



生态与农村环境学报
Journal of Ecology and Rural Environment
ISSN 1673-4831, CN 32-1766/X

《生态与农村环境学报》网络首发论文

题目: 海河流域总氮陆海迁移特征及污染源汇耦合关系研究
作者: 逯颖, 王雪蕾, 刘帅, 黄莉, 高强, 申茜, 姚月, 郝新
DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2025.1090
收稿日期: 2025-12-11
网络首发日期: 2026-08-25
引用格式: 逯颖, 王雪蕾, 刘帅, 黄莉, 高强, 申茜, 姚月, 郝新. 海河流域总氮陆海迁移特征及污染源汇耦合关系研究[J/OL]. 生态与农村环境学报.
<https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2025.1090>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2025.1090

海河流域总氮陆海迁移特征及污染源汇耦合关系研究

逯颖^{1,2}, 王雪蕾^{1,2}, 刘帅^{1,2}, 黄莉^{1,2}, 高强³, 申茜^{4,5}, 姚月^{4,5}, 郝新^{1,2①} (1.生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2.生态环境部卫星遥感重点实验室, 北京 100094; 3.江苏海洋大学, 江苏 222005; 4.可持续发展大数据国际研究中心, 北京 100094; 5.中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要: 为揭示海河流域总氮污染物陆海传输规律, 本研究基于 GF-5 高光谱和 GF-1 等多光谱遥感数据, 结合梯度提升算法和遥感水文站量化了入海河流总氮浓度空间分布和通量变化, 耦合遥感分布式面源污染评估模型 (DPeRS) 评估陆源面源总氮流失量, 定量分析入海河流总氮污染时空分布特征对陆源流失响应机制, 并探讨了总氮污染物陆海传输的关键影响因子。结果表明: 2024 年研究区遥感反演入海河流总氮浓度为 0.10~8.46 mg L⁻¹, 总氮入海通量为 71~3373 t, 陆源面源总氮流失负荷为 56.86 kg km⁻²; 总氮高值区主要分布于海河和独流减河, 贡献 19.62% 的入海总通量, 与面源污染空间分布特征一致; 总氮入海通量月变化呈单峰特征, 与面源总氮流失量显著正相关 ($R=0.75$, $P<0.05$), 面源流失贡献率达 79.87%; 降雨与土地利用类型为入海河流总氮污染的关键影响因素, 降雨量和总氮入海通量、面源流失量显著正相关 ($R>0.30$, $P<0.05$), 农业用地、林地、草地与总氮污染的相关性更高 ($R>0.25$, $P<0.05$)。研究表明, 降雨驱动下的农业源与自然源是海河流域入海河流总氮污染的主要来源, 全程源流汇聚分析可揭示污染特征与贡献机制, 可为渤海湾陆海协同总氮污染防治治理提供技术支撑。

关键词: 高光谱、入海河流、总氮、面源污染、DPeRS 模型、遥感

中图分类号: X52

Study on Land-Sea Migration Characteristics of Total Nitrogen and Coupled Source-Sink Relationship of Pollution Sources in Haihe River Basin. LU Ying^{1,2}, WANG Xue-lei^{1,2}, LIU Shuai^{1,2}, HUANG Li^{1,2}, GAO Qiang³, SHEN Qian^{4,5}, YAO Yue^{4,5}, HAO Xin^{1,2①} (1.Satellite Application Center for Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 3.Jiangsu Ocean University, Jiangsu 222005, China; 4.International Research Center of Big Data for the Sustainable Development Goals, Beijing 100094, China; 5.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: To reveal the land-sea transport characteristics of total nitrogen (TN) pollution in the Haihe River Basin, this study quantified TN concentration and estuarine TN flux variation using gradient

收稿日期: 2025-12-11

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项资助 (2025ZD1205304); 中国博士后科学基金 (2025M781210)

①通信作者: E-mail: haoxin@mail.bnu.edu.cn

boosting algorithm and remote sensing hydrological stations based multispectral remote sensing data (GF-5 and GF-1). And the DPeRS model was applied to estimate diffuse TN loading, which was used quantitatively analyzed the response mechanism of estuarine TN variation to terrestrial TN loss, and the key influencing factors of land-sea TN transport. In 2024, TN concentrations varied between 0.10 to 8.46 mg L⁻¹, and the estuarine TN fluxes varied between 71 to 3373 t. The annual diffuse TN loading was 56.86 kg km⁻². High TN concentrations were primarily distributed in the estuaries of Haihe River and Duliujian River, contributing 19.62% of the total TN flux to the sea, consistent with the spatial distribution of diffuse TN losses. The monthly variation of TN flux into the sea showed a unimodal characteristic and was significantly positively correlated with terrestrial TN losses ($R = 0.75$, $P < 0.05$), with a diffuse TN loss contribution rate of 79.87%. Rainfall and land use were identified as the key factors. Rainfall was significantly positively correlated with both TN fluxes and terrestrial losses ($R > 0.30$, $P < 0.05$). And agricultural land, forest, and grassland had a higher correlation with estuarine TN pollution ($R > 0.25$, $P < 0.05$). Overall, the agricultural and natural diffuse TN pollution driven by rainfall are the main contributors to estuarine TN pollution in the Haihe River Basin. Full-process source-flow convergence analysis can reveal pollution characteristics and contribution mechanisms, and can provide technical support for the coordinated land-sea control and prevention of TN pollution in the Bohai Bay.

