

基于 SWAT 模型的瓯江流域总氮入海通量分区管控及 减排成本优化

马沿开^{1,2}, 彭嘉玉², 熊伟光², 童思陈¹, 雷坤^{1,2*}

1.重庆交通大学河海学院

2.生态环境部河口与海岸带环境重点实验室, 中国环境科学研究院

摘要 为评估瓯江流域总氮(TN)污染综合管控措施的效果并揭示其影响因素, 基于 SWAT 模型构建瓯江流域水文水质模型, 系统揭示 TN 入海通量时空分布特征和污染源结构特征, 提出综合风险指数, 识别流域 TN 污染类型, 通过 TN 减排防控措施多情景模拟, 量化不同治理方案的 TN 削减量与经济投入成本。结果表明: 1) 瓯江流域 TN 入海通量呈现“下游>中游>上游”分布特征, 高值区为松阴溪流域和瓯江入海流域, 汛期 TN 入海通量占全年总量 74%以上; 2) 松阴溪流域和瓯江入海流域为高风险源区, 其面积占比 27.83%, 但 TN 负荷贡献率达 47.5%, 流域主要污染类型为种植业主导型、工业源主导型、混合型三类; 3) 差异化的 TN 削减策略可实现 TN 削减量 42.36~6 052.52 t/a, 成本 1.44~898.21 万元/a, 相对于全域管控策略节约成本 12.25%~43.54%; 4) 瓯江流域的 TN 负荷强度在浙江省东海入海河流域属于较低流域, TN 负荷与城镇人口、建成区面积、城市化率、第三产业产值等因子呈显著正相关, 方差贡献率达 68.8%。研究表明, 瓯江流域 TN 污染与产业结构、土地利用格局密切相关, 未来流域 TN 管控压力持续存在, 分区分类差异化管控模式可提升减排成效与经济可行性。

关键词 瓯江流域; SWAT 模型; 总氮; 入海通量; 污染管控; 减排成本

中图分类号:X522 编号:1674-991X(2026)04-0-0 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20260128

Zonal control of total nitrogen flux into the sea in Oujiang River Basin based on SWAT model and emission reduction cost optimization

MA Yankai^{1,2}, PENG Jiayu², XIONG Weiguang², TONG Sichen¹, LEI Kun^{1,2*}

1.School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences

Abstract To evaluate the effectiveness of comprehensive total nitrogen (TN) pollution control measures and identify their influencing factors in Oujiang River Basin, a hydrological-water quality model was developed based on the SWAT model. The study systematically revealed the spatiotemporal distribution characteristics and pollution source structure of TN fluxes into the sea, proposed a comprehensive risk index to classify TN pollution types, and quantified TN reduction amounts and economic costs under multi-scenario simulations of TN mitigation measures. The results indicate that: (1) TN fluxes exhibited a distinct spatial gradient of "lower reaches

投稿日期: 2026-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3101704)

作者简介: 马沿开(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事流域水环境管理研究, 1215562833@qq.com

*通信作者: 雷坤(1973—), 女, 研究员, 博士, 主要从事流域水环境管理研究, leikun2023@163.com

>middle reaches > upper reaches," with high-value zones identified in the Songyinxu River sub-basin and the estuary area. Flood season contributed over 74% of the annual TN flux. (2) These high-risk source regions accounted for only 27.83% of the basin area but contributed 47.5% of the TN load, highlighting three dominant pollution types: crop cultivation-dominated, industry-dominated, and mixed sources. (3) Differentiated TN reduction strategies achieved annual TN reductions ranging from 42.36 to 6 052.52 t/a, with costs ranging from 1.44 to 898.21×10^4 yuan per year, representing cost savings of 12.25%-43.54% compared to basin-wide uniform control. (4) The TN load intensity in Oujiang River Basin was relatively low among the East China Sea inflowing river basins in Zhejiang Province. TN load showed a significant positive correlation with factors such as urban population, built-up area, urbanization rate, and tertiary industry output, with a variance contribution rate of 68.8%. The findings suggest that TN pollution in Oujiang River Basin is closely linked to industrial structure and land use patterns. Future TN control pressures persist, while zoned and categorized differentiated management strategies can enhance reduction efficiency and economic feasibility.

Key words Oujiang River Basin; SWAT model; total nitrogen(TN); flux into the sea; pollution control; emission reduction cost

氮是海洋生态系统的关键生源要素，过量氮输入会引发近岸海域富营养化及藻华暴发^[1]。“十四五”以来，全国近岸海域水质总体改善明显，但面向 2035 年实现海洋生态环境根本好转的目标，我国面临入海污染负荷居高不下、部分河口海湾污染严重等突出挑战^[2]。陆源污染占海洋污染来源的 80%以上^[3]，入海河流是陆源污染的主要输送通道^[4-5]。全国第二次污染普查数据显示，农业源和生活源 TN 排放量是流域的主要污染源，成为制约流域海域环境质量的主要因素。

氮通量的准确估算可以为控制 TN 负荷提供基础信息。物理过程模拟及考虑社会经济模型的物理过程模型被广泛应用于营养盐负荷的预测^[6]，焦锋等^[7]耦合 SWAT 模型与马尔科夫链模型，研究社会经济发展对江苏省小流域（西涧河）面源污染的影响。汪栩志等^[8]为探究洱海流域最佳农田管理措施，利用 SWAT 模型模拟了化肥氮磷减施、改变耕作模式等 16 个情景下洱海流域氮磷流失削减效果；毕杨等^[9]通过 SWAT 模型解析流域点、面源负荷排放的时空特征以及识别流域 TN 的关键源。然而，以往的研究多关注于流域模型在面源污染时空特征刻画、管控效果评估以及社会经济发展的影响等方面，较少有研究考虑不同管控措施实施的技术经济可行性。

针对这一研究现状，本研究选择东海温州湾的主要入海河流——瓯江为研究区，利用 SWAT 模型开展流域 TN 污染模拟和管控策略研究，基于 TN 污染管控措施减排成本分析方法，对 TN 污染管控策略的经济可行性进行评价，以期瓯江流域制定兼顾公平、效率的 TN 污染减排方案提供技术支撑。

