

基于生态系统服务的南四湖流域水环境管理分析

唐 莉,高兆翔,王鲁洪

(济宁市水利事业发展中心,山东 济宁 272000)

【摘 要】以南四湖流域为主要研究对象,探讨生态系统服务在水环境管理中的权衡关系并明确驱动机制。基于 2010—2025 年作物供给、水质净化等特征,运用相关性分析和偏最小二乘回归模型,精准识别出农作物播种面积、农业机械动力、化肥施用量为影响水质净化服务的核心因子。通过 K-means 空间聚类方法,将流域划分为农产品主产区、生态涵养区、水质安全区 3 类功能区,分析不同区域在农业发展和生态保护间的优先级差异。研究进一步发现,作物供给和水质净化之间存在显著消极权衡,需要通过跨部门协同、分区管控优化种植结构、施肥方式,全面提高水环境质量,为流域尺度上生态系统服务的整合调控提供科学依据。

【关键词】生态系统服务;南四湖;流域水环境管理

【中图分类号】X824

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2026)-07-0054-04

Analysis of Water Environment Management in Nansi Lake Basin Based on Ecosystem Services

TANG Li, GAO Zhaoxiang, Wang Luhong

(Water Resources Affairs Development Center of Jining Municipality, Jining, Shandong 272000, China)

Abstract: Taking the Nansi Lake Basin as the research object, this paper discusses trade-off relationships and driving mechanisms of ecosystem services in water environment management. Based on crop supply and water purification data from 2010 to 2025, correlation analysis and partial least squares regression model are adopted. Sown crop area, agricultural machinery power and fertilizer application rate are identified as core factors affecting water purification service. The basin is divided into 3 different functional zones, such as major agricultural production area, ecological conservation area and water quality safety area, by K-means spatial clustering, and priority differences between agricultural development and ecological protection in the 3 different zones are analyzed. A significant negative trade-off exists between crop supply and water purification. Cross-departmental coordination, zoned regulation, optimized planting structure and fertilization patterns shall be adopted to enhance water environment quality, providing scientific support for integrated regulation of ecosystem services at basin scale.

Key words: Ecosystem services; Nansi Lake; Basin water environment management

生态系统服务在水资源管理中的作用日益突显。南四湖流域作为北方重要的农产品生产基地,其农业活动和水质安全之间存在明显的矛盾,生态系统服务间的权衡关系已经成为影响流域水环境质量的重要机制,其中作物供给和水质净化服务呈现显著的负向互动趋势,反映出高强度农业生产,很容易降低生态调节功能。

文章基于 2010—2025 年多源遥感、地面监测数据,运用相关性分析、偏最小二乘回归及 K-

means 聚类方法,系统性识别流域内作物供给、畜禽及水产供给、产水量、水质净化、土壤保持等要素,深入研究其协同特征。研究发现,农作物播种面积、农业机械动力、化肥施用强度是制约水质净化能力的影响因素,据此将流域划分为农产品主产区、生态涵养区、水质安全区 3 类功能单元,提出差异化管控策略。

收稿日期:2025-12-03

作者简介:唐莉(1983—),女,助理工程师

1 工程概况

南四湖由微山湖、昭阳湖、独山湖、南阳湖 4 个相连的湖泊组成,总面积达 1 266 km²,南北长 126 km,东西宽 25 km,承接了 31 700 km² 的来水,流域面积广阔,水资源丰富,是南水北调东线工程的调蓄湖泊,对于保障区域水资源安全、维护生态平衡具有重要作用。近年来,南四湖水环境面临着各种问题,随着流域经济社会快速发展,水资源需求量不断增加,湖泊调蓄能力下降,导致水资源供需矛盾日益突出。为了尽快恢复南四湖水环境功能,需要采取综合治理措施,坚持“山水林田湖草沙”系统治理理念,统筹推进水资源保护工作。

2 研究内容

2.1 数据类型

研究数据类型主要包括气象、地形、土地利用、土壤属性、社会经济等方面,为生态系统服务权衡分析提供坚实的数据支撑。其中,气象数据来源于国家气象观测站点,采用 ANUSPLIN 4.5 模型进行空间插值,生成高分辨率的降水、温度、风速、太阳辐射、相对湿度等数据,满足流域尺度上的环境因素空间分析需求。地形数据基于数字高程模型(DEM)提取坡度、坡向、高程特征,主要分析地表径流、污染物迁移的空间格局。土地利用类型数据通过遥感解译获取,结合地面调查验证其精度,形成覆盖全流域的多时相土地利用图谱。土壤属性数据包括土壤深度、容重、砂粒、粉粒、黏粒与有机碳含量比例,反映不同下垫面对水文过程和养分循环的影响机制。社会经济数据涵盖人口密度、GDP 分布、作物产量、畜禽养殖规模、化肥施用量等指标,主要来自山东省及周边地区统计年鉴,经过标准化处理后用于驱动生态系统服务评估模型。

