

入海河流总氮时间变化特征及其对降雨的响应：以掘苴河为例

马攀述, 李银平*

青岛科技大学生物工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

本文基于以2020~2024年长江入海河流掘苴河的环东闸口监测断面数据为基础, 结合当地气象站的降雨数据, 分析掘苴河流域总氮的时间变化特征及其对降雨的响应。结果表明: ① 掘苴河流域总氮污染问题较为严峻, 总氮年均值介于2.42~3.12 mg/L之间, 超过地表水环境总氮质量标准Ⅴ类限值2 mg/L。总氮呈现明显的季节性变化规律, 夏冬季节浓度高, 春秋季节浓度较低。② 在降雨强度方面, 随着降雨强度的增加, 总氮浓度呈现先降低后升高最后又降低的变化趋势, 降雨产生的侵蚀、渗透和稀释作用共同影响水体的氮素浓度。③ 在降雨的季节性变化方面, 总氮浓度在丰水期和枯水期的浓度值较高, 平水期浓度值较低, 受到农业面源和污水处理厂出水的影响。

关键词

入海河流, 总氮, 时间变化特征, 降雨

Temporal Variation Characteristics of Total Nitrogen in Rivers Entering the Sea and Its Response to Rainfall: A Case Study of Jueju River

Panshu Ma, Yinping Li*

College of Biological Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: June 29, 2026; accepted: July 22, 2026; published: July 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 马攀述, 李银平. 入海河流总氮时间变化特征及其对降雨的响应: 以掘苴河为例[J]. 水污染及处理, 2026, 14(3): 179-190. DOI: 10.12677/wpt.2026.143019

Abstract

Based on the monitoring cross-section data of the east gate of the Yangtze River entering the sea from 2020 to 2024, combined with the rainfall data of the local weather station, this paper analyzes the temporal variation characteristics of total nitrogen and its response to rainfall in the Jueju River Basin. The results showed that: ① The total nitrogen pollution in the Jueju River Basin was serious, and the annual average of total nitrogen was between 2.42 and 3.12 mg/L, which exceeded the class V limit of the surface water environment total nitrogen quality standard by 2 mg/L. The concentration of total nitrogen was high in summer and winter, and low in spring and autumn. ② In terms of rainfall intensity, with the increase of rainfall intensity, the total nitrogen concentration first decreased, then increased, and finally decreased. The erosion, infiltration and dilution caused by rainfall jointly affect the nitrogen concentration in water. ③ In terms of seasonal variation of rainfall, the concentration of total nitrogen is higher in wet season and dry season, and lower in normal season, which is affected by agricultural non-point sources and sewage treatment plant effluent.

Keywords

Rivers Entering the Sea, Total Nitrogen, Time Variation Characteristics, Rainfall

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全世界人工氮肥的生产和农田施用,氮循环加速,粮食产量大幅增加,同时也导致生态系统的富营养化和全球酸化等一系列环境问题[1]。《2024 中国生态环境状况公报》显示,无机氮是我国近岸海域水质超标主要指标之一,氮素超标已成为我国入海河流的主要水污染问题[2]。2025 年 7 月,生态环境部印发《关于进一步加强入海河流总氮等污染治理与管控推动近岸海域水质持续改善的意见》[3],将总氮纳入协同推进入海河流总氮减排和近岸海域水质改善的行动中去。因此,预防与治理氮污染危害成为当前亟待解决的环境治理重点目标。掘苴河是长江入黄海的支流之一,2022 年生态环境部等印发《“十四五”海洋生态环境保护规划》[4]中提到推进入海河流断面水质持续改善,要求 2025 年底前,重点海域综合治理攻坚战实施区域内的省控及以上河流入海断面基本消除劣 V 类,掘苴河对应的总氮浓度需低于 2.0 mg/L。2023 年发布的《江苏省近岸海域污染物削减和水质提升三年行动方案(2024~2026 年)》[5]中提出到 2025 年,列入全省近岸海域综合治理攻坚战的 22 条入海河流国控断面总氮浓度较 2020 年实现负增长。掘苴河国控断面环东闸口是 22 条入海河流的重点之一。长江中下游流域点源污染随降雨径流的汇入是河道中污染物的主要来源[6]。因此,改善掘苴河水质需要削减总氮污染源进入河流的总量。

总氮在水中主要分为溶解态无机氮、溶解态有机氮、颗粒态氮和沉积态可转化氮等类别,主要存在形式包括 NH_3 、 NH_4^+-N 、 NO_3--N 和有机氮等[7]。其中,氨氮作为活性污染物,在水体中会通过硝化作用、厌氧氨氧化作用或以氨气形式挥发等方式快速转化,无法在水体中长期滞留[8]。因此,铵态氮是影响河流水质的主要氮素。氮素进入水体主要通过人为途径和自然途径两种方式,其中降雨是自然途径的主要驱动力,降雨通过冲刷污染源,携带污染物进入水体[9]。国内外学者的研究表明,在降雨过程中,降雨初期常伴随总氮浓度的快速上升,形成初期冲刷效应[10];在降雨中后期总氮浓度会趋于平稳,总氮

浓度值随着降雨量的减少而逐渐下降[11];随着降雨强度的增加,总氮流失的速率加快[12]。此外,河流中的总氮具有季节性分布的特征,我国南方地区的珠江、闽江和长江流域总氮的年内分布特征通常为汛期总氮浓度较低,非汛期较高[13]-[15];然而珠江平原河网地区和汉江流域等长江中下游、珠江入海口区域的总氮浓度常表现为非汛期总氮浓度较高的特点[16][17]。