Key words: Hyperspectral, Rivers flowing into the sea, Total nitrogen, Diffuse pollution, DPeRS model, Remote sensing

1 引言

近年来,我国海洋环境稳中向好,但渤海湾等重点海域受总氮污染影响仍存在劣四类水质^[1]。研究表明,全球尺度海洋污染约 80%来自河流陆源污染的流失和传输^[2],过量的陆源氮输入直接影响近岸海域水质并引发富营养化等问题^[3,4]。复杂人地关系胁迫下,陆源总氮传输入海受面源和点源多来源影响,随着点源污染治理加强,面源污染逐渐成为入海河流的主要污染源^[5,6]。因此,准确量化入海河流总氮污染入海通量,厘清陆源总氮输入多源贡献特征,识别入海河流总氮污染的关键影响因素,可为陆海协同的总氮污染精准防治提供有力支撑。

准确量化河流总氮污染入海通量是污染源汇分析的前提,传统地面监测可以准确量化监测断面总氮瞬时浓度和流量,但当前地表水监测网存在水质与水文监测不同步的情况^[7]。随着遥感技术的发展,通过河宽遥感监测,利用三维数字河道可量化河流断面瞬时流量,结合地面水质自动站监测可实现天地一体污染通量非接触监测^[8,9]。此外,河流地表水总氮分布受陆源输入的影响时空异质性较强,传统地面点位监测无法表征总氮空间分布特征,利用总氮对高光谱卫星特定光谱波段反射和吸收特性,结合水体背景干扰因素建立定量反演模型可实现河流总氮浓度空间动态监测^[10-12]。遥感反演总氮等水质参数的方法包括物理解析法、经验法、半经验法和机器学习法等。其中,物理解析法基于水体对电磁波的反射、吸收和传输规律构建,适用于清澈水体;经验法和半经验法原理简单,但反演模型受区域和季节影响无法推广应用;机器学习法是利用梯度提升算法和随机森林等模型构建光谱与水质参数的映射关系,无需预先假设水质参数与遥感数据的函数形式,因其反演精度高被广泛应用^[13-15]。

河流总氮污染中面源污染受降雨、土地利用和农业活动的影响具有复杂性、随机性和不确定性,通过地面监测无法准确量化面源污染对河流污染的贡献特征^[6,16]。面源污染模

型是面源污染评估的常用工具，包括经验模型和机理模型^[17]。经验模型包括输入输出模型等，模型操作简单，但模拟精度较低且难以准确反映流失负荷的空间分布差异^[18]。机理模型包括 HSPF 模型和 SWAT 模型等，模型考虑了面源污染物在不同土地利用下迁移转化机理，可以有效表征人类活动、水文循环对面源污染物流失的影响，但模型构建操作复杂^[19]。其中，以 SWAT 模型为代表的机理模型的基础计算单元为汇水单元，模型参数的率定和验证依赖河流长时序监测数据，但在水库、人工河道改造和跨流域调水工程等人活动干扰较大的复杂流域，模型可靠性验证难度相对较大^[20-22]。同时，卫星遥感技术应用不仅可为机理模型提供高精度的空间数据，耦合卫星遥感技术与机理模型构建的 DPeRS 模型将面源污染评估空间精度进一步提升至遥感像元尺度^[23]。此外，DPeRS 模型整合了自然要素和社会经济要素，且模型主要由遥感数据驱动，适用于流域-区域-国家等多尺度的模拟^[24]。

渤海湾是我国唯一的半封闭海湾，在生态、经济和资源方面具有重要意义^[25]。在全国三大重点海域中，渤海入海河流总氮平均浓度是其他海域的 2~3 倍，高强度的陆源总氮流失对渤海湾的生态环境造成严重危害^[26]。本研究以海河流域为研究区，基于遥感反演识别入海河流总氮浓度沿程变化，量化总氮入海通量时空分布特征；结合 DPeRS 模型评估面源总氮流失负荷，分析入海河流总氮污染源汇关系并识别关键影响因子，为渤海湾陆海统筹总氮治理管控提供技术支撑，助力渤海湾重点入海河流“一河一策”政策制定实施。

2 研究方法或原理

2.1 研究区概况

海河流域地处我国华北地区，由海河、滦河和徒骇马颊河 3 大水系组成，总面积 32 万平方公里^[27]。海河流域西部总体地势西北高东南低，属暖温带大陆性季风气候，降水主要集中在 6~9 月，年均降水为 539 mm（2011~2016 年），年均气温为 1.5~14 °C。海河流域主要包括耕地、林地和草地，分别占总面积的 42.4%、30.9%和 9.6%^[28]。其中，耕地以旱地为主，水田面积占比不足 1%（图 1a）。研究选取的入海河流主要分布在海河水系，包含蓟运河、永定新河、海河、独流减河、青静黄排水渠、子牙新河、北排水河、廖家洼河、石碑河和宣惠河 10 条主要入渤海湾河流，同时基于区域下垫面特征，将研究区划分为北三河、永定河、大清河、子牙河、黑龙港运东和漳卫河 6 个子流域（图 1）。