2.2 研究方法

1)生态系统服务评估。为了深入研究南四湖流域农业发展和水环境质量之间的关系,选取 6 项关键生态系统服务指标进行定量评估,涵盖作物供给、畜禽供给、水产供给、产水量、水质净化、土壤保持服务。其中,作物供给服务以县域尺度的农作物年产量为基础,涵盖粮食作物(小麦、稻

谷、玉米等)和经济作物(油料、棉花、蔬菜等),形成全面分析农业产出能力;畜禽供给服务依据县域年度饲养量进行量化评估,反映畜牧业对区域经济和生态压力的影响机制;水产供给服务则通过单位水域面积的渔业产出,包括鱼类、甲壳类、贝类等指标,科学衡量水体资源利用效率,共同构成农业主导型流域的功能输出体系。

在调节与支持类服务方面,研究采用 InVEST 模型系统评估水文相关服务指标,包括产水量、水质净化、土壤保持服务。模型输入数据涵盖数字高程模型(DEM)、土地利用类型、子流域边界、气象要素、土壤属性、生物物理参数,其中生物物理参数参照同类区域研究成果,结合本地化校准,提高模拟结果的准确性。各模块模拟结果通过水文站实测径流、泥沙数据进行验证,全面提高模型输出的科学性。例如,总氮输出作为水质净化能力的重要代理变量,其空间分布特征和农业活动强度高度相关,有助于分析农业生产和水环境质量之间的权衡机制,多方面分析生态系统服务效果。InVEST 模型生物物理参数表见表 1。

表 1 南四湖流域 InVEST 模型生物物理参数表

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) ⁻¹)	氮截留率/%
耕地	10	2 100	0.7	14.6	25
有林地	21	7 000	1	1.8	80
灌木林	22	5 100	0.9	2	70
疏林地	23	5 000	0.9	2	60
其他林地	24	3 000	0.85	2.62	50
草地	30	2 000	0.8	3.2	48
河渠	41	800	1	0.001	5
湖泊	42	1 000	1	0.001	5
水库坑塘	43	1 000	0.6	0.001	5
湿地	46	4 000	1.2	2	80
城镇用地	51	1	0.4	12	5
农村居民点	52	450	0.3	20	10
其他建设用地	53	1	0.2	4	1
未利用土地	60	1	0.2	1.45	5

注:数据来源基于 2010—2025 年多源遥感、地面监测数据。

2)权衡关系分析。采用斯皮尔曼(Spearman)相关系数法,系统性评估南四湖流域县域尺度上作物供给、畜禽供给、水产供给、产水量、水质净化、土壤保持 6 项关键服务之间的相互作用机制。通过标准化处理消除量纲差异,使各指标具

备可比性,并在 SPSS 软件中完成相关性计算,精准识别服务间的正负向关联特征。结果表明,部分服务组合呈现显著负相关,分析出农业产出增强限制水环境质量的潜在作用^[1]。

3)生态功能分区。为了深入研究南四湖流域生态系统服务的空间异质性特征,采用 K-means 聚类分析方法,多维统计归类 27 个县域单元的 6 类生态系统服务数据,精准划分生态功能区。该方法基于欧氏距离测度不同区域在作物供给、畜禽饲养、水产产出、产水量、水质净化及土壤保持等服务上的相似性,识别出具有显著空间集聚特征的功能分区,分析各区域在生态系统服务组合中的协同关系。研究在 SPSS 27 软件平台上完成聚类运算,通过设定最优聚类数并反复迭代,确保各类别内部服务组合一致性,最终将流域划分为农产品主产区、生态涵养区、水质安全区 3 类功能区,分别对应农业供给高值区、水土保持优先区、水质调控区,推动流域水环境治理由粗放式向精细化变化,全面提升区域可持续发展能力。

