持	土壤侵蚀	t	InVEST 3.10.0-泥沙输移模块(SDR)

水文生态系统服务指标采用 InVEST 模型进行评估,模型各模块的工作原理及数据需求等详见模型手册^[24]。各模块输入数据涉及 DEM、土地利用、流域和子流域划分、年降水量、参考蒸散量、土壤深度、植物有效含水量、养分径流代理栅格数据、降雨侵蚀指数 (R)、土壤可侵蚀性 (K) 和生物物理参数,所需数据的来源如表 1 所示。生物物理参数根据研究区及类似区域的研究确定^[25-30],具体如表 3 所示,并采用水文站实测径流和泥沙数据对模拟结果进行了验证,反映模拟结果的合理和可靠性。

表 3 南四湖流域 InVEST 模型生物物理参数表
Table 3 Biophysical parameters table of the InVEST model in Nansihu Lake Basin

土地利用类型	编码	根系深度/mm	蒸散系数	氮输出系数/(kg/hm ²)	氮截留率/%
耕地	10	2 100	0.7	14.60	25
有林地	21	7 000	1.0	1.80	80
灌木林	22	5 100	0.9	2.00	70
疏林地	23	5 000	0.9	2.00	60
其他林地	24	3 000	0.85	2.62	50
草地	30	2 000	0.8	3.20	48
河渠	41	800	1.0	0.001	5
湖泊	42	1 000	1.0	0.001	5
水库坑塘	43	1 000	0.6	0.001	5
湿地	46	4 000	1.2	2.00	80
城镇用地	51	1	0.4	12.00	5
农村居民点	52	450	0.3	20.00	10
其他建设用地	53	1	0.2	4.00	1
未利用土地	60	1	0.2	1.45	5

1.3.2 权衡关系分析

生态系统服务权衡关系的分析,对于促进服务间的积极协同、避免消极权衡,并开展以解决问题为导向的流域生态系统管理具有重要意义。生态系统服

务之间的权衡关系通常用相关系数表征,正相关表示两种生态系统服务呈协同关系,负相关表示权衡关系。为了从权衡和协同的角度评估生态系统服务之间的相互作用关系,本研究采用斯皮尔曼(Spearman)相关系数法,对县域尺度上生态系统服务的权衡关系进行评价^[31-32]。为了对所有指标进行有意义的比较,每个指标都进行了 z 标准化处理,计算在 SPSS 软件中进行。

1.3.3 驱动因素分析

识别生态系统服务的关键影响因素,是协调生态系统服务权衡关系,实现生态系统调控和管理的必要基础。本文基于生态系统服务形成过程,按照科学性、代表性和数据可获取性的原则,同时结合专家知识和研究需求,从自然与人为因素方面选取了流域生态系统服务的驱动因素^[33]。其中,自然因素包括气象、地形、植被覆盖与土壤属性等,人为因素包括土地利用类型、人口经济、农业生产三个方面,具体所选取的驱动要素如表 4 所示。

在指标选取的基础上,采用偏最小二乘回归法(PLSR)对关键影响因素进行识别。PLSR 法分别将预测变量(因变量)和观测变量(自变量)投影到新的低维空间中,寻求其投影之间的协方差最大化,以此建立回归模型^[34]。使用决定系数 (R^2) 和可解释的因变量总方差比 (Q_{cum}^2) 来反映模型的预测能力。模型通过变量投影重要性指标 VIP 的高低及回归系数来反映各因素的贡献程度和方向。VIP>1 的自变量为相对重要影响因子,VIP<0.5 的自变量为不重要因子。

1.3.4 生态功能分区

生态系统服务簇是多种生态系统服务的组合,是生态系统多功能性中的主导功能表征^[35]。本文采用 K-means 聚类分析法识别生态系统服务簇的空间分布,进行流域生态功能分区^[36]。该方法能够识别多个生态系统服务空间上的聚集模式。通过衡量不同生

表 4 南四湖流域生态系统服务驱动因素

Table 4 Selection of drivers of ecosystem services in the Nansihu Lake Basin

驱动因素类别	缩写	指标描述	单位
气象因素	PRE	年均降水量	mm
	TEM	年均气温	℃
地形因素	SLOP	平均坡度	度
	ALT	平均高程	m
	RIVER	河网密度	km/hm ²
植被覆盖	EVI	增强型植被指数	
土壤属性	PH	土壤pH	
	BULK	土壤表层容重	g/cm ³
	CLAY	土壤表层黏土含量	%
	GRAVEL	土壤表层砂石含量	%
	SAND	土壤表层砂粒含量	%
	SILT	土壤表层粉砂含量	%
	TOC	土壤表层有机碳含量	%
土地利用类型	FARM	耕地占比	%
	FOREST	林草地占比	%
	WATER	水域占比	%
	CONSTR	建设用地占比	%
人口经济	POP	人口数量	人/km ²
	URBANI	城镇化率	%
	GDP	国内生产总值	元/km ²
	FRIMIN	一产占比	%
	SECOIN	二产占比	%
	THIRIN	三产占比	%
农业生产	CROPAR	农作物播种面积	%
	GRAIAR	粮食作物播种面积占比	%
	ECONAR	经济作物播种面积占比	%
	AGRPOW	农业机械总动力	kW/km ²
	CHEFER	化肥折纯施用量	kg/km ²