目前,众多研究集中在自然降雨和模拟降雨的条件下分析农田径流和河流水质的总氮浓度特征研究[18][19],但基于监测断面的多年水质指标对自然降雨响应的研究较少。

本文以掘苴河为研究对象,基于环保部门断面加密监测数据,结合补充调查的手工监测数据和降雨量数据,通过统计学方法分析总氮浓度的时空分布特征,结合降雨数据进行成因分析。研究降雨对河流水体中总氮浓度的影响。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

掘苴河全长 22.1 km,主要流向为自南向北,最终汇入黄海,是长江入海口最主要的航运通道(图 1)。研究区域属于亚热带海洋性季风气候区,雨水充沛,年平均降水量 1000 mm 以上,夏季初有梅雨,夏秋之交受热带风暴和台风的影响,降水量大,易发洪水灾害。根据 GB/T 50095-2014《水文基本术语和符号标准》[20]并结合当地多年的水文观测数据,可以划分为丰水期/汛期(6~9月)、枯水期(12月~翌年2月)、平水期(3~5月、10~11月)三个时期。

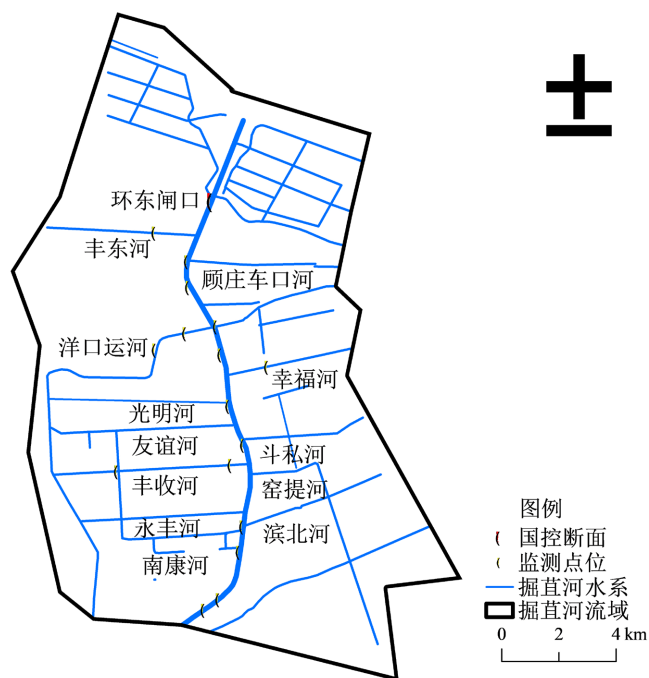
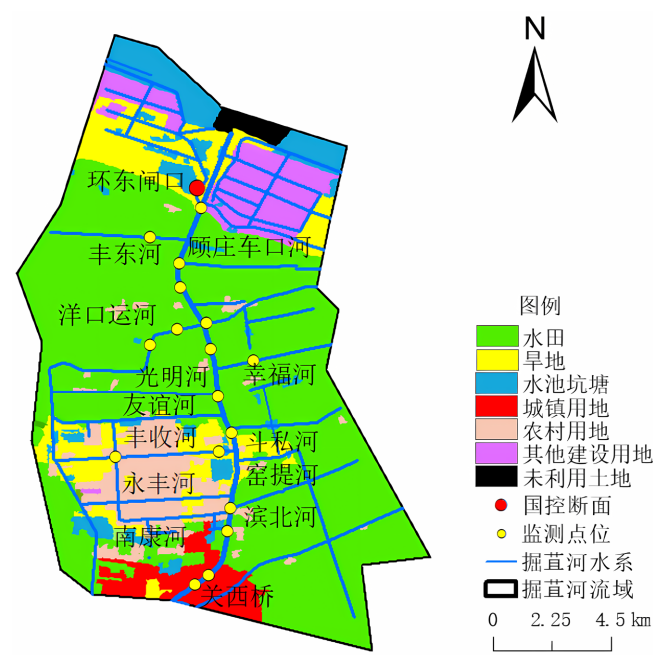


Figure 1. Distribution of sampling points in Jueju River
图 1. 掘苴河采样点位分布

掘苴河流域的土地利用类型(图 2)可知,水田是该区域主要的土地利用类型,其面积占比超过流域总面积的 60%,占耕地面积比例更高达 90%以上。因此,流域内的主要污染物为农业面源,污染源较为复杂,包括农业种植源、畜禽养殖源、农村生活源和水产养殖源。此外,以污水处理厂出水为主导的工业

和城镇生活污染源占比较高。随着工业和农业的发展, 排入河流中的总氮污染源逐年增加, 河流的总氮污染日益严重。



2.2. 数据来源与水样分析

掘苴河国控断面环东闸口监测站数据(小时, 4 h 一次)来自南通市生态环境局, 降雨量数据来自中国气象站, 土地利用数据来自中国科学院 LUCC 土地利用数据(分辨率为 30 m × 30 m)。对总氮浓度年内和年际的变化规律以及降雨的强度、水期和季节性变化对总氮浓度的影响进行分析。