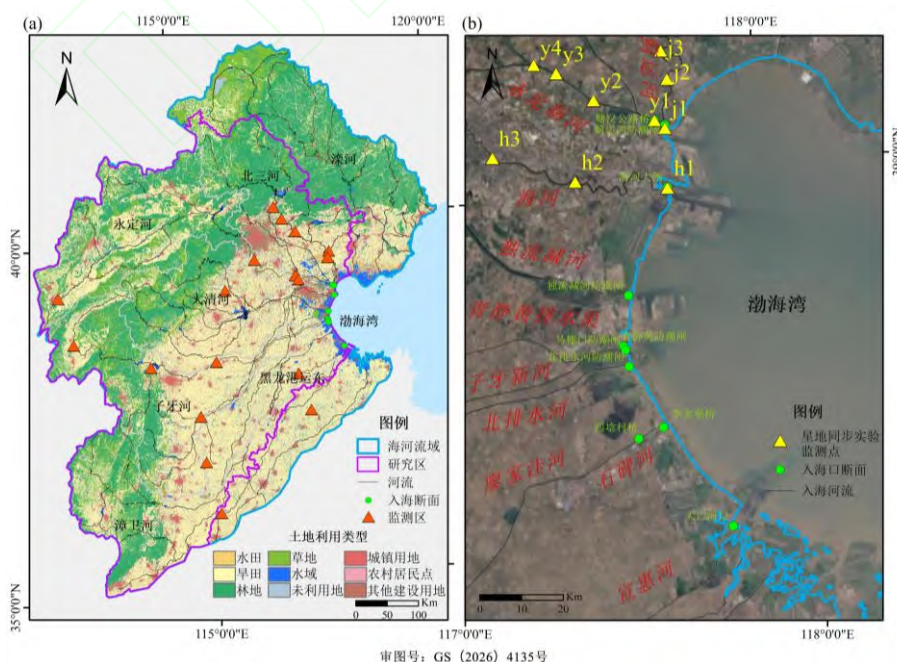


图 1 研究区土地利用和入海河流入海口断面空间分布

Fig.1 Spatial distribution of land use and estuary in the study area

2.2 河流总氮浓度高光谱遥感反演

水体总氮浓度的特征光谱响应主要集中在紫外与蓝光波段,且含氮物质与悬浮颗粒物、藻类的复合作用,使水体在 550-650 nm 可见光波段的反射率产生相应变化,但波长小于 400 nm 的紫外波段受到大气散射和仪器噪声的影响光谱响应度较低、校正精度低^[29,30]。因此,基于 2023-2024 年覆盖研究区典型断面的 GF5 系列卫星和 ZY1E/1F 的 AHSI 传感器系列影像的高光谱遥感数据,选择受大气吸收和散射干扰较小的 400-700 nm 可见光波段开展水体总氮浓度反演。首先,筛选少云、无耀斑、非冰期(每年 3-11 月)且质量较好的影像开展辐射校正、几何校正、大气校正等预处理,生成高光谱水体反射率产品。同时,2024 年 11 月开展海河、永定新河、蓟运河 3 条入海河流星地同步野外试验(图 1b)。基于星地同步野外试验结果和国家地表水水质自动监测站 4 小时监测站数据及同步过境的高光谱影像,在特征波段分析的基础上,其中 70%数据构建模型,30%数据开展精度评价,构建 9 种总氮反演模型,包括:梯度提升算法、随机森林法、岭回归、Lasso 回归、弹性网络、支持向量回归、决策树、K 最近邻法和多层感知机回归器^[31],选取均方根误差(RMSE)最低的梯度提升算法(RMSE = 1.0057)确定为总氮反演模型(图 2a)。由于 AHSI 传感器 30 m 空间分辨率,当河宽小于 120 m 时,梯度提升算法反演结果受混合像元影响较大,故研究仅对除黑龙港运东子流域的廖家洼河、石碑河以外 8 条河流开展反演,河流反演长度约为 50 km。

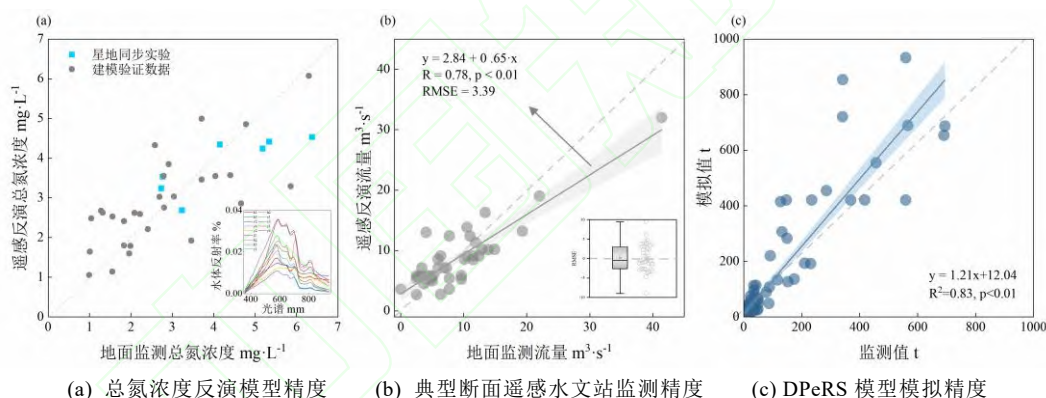


图 2 河流总氮浓度反演模型、遥感水文站和 DPeRS 模型的验证结果

Fig.2 River total nitrogen inversion model, remote sensing hydrological Station, and DPeRS model verification

2.3 河流断面总氮污染通量计算方法

河流断面总氮污染通量为某时段内总氮浓度与瞬时流量乘积的时间积分^[32]。本研究使用的总氮浓度与流量数据分别来源于国家地表水水质自动监测站和遥感水文站监测数据。其中,遥感水文站是通过无人机和无人船分别提取监测断面水面地上和水下地形数据,同时利用人工断面点位测量法获取水深和流速确定三维数字河道水利参数,最后利用 GF1、GF2、GF6 和 GF7 高分辨率遥感卫星影像识别水面宽度变化,并开展遥感水文站长时序流量的计算,核心计算公式见文献^[11]。通过典型水文站地面实测结果开展遥感水文站监测结果验证,采用 R 和 RMSE 作为评价参数,验证结果中 R 为 0.78, RMSE 为 3.39,表明二者趋势具有较高的一致性,遥感水文站监测结果满足研究需要(图 2b)。

2.4 陆源面源总氮流失量评估方法

本研究采用 DPeRS 模型开展 2024 年海河流域面源总氮流失量评估。DPeRS 模型是基

于二元结构原理构建的遥感分布式面源污染评估模型，综合考虑面源污染影响环境因素和本地化特征参数，模拟类型包括农田径流、农村生活、畜禽养殖、城镇径流和水土流失，在生态环境部全国农业面源污染监测评估业务体系中被广泛应用于^[33,34]，核心计算公式见文献^[23]。海河流域 DPeRS 模型数据库包括：土地利用、月植被覆盖度、月降雨量、土壤、地形以及分县指标调查数据。其中，遥感数据的空间分辨率均为 30 m，分县指标调查数据来源于《全国农业面源污染监测评估实施方案（2022—2025 年）》（简称实施方案）指导下 2024 年度县域尺度统计数据^[35]。通过对比 2024 年研究区内 18 个监测区总氮污染通量监测值和模拟值开展精度验证，采用 R^2 评价 DPeRS 模型的验证效果。结果表明，2024 年海河流域监测区月尺度总氮通量的监测值与模拟值一致性较高（ $R \approx 0.83$, $p < 0.01$ ），模型验证结果表明海河流域模型模拟结果满足研究需要（图 2c）。

2.5 统计分析方法

基于海河流域农业统计和空间数据整理了研究区各子流域降雨量、植被覆盖度、土地利用、坡度等影响因素，利用 SPSS 软件和 Origin 2024 软件通过冗余分析（Redundancy analysis, RDA）和皮尔逊相关分析等方法探究海河流域面源污染及入海口断面总氮通量/浓度的关键影响因素。