态系统服务之间的相似性,从 27 个地区的 6 类生态系统服务的数据集中获取关键信息,识别出具有较高相似度的县域单元,反映单元的某类主导生态系统服务功能^[37]。该研究在 SPSS 27 软件中进行 K-means 聚类分析。

2 结果与分析

2.1 流域生态系统服务时空变化特征

南四湖流域农产品供给服务的时空变化特征如图 2 所示,流域多年平均作物产量为 15.15 t/hm²,农产品供给服务高的县多分布在湖西地区。2005—2020 年,流域农作物产量增长了 2.01%,增长地区多

分布在湖西平原县。流域多年平均畜禽饲养量为 9.77 头/hm²。流域西部汶上县、单县、定陶区的畜禽饲养量相对较高,饲养量较低的地区主要包括湖区所在的微山县及湖东区域。2005—2020 年间,流域畜禽饲养数量下降了 50.82%,其中 18 个区县的降幅超过 50%,这与 2008 年以来流域治污措施的持续推进有关^[22]。流域多年平均水产供给量为 3.28 t/hm²,南四湖东部的兖州区、曲阜市、泗水县等供给量相对较低。2005—2020 年,流域水产品供给量下降 7.16%。

流域水文生态系统服务的时空分异特征如图 3 所示,流域多年平均产水量为 193.40 mm。2005—2020 年间,南四湖流域产水量呈减少趋势。与其他该流域的研究结果^[30,38]类似,流域产水量高值区主要出现在流域东部的山地丘陵地区,低值区主要分布在流域西部的平原地区。流域多年平均 TN 输出量为 5.00 kg/hm²。TN 输出的低值区主要出现在流域东部的山地丘陵区,尤其是枣庄市山亭区在各年份的输出量均最低^[39]。流域多年平均土壤侵蚀量为 9.24 t/hm²。根据水利部颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)中的分级〔微度,土壤侵蚀强度<10 t/(hm²·a);轻度,土壤侵蚀强度为 10~25 t/(hm²·a);中度,土壤侵蚀强度为 25~50 t/(hm²·a);强烈,土壤侵蚀强度为 50~80 t/(hm²·a);极强烈,土壤侵蚀强度为 80~150 t/(hm²·a);剧烈,土壤侵蚀强度>150 t/(hm²·a)]规定,南四湖流域多年平均土壤侵蚀量均为微度级别,土壤流失总体保持在较低的水平。土壤侵蚀的高值区在湖东山地丘陵区出现,主要集中在泗水县、山亭区和邹城市。

2.2 流域生态系统服务权衡关系特征

通过 Spearman 秩相关系数法得到的流域生态系统服务相关系数如图 4 所示。由图 4 可知,对供给服务而言,作物供给量与畜禽饲养量、水产供给量均呈正相关。对于水文生态系统服务各指标,产水量与 TN 输出量、土壤侵蚀量呈显著正相关。对于供给服务与调节服务而言,作物供给量与 TN 输出量呈显著正相关。TN 输出量是水质净化服务的表征指标,与水质净化服务呈负相关,因此南四湖流域作物供给量与水质净化服务呈负相关,表明作物供给量与水质净化服务为权衡关系,这与 Pahl-Wostl 等^[9,40]研究结果一致。

2.3 生态系统服务关键驱动因素识别

基于南四湖流域 2005—2020 年县域尺度的生态系统服务和各驱动因素数据,采用 PLSR 方法进行关键影响因素识别。由于 TN 污染是流域水环境的主要问题,因此,该部分重点关注水质净化服务(TN)的