水样的检测项目为总氮、氨氮、硝酸盐氮和亚硝酸盐氮四个项目。总氮采用碱性过硫酸钾氧化 - 紫外分光光度法进行检测分析; 硝酸盐氮采用气相分子吸收光谱法; 亚硝酸盐氮采用气相分子吸收光谱法; 氨氮采用水杨酸分光光度法。

2.3. 数据处理

使用 Microsoft Excel 2023 进行相关数据计算, 采用 Origin 2024 绘制图形, SPSS 27.0 进行差异显著性分析, 用 ArcGIS 10.8 进行研究区地图的绘制。

本文结合国家标准降水量等级(GB/T 28592-2012) [21]和 Zhang [22]等对强降雨对河流羽流的影响时强降雨的定义。结合本研究区域的降雨特征, 将日降雨量 40 mm 以上的降雨定义为强降雨。将降雨量分为小雨(<10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~40 mm)和强降雨(>40 mm)。运用降雨后相关性最强时的总氮浓度与不同强度降雨数据的散点图, 进行回归拟合。

3. 结果与分析

3.1. 掘苴河流域总氮浓度的年内与年际变化趋势

图 2 所示, 2020 年总氮浓度介于 1.34~6.71 mg/L, 平均值为 2.97 mg/L, 总氮浓度 7 月较高, 达到

6.64 mg/L, 在 8 月降低后趋于稳定, 11 月浓度又逐渐升高; 2021 年总氮浓度介于 1.30~5.29 mg/L, 平均值为 2.42 mg/L, 总氮浓度全年较为平稳, 仅在 1 月和 7 月出现两个较小的波动; 2022 年总氮浓度在 0.22~9.80 mg/L 之间, 平均为 2.55 mg/L, 季节性差异明显, 1 月总氮浓度达到最高为 5.24 mg/L, 8 月最低, 总氮浓度仅为 1.07 mg/L; 2023 年总氮浓度在 1.50~5.82 mg/L 之间, 平均为 3.06 mg/L, 季节性变化规律明显, 在 1 月和 7 月出现两个比较明显的高值; 2024 年总氮在 1.18~8.76 mg/L 之间, 平均为 3.12 mg/L, 在 1~3 月总氮浓度均较高, 2 月和 7 月出现两个明显高值, 总氮浓度分别为 6.77 mg/L 和 4.46 mg/L。综上, 可以看出总体上掘苴河总氮浓度在 3~5 月、8~10 月处于较低水平, 在 7 月达到年内最高, 表现出夏冬季节高、春秋季节低的分布特征(图 3(b))。在图 2 中可以看出总氮浓度大多超过地表水 V 类水标准 2.00 mg/L, 尤其是 2020 年、2023 年和 2024 年的汛期时总氮浓度远超标准。