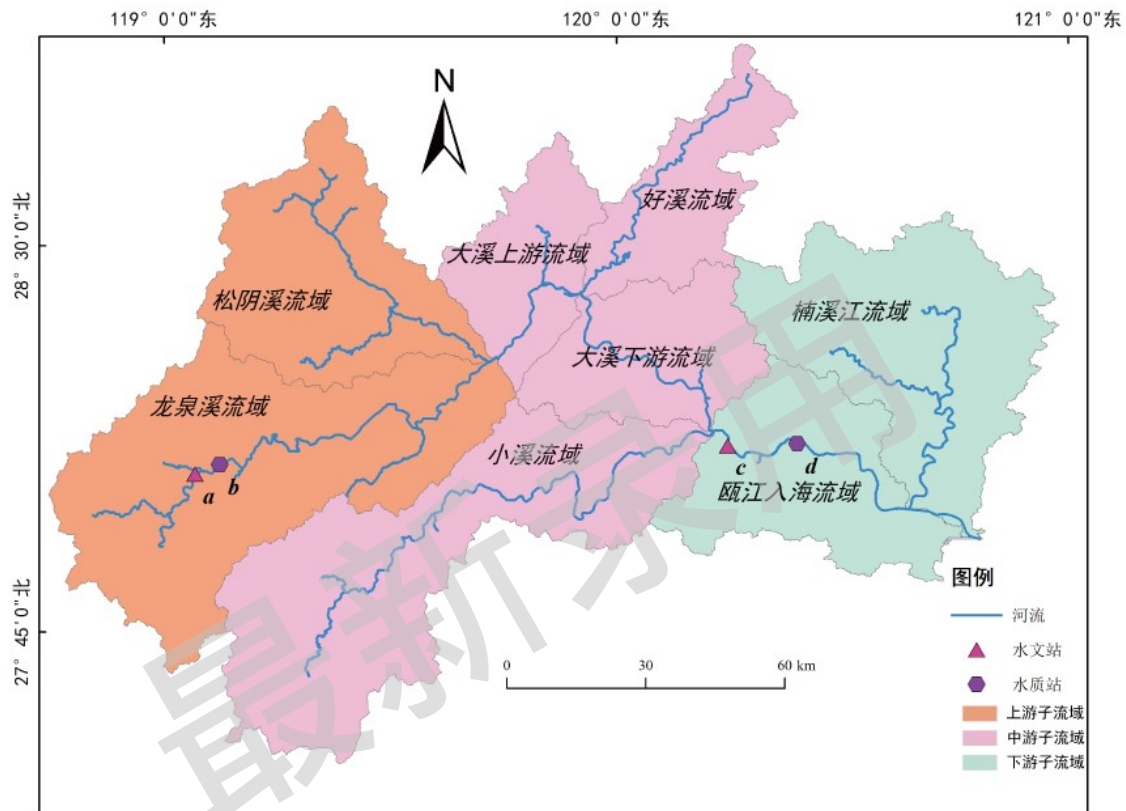
1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

瓯江流域位于浙江省南部（118°45'E~121°00'E，27°28'N~28°48'N）（图 1），为浙江省第二大水系。干流总长约 390 km，流域面积约 1.8 万 km²。瓯江发源于龙泉市与庆元县交界的百山祖西北麓锅帽尖，自

西向东流，纵贯整个浙南山区，途径丽水、温州两市，最终在温州市汇入东海温州湾。作为浙南核心生态屏障和经济走廊，瓯江流域土地利用类型多样，空间格局呈现山地林地为基地、平原耕地与城镇建设用地连片分布的特征。

借助 SWAT 模型子流域划分模块，将全流域划分为 8 个子流域。其中龙泉溪流域、松阴溪流域构成流域上游，主导功能以生态保护、农林生产及水电开发为主；中游包含大溪上游流域、大溪下游流域、好溪流域、小溪流域；下游涵盖瓯江入海流域与楠溪江流域。流域中下游集聚丽水、温州两大都市圈，人口集聚度高、工商业产业密集，是浙江省乃至全国经济活力突出的区域。受流域特殊山地丘陵地形约束，叠加区域高强度人类生产生活活动，流域水资源承载力与水环境质量面临显著胁迫^[10]。



注：a—南大洋；b—临江；c—鹤城；d—小旦。

图 1 瓯江流域水系及子流域划分

Fig.1 Division of the water system and sub-systems in Oujiang River Basin

1.2 数据来源

SWAT 模型建立所需基础数据，水文水质数据、污染数据和社会经济指标数据具体数据来源如表 1 所示。

表 1 数据具体内容及来源

Table 1 Specific content and source of the data

数据类型	具体内容	年份	数据精度	数据来源
空间基础数据	数据高程模型 (DEM)	2023	30 m 分辨率	地理空间数据云
	土地利用	2020	90 m 分辨率	地方自然资源部门
	土壤	2020	1 km 分辨率	世界和谐土壤数据库 (HWSD)
水文气象数据	气象数据（降水、气温、湿度、蒸发量、相对湿度、风向风速、日照时数等）	2015—2023	逐日	浙江省水文局
	水文站数据（南大洋、鹤城）	2015—2023	逐日	浙江省水文局
污染与水质数据	污水处理厂、企业	2019—2023	逐日	温州市、丽水市环境统计数据、
	畜禽养殖	2019—2023	年尺度	温州市、丽水市农村农业局
	施肥	2019—2023	月尺度	温州市、丽水市农村农业局
	地表水水质监测站数据（临江、小旦）	2019—2023	逐日	浙江省生态环境监测站
社会经济指标	人均 GDP、第一二三产业总值、建成区面积、城镇人口、城市化率	2019—2023	年尺度	《丽水市统计年鉴》 《温州市统计年鉴》

1.3 研究方法

1.3.1 模型建立

模型率定采用“先水文、后水质”的分步率定策略，选取南大洋、鹤城两个水文站实测流量数据为约束，对流域水文过程进行率定与验证；在水文模拟精度满足的基础上，进一步对临江、小旦水质站进行 TN 通量相关参数的率定与验证。模型率定采用 SWAT-CUP 软件中的 SUFI-2 算法，并开展参数敏感性分析与不确定性分析。综合 SWAT 参数物理意义、已有流域水文水质模拟研究中的常用敏感参数^[11]，以及研究区径流形成和氮素迁移转化过程特征，经敏感性分析后选取 15 项水文参数和 7 项 TN 负荷参数参与率定，各参数初始范围及率定后的最优取值见表 2。径流和 TN 负荷模拟以 2019—2021 年为率定期、2022—2023 年为验证期。模型模拟效果采用纳什-萨克利夫效率系数（NSE）、决定系数（ R^2 ）和百分偏差（PBIAS）等统计指标进行可靠性评价。