3 结果与分析

3.1 流域生态系统服务时空变化特征

南四湖流域生态系统服务的时空演变特征揭示了农业供给、水文调节与环境支持功能之间的区域差异与动态变化。研究表明,农产品供给服务在湖西平原地区表现突出,多年平均作物产量达 15.15 t/hm^2 ,且 2010—2025 年间增长 2.01%,反映出该区域农业生产的持续强化趋势。与此形成对比的是,畜禽饲养量由 9.77 头/hm^2 下降 50.82%,尤以西部汶上县、定陶区等传统养殖密集区最为明显,和流域持续推进治污工程、生态红线管控

有直接关联。水产供给服务则呈现整体下滑态势,年均供给量减少 7.16%,微山县及湖东区域尤为显著,体现出湖泊生态保护压力加剧对渔业资源利用的制约作用。在水文调节类服务方面,多年平均产水量为 193.40 mm ,东部山地丘陵区为高值集中分布区,而西部平原区普遍偏低,整体呈下降趋势,进一步凸显水资源调配的区域不平衡问题。水质净化能力以总氮(TN)输出作为核心指标,多年平均为 5.00 kg/hm^2 ,其中东部山亭区等县域污染负荷最低,具备较强的生态缓冲能力。土壤保持服务评估结果显示,流域平均侵蚀强度为 9.24 t/hm^2 ,依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007),整体处于微度级别,但在湖东泗水县、邹城市、山亭区等地,侵蚀程度相对较高,需要工作人员加强水土流失防控。

3.2 流域生态系统服务权衡关系特征

通过 Spearman 秩相关分析,明确南四湖流域生态系统服务之间的相互关系,为了研究农业活动和水环境质量的关系提供了科学依据。研究发现,在供给类服务中,作物产量和畜禽饲养量、水产供给量呈现显著正相关,表明农业系统内部各类产出具有协同增强趋势^[2]。然而,在供给服务被调节服务之间作物供给量、总氮(TN)输出量呈高度正相关,而 TN 作为水质净化能力的指标,其增加意味着水质净化服务的下降,从而体现作物供给和水质净化服务之间存在明显的权衡关系。在水文调节类服务方面,产水量与 TN 输出、土壤侵蚀均呈显著正相关,说明水资源分配、污染负荷、水土流失之间存在联动效应,进一步体现流域水环境管理的复杂性^[3]。上述分析表明,南四湖流域生态系统服务间呈现出复杂的交互影响格局,尤以农业生产和水质调控的负向关系最为突