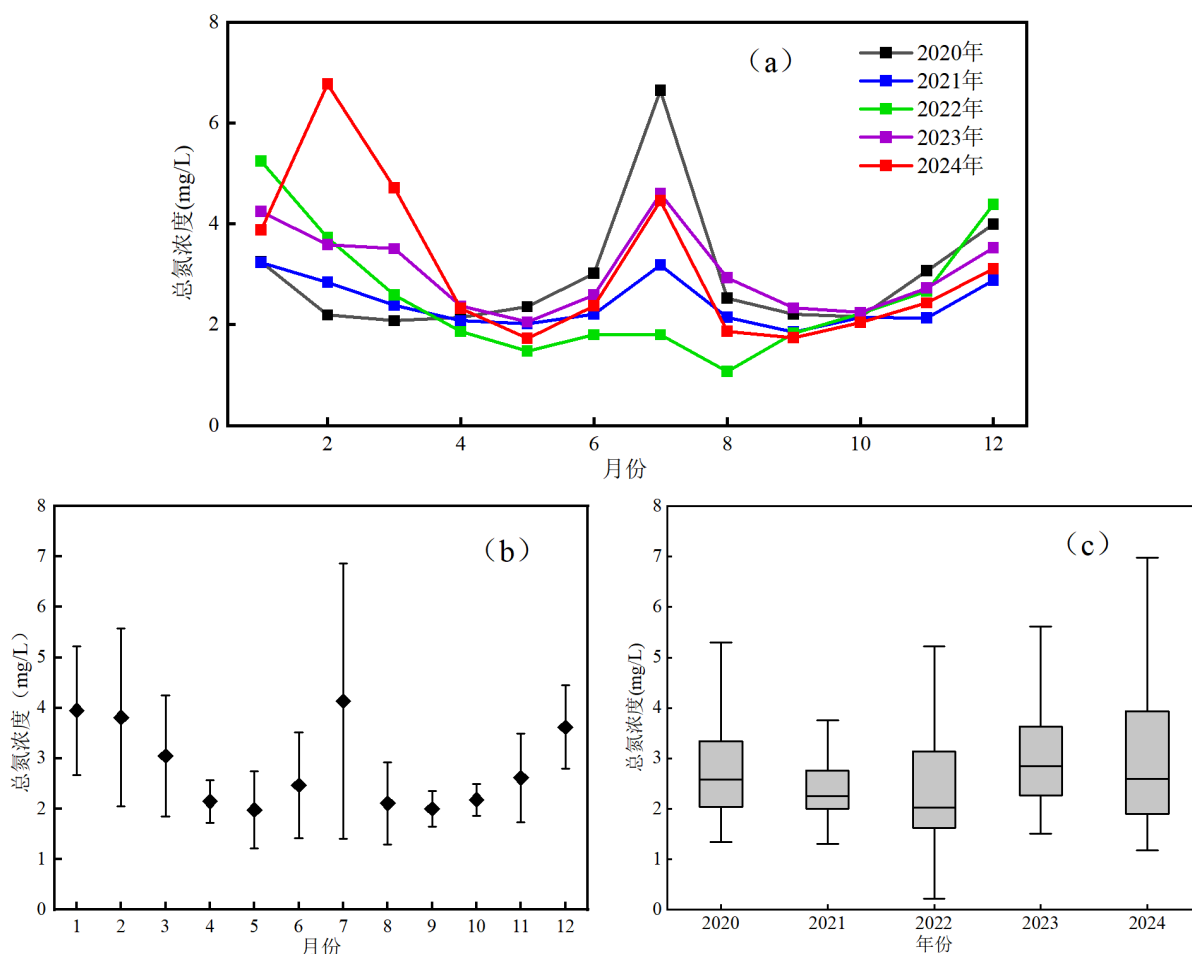


Figure 3. Interannual and interannual variation characteristics of total nitrogen concentration at Huandong Gate from 2020 to 2024

图 3. 环东闸口 2020~2024 年总氮浓度的年内、年际变化特征

掘苴河总氮浓度的年际变化呈现出缓慢的上升趋势(图 3(c)), 2021 年之后, 总氮浓度逐年上升, 各年份总氮浓度无显著性差异($p > 0.05$)。2021~2024 的年均总氮浓度依次为 2.42 mg/L、2.55 mg/L、3.06 mg/L 和 3.12 mg/L。在 2023 年总氮浓度上升最大, 上升幅度为 17%。可以看出掘苴河流域总氮污染日益严重, 河流总氮污染源逐年增加。

3.2. 总氮浓度对降雨事件的响应

3.2.1. 不同降雨强度下总氮浓度的变化情况

由图 2 土地利用类型可知, 掘苴河流域主要以水田为主, 水田中氮流失主要通过渗透与地表径流两种方式, 其中地表径流受降雨影响显著。据相关研究表明, 地表径流量随降雨量的增加呈线性上升趋势, 当降雨量分别超过 3.45~6.89 mm 时, 水田会产生地表径流[23]。因此, 本研究以 7 mm 以上降雨产生地表径流为标准进行分析, 将 7 mm 以下小雨记作雨强 A, 7 mm 以上的中小雨记作雨强 B, 大雨及强降雨记作雨强 C。

由图 4 分析可知, 雨强 A 在降雨后 16 h 相关系数达到最大, 为 0.36; 雨强 B 在降雨后 40 h 相关系数达到最大, 为 0.16; 雨强 C 在降雨后 40 h 相关系数达到最大, 为 0.26, 选取上述时间对应的总氮浓度与降雨量进行回归拟合分析。

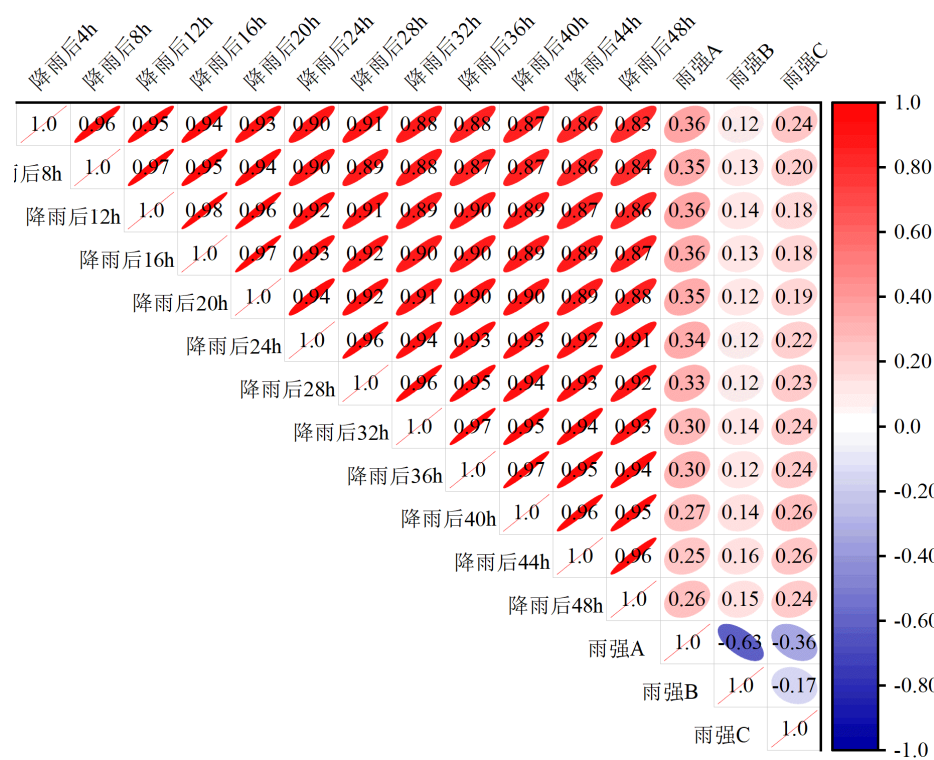


Figure 4. Correlation analysis between different rainfall intensities and total nitrogen concentration within 48 hours after rainfall