表 2 率定参数初始范围及最佳取值

Table 2 Initial ranges and optimal values of the calibration parameters

类别	参数及迭代方式	参数含义	初始范围		最佳取值
			最小值	最大值	
径流	v__SURLAG.bsn	地表径流滞后系数	0.05	24	18.416
	v__ADJ_PKR.bsn	峰值径流调整因子	/	/	2.915
	v__EVRCH.bsn	河道蒸发系数	0.5	1	0.638
	v__TRNSRCH.bsn	河道传输损失系数	0	1	-0.200
	v__ALPHA_BF.gw	基流退水系数	/	/	0.823
	v__LAT_TTIME.hru	侧向流传输时间	0	180	101.349
	v__OV_N.hru	地表径流曼宁糙率系数	0.01	30	34.101
	r__SLSUBBSN.hru	平均坡长	10	150	123.224
	v__CH_N2.rte	主河道曼宁糙率系数（N）值	-0.01	0.3	0.113
	v__CH_K2.rte	主河道有效水力传导度	-0.01	500	-114.220
	v__ALPHA_BNK.rte	河道调蓄系数	0	1	0.512
	v__CH_N1.sub	支流曼宁公式N值	0.01	30	15.016
	v__CH_K1.sub	支河道有效水力传导度	0	300	82.203
	v__PLAPS.sub	降水垂直递减率	-1000	1000	139.648
	v__CN2.mgt	SCS 径流曲线数	35	98	89.066
TN 负荷	v__ERORGN.hru	有机氮富集比	0	1	0.360
	v__NPERCO.bsn	氮下渗系数	0	1	0.065
	v__CDN.bsn	反硝化指数速率系数	0	0.015	0.005
	v__CMN.bsn	腐殖质矿化速率因子	0.0001	0.003	0.002
	v__RS3.swq	20 °C时河道氨氮底源速率系数	0	1	0.912
	v__RS4.swq	20 °C时河道有机氮沉降速率系数	0.001	0.1	0.003
	v__HLIFE_NGW_BSN.bsn	地下水中氮半衰期	0	500	447.500

1.3.2 风险源区识别

基于模型的.sub 后缀文件输出结果，对子流域进行归一化加权处理，得到其综合风险指数（ D_i ）^[12]，并利用 Jenks 法将 D_i 划分为 3 个区间： $D_i \geq 0.7$ ，高风险区； $0.7 < D_i \leq 0.4$ ，中风险区； $D_i < 0.4$ ，低风险区。 D_i 计算公式如（1）所示：

$$D_i = \alpha \times \frac{L_i - \min(L)}{\max(L) - \min(L)} + \beta \times \frac{I_i - \min(I)}{\max(I) - \min(I)} \quad (1)$$

式中： D_i 为第 i 个子流域的综合风险指数，无量纲； L_i 为第 i 个子流域的 TN 负荷，t； I_i 为第 i 个子流域的 TN 负荷强度，t/(km²·a)； $\max(L)$ 和 $\min(L)$ 分别为所有子流域中 TN 负荷最大值、最小值，t； $\max(I)$ 、 $\min(I)$ 分别为所有子流域中 TN 负荷强度最大值和最小值，t/(km²·a)； α 、 β 为 TN 负荷与负荷强度的权重系数，本研究均取 0.5，表示两者同等重要。

1.3.3 TN 污染管控减排情景设置

基于流域风险源区识别和 TN 污染源结构核算结果，分区分类设定 TN 污染管控措施。分区依据 D_i 评

价设定为高风险区和非高风险区（中风险和低风险）；根据 TN 的污染源类型以及污染物的输移规律，TN 污染管控措施分为源头削减、过程阻断、末端拦截三类，具体的 TN 污染管控情景设置见表 3。为了对比 TN 管控措施差异化实施和全流域实施效果，提出了全流域实施某种减排情景的无差异 TN 污染管控策略、分区分类实施某种减排情景的差异化 TN 污染管控策略 2 种减排措施。

表 3 TN 污染管控减排情景设置
Table 3 Planned emission reduction scenarios for different basin types

情景编号	聚类类型	子流域风险等级	管控类型	情景描述
S1	无	无	无	基准情景
S2	生活源主导	高风险子流域	末端拦截	仅农村生活废水污水处理厂排放减少 20%
S3	农业源主导	高风险子流域	源头削减	化肥施用量减少 20%
S4			过程阻断	设置植被缓冲带 5 m
B2		非高风险子流域	源头削减	化肥施用量减少 10%
B3			过程阻断	设置植被缓冲带 3 m
S5	混合型	高风险子流域	末端拦截	所有污水处理厂排放减少 20%
S6			源头削减	化肥施用量减少 15%
S7			过程阻断	设置植被缓冲带 4 m
S8			末端拦截	畜禽废水处理
S9		非高风险子流域	源头削减	三池两坝建设
B4			末端拦截	所有污水处理厂排放减少 10%
B5			源头削减	化肥施用量减少 10%

1.3.4 TN 污染管控措施减排成本分析方法

基于近岸海域氮磷污染陆海气协同防治关键技术研究与示范课题研发成果^[13]，单位 TN 减排成本的基本核算公式为：

$$u_m = \frac{a_m I_m + O_m}{Y_m} \tag{2}$$

式中， u_m 为措施 m 的单位 TN 减排成本，万元/t； I_m 为工程建设投资，万元； a_m 为投资年化系数； O_m 为年度运行维护成本，万元/a； Y_m 为该措施的 TN 年削减量，t/a。各类 TN 污染管控措施单位减排成本分析结果见表 4^[13]。

表 4 各污染控制措施的单位 TN 减排成本（浙江参数）
Table 4 Unit TN reduction cost of various pollution control measures (Zhejiang parameters)