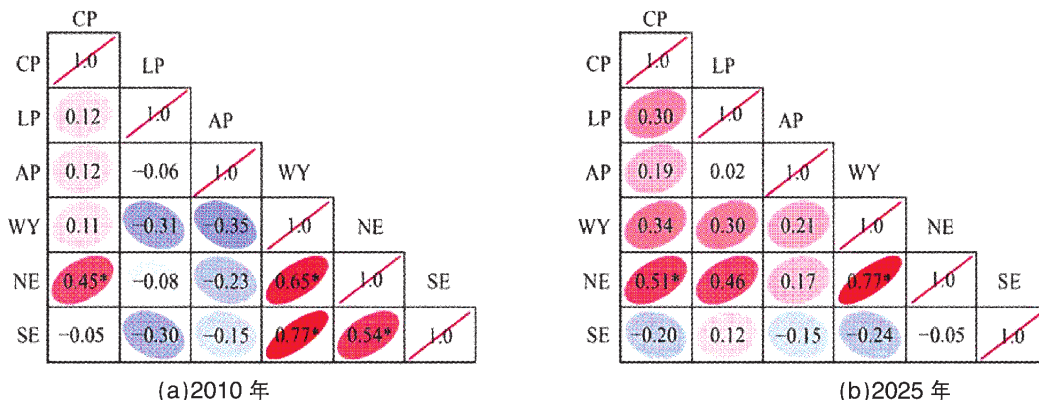


图 1 2010—2025 年生态系统服务相关性

出,如图 1 所示。

3.3 南四湖流域生态功能分区

基于 K-means 聚类方法分析南四湖流域 27 个县域单元的生态系统服务的功能分区,最终形成 3 类主导功能差异显著的生态功能区。通过分析各服务簇在不同区域中的贡献度发现,农产品主产区(服务簇 1)以作物供给、畜禽饲养和水产产出为主要特征,标准化贡献度分别为 0.57、0.54 和 0.20,显示出该区域高度依赖农业活动。该功能区覆盖流域西北部 60.11%的面积,包含菏泽市 9 个区(县)、济宁市西北部 5 个区(县)、泰安市宁阳县等共 15 个行政单元,平均坡度仅为 1.77°,耕地占比高达 67%,是流域粮食安全的承载区。生态涵养区(服务簇 2)主要分布在东部丘陵地带,包括济宁任城区、兖州区、曲阜市、泗水市、邹城市及枣庄市 6 个县(市、区),合计 11 个行政单元,占流域总面积 34.26%。该区域平均坡度达 3.81°,林草覆盖率达 91.33%,在土壤保持、产水调节、氮输出控制方面发挥关键作用,是维持流域生态稳定、水源涵养的重要屏障^[4]。水质安全区(服务簇 3)则仅涵盖微山县全域,作为湖泊核心区,其水域面积占全流域 60.51%,在调水工程保障中具有不可替代的地位,如图 2 所示。

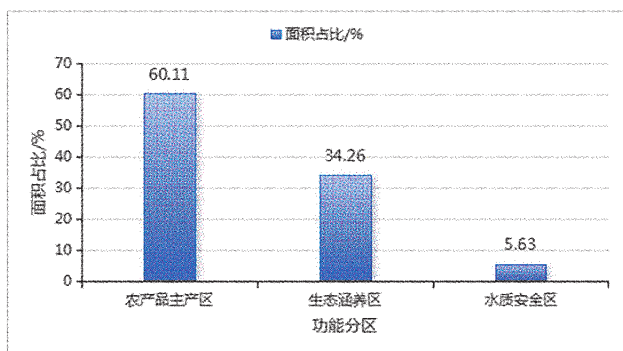


图 2 南四湖流域生态功能分区面积

进一步分析表明,各类功能区在资源利用模式与环境管理目标上存在明显差异。农产品主产区要重点优化农业结构,提升化肥利用率,减少非点源污染负荷,以缓解农业生产与水质净化之间的消极权衡关系;生态涵养区需要加强植被恢复,提高生态系统的自我调节能力,并提高水土流失、氮素迁移的防控机制;水质安全区则应该严格限制工业和农业污染物入湖总量,完善湖区

周边生态缓冲带建设,确保南水北调东线工程的水质安全^[9]。

4 结 语

南四湖湖区管理需要多层次、多部门协同合作的体系,包括环保部门、水利部门、农业部门等机构的参与。这些机构应明确各自的职责和权限,形成统一的管理网络,有效执行各项保护措施^[6]。湖区管理制定详细的管理计划,包括湖泊水质监测、生态修复、水资源调度等方面,如定期对湖泊水质进行监测,及时掌握水质变化情况;制定生态修复计划,通过人工湿地建设、水生植物种植等手段,逐步恢复湖泊的生态系统。加强湖区的执法力度,建立严格的执法队伍,对湖区内的违法排污、非法捕捞、乱倒垃圾等行为进行严厉打击,确保各项管理措施得到落实。此外,设立湖区管理专项基金,用于支持湖区管理工作的开展,包括水质监测设备的购置、生态修复项目的实施等^[7]。开展湖区保护宣传教育活动,提高公众的环保意识,鼓励社会各界参与到湖区保护中来,组织志愿者参与湖区清洁活动,开展湖区生态保护知识讲座,增强公众保护湖区的认同感和责任感^[8]。

参考文献

- [1] 孔维健,梁玉,张文馨,等.山东南四湖菹草时空分布及其对环境的影响[J].湿地科学与管理,2024,20(2):23-28.
- [2] 陈元元.南四湖济宁段水安全保障现状及建议[J].山东水利,2024(8):48-49,52.
- [3] 谭伟,纪发达,焦海燕,等.南四湖流域水污染物综合排放标准制定背景研究[J].环境科学与管理,2024,49(7):5-10.
- [4] 刘明璐,张大文.南四湖流域河湖沉积物重金属污染研究综述[J].中国水运,2024,24(2):74-79,108.
- [5] 张一泉,王卫星,次珍,等.南四湖菹草生长周期对内源磷释放的影响[J].环境科学学报,2024,44(8):370-382.
- [6] 王宗志,白莹,杜慧华,等.调水影响下湖泊流域水资源多尺度演变与安全调控[J].中国水利,2024(13):27-33.
- [7] 张运林,蔡永久,彭凯,等.南水北调东线沿线湖泊生态环境面临的挑战与保护对策[J].湖泊科学,2024,36(5):1289-1302.
- [8] 姚辉勇,李敏,范福军.南水北调梁济运河及柳长河输水渠水量损耗分析[J].山东水利,2024(1):27-28.

(责任编辑 张玉燕)