图 4. 不同降雨强度和降雨后 48 h 内总氮浓度的相关性分析

总氮浓度受到降雨等多种因素共同影响, 本文重点分析降雨对重点浓度影响, 因此决定系数较低。由不同降雨量下总氮浓度的散点分布图 5 中可以看出, 在雨强 A 下, 散点分布较为密集, 总氮浓度随着降雨量的上升呈现下降的变化趋势, 浓度值在 1.07~6.25 mg/L 之间, 平均值为 3.08 mg/L。在雨强 B 事件下, 散点的分布更为分散, 但分布较为均匀, 总氮浓度随降雨量的增加呈现升高的趋势, 浓度值在 1.40~7.79 mg/L 之间, 平均值为 3.07 mg/L。雨强 C 事件发生次数较少, 两种降雨强度随着降雨量的增加总氮浓度先升高后降低的趋势。分析原因为降雨前期, 降雨以冲刷作用占主导; 降雨后期, 降雨以稀释作用占主导。从不同降雨强度下的总氮浓度变化趋势来看, 总体上, 随着降雨强度的增大总氮浓度呈现先降低后升高再降低的变化趋势。

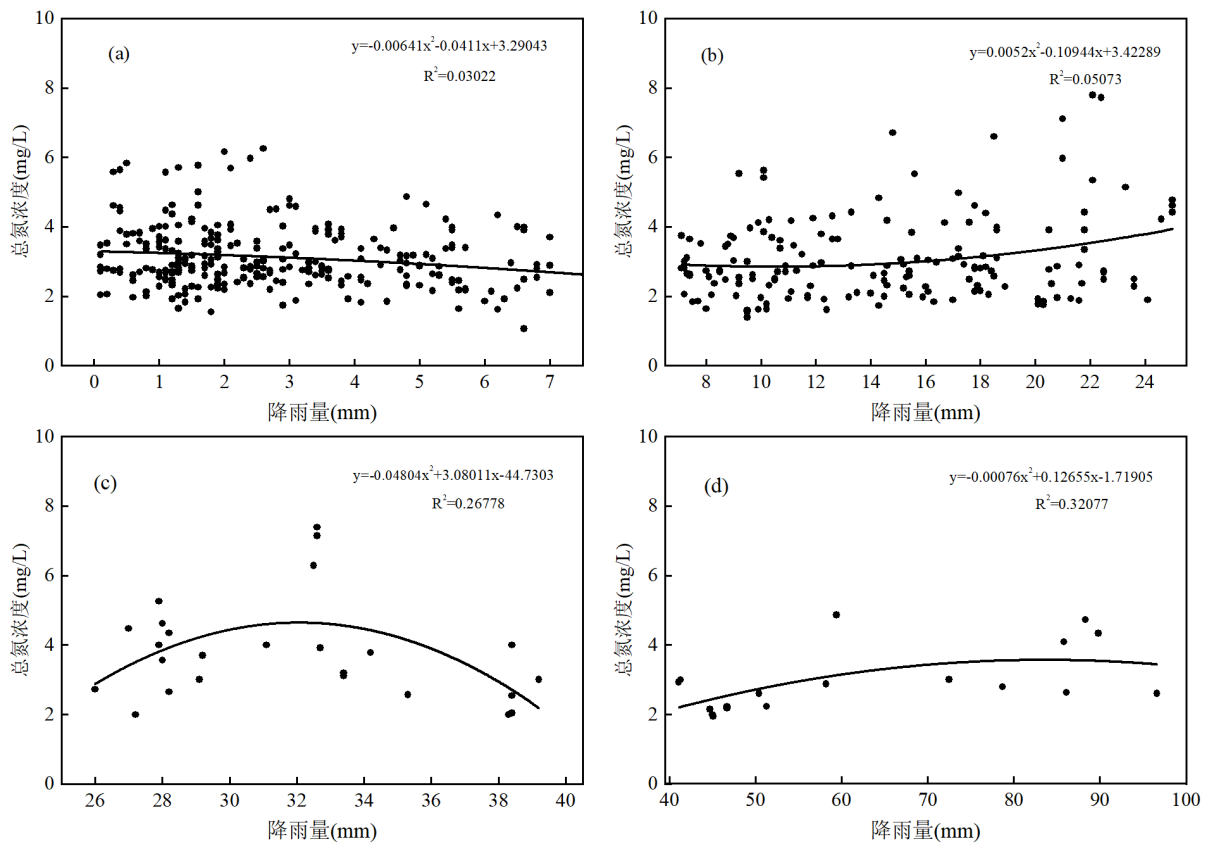


Figure 5. Trend of total nitrogen concentration under different rainfall intensities