污染控制措施	单位 TN 减排成本/（万元/t）
城镇污水处理	0.364
农村污水处理终端	0.268
生态拦截沟渠	0.130

污染控制措施	单位 TN 减排成本/(万元/t)
畜禽废水处理	0.231
三池两坝建设	0.034
污水处理厂提标改造	0.056

在单位减排成本保持不变的条件下，管控策略的年化治理成本计算为：

$$C_{p,m}=u_m\Delta L_{p,m} \tag{3}$$

若某一管控策略同时包括多项措施，则其总年化治理成本为：

$$C_p=\sum_m C_{p,m} \tag{4}$$

式中， $C_{p,m}$ 为策略 p 下措施 m 的年化治理成本，万元/a； C_p 为该策略各项措施年化治理成本之和，万元/a。

2 结果与讨论

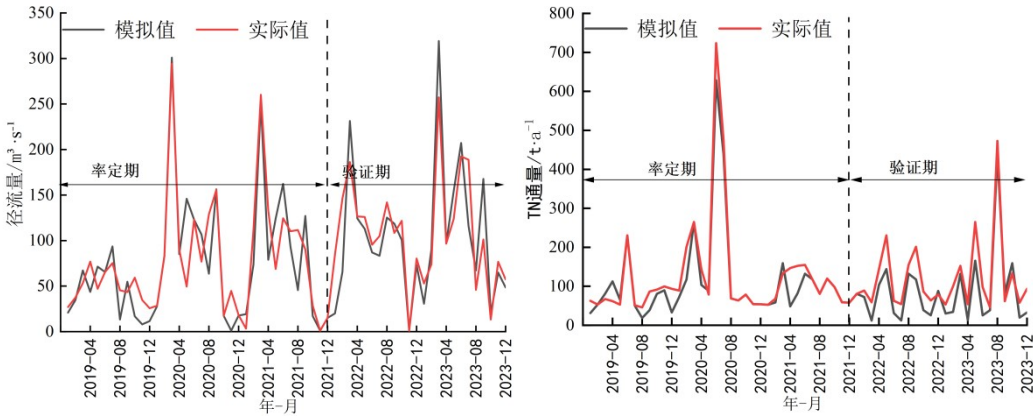
2.1 SWAT 模型率定与验证

水文站的径流量和水质站 TN 通量在率定期内的 R^2 均大于 0.6，NSE 均大于 0.6，PBIAS 均小于 $\pm 30\%$ ，验证期内 R^2 均大于 0.6，NSE 均大于 0.6，PBIAS 均小于 $\pm 30\%$ ，说明模型模拟效果良好（表 5）。模型率定与验证的模拟值和实测值对比结果如图 2 所示，南大洋与鹤城水文站径流量的模拟中，南大洋站对于极端值模拟效果较为良好，部分趋势在验证期内失真，鹤城站对于极端值的模拟效果有部分偏小情况，但整体趋势模拟效果良好；临江与小旦水质站 TN 通量模拟中，临江区会有模拟值与实际值失真情况，但整体趋势以及极端值的模拟情况较为良好，小旦站位于流域出口，模拟结果优秀。

表 5 模型性能评价结果

Table 5 Model performance evaluation results

站点类型	站点编号	率定期			验证期		
		R^2	NSE	PBIAS/%	R^2	NSE	PBIAS/%
水文站 (径流量)	南大洋	0.69	0.64	15	0.67	0.62	12
	鹤城	0.77	0.75	-21	0.75	0.73	-18
水质站 (TN 通量)	临江	0.82	0.75	25	0.85	0.80	20
	小旦	0.86	0.87	5	0.85	0.88	9



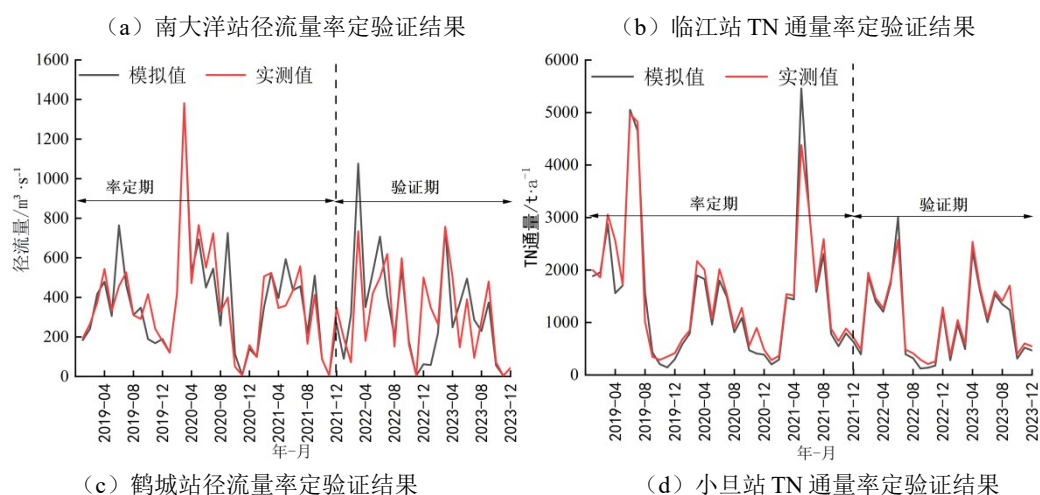


图2 瓯江流域站点月径流量和 TN 模拟与实测值动态

Fig.2 Monthly dynamics of simulated and observed runoff and total nitrogen concentrations at monitoring stations in Oujiang River Basin

2.2 瓯江流域 TN 入海通量时空分布特征

瓯江流域 TN 通量空间分布特征如图 3 (a) 所示, 上游 TN 通量为 2 186.94 t/a, 中游 TN 通量为 3 086.48 t/a, 下游 TN 通量为 4 675.31 t/a, 整体呈现出“下游>中游>上游”的趋势。高值区位于松阴溪流域; 中游 TN 通量高值区位于大溪上下游流域; 下游高值区则在瓯江入海流域。瓯江流域的汛期主要集中在 4—9 月, 梅汛期是主汛期, 集中在 4—6 月, 7—9 月为台汛期, 台风暴雨为主, 降水强度大, 非汛期主要集中在 10 月—次年 3 月^[14]。如图 3 (b) 所示, 径流量在进入 4 月开始大幅增长, 在 5 月达到最大值 180.80 m³/s, 汛期的平均径流量为 132.16 m³/s, 非汛期的平均径流量为 34.35 m³/s, 汛期径流量是非汛期的 3.85 倍, 占全年的 74% 以上。汛期的 TN 通量为 6 783.06 t/a, 是非汛期的 2.42 倍。因此, 河道径流量的变化会对 TN 通量与迁移有影响, TN 通量与径流量呈现相同的变化趋势。