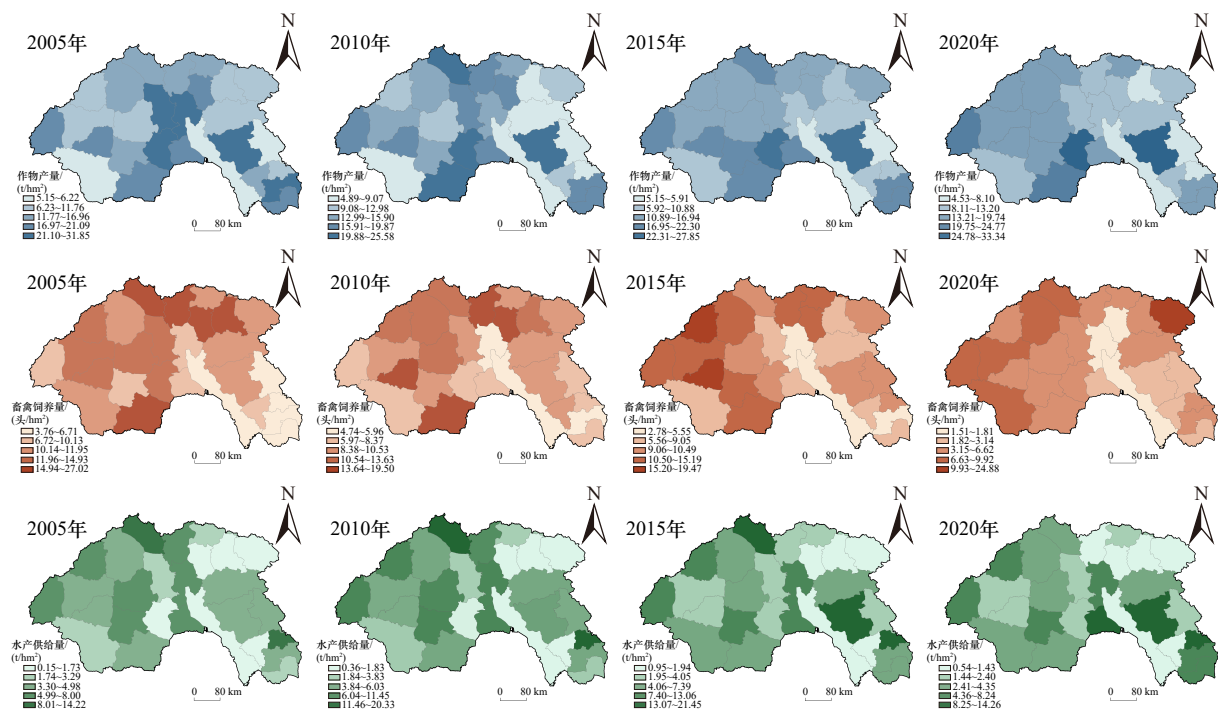


图 2 南四湖流域农产品供给服务时空特征

Fig.2 Spatiotemporal characteristics of agricultural supply services in Nansihu Lake Basin

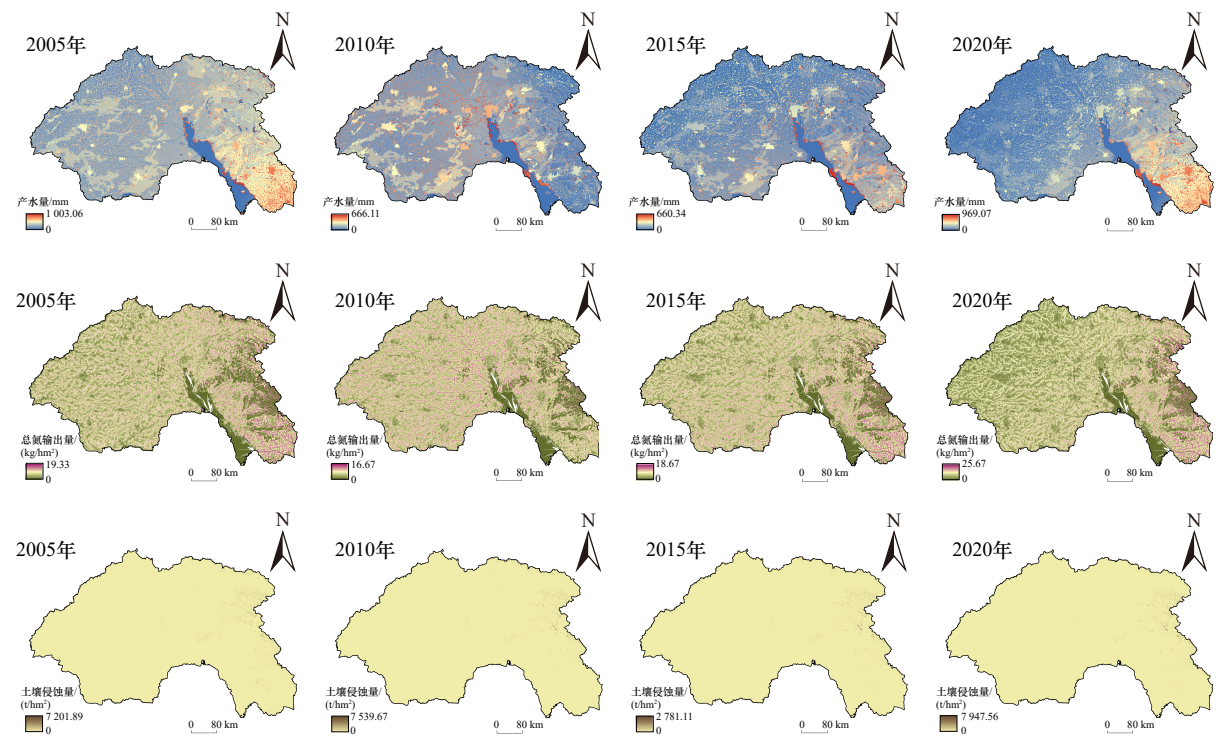


图 3 南四湖流域水文生态系统服务时空特征

Fig.3 Spatiotemporal characteristics of hydrological ecosystem services in Nansihu Lake Basin

影响因素识别。由 PLSR 模拟结果可知, 针对 TN 输出的模拟, 模型提取了两个 PLS 组分, 拟合优度为 85.00%, 预测优度为 73.70%, 均大于 0.5, 表明各驱动因素对 TN 输出具有良好的解释和预测效果。

南四湖流域 TN 输出各驱动因素的 VIP 值及回归系数如图 5 所示。驱动因素按 VIP 值由高到低分别为农作物播种面积、农业机械总动力、化肥施用量、土壤有机碳含量和降水量等, VIP 值依次为 2.07、