图 5. 不同降雨强度下总氮浓度变化趋势图

3.2.2. 不同水期时连续降雨后总氮浓度的变化情况

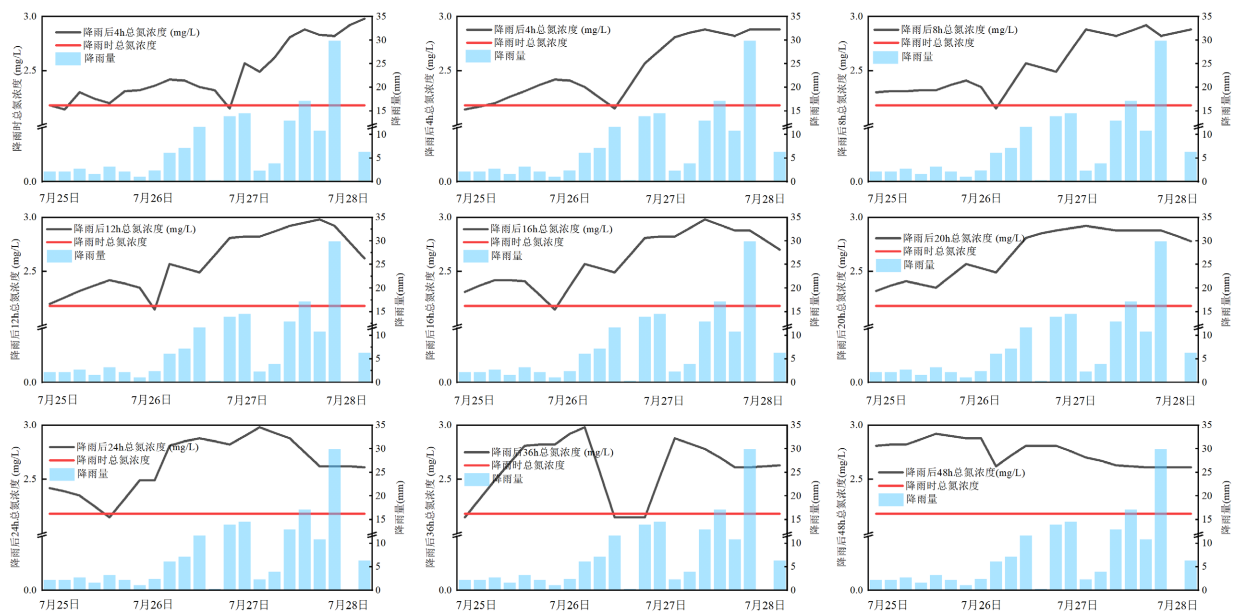


Figure 6. Lag effect of total nitrogen concentration after rainfall in wet season

图 6. 丰水期时降雨后总氮浓度的滞后效应

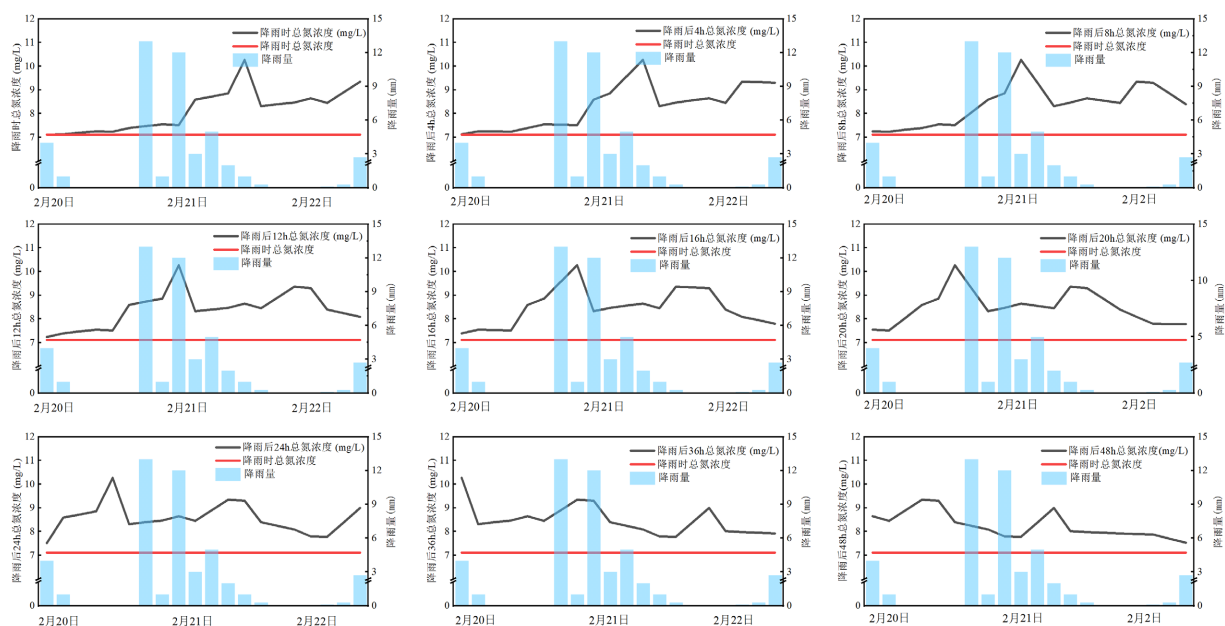


Figure 7. Lag effect of total nitrogen concentration after rainfall in dry season