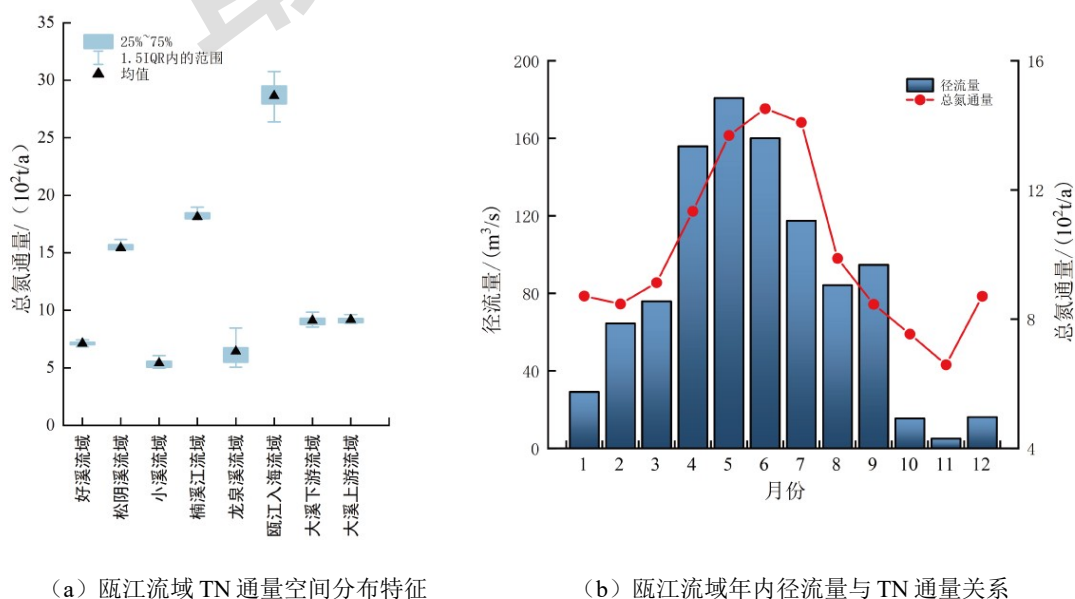


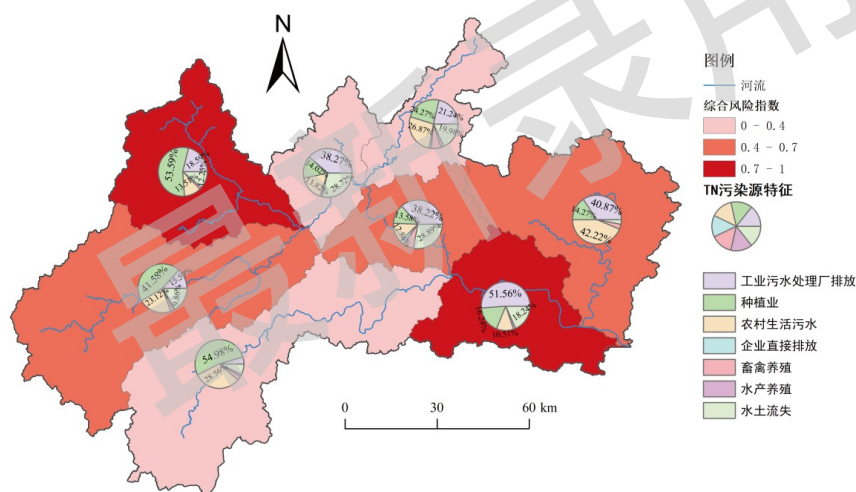
图3 瓯江流域 TN 通量时空分布特征以及年内径流量与 TN 通量关系

Fig.3 Spatiotemporal distribution characteristics of TN flux in Oujiang River Basin and the relationship between annual runoff and

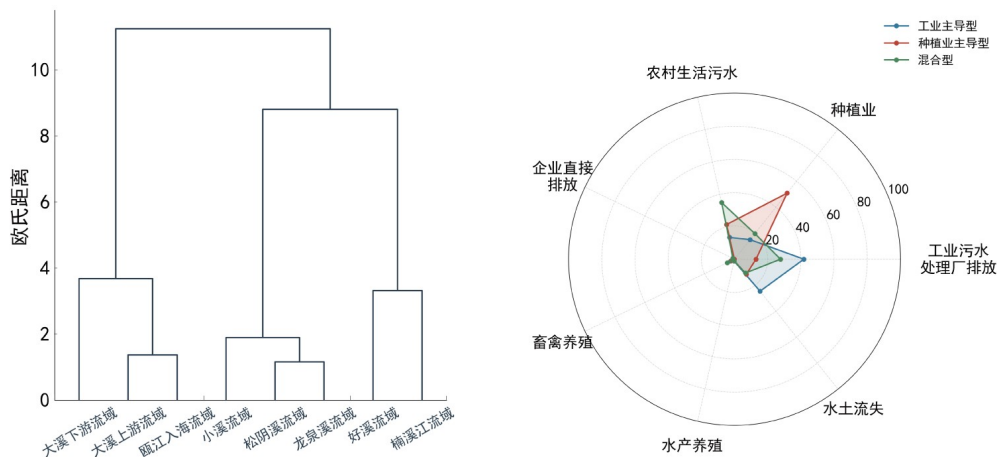
2.3 瓯江流域 TN 污染风险区和污染源结构

通过统计各类污染源的多年平均 TN 入河负荷, 结果如图 4 (a) 所示。全流域 TN 负荷达到 6 852.57 t, 全流域 TN 负荷强度是 1.42 t/(km²·a)。8 个子流域中, TN 负荷最高是瓯江入海流域, 达到 1 760.46 t, 最低是小溪流域, 为 546.54 t; TN 排放强度的范围是 0.81~2.22 t/(km²·a), 最高是瓯江入海流域, 最低是大溪上游流域。根据 D_i 分级结果, 高风险区域为上游的松阴溪流域和下游的瓯江入海流域, 其面积之和占流域总面积的 27.83%, TN 负荷贡献率达 47.5%; 中风险区有龙泉溪流域、大溪下游流域和楠溪江流域, 低风险区有小溪流域、大溪上游子流域和好溪流域。

根据肘部法则确定最佳类别数 (k), 结合层次聚类进行合理聚类。如图 4 (b) (c) 所示, 根据连接距离情况, 将上游的松阴溪流域以及龙泉溪流域和中游的小溪流域第一类别, 该类别污染特征为种植业主导型, 占比介于 41.58%~59.59%之间; 将中游大溪上下游流域和瓯江入海流域归为第二类别, 该类别污染特征以工业污水处理厂排放为主导型, 占比介于 35.22%~51.56%之间; 将好溪流域和楠溪江流域归为第三类别, 该类别污染特征为混合型, 污染源排放分布较为均衡。



(a) 瓯江流域 TN 风险分级及污染源排放特征



(b) 基于欧氏距离和 Ward.D2 法的层次聚类树状图 (c) 各聚类污染源结构占比

图 4 瓯江流域 TN 风险分级、污染源排放特征以及聚类分析

Fig.4 Total nitrogen risk levels, pollution source emissions, and cluster analysis in Oujiang River Basin

2.4 流域污染控制策略减排效果及成本分析

两种策略的流域 TN 削减效果如图 5 所示，无差异化 TN 污染管控策略 S4 子流域全域治理 TN 削减量达 5 896.56 t/a，为最高 TN 削减管控情景，其次是 S7、S5、B3，削减量分别达到 4 678.58 t/a、3 583.65 t/a 和 3 058.25 t/a，上述治理以缓冲带设置与工业污水处理厂减排为主，削减效果突出，采取差异化 TN 管控策略，实施 S4、S7、S5、B3 也能具备 509.65~1 058.52 t/a 的 TN 削减量；无差异化 TN 污染管控策略下 S2、S3、S6、B2、B4、B5 全域的 TN 削减量在 1 358.63~2 587.89 t/a 区间，主要控氮措施为化肥用量减少和工业废水减排，与 S4、S7、S5、B3 相比，TN 削减力度较轻，采取差异化 TN 管控策略，S2、S3、S6、B2、B4、B5 的 TN 削减量 347.85~658.85 t/a，削减能力是无差异化 TN 污染管控策略的 1/3；无差异化 TN 污染管控策略下 S8 和 S9 情景 TN 削减量不足 300 t/a，削减措施以畜禽养殖和水产养殖为主，采取差异化 TN 管控策略，S8 和 S9 情景 TN 削减量不足 60 t/a。