3 数据结果处理与分析

3.1 河流遥感反演总氮浓度时空变化特征

2024 年海河流域入海河流遥感反演总氮浓度变化范围为 $0.10 \sim 8.46 \text{ mg L}^{-1}$ ，子流域总氮浓度月均值由大到小依次为：大清河（ 2.91 mg L^{-1} ）>黑龙港运东（ 2.62 mg L^{-1} ）>北三河（ 2.57 mg L^{-1} ）>子牙河（ 2.49 mg L^{-1} ）。海河流域河流遥感反演总氮浓度变化呈单峰变化趋势，其中大清河、北三河和子牙河子流域的峰值为 5 月，黑龙港运东子流域为 10 月，各子流域的最低值均分布在 7-8 月（图 3a）。海河流域河流遥感反演总氮浓度峰值月空间分布结果图 3b-e 所示，5 月海河高值区主要分布在上游、下游和入海口，永定新河高值区分布在下游和入海口，而独流减河、蓟运河和北排水河 3 条河流高值区分布在中上游，河流总氮浓度均值分别为 3.34 、 3.26 、 3.34 、 3.22 和 3.06 mg L^{-1} ；10 月宣惠河高值区分布在上游，入海口浓度相对较低，浓度均值为 3.29 mg L^{-1} 。

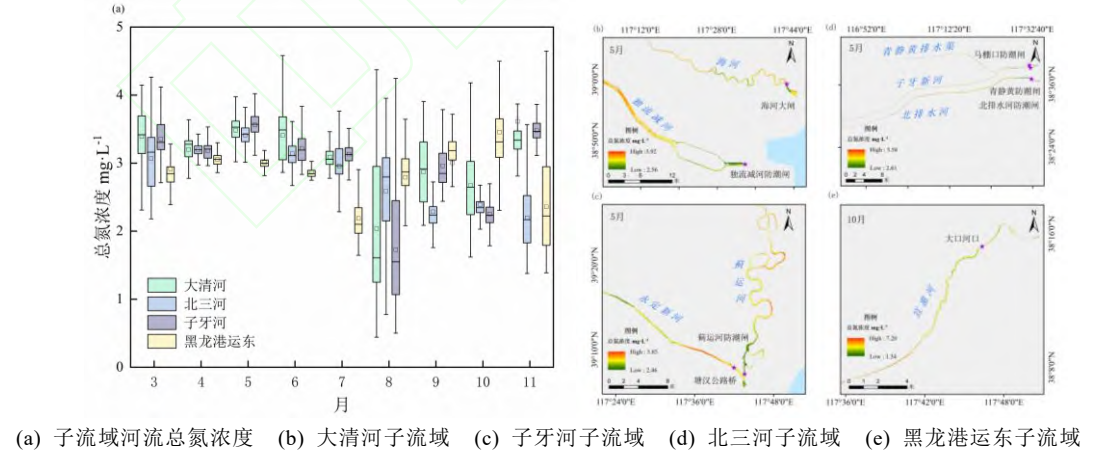


图 3 2024 年河流遥感反演总氮浓度时空分布

Fig.3 Total nitrogen concentrations distribution of remote sensing inversion in 2024

3.2 河流总氮入海通量时空变化特征

2024 年海河流域入海河流入海口总氮浓度变化范围为 $0.67 \sim 6.48 \text{ mg L}^{-1}$ ，各月总氮浓度平均值均高于地表水总氮Ⅲ类水质标准（ 1.0 mg L^{-1} ），且高于地表水总氮Ⅴ类水质标准（ 2.0 mg L^{-1} ）月份占全年的 91.67%（图 4a）。入海口总氮浓度呈双峰变化趋势，3 月和 8

月总氮浓度相对较高，平均浓度分别为 3.90 和 2.88 mg L^{-1} ，分别是地表水总氮V类水质标准的 1.95 倍和 1.44 倍。2024 年入海河流入海口总氮污染通量变化范围为 0.14~883.36 t。入海口总氮污染通量变化趋势与总氮浓度变化趋势存在明显差异，入海口总氮污染通量呈单峰变化趋势，8 月总氮污染通量相对较大，均值为 357.68 t。2024 年年度入海河流入海口总氮污染通量为 1.59×10^4 t，其中，分布在流域北部的永定新河、蓟运河、独流减河和海河年总氮污染通量相对较高，年总氮污染通量均高于 2000 t（图 4b）。

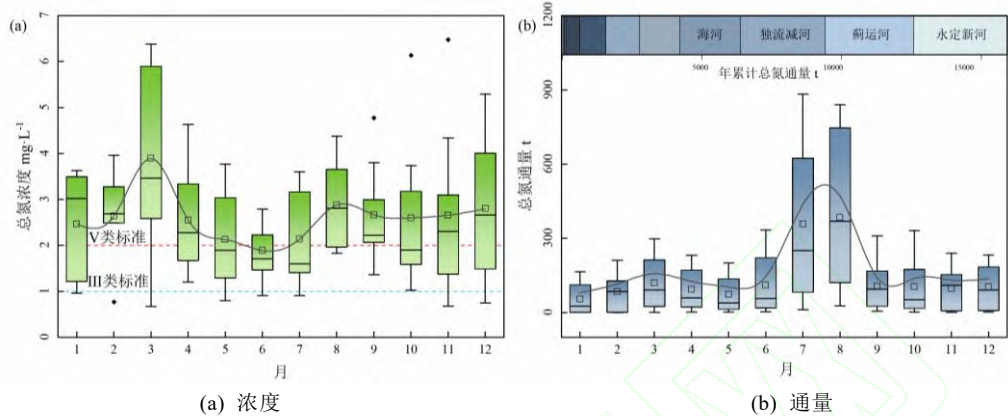


图 4 2024 年入海口总氮浓度和通量时空分布

Fig.4 Spatial-temporal distribution of estuarine total nitrogen concentration and flux in 2024

3.3 陆源面源总氮流失负荷空间分布特征

2024 年海河流域面源总氮流失量为 1.27×10^4 t，流失负荷为 56.86 kg km^{-2} ，与朱梅等学者总氮流失量数量级和空间分布特征一致^[36-38]。流域面源总氮流失负荷超出平均值的面积占比为 19.11%，高值区主要分布在流域中部和下部（图 5a）。黑龙港运东、大清河和子牙河子流域面源总氮流失负荷相对较高，分别为 141.01、62.91 和 61.32 kg km^{-2} ，均高于流域平均值。2024 年流域不同类型面源总氮流失量占比分析结果表明农业面源是首要污染源（77.27%），其次为城市面源（12.77%）（图 5b）。各子流域不同类型面源总氮流失量的占比具有明显差异，但农业面源污染占比均高于 50%，其中，黑龙港运东子流域农业面源污染占比达到 90%以上，北三河子流域的农业面源污染占比最低（52.55%），各子流域农业面源污染占比与耕地面积占比一致。Li 等人^[39]利用 SWAT 模型分析了海河流域不同来源面源总氮污染贡献，表明耕地种植是面源总氮污染的主要来源，结论与本研究一致。