图 7. 枯水期时降雨后总氮浓度的滞后效应

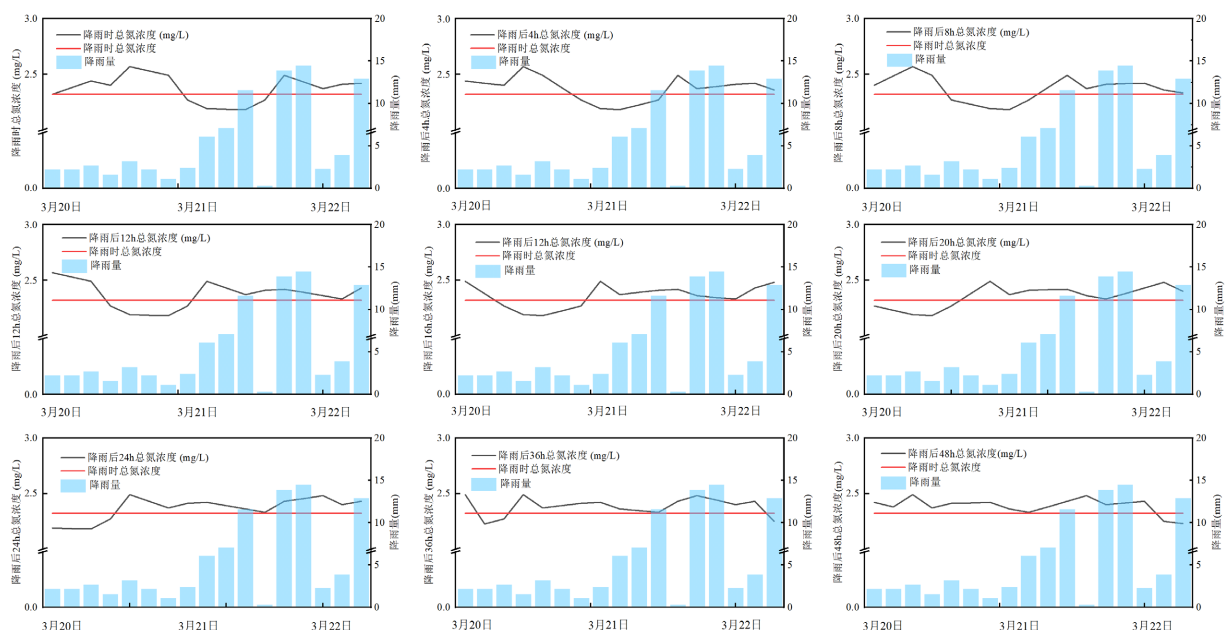


Figure 8. Lag effect of total nitrogen concentration after rainfall in normal water period

图 8. 平水期时降雨后总氮浓度的滞后效应

丰水期时, 总氮浓度在降雨后 48 h 内呈现出先快速上升后平稳下降的变化趋势, 稳定后总氮浓度为 2.61 mg/L, 较降雨前升高 19.7% (图 6)。总氮浓度在降雨后 8 h 内处于快速上升阶段; 降雨后 12~24 h 总氮浓度达到峰值后趋于稳定, 并表现出下降的趋势; 降雨后 24~48 h 总氮浓度开始下降后趋于平稳, 总氮浓度明显高于降雨前。丰水期降雨后, 地表径流携带农田等面源污染物进入河流, 降雨引起的总氮浓度升高的滞后效应可以到达 48 h 以上。

枯水期期间, 总氮浓度在降雨后 48 h 内呈现出先快速上升后迅速下降的变化趋势, 稳定后总氮浓度为 7.70 mg/L, 较降雨前升高 8.3% (图 7)。总氮浓度在降雨后 4 h 内处于快速上升阶段, 并且在首次强降雨后 16 h 总氮浓度达到最大值; 降雨后 8~16 h 总氮浓度趋于稳定, 并表现出下降的趋势; 降雨后 20~48 h 总氮浓度迅速下降, 总氮浓度明显高于降雨前。枯水期降雨后, 地表径流携带累积的氮源污染物进入河流, 降雨引起的总氮浓度升高的滞后效应可以到达 48 h。

平水期期间, 总氮浓度在降雨后 48 h 内的变化趋势并不显著, 表现为降雨后呈现上下波动的变化趋势 (图 8)。总氮浓度在降雨前期浓度值上下波动, 并在降雨初期达到峰值, 最高值为 2.57 mg/L。平水期时降雨可能通过冲刷和稀释作用共同影响流域内的总氮浓度, 流域内总氮浓度值较为稳定, 无明显的滞后效应。

3.2.3. 降雨季节性变化下总氮浓度的变化情况

对降雨量的季节性变化与总氮的季节性变化进行分析如图 9。2020 年 6~8 月累计降雨量均接近 300 mm, 对应的 6~8 月的总氮浓度波动较大, 总氮浓度在 6 月快速上升在 7 月到达峰值(6.17 mg/L); 12 月~翌年 2 月降雨量持续较低, 对应的总氮浓度偏高。2021 年 7 月累计降雨量超过 350 mm, 7 月对应总氮浓度较其余月份波动较大, 月均值达到 3.18 mg/L; 12 月~翌年 2 月降雨量持续较低, 12 月全月无降雨, 对应总氮浓度显著升高。2022 年全年累计降雨量较往年明显下降, 6、7 月份降雨量均接近 150 mm, 对应 6、7 月份总氮浓度较低, 在 8 月达到年内最低值(1.07 mg/L); 10 月~翌年 2 月降雨量持续较低, 12 月全月无降雨, 对应总氮浓度显著升高。2023 年 6、7 月累计降雨量较高, 特别是 7 月超过 350 mm, 对应的 6、7 月的总氮浓度波动较大, 7 月总氮达到年内最高 4.60 mg/L; 10 月~翌年 1 月降雨量持续较低, 对应总氮浓度显著升高。2024 年 2 月累计降雨量超过 150 mm, 远超历史同期降雨水平, 并且 6、7、9 月累计降雨量均超过 150 mm。2 月总氮浓度值为 6.73 mg/L, 远高于其余年份。其中, 9 月和 11 月总氮浓度受单日强降雨影响, 浓度值变化不大。各年份的变化规律为, 丰水期前期(6 月~7 月中旬)随降雨量增加, 总氮浓度表现出快速上升的趋势。丰水期中期(7~8 月)降雨量逐渐减少, 总氮表现出快速下降的趋势。丰水期后期(8~9 月)降雨量持续下降, 总氮浓度值变化相对稳定。枯水期(11 月~翌年 2 月), 降雨量可忽略不计, 外源污染持续输入, 总氮浓度持续较高。平水期(3~5 月、9~11 月)降雨量较少且较为平稳, 总氮浓度较为稳定。