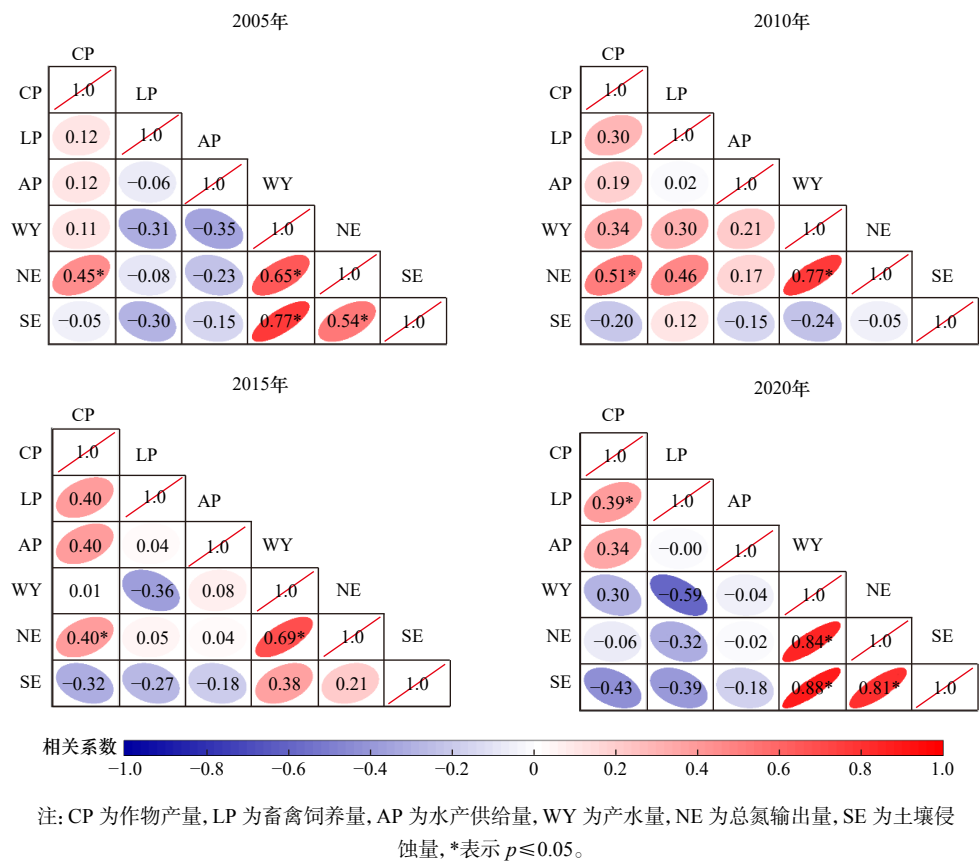
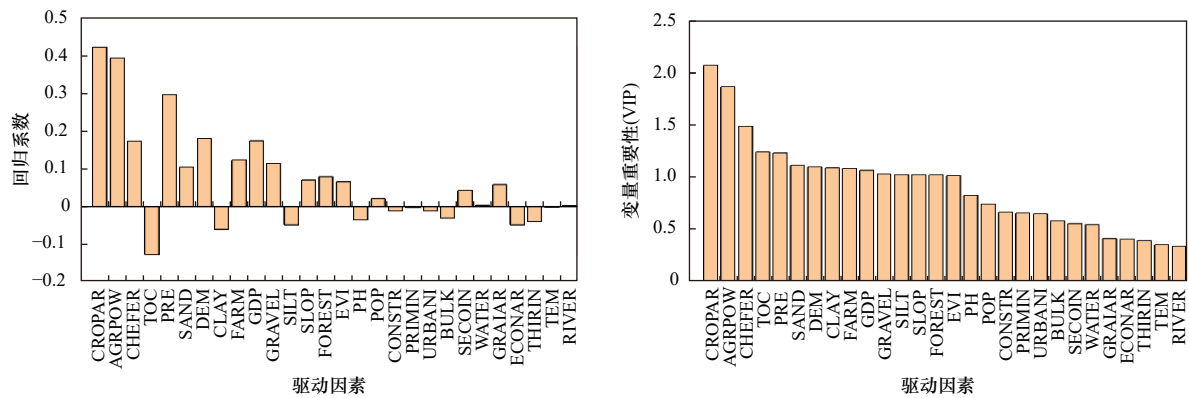


图 4 2005—2020 年生态系统服务相关性

Fig.4 Correlation coefficients between ecosystem service from 2005 to 2020



注: 横坐标各缩写的释义详见表 4。

图 5 南四湖流域 TN 输出关键驱动因素识别

Fig.5 Identification of key drivers of TN export in Nansihu Lake Basin

1.86、1.48、1.23 和 1.22。除土壤有机碳含量的回归系数为负外,其余因素的回归系数均为正,表明 TN 输出量主要受人为因素影响,人类活动强度高、农作物播种面积大以及化肥和机械动力投入多的地区,可能出现较高氮负荷;土壤有机碳含量高的区域,土壤中有机质和微生物含量较多,吸附截留污染物的能力也更强,可能使得 TN 输出量较低^[41]。

2.4 南四湖流域生态功能分区

生态功能分区可以为同时管理多个生态系统服务以及流域分区管理提供参考依据。本文采用 K-means 聚类分析的方法,对 27 个地区的生态系统服务进行聚类分析,得到 3 个生态系统服务簇,相应地将流域划分为 3 个主导生态系统服务类型不同的区域,实现生态功能分区。生态系统服务簇中各生态系统服务评估指标的贡献度如图 6 所示。