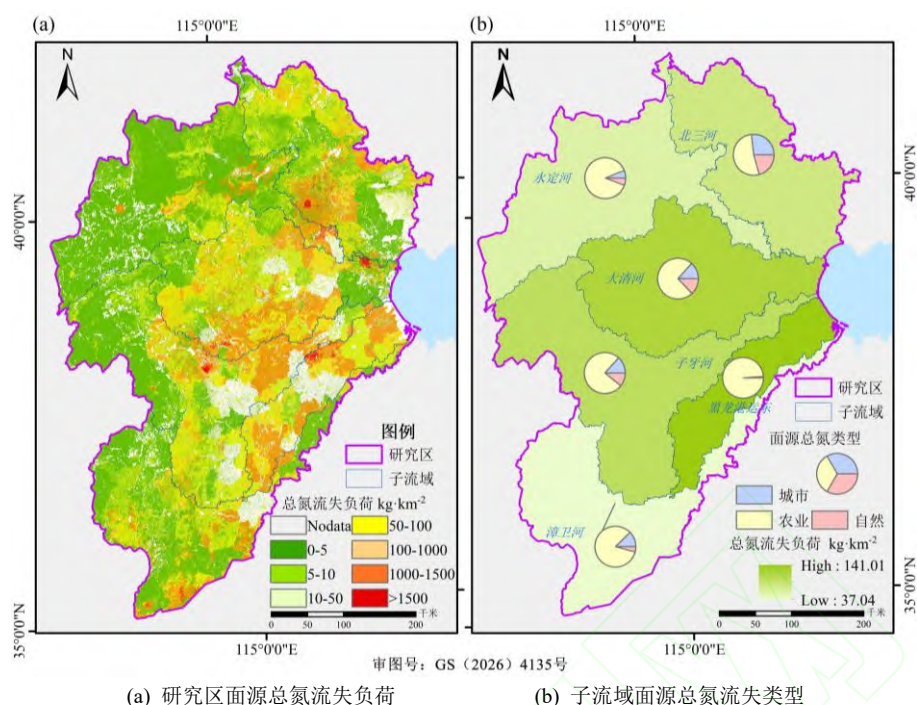
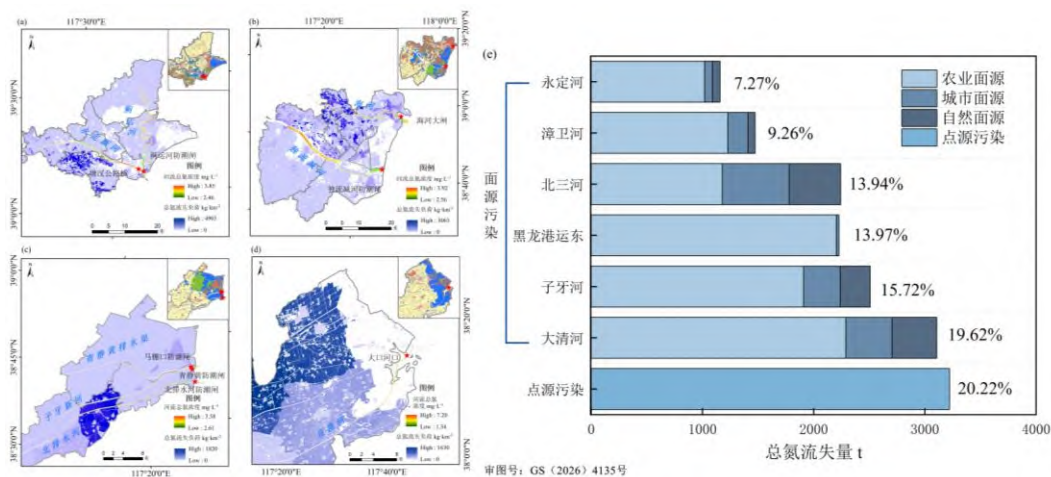


图 5 2024 年流域面源总氮流失负荷和流失类型空间分布

Fig.5 Spatial distribution of watershed diffuse total nitrogen loading and types in 2024

3.4 海河流域总氮污染源汇关系分析

2024 年入海河河流遥感反演浓度空间变化原因分析表明,对于河流沿岸土地利用以耕地为主的宣惠河、北排水河和独流减河,河流总氮空间变化与面源总氮流失负荷呈正相关响应,河流总氮高值区多集中分布在面源总氮流失负荷高的地区(图 6a-d)。海河流域耕地主要种植小麦、玉米和露地蔬菜,农业活动密集期与雨季重叠且化肥使用量大,灌溉和降雨的冲刷下面源总氮污染随着地表径流迁移到临近水体,其对河流的污染风险会随着耕地离水距离的减小而增大^[40]。然而,对于河流沿岸土地利用以城镇用地和农村居民点为主的蓟运河、海河和永定新河,河流总氮高值区与面源总氮流失负荷分布一致性相对较差,河流总氮的高值区可能与人口密度、排污口分布等因素有关^[41]。2024 年总氮污染入海通量中 79.87%来源于面源污染,20.22%来源于点源污染(图 6e),结果与 Li 等人研究中海河流域面源污染占比 77.33%的结论趋势一致^[39]。空间上,子牙河和大清河子流域面源污染贡献超过 10%,且北三河、子牙河和大清河子流域城市面源和自然面源污染的占比相对较高。北三河、子牙河和大清河子流域上游为山区,流域下游为城镇和耕地,已有研究表明,海河流域山区面源总氮污染受坡度变异、土壤质地等自然因素影响较大,而平原区面源总氮污染受畜禽养殖密度、耕地分布、人口等农业和工业活动密集区域影响^[42]。



(a) 蓟运河和永定新河 (b) 海河和独流减河 (c) 青静黄排水渠、子牙新河、北排水河 (d) 宣惠河 (e) 污染类型占比

图 6 流域面源总氮污染对河流总氮浓度空间分布和入海口通量贡献分析

Fig.6 Contribution analysis of diffuse total nitrogen pollution to the variation of total nitrogen concentration and estuarine flux