从治理投资成本角度来看，无差异化 TN 污染管控策略下，S4、S5、S7 和 B4 的投资成本均超过 600 万元/a，且 S5 为全流域治理成本的峰值，达到 1 307.45 万元，其次是 S4 和 B4，分别达到 766.55 万元/a 和 722.78 万元/a；S3、S6、S8、S9、B2、B5 全域治理投入均低于 100 万元/a。采取差异化 TN 管控策略，S5 为最大治理成本，310.14 万元，其余治理成本较高的还包括 B4 和 S4，花费分别为 220.35 万元和 137.61 万元，治理成本较低的情景 S9、B2 和 B5，花费不高于 10 万元/a。分区分类的 TN 削减策略可实现 TN 削减量 42.36~6 052.52 t/a，成本为 1.44~898.21 万元/a，相对于全域管控策略可节约成本 12.25%~43.54%。

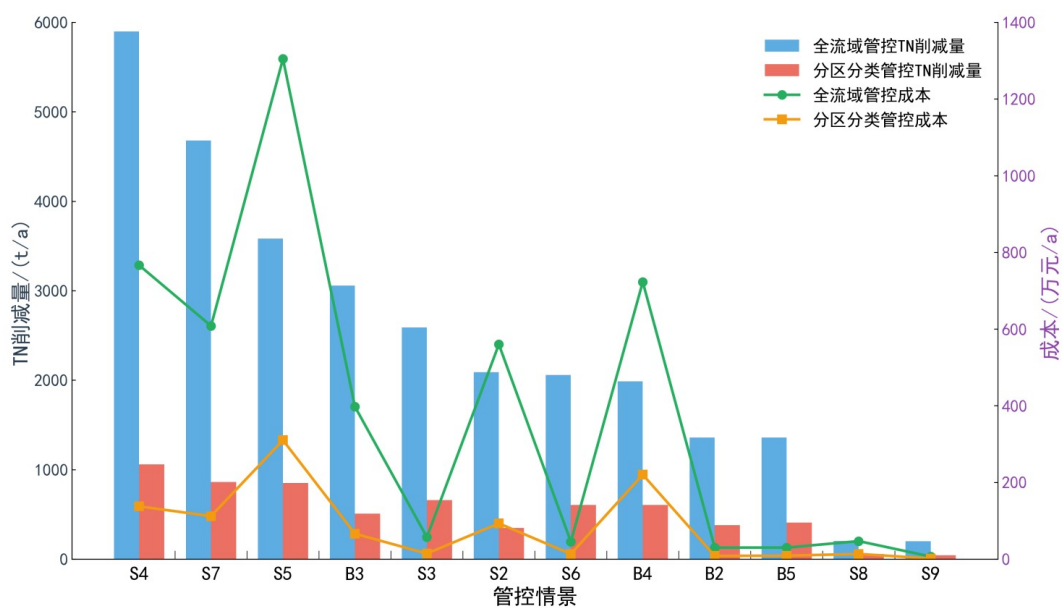
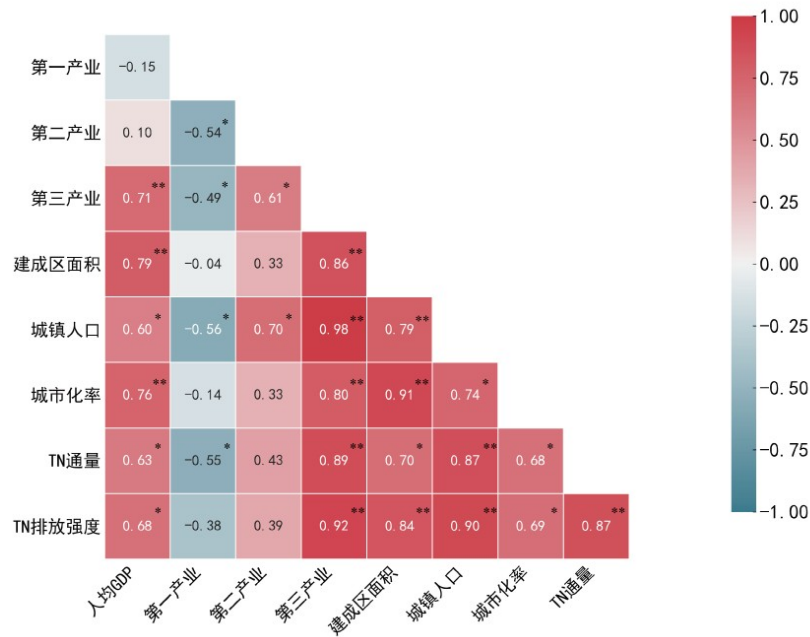


图 5 瓯江流域污染控制策略减排效果及减排成本分析

Fig.5 Analysis of pollution control strategies, emission reduction effects, and costs in Oujiang River Basin

2.5 瓯江流域 TN 驱动机制分析

瓯江流域社会经济指标与 TN 污染指标的相关性分析如图 6 所示。TN 通量与人均 GDP、建成区面积、城市化率呈显著正相关，皮尔逊相关系数分别为 0.63、0.70、0.68，与第一产业呈显著负相关（-0.55），与第三产业、城镇人口成强正相关，皮尔逊相关系数分别为 0.89、0.87；TN 排放强度与人均 GDP 和城市化率呈显著正相关，皮尔逊相关系数分别为 0.68、0.69，与第三产业、建成区面积、城镇人口呈强相关，皮尔逊相关系数分别为 0.92、0.84、0.90。综上发现，第三产业以及城镇人口对 TN 污染指标影响较大。图中显示人均 GDP、城镇化率以及城镇人口之间具有较强相关性，初步表明变量之间可能存在多重共线性问题。通过进一步计算各解释变量的方差膨胀因子（VIF），结果发现所有变量的 VIF 均在 5~10 范围内，存在较强多重共线性问题，因此选择采用主成分分析法对变量进行降维处理。



注：*表示 $p<0.01$ ；**表示 $p<0.001$ 。

图6 瓯江流域 TN 污染指标与经济发展指标相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of total nitrogen pollution indicators and economic development indicators in Oujiang River Basin

通过对 9 个指标进行 KMO 以及 Bartlett 球形检验，计算出 KMO 的值为 0.765，Bartlett 球形检验显著性小于 0.001，说明适用于主成分分析（图 7），分析结果如表 5 所示，提取出特征值大于 1 的两个主成分，第一主成分（方差贡献率 68.8%）由人均 GDP、第二产业、第三产业、建成区面积及城市化率等变量高度正向驱动，其中第三产业、建成区面积、城镇人口贡献率分别为 1.004、0.894、0.980，对排序贡献较大；而第二主成分（方差贡献率 16.7%）则主要与第一产业正向关联，载荷为 0.765，构成农业活动因子。如图 7（b）所示，流域内 TN 污染强度的主要驱动力并非单一指标，而是以城镇化进程、工业与服务经济发展为核心的综合性社会经济活动。相反，第一产业与 TN 负荷强度在 PCA 空间中分布方向差异显著，表明其驱动模式相对独立。综上表明瓯江流域的氮污染问题与城镇化、人口聚集程度和经济发展进程紧密耦合，这为从系统性角度制定协同减排策略提供了关键依据。