由图 6 可知,畜禽供给、作物供给和水产供给对

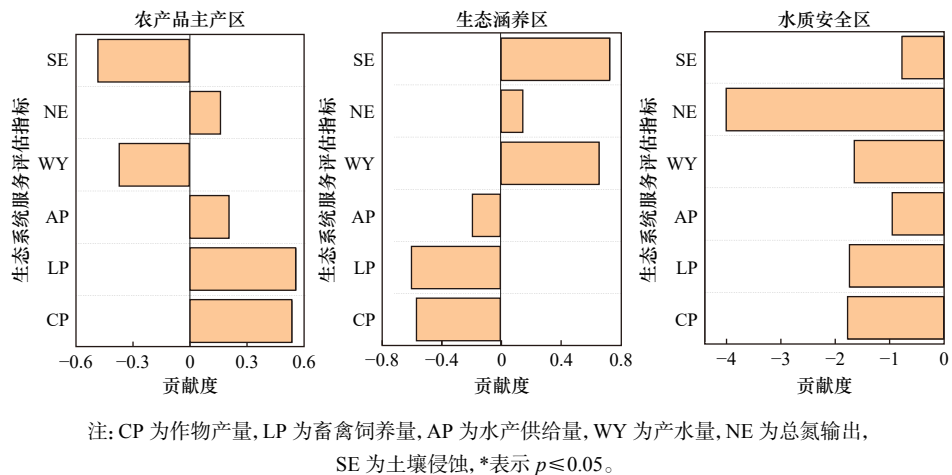


图 6 南四湖流域生态系统服务聚类贡献结果

Fig.6 Clustering contribution results of ecosystem services in Nansihu Lake Basin

生态系统服务簇 1 的贡献较大, 贡献度分别为 0.57、0.54 和 0.20; 对生态系统服务簇 2 贡献较大的分别是土壤侵蚀、产水量和 TN 输出, 贡献度分别为 0.73、0.66 和 0.14。因此, 生态系统服务簇 1 和 2 分别代表以农产品供给和生态涵养为主导的生态系统服务聚类结果。生态系统服务簇 3 中各项评估指标的贡献度均为负值, 其中 TN 输出的负向贡献度最高, 由于 TN 输出量与水质净化服务呈负相关, 表明生态系统服务簇 3 对应以水质净化服务为主导的生态系统服务聚类结果。

流域内 27 个地区被划分为 3 个不同的生态功能

区: 农产品主产区、生态涵养区和水质安全区 (见图 7)。其中农产品主产区位于流域西北部, 占流域总面积的 60.11%, 包括菏泽市的 9 个区县、济宁市西北部的 5 个区县以及宁阳县共计 15 个地区。区域以平原为主, 平均坡度为 1.77°, 耕地占流域总耕地面积的 67%。区域以农产品供给服务为主导, 对流域农业生产具有重要区位意义。生态涵养区分布于流域东部地区, 占流域总面积的 34.26%, 包括济宁市任城区、兖州区、曲阜市、泗水县和邹城市 5 个区县, 以及枣庄市 6 个县, 合计 11 个区县。区域平均坡度为 3.81°, 流域内 91.33% 的林草地面积分布于此。该区

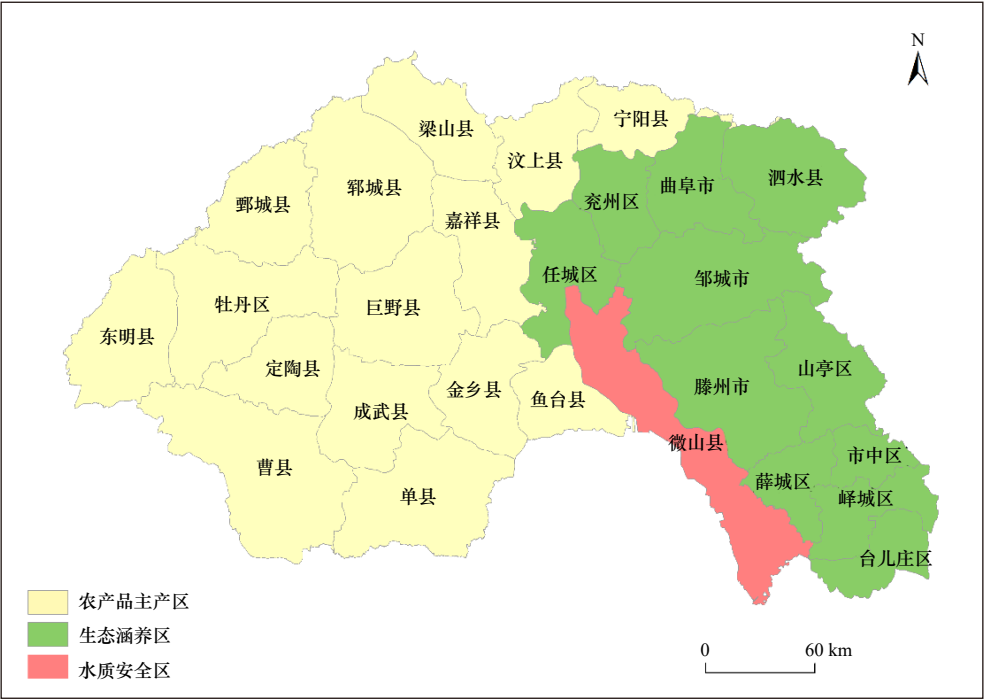


图 7 南四湖流域各生态功能区空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological functional areas in Nansihu Lake Basin