3.5 海河流域总氮陆海传输影响因素分析

面源污染流入河的主要驱动力是降雨^[43], RDA 分析结果中面源总氮流失量与降雨量之间的夹角最小, 且二者相关性系数为 0.30 ($P<0.05$) (图 7a)。土地利用类型影响面源总氮污染的产生和输出^[44], RDA 分析结果显示, 面源总氮流失量与农业用地的夹角相对较小, 相关性分析结果呈正相关 ($R=0.25$, $P<0.05$), 与海河流域农业面源污染源占比较高结果一致。除降雨量和土地利用类型影响外, 自然面源与植被覆盖度和坡度表现出显著正相关关系。林草地水土流失和林草凋落物养分流失是自然面源的重要来源, 高植被覆盖度会增加凋落物含量, 而坡度增加会加大林草地总氮随地表径流和土壤侵蚀的流失风险^[45,46]。

总氮入海通量和浓度变化影响因素分析表明, 总氮入海通量与流量 ($R=0.90$) 和降雨量 ($R=0.71$) 呈显著正相关关系, 而总氮浓度与二者呈负相关 (图 7b), 表明降雨产生的地表径流是陆源总氮流失的主要路径, 但高降雨增加了河流流量可能会降低总氮浓度, 使浓度与通量趋势不一致 (图 4)。农业源是总氮入海的主要来源, 总氮入海通量和浓度与农业源面源总氮流失量、农业用地占比和禽蛋产量影响因子均通过显著性检验 ($P<0.05$), 与徐凤伟等人研究一致^[47]。除农业源影响外, 总氮入海通量和浓度与自然源面源污染、林地/草地占比、植被覆盖度也呈正相关关系, 海河流域夏季汛期高降雨增加了林草地面源污染流失风险^[40]。此外, 由于入海口多分布在大城市下游且距离较近, 总氮浓度受城市人类活动的影响较大 ($R=0.59$, $P<0.05$) (图 7b)。

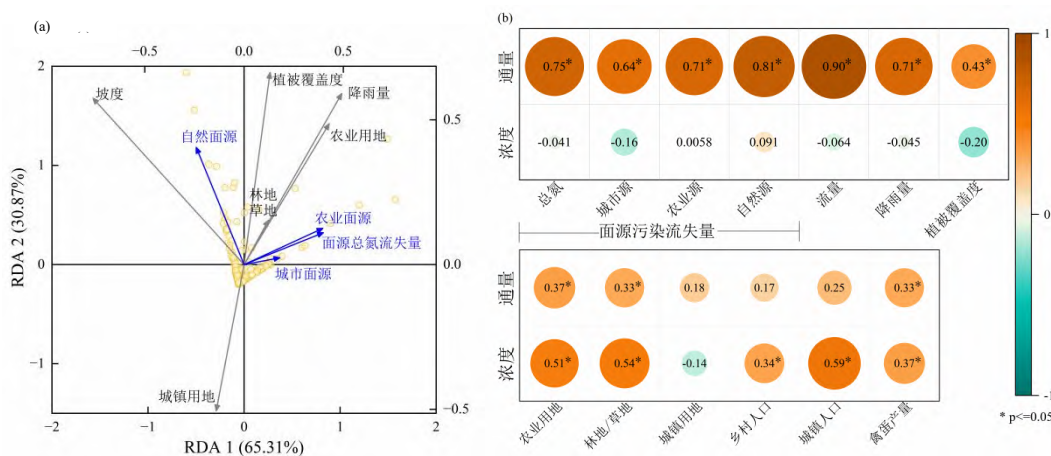


图 7 流域总氮陆海传输影响因素冗余分析和相关分析

Fig.7 Redundancy analysis and correlation analysis of influencing factors for watershed total nitrogen transport

4 结 论

本研究基于多源遥感数据实现了天空地一体的入海河流总氮浓度和通量的时空分布监测,结合 DpeRS 模型估算了不同类型面源总氮流失量,对海河流域总氮污染物从陆源产生和入海传输的全过程开展定量分析,揭示了流域总氮污染的源汇关系和关键影响因素。研究表明:(1) 2024 年入海河流遥感反演总氮浓度月变化范围为 $0.10\sim 8.46\text{ mg L}^{-1}$,呈波动变化趋势,总氮入海通量的变化范围为 $71\sim 3373\text{ t}$,与浓度变化趋势不一致,夏季汛期 7 月和 8 月占全年的 46.52%。(2) 2024 年,面源总氮流失负荷为 56.86 kg km^{-2} ,受降水和土地利用的综合影响,黑龙港运东、大清河和子牙河子流域总氮流失负荷均高于研究区平均水平。(3) 面源总氮流失是入海河流总氮污染分布的主要污染源,面源总氮流失量占总氮入海通量的 79.87%,农业源和人类活动影响了入海河流总氮污染的空间分布,入海河流遥感反演总氮浓度高值区与农业用地分布特征一致,农业源和农业用地占比与入海通量呈显著正相关变化关系。该研究结果为厘清海河流域对渤海湾总氮传输贡献的驱动机制提供了数据支撑,对陆海统筹水质总氮污染溯源具有重要参考意义,后续可结合全流域断面通量和污水处理厂等点源排放数据,更加科学解释总氮污染物迁移转化的空间差异。

参考文献

- [1] 唐星辰. 渤海新区海岸带陆源入海污染分布特性与海域水环境研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.[TANG Xing-chen. Study on Land-Based Pollutant Distribution Characteristics and Marine Environment in the Coastal Zone of Bohai New Area[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.]
- [2] 董斯齐, 黄翀. 粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5384-5393.[DONG Si-qi, HANG Chong. Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5384-5393.]
- [3] 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 等. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4445-4453.[KONG Pei-ru, CHEN Li-dong, SU Ran-hao, et al. Identification and optimized simulation of non point source pollution risk patterns in the Haihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4445-4453.]
- [4] 张慧, 郭文建, 曹方方, 等. 北方典型区域入海河流氮污染物分布特征及来源研究[J/OL]. 环境监测管理 与技术, 1-8[2025-12-10]. <https://doi.org/10.19501/j.cnki.1006-2009.20250613.001>. [ZHANG Hui, GUO Wen-jian, CAO Fang-fang, et al. Research on the Distribution Characteristics and Sources of Nitrogen Pollutants in the Rivers Flowing into the Sea in Typical Regions of Northern China[J/OL]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 1-8[2025-12-10]. <https://doi.org/10.19501/j.cnki.1006-2009.20250613.001>.]
- [5] WANG Yuanyi, XU Hai, ZHAO Xing-chen, et al. Rainfall impacts on nonpoint nitrogen and phosphorus dynamics in an agricultural river in subtropical montane reservoir region of southeast China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2025, 149: 551-563.