表 5 主成分载荷矩阵

Table 5 Principal Component Loading Matrix

指标	主成分 1	主成分 2
人均 GDP	0.768	0.456
第一产业	-0.474	0.765
第二产业	0.572	-0.625
第三产业	1.004	-0.063
建成区面积	0.894	0.416
城镇人口	0.980	-0.208
城市化率	0.854	0.353
TN 负荷	0.914	-0.104

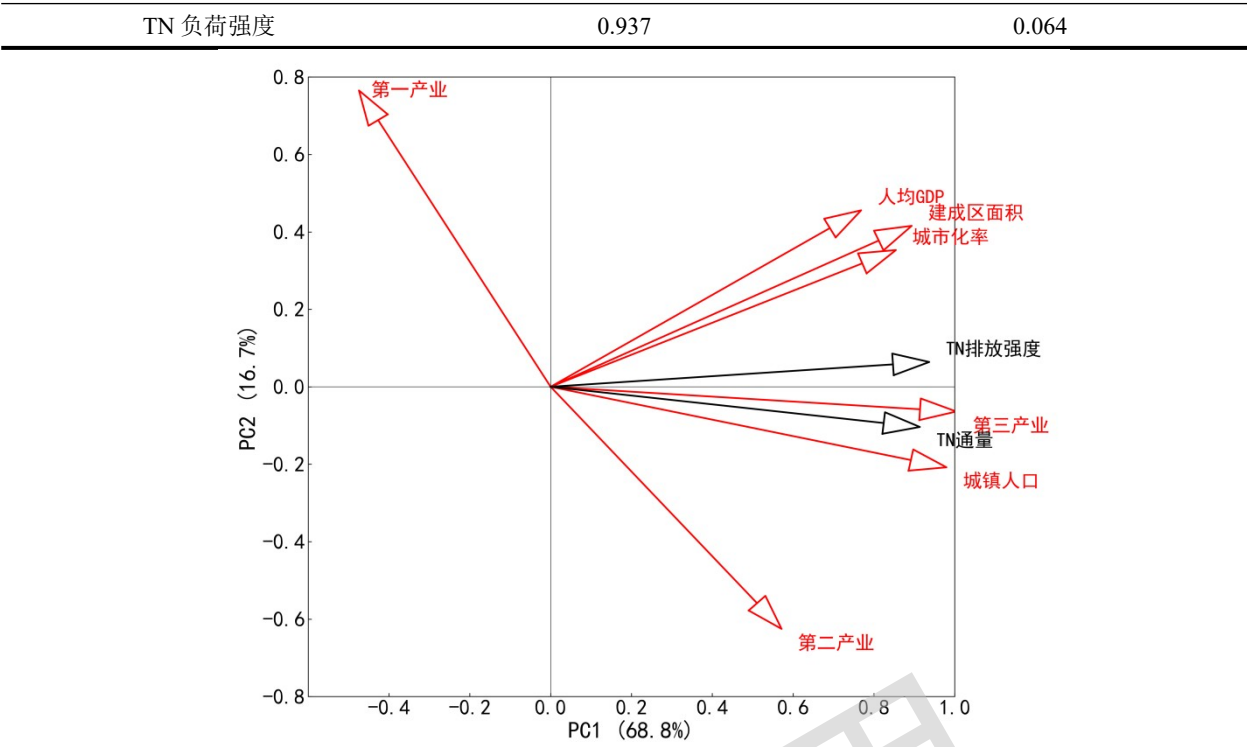


图 7 流域 TN 污染指标与经济发展指标主成分分析

Fig.7 Principal component analysis of total nitrogen pollution indicators and economic development indicators in the river basin

2.6 瓯江流域 TN 管理启示

对比甬江、钱塘江、长江等受高强度人类活动扰动的入海流域，瓯江流域年均 TN 负荷强度仅 1.42 t/(km²·a)，显著低于甬江〔17.26 t/(km²·a)〕^[15]、钱塘江〔8.03 t/(km²·a)〕^[16]与长江〔12.01 t/(km²·a)〕^[17]；即便与同属温州湾汇水水系的飞云江^[18]、鳌江流域相比^[19]，瓯江 TN 负荷强度仍处于低位，流域自然水质本底条件优良。但作为浙南地区关键性入海河流，瓯江 TN 入海通量仍是驱动温州湾近岸海域富营养化的重要影响因子，构建科学、经济可行的流域氮素管控体系，对推进陆海统筹协同治理具有关键支撑作用。

“十四五”时期，依托“五水共治”实施全流域系统综合治理，城镇污水处置、工业污染源管控、农业农村面源污染整治等领域治理成效显著。步入“十五五”阶段，流域及近岸海域水生态健康保护管控标准全面提升，叠加区域经济稳步发展需求，本底低负荷特征下的 TN 精细化管控压力持续加剧。传统“一刀切”式治理模式已难以适配流域差异化精准治污需求，因此精准识别流域关键污染分区与污染来源类型，并兼顾各类治理举措的成本效益，成为流域 TN 源头减量管控的核心实施路径^[20-21]。

表 6 入海流域 TN 负荷强度对比情况

Table 6 Table 3 Comparison of total nitrogen load intensity in Seaward River Basin

流域	TN 负荷强度/ (t/(km ² ·a))	流域面积/km ²	数据来源
瓯江流域	1.42	18 028	本研究
甬江流域	17.26	4 500	文献[15]
钱塘江流域	8.03	55 558	文献[16]
长江流域	12.01	1 800 000	文献[17]
飞云江流域	2.04	3 731	文献[18]

鳌江流域	1.03	1 550	文献[19]
闽江流域	1.11	60 992	文献[22-23]
曹娥江流域	0.60	6080	文献[24]

3 结论

（1）通过构建瓯江流域 SWAT 模型，完成瓯江流域 TN 入海通量核算。流域 TN 入海通量呈现下游 > 中游 > 上游梯度分布，松阴溪流域、大溪上下游流域、瓯江入海流域为通量高值集聚区；时间尺度上 4—9 月汛期径流主导氮素输移，汛期 TN 入海通量占全年总量 74% 以上，汛期径流量为非汛期 3.85 倍，通量与河道径流量变化趋势一致，降雨冲刷是驱动 TN 入海的核心自然因子。

（2）瓯江全流域 TN 负荷达到 6 852.57 t/a，TN 负荷强度为 1.42 t/(km²·a)。瓯江入海流域 TN 负荷最高是，达到 1 760.46 t/a，小溪流域最低，达 546.54 t/a；TN 负荷强度的区间是 0.81~2.22t/(km²·a)，最高是瓯江入海流域，最低是大溪上游流域。松阴溪流域和瓯江入海流域综合风险指数大于 0.7，均属于高风险区域。龙泉溪流域、大溪下游流域和楠溪江流域为中风险区，小溪流域、大溪上游流域和好溪流域为低风险区。流域主要污染类型为种植业主导型、工业源主导型、混合型 3 类。