以生态环境调节功能为主,在经济发展的同时需重视区域水土保持功能,提高生态系统的水源涵养能力。水质安全区仅包含南四湖湖区所在的微山县,流域内 60.51% 的水域面积分布于此。该区以水净化服务为主,对湖区水质安全和调水工程意义重大,需重视生态环境保护,严格限制经济发展导致的污染排放。

3 讨论

3.1 基于生态系统服务权衡和分区的流域水环境管理

在传统的流域综合管理中,生态系统服务间的相关性与解决环境问题的协调过程之间存在错位^[9]。生态系统服务权衡可以为流域水环境问题提供系统性和整体性的分析视角,同时管理多个生态系统服务是流域经济与水环境可持续发展的重要内容。南四湖流域要实现可持续发展,利益相关部门应从生态系统主体视角出发,在流域层面加强部门之间的协调联动,将流域空间管控作为落实流域水环境管理的重要手段。全面落实主体功能区划,将生态环境分区管控与国土空间规划充分衔接,构建可持续的新发展格局^[42]。在流域层面协调供给服务与水质净化服务的关系,统筹“山水林田湖草沙”一体化保护和系统治理。在流域农产品主产区、生态涵养区和水质安全区,因地制宜地实行差异化的发展和保护策略,促进流域经济增长、生态保护和污染减排的协同推进。通过识别各分区的水环境问题和关键影响因素,将水环境保护的工作重心由末端治理转向前端管控,实现污染物的源头预防,建立从问题识别到解决方案的分区分类管控策略,这也符合我国正在全面推进的生态环境分区管控的政策要求^[43]。

3.2 流域生态系统服务权衡关系的协调措施

生态功能分区主要在宏观层面框定发展和保护格局,而生态环境管理需要结合多学科方法制定差异化、精细化的管控措施。为了控制水环境 TN 污染,实现经济与水环境可持续发展,南四湖流域需要采取具体措施来协调供给服务和水质净化服务之间的权衡关系。由偏最小二乘回归分析可知,流域农业种植活动对水质净化服务 (TN) 有较大影响,因此,可以在功能分区的基础上,根据产业生态学理论中的物质流分析方法^[44-46],将流域种植系统作为调控和治理主体,分别解析各分区种植系统内部的氮物质流规律^[47],揭示种植规模、结构、化肥物质投入等与供给服务和氮净化服务之间的关系,识别影响生态系统服务的关键决策变量。在此基础上,将流域供给服务和水质净化服务 (TN) 效益最大化,即经济效益最大和氮输出最

少作为目标函数^[6],通过多目标规划模型求解,得到各区域关键决策变量的优化方案,包括优化后的农业种植规模和结构、氮肥施用量、有机肥施用量等,从而为协调流域生态系统服务权衡关系,促进农业与水环境可持续发展提供决策支持。

4 结论

a) 2005—2020 年间,流域多年平均作物供给、畜禽供给和水产供给服务水平分别为 15.15 t/hm²、9.77 头/hm² 和 3.28 t/hm²。农产品供给服务的高值区均主要分布在流域西部的平原地区。流域多年平均产水量为 193.40 mm, TN 输出量为 5.00 kg/hm², 土壤侵蚀量为 9.24 t/hm²。流域产水量和土壤侵蚀的高值区,以及 TN 输出的低值区出现在流域东部的山地丘陵地区。

b) 斯皮尔曼相关性分析表明,南四湖流域作物供给与水质净化服务为显著的权衡关系。偏最小二乘回归模拟显示,流域水质净化服务 (TN) 的主要影响因素为农作物播种面积、农业机械总动力和化肥施用量。未来可采用结构方程模型、贝叶斯网络等方法对生态系统服务权衡关系和驱动机制进行进一步分析。

c) K-means 空间聚类分析将流域划分为农产品主产区、生态涵养区和水质安全区。未来在此基础上,结合产业生态学、多目标优化等方法,可以进一步优化调控南四湖流域各区域的种植结构、规模和施肥方式等,为流域的生态环境分区管控和经济与水环境可持续发展提供参考和支持。

参考文献 (References):

- [1] 吴丰昌.我国水体污染控制与治理成效、科技支撑与展望 [J].水利发展研究,2023,23(12):1-8.
WU F C.Effectiveness,scientific and technological support,and prospects for water pollution control and management in China [J].Water Resources Development Research,2023,23(12):1-8.
- [2] 袁哲,许秋瑾,宋永会,等.辽河流域水污染治理历程与“十四五”控制策略 [J].环境科学研究,2020,33(8):1805-1812.
YUAN Z,XU Q J,SONG Y H,et al.Water pollution management process and ‘14th Five-Year Plan’ pollution control strategy for Liao River Basin [J].Research of Environmental Sciences,2020,33(8):1805-1812.
- [3] LUO Z L,ZUO Q T.Evaluating the coordinated development of social economy,water,and ecology in a heavily disturbed basin based on the distributed hydrology model and the harmony theory [J].Journal of Hydrology,2019,574:226-241.
- [4] ZHOU X Y,ZHENG B H,KHU S T.Simulation platform of human-environment systems for water environment carrying capacity research [J].Journal of Cleaner Production,2020,250:119577.