- [6] HUSSAIN F, AHMED S, MUHAMMAD ZAIGHAM ABBAS NAQVI S, et al. Agricultural Non-Point Source Pollution: Comprehensive Analysis of Sources and Assessment Methods[J]. Agriculture, 2025, 15(5): 531.
- [7] 何汝艳, 吕子俊, 贾森. 基于 LBFGS 加速多层感知网络的高光谱遥感非光学水质参数反演[J]. 遥感学报, 2024, 28(11): 2970-2983.[HE Ru-yan, LV Zi-jun, JIA Sen. Inversion of non-optical water quality parameters of hyperspectral remote sensing based on LBFGS- accelerated multi-layer perceptron network[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(11): 2970-2983.]
- [8] LOU He-zhen, LI Hao, YANG Sheng-tian, et al. River discharge recovery lag in the small and medium-sized rivers occurred in response to climate change and human activities[J]. Journal of Hydrology, 2023, 620: 129453.
- [9] 陈华杰, 尹文杰, 刘帅, 等. 天空地一体化断面污染通量监测关键技术研究——以蓟运河防潮闸断面为例[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2848-2855.[CHEN Hua-jie, YIN Wen-jie, LIU Shuai, et al. An integrated space-air-ground approach for monitoring pollution flux in river sections: a case study of the Jiyun River section[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12): 2848-2855.]
- [10] 陈洁, 张立福, 张红明, 等. 白洋淀水体总磷总氮高光谱估算模型比较[J]. 遥感学报, 2023, 27(07): 1642-1652.[CHEN Jie, ZHANG Li-fu, ZHANG Hong-ming, et al. Comparative study on the hyperspectral estimation models of TP and TN in Baiyangdian water body[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(07): 1642-1652.]
- [11] 杨胜天, 王鹏飞, 王娟, 等. 结合无人机航空摄影测量的河道流量估算[J]. 遥感学报, 2021, 25(06): 1284-1293.[YANG Sheng-tian, WANG Peng-fei, WANG Juan, et al. River flow estimation method based on UAV aerial photogrammetry[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(06): 1284-1293.]
- [12] 张寒博, 窦世卿, 温颖. 内陆水体水质参数遥感监测进展与挑战[J]. 环境科学, 2025, 46(07): 4211-4226.[ZHANG Han-bo, DOU Shi-qing, WEN Ying. Progress and Challenges in Remote Sensing Monitoring of Water Quality Parameters in Inland Waters[J]. Environmental Science, 2025, 46(07): 4211-4226.]
- [13] ZHOU Xiao-teng, Liu Chun, Daniela Carrion, et al. Spectro-environmental factors integrated ensemble learning for urban river network water quality remote sensing[J]. Water Research, 2024, 267: 122544.
- [14] Hou Man, Xiong Jun-feng, Xiang Yang, et al. Two-decade spatiotemporal dynamics of nutrients in Yangtze-Huaihe lakes revealed by remote sensing[J]. Journal of Environmental Management, 2026, 401: 128808.
- [15] 吴奇, 宫福征, 白伟桦, 等. 太子河干流总氮与氨氮水质参数反演及时空变化研究[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(8): 1017-1028.[WU Qi, GONG Fu-zheng, BAI Wei-hua, et al. Study on the Inversion and Spatio-temporal Variations of Total Nitrogen and Ammonia Nitrogen Water Quality Parameters in the Mainstream of Taizi River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(8): 1017-1028.]
- [16] LEE M S, PARK G A, PARK M J, et al. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying Best Management Practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(6): 826-833.
- [17] OUYANG Wei, GAO Xiang, WEI Peng, et al. A review of diffuse pollution modeling and associated implications for watershed management in China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(6): 1527-1536.

- [18] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(04): 755-761.[XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(04): 755-761.]
- [19] BINGNER R L, THEURER F D. Topographic factors for RUSLE in the continuous-simulation, watershed model for predicting agricultural, non-point source pollutants (AnnAGNPS)[C]// Soil Erosion. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2001: 619.
- [20] RIBAROVA I, NINOV P, COOPER D. Modeling Nutrient Pollution During a First Flood Event Using HSPF Software: Iskar River Case Study, Bulgaria[J]. Ecological Modelling, 2008, 211(1): 241-246.
- [21] GASSMAN P W, SADEGHI A M, SRINIVASAN R. Applications of the SWAT Model Special Section: Overview and Insights[J]. Journal of Environmental Quality, 2014, 43(1): 1-8.
- [22] 李悦, 田淼, 姜亚雯, 等. 福建省三沙湾氮、磷污染物入海量及来源结构[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(11): 1514-1523.[LI Yue, TIAN Miao, JIANG Ya-wen, et al. Nitrogen and Phosphorus Discharge Flux into the Sea and Pollution Source Structure in Sansha Bay, Fujian Province[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(11): 1514-1523.]
- [23] WANG Xue-lei, WANG Qiao, WU Chuan-qing, et al. A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 430: 132-43.
- [24] 王雪蕾, 张建辉, 董明丽, 等. 我国农业面源污染立体监测评估业务体系构建与应用[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12): 2743-2751.[WANG Xue-lei, ZHANG Jian-hui, DONG Ming-li, et al. Construction and application of stereo monitoring and evaluation system for agricultural non-point source pollution in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12): 2743-2751.]
- [25] 张广帅, 闫吉顺, 吴婷婷, 等. 环渤海主要城市近岸海域水质状况综合评价[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(04): 63-70.[ZHANG Guang-shuai, YAN Ji-shun, WU Ting-ting, et al. Water Quality Assessment of Nearshore Waters of the Primary Urban Areas Around Bohai Sea[J]. Journal of Hydroecology, 2022, 43(04): 63-70.]
- [26] 徐媛, 汤振怡, 刁维强, 等. 渤海入海河流总氮污染根源分析及管控经验探索[J]. 环境保护, 2024, 52(Z2): 30-35.[XU Yuan, TANG Zhen-yi, DIAO Wei-qiang, et al. Analysis of the Root Causes of Total Nitrogen Pollution in Rivers Going Towards Bohai Sea and Exploration of Control Experience[J]. Environmental Protection, 2024, 52(Z2): 30-35.]
- [27] 吴汉卿, 万炜, 单艳军, 等. 基于磷指数模型的海河流域农田磷流失环境风险评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 17-27+327.[WU Han-qing, WAN Wei, SHAN Yan-jun, et al. Environmental risk assessment of phosphorus loss from farmland based on phosphorus index model in the Haihe River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 17-27+327.]
- [28] 杨金凤, 冯爱萍, 王雪蕾, 等. 海河流域农业面源污染潜在风险识别方法[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4782-4791.[YANG Jin-feng, FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, et al. An identification method of potential risk for agricultural non-point source pollution in the Haihe River Basin[J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4782-4791.]
- [29] 张兵, 李俊生, 申茜, 等. 长时序大范围内陆水体光学遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 37-52.[ZHANG Bin, LI Jun-sheng, SHEN Qian, et al. Recent research progress on long time series and large