（3）第一主成分对 TN 负荷的方差贡献率达 68.8%，包含城镇人口、建成区面积、第三产业、城市化率等正向驱动因素，其中第三产业、建成区面积、城镇人口贡献率分别为 1.004、0.894、0.980，对排序贡献较大；第二主成分对 TN 负荷的方差贡献率达 16.7%，第一产业正向关联，载荷为 0.765，对排序贡献较大。

（4）差异化的 TN 削减策略可实现 TN 削减 42.36~6 052.52 t/a，TN 削减效果较好的为 S7、S5、B3 减排情景，主要运用了布设缓冲带以及工业污水处理厂的减排措施，差异化 TN 削减策略的成本 1.44~898.21 万元，相对于全域管控策略节约成本 12.25%~43.54%。传统“一刀切”式治理模式已难以适配流域差异化精准治污需求，因此精准识别流域关键污染分区与污染来源类型，并兼顾各类治理举措的成本效益，成为流域 TN 源头减量管控的核心实施路径。

参考文献

[1] ZENG F F,ZUO Z,MO J C,et al.Runoff losses in nitrogen and phosphorus from paddy and maize cropping systems:a field study in Dongjiang Basin,South China[J].Frontiers in Plant Science,2021,12:675121.

[2] 生态环境部环境规划院.国家“十四五”生态环境保护规划专题研究[M].北京:中国环境出版集团,2023.

[3] 王辉,栾维新,康敏捷.渤海氮污染的来源结构与污染压力空间分布[J].地理研究,2020,39(1):186-199.

WANG H,LUAN W X,KANG M J.Nitrogen pollution source structure and spatial distribution of Bohai Sea[J].Geographical Research,2020,39(1):186-199.

[4] GUTIERREZ J R,WHITFORD W G.Chihuahuan desert annuals:importance of water and nitrogen[J].Ecology,1987,68(6):2032-2045.

[5] 王雨珊.中国七大流域人为净磷输入及河流入海磷通量研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[6] 刘杰,陈前,许妍,等.基于混合模型的长江流域洞庭湖区陆域磷输入通量及其削减预测[J].环境科学,2025,46(1):172-

- LIU J, CHEN Q, XU Y, et al. Using hybrid modeling to examine the input flux of phosphorus and its reduction in the terrestrial area of Dongting Lake area[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(1): 172-183.
- [7] 焦锋, 秦伯强, 黄文钰. 小流域水环境管理: 以宜兴湖滏镇为例[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(2): 220-224.
- JIAO F, QIN B Q, HUANG W Y. Management of water environment in small watershed with Hufu town of Yixing city as example[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(2): 220-224.
- [8] 汪栩志, 张克强, 沈修卿, 等. 基于 SWAT 模型的洱海流域面源污染最佳管理措施研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2025, 33(2): 240-251.
- WANG X Z, ZHANG K Q, SHEN X Q, et al. Simulation of the best management practices for agricultural non-point source pollution in the Erhai Lake Basin based on SWAT model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(2): 240-251.
- [9] 毕杨, 荣易, 赵琰鑫, 等. 基于 SWAT 模型的盐津河流域氮磷污染关键源识别及特征解析[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(12): 6881-6891.
- BI Y, RONG Y, ZHAO Y X, et al. Identification of critical sources and characteristic analysis of nitrogen and phosphorus pollution in Yanjin River Basin based on SWAT Model[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(12): 6881-6891.
- [10] 郭朝臣. 瓯江流域总氮排放负荷分配与限值确定研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2024.
- [11] 宋卓远, 李华林, 于佩丹, 等. 北运河上游非点源污染负荷模拟与最佳管理措施评估研究[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(2): 334-344.
- SONG Z Y, LI H L, YU P D, et al. Simulation of non-point source pollution load and evaluation of best management practices in the upper Beiyun River watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(2): 334-344.
- [12] CHANG D, LAI Z Q, LI S, et al. Critical source areas' identification for non-point source pollution related to nitrogen and phosphorus in an agricultural watershed based on SWAT model[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(34): 47162-47181.
- [13] 北京大学, 中国环境科学研究院. 氮磷污染负荷优化分配与费效分析技术[R]. 北京: 北京大学, 中国环境科学研究院, 2021.
- [14] 马沿开, 彭嘉玉, 王新艳, 等. 瓯江流域河流总氮浓度时空分布特征及人类活动影响下开发强度阈值研究[J]. *环境科学研究*, 2026, 39(2): 336-347.
- MA Y K, PENG J Y, WANG X Y, et al. Spatiotemporal distribution of total nitrogen and thresholds of human activity intensity in the Oujiang River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2026, 39(2): 336-347.
- [15] 杨宏伟, 黄国鲜, 罗艳, 等. 甬江流域氮素收支估算及驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(7): 1435-1445.
- YANG H W, HUANG G X, LUO Y, et al. Estimation of nitrogen budget and its driving factors in the yongjiang river basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(7): 1435-1445.
- [16] 张安琪. 钱塘江-杭州湾氮磷污染物迁移转化特征及来源解析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [17] LI J C, WANG L F, LIU Z, et al. Research on rural domestic sewage discharge, influencing factors and pollution loads in the Yangtze River basin[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 40970.
- [18] 王刚. 飞云江流域不同尺度氮污染溯源研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
- [19] 程全国, 王嗣彤, 雷坤. 鳌江流域水质时空变化及主要污染物通量[J]. *沈阳大学学报(自然科学版)*, 2023, 35(1): 7-15.
- CHENG Q G, WANG S T, LEI K. Spatial and temporal changes of water quality and main pollutant fluxes in aojiang river basin[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2023, 35(1): 7-15.
- [20] JIANG F, SHI X Y, XU Y L, et al. Assessing spatiotemporal dynamics and future evolution of surface water quality in Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2026, 669: 135113.
- [21] 杨月, 翁异静. 浙江山区 26 县绿色发展效率的时空格局及影响因素[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(3): 1065-1075.
- YANG Y, WENG Y J. Spatial-temporal pattern and influencing factors of green development efficiency of 26 mountainous counties in Zhejiang Province[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(3): 1065-1075.
- [22] ZHANG X Q, LIU J W, ZHU J, et al. Analysis of the spatiotemporal patterns of water conservation in the Yangtze River ecological barrier zone based on the InVEST model and SWAT-BiLSTM model using fractal theory: a case study of the

Minjiang River Basin[J].Fractal and Fractional,2025,9(2):116.

[23] YOU T G,XU Y H,XIAO Y L,et al.Research of water pollution based on vine *Copula* Function in the Min River Basin,China[J].Water,2025,17(3):332.

[24] 张志敏.曹娥江流域污染负荷估算及来源解析研究[D].沈阳:沈阳大学,2022.

最新录用