- [5] 杜芳,彭剑峰,王亚俊,等.北运河北京段水生生态承载力研究及关键控制要素识别 [J].环境科学研究,2021,34(10):2369-2379.
DU F,PENG J F,WANG Y J,et al.Water ecological carrying capacity and identification of key control factors:a case study of Beijing section of north canal[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(10):2369-2379.
- [6] HU M M,WANG Y F,XIA B C,et al.How to balance ecosystem services and economic benefits?a case study in the Pearl River Delta,China[J].Journal of Environmental Management,2020,271:110917.
- [7] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法 [J].资源科学,2016,38(1):1-9.
FU B J,YU D D.Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services[J].Resources Science,2016,38(1):1-9.
- [8] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望 [J].地球科学进展,2015,30(11):1250-1259.
DAI E F,WANG X L,ZHU J J,et al.Progress and perspective on ecosystem services trade-offs[J].Advances in Earth Science,2015,30(11):1250-1259.
- [9] PAHL-WOSTL C,LUKAT E,STEIN U,et al.Improving the socio-ecological fit in water governance by enhancing coordination of ecosystem services used[J].Environmental Science & Policy,2023,139:11-21.
- [10] 刘尹,李春明,孙倩莹,等.厦门市生态系统供水服务量化与价值评估 [J].环境科学研究,2019,32(12):2008-2014.
LIU Y,LI C M,SUN Q Y,et al.Quantification and valuation of water supply ecosystem service in Xiamen City,China[J].Research of Environmental Sciences,2019,32(12):2008-2014.
- [11] VOLLMER D,BURKHARD K,ADEM E,SMAIL B,et al.Incorporating ecosystem services into water resources management-tools,policies,promising pathways[J].Environmental Management,2022,69(4):627-635.
- [12] 项颂,吴越,吕兴菊,等.洱海流域农业面源污染空间分布特征及分类控制策略 [J].环境科学研究,2020,33(11):2474-2483.
XIANG S,WU Y,LÜ X J,et al.Characteristics and spatial distribution of agricultural non-point source pollution in Erhai Lake Basin and its classified control strategy[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(11):2474-2483.
- [13] WU Y H,LIU J Z,SHEN R F,et al.Mitigation of nonpoint source pollution in rural areas:from control to synergies of multi ecosystem services[J].Science of the Total Environment,2017,607/608:1376-1380.
- [14] ZHENG H,LI Y F,ROBINSON B E,et al.Using ecosystem service trade-offs to inform water conservation policies and management practices[J].Frontiers in Ecology and the Environment,2016,14(10):527-532.
- [15] 何刘洁,郑博福,万炜,等.长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素 [J].环境科学,2024,45(6):3318-3328.
HE L J,ZHENG B F,WAN W,et al.Trade-off and synergy of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt and its driving factors[J].Environmental Science,2024,45(6):3318-3328.
- [16] 刘洋,吕建树,毕军.流域陆地生态系统水体净化服务表征及驱动力分析 [J].地理科学进展,2019,38(4):588-599.
LIU Y,LY J S,BI J.Characterizing water purification services and quantifying their driving factors in watershed terrestrial ecosystems [J].Progress in Geography,2019,38(4):588-599.
- [17] 叶敦雨,孙小银,单瑞峰.南四湖流域近 45 a 水质净化服务功能的时空演变及其影响因素 [J].生态与农村环境学报,2023,39(8):990-998.
YE D Y,SUN X Y,SHAN R F.Study on the spatio-temporal changes of water purification service function and its influencing factors of Nansihu Lake Basin for 45 years[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2023,39(8):990-998.
- [18] 张文静,孙小银,周俊.南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系 [J].生态学报,2021,41(20):8003-8015.
ZHANG W J,SUN X Y,ZHOU J.Spatio-temporal dynamics of tradeoffs between crucial ecosystem services in Nansihu Lake Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(20):8003-8015.
- [19] 王飞儿,郑思远,杨泓蕊,等.基于生态系统服务的浙江省水生态环境分区分类管控 [J].生态学报,2022,42(2):539-548.
WANG F E,ZHENG S Y,YANG H R,et al.Regionalization and classification of water eco-environment in Zhejiang Province based on ecosystem service[J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(2):539-548.
- [20] 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 [J].生态学报,2019,39(23):8903-8910.
KONG L Q,ZHENG H,OUYANG Z Y.Ecological protection and restoration of forest,wetland,grassland and cropland based on the perspective of ecosystem services:a case study in Dongting Lake Watershed[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(23):8903-8910.
- [21] 陈妮.2006—2015 年南四湖水质综合评价及改善效果分析 [D].青岛:青岛理工大学,2018.
- [22] 倪晓.南四湖流域水污染物总量控制及水质综合改善方案研究 [D].济南:山东师范大学,2013.
- [23] HU X Q,WANG H Q,ZHU Y,et al.Landscape characteristics affecting spatial patterns of water quality variation in a highly disturbed region[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2019,16(12):2149.
- [24] Natural Capital Project.InVEST 0.0[EB/OL].Stanford University, University of Minnesota,Chinese Academy of Sciences,The Nature Conservancy,World Wildlife Fund,Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences,2024.<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- [25] 刘洋.生态系统服务时空分异特征及驱动力研究:以太湖流域(江苏省)为例 [D].南京:南京大学,2016.
- [26] 徐洁,肖玉,谢高地,等.东江湖流域水供给服务时空格局分析 [J].生态学报,2016,36(15):4892-4906.
XU J,XIAO Y,XIE G D,et al.Spatiotemporal analysis of water supply service in the Dongjiang Lake Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(15):4892-4906.