- scale optical remote sensing of inland water[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021.25(1): 37-52.]
- [30] 童庆禧, 张兵, 张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(05): 689-707.[TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHANG Li-fu. Current progress of hyper-spectral remote sensing in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(05): 689-707.]
- [31] 孙骄阳. 基于多源遥感与机器学习的密云水库水质参数反演研究[D]. 北京:北京林业大学, 2019.[SUN Li-yang. Inversion of Water Quality Parameters of Miyun Reservoir Based on Multi-source Remote Sensing and Machine Learning[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2019.]
- [32] 徐海波, 吴金华, 任小龙, 等. 基于固定式 ADCP 的陈东港污染物通量计算[J]. 水资源保护, 2023, 39(06): 178-185.[XU Hai-bo, WU Jin-hua, REN Xiao-long, et al. Calculation of pollutant influx of the Chendong River based on fixed ADCP[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(06): 178-185.]
- [33] 逯颖, 张建辉, 李文君, 等. 长江经济带农业面源总磷污染时空特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(12):2752-2764.[LU Ying, ZHANG Jian-hui, LI Wen-jun, et al. Analysis on spatiotemporal characteristics of total phosphorus of agricultural non-point source pollution in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(12):2752-2764.]
- [34] 冯爱萍, 郝新, 罗仪宁, 等. 滦河流域承德市非点源污染遥感模型评估分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11):2417-2427. [FENG Ai-ping, HAO Xin, LUO Yi-ning, et al. Evaluation and analysis of non-point source pollution in Chengde City, Luanhe River basin using a remote sensing model[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11):2417-2427.]
- [35] 生态环境部. 全国农业面源污染监测评估实施方案(2022—2025年)(环办监测〔2022〕23号)[Z]. 2022.北京:生态环境部.[Ministry of Ecology and Environment.Implementation plan for national agricultural non-point source pollution monitoring and assessment (2022—2025) (Document No. 23 of 2022) [Z]. 2022. Beijing:Ministry of Ecology and Environment.]
- [36] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.[ZHU Mei. Study on agricultural NPS loads of Haihe Basin and assessment on its environmental impact[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.]
- [37] 张巧玲. 基于 InVEST 模型的海河流域农田氮磷面源污染时空变化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.[ZHANG Qiao-ling. Research on spatiotemporal Changes of N and P from farmland non-point sources pollution in the Haihe River Basin based on In VEST model[D]. Xi'an: Xi'an University Of Science And Technology, 2021.]
- [38] 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 等. 基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4555-4563.[FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, et al. Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model[J]. Environmental Science, 2020, 41(10): 4555-4563.]
- [39] Li Xian-feng, Xu Wen-zhe, Song Shuai, et al. Sources and spatiotemporal distribution characteristics of nitrogen and phosphorus loads in the Haihe River Basin, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 189, 114756.
- [40] ZHANG Xianqi, CHEN Peng, DAI Shengnan, et al. Analysis of non-point source nitrogen pollution in watersheds based on SWAT model[J]. Ecological Indicators, 2022, 138:108881.
- [41] Zhao Zhan-qing, Qin Wei, Bai Zhaohai, et al. Agricultural nitrogen and phosphorus emissions to water and

- their mitigation options in the Haihe Basin, China[J].Agricultural Water Management, 2019, 212:262-272.
- [42] 汪昊, 高凯璐, 尹高飞, 等. 基于机器学习的海河流域河流氮素变化趋势及关键因子识别[J/OL]. 中国环境科学, 1-20[2025-12-10]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250113.001>. [WANG Hao, GAO Kai-lu, YIN Gao-fei, et al. Identification of river nitrogen trends and key factors in the Haihe River Basin based on machine Learning[J/OL]. China Environmental Science, 1-20[2025-12-10]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250113.001>.]
- [43] ADU J T, KUMARASAMY M V. Assessing non-point source pollution models: a review[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(5): 1913-1922.
- [44] 宋泽芬, 王克勤, 杨云华, 等. 澄江尖山河小流域不同土地利用类型面源污染输出特征[J]. 水土保持学报, 2008, (02): 98-101+158.[SONG Ze-fen, WANG Ke-qin, YANG Yun-hua, et al. Characteristics of Non-point Source Pollution Output of Different Lands Utilization Pattern in Small Watersheds in Jianshan River, Chengjiang[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, (02): 98-101+158.]
- [45] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3137~3143.[XU Xian-li, MA Ke-ming, FU Bo-jie, et al. Research review of the relationship between vegetation and soil loss.Acta Ecologica Sinica[J]. ActaEcologica Sinica, 2006, 26(9): 3137~3143.]
- [46] WANG You-xiao, LIU Gao-huan, ZHAO Zhong-he, et al. Using soil erosion to locate nonpoint source pollution risks in coastal zones: a case study in the Yellow River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 283: 117117.
- [47] 徐凤伟. 海河流域典型区农业面源污染物迁移转化规律研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018.[XU Feng-wei. The Study On Migration And Transformation Of Agricultural Non-point Source Pollutants In Typical Areas Of Haihe River Basin[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.]

作者简介: 逮颖 (1994—), 女, 山西寿阳人, 主要从事水生态环境遥感监测研究。E-mail: luying82500@163.com