- [27] 冉凤维.鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同研究[D].南昌:江西农业大学,2019.
- [28] 张华美.南四湖流域非点源污染输出风险评估及其对土地利用变化的响应[D].曲阜:曲阜师范大学,2018.
- [29] CHEN J Y,CUI T,WANG H M,et al.Spatio-temporal evolution of water-related ecosystem services:Taihu Basin,China[J].*PeerJ*,2018,6:e5041.
- [30] 郭洪伟.基于 InVEST 模型的南四湖流域生态系统服务空间格局研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2017.
- [31] BENNETT E M,PETERSON G D,GORDON L J.Understanding relationships among multiple ecosystem services[J].*Ecology Letters*,2009,12(12):1394-1404.
- [32] WANG J N,WU W J,YANG M,et al.Exploring the complex trade-offs and synergies of global ecosystem services[J].*Environmental Science and Ecotechnology*,2024,21:100391.
- [33] JIANG Z,SUN X Y,LIU F,et al.Spatio-temporal variation of land use and ecosystem service values and their impact factors in an urbanized agricultural basin since the reform and opening of China[J].*Environmental Monitoring and Assessment*,2019,191(12):739.
- [34] 邓俊.三峡库区典型小流域氮磷输出特征及其影响因素研究[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [35] 潘莹,郑华,易齐涛,等.流域生态系统服务簇变化及影响因素:以大清河流域为例[J].*生态学报*,2021,41(13):5204-5213.
- PAN Y,ZHENG H,YI Q T,et al.The change and driving factors of ecosystem service bundles:a case study of Daqing River Basin[J].*Acta Ecologica Sinica*,2021,41(13):5204-5213.
- [36] LI X,MENG X M,JI X D,et al.Zoning technology for the management of ecological and clean small-watersheds via K-means clustering and entropy-weighted TOPSIS:a case study in Beijing[J].*Journal of Cleaner Production*,2023,397:136449.
- [37] 袁海威,龚建周,陈雅婷,等.基于地域区划的广东省陆域生态系统服务簇与模式识别[J].*生态学报*,2023,43(22):9384-9401.
- YUAN H W,GONG J Z,CHEN Y T,et al.Recognition and analysis of ecosystem service cluster patterns in Guangdong Province based on region division[J].*Acta Ecologica Sinica*,2023,43(22):9384-9401.
- [38] CONG W C,SUN X Y,GUO H W,et al.Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns,priorities and trade-offs in a complex basin[J].*Ecological Indicators*,2020,112:106089.
- [39] 林雪原.山东省农业面源污染负荷分析及控制研究[D].曲阜:曲阜师范大学,2015.
- [40] SUN X Y,YE D Y,SHAN R F,et al.Effect of physical geographic and socioeconomic processes on interactions among ecosystem services based on machine learning[J].*Journal of Cleaner Production*,2022,359:131976.
- [41] 丁兴民,王蕾,徐振,等.青岛市农田土壤养分状况及变化特征分析[J].*青岛农业大学学报(自然科学版)*,2021,38(1):34-39.
- DING X M,WANG L,XU Z,et al.Current status of farmland soil nutrient and its change characteristics in Qingdao City[J].*Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*,2021,38(1):34-39.
- [42] 李海生.黄河流域生态环境问题系统识别与展望[J].*环境科学研究*,2024,37(1):1-10.
- LI H S.Systematic identification and prospect of eco-environmental problems in the Yellow River Basin[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(1):1-10.
- [43] 国务院办公厅 中共中央办公厅.关于加强生态环境分区管控的意见[EB/OL].北京:中华人民共和国中央人民政府,(2024-03-16)[2024-06-27].https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11246/202403/content_6941845.html.
- [44] 谷保静.人类-自然耦合系统氮循环研究:中国案例[D].杭州:浙江大学,2011.
- [45] 王玉涛.循环经济视野下的生态环境政策研究与案例分析[D].济南:山东大学,2011.
- [46] 袁增伟,程明今.物质循环科学的研究对象、理论与方法[J].*资源科学*,2021,43(3):435-445.
- YUAN Z W,CHENG M J.Object,theories and methods of material cycling science[J].*Resources Science*,2021,43(3):435-445.
- [47] DONG Y,XU L Y,YANG Z F,et al.Aggravation of reactive nitrogen flow driven by human production and consumption in Guangzhou City China[J].*Nature Communications*,2020,11(1):1209.

(责任编辑:张蕊)