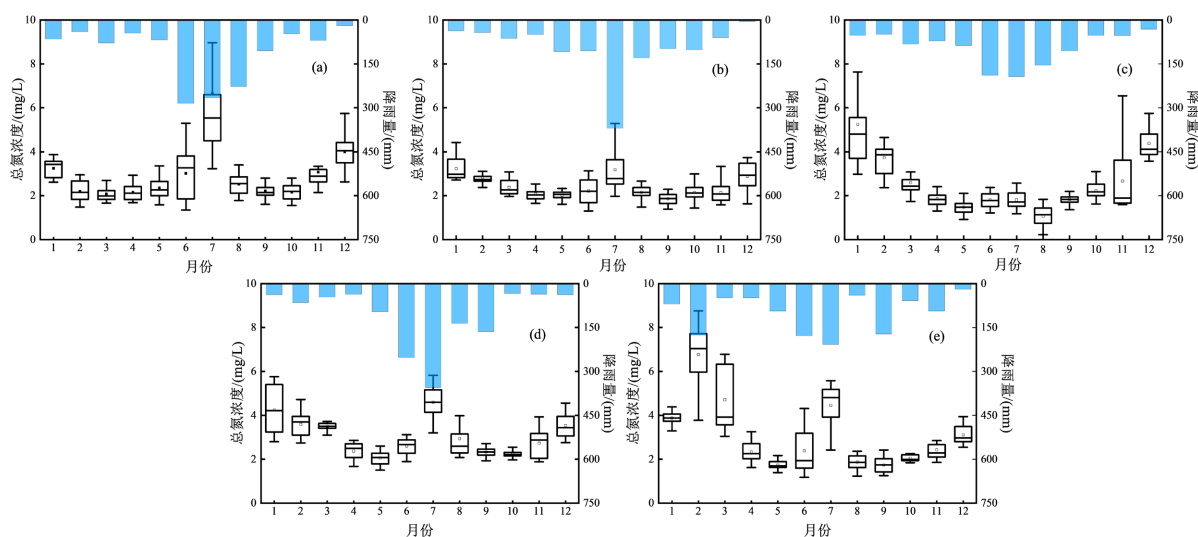


Figure 9. Variation trend of total nitrogen concentration under monthly accumulated rainfall at Huandong Gate from 2020 to 2024

图 9. 2020~2024 年环东闸口月累计降雨量下总氮浓度的变化趋势图

4. 讨论

通过对掘苴河断面 5 年监测数据的分析, 可以看出掘苴河流域总氮浓度一直处于较高水平, 总氮浓度年均值均超过 V 类, 会导致近海海域的水质污染问题, 存在暴发赤潮的风险。掘苴河逐月变化特征较为明显, 整体上降雨量大的月氮总氮浓度明显高于降雨量小的月, 说明降雨对总氮污染对掘苴河影响较大。降雨多集中在 6~8 月, 与掘苴河流域夏季播种时间吻合, 夏季种植水稻时期与强降雨期重叠, 水稻种植过程需要追加施肥, 因此会导致大量的氮磷流失[24]。有关于长江中下游区域的研究表明, 农业种植和畜禽养殖业是总氮污染的主要来源, 总氮排放占比分别为 58.93%和 33.53% [25]。人生产活动如工业化等会造成工业废水以及城市污水的排放增加, 从而导致水生态环境恶化[26], 包括有害藻华、水体缺氧、生物多样性丧失和水质持续恶化等[27]。工业废水和城市污水主要通过污水处理厂处理后排放, 而城市污水处理厂出水是河流氮磷的重要来源[28] [29]。相比降雨量大的丰水期而言, 枯水期河流由于污水处理厂尾水总氮的持续输入, 缺少雨水的稀释作用, 总氮污染负荷较高[30]。这与掘苴河枯水期降雨量较少但总氮浓度较高的特点吻合。

降雨主要通过侵蚀和稀释两种作用对总氮污染源产生影响。侵蚀作用会携带污染物通过径流的方式汇入水体, 还包括渗透的方式使河流中总氮浓度升高[31]; 稀释作用会降低河流中总氮污染物的浓度下降[32]。相关研究表明, 降雨中污染物浓度的变化不仅与径流有关, 而且还取决于降雨量、降雨强度等因素[33]。

当降雨量较小时, 雨水未形成径流或下渗, 主要通过稀释作用降低水体中的总氮浓度; 随着降雨强度增加, 以径流和渗透为主导, 会携带外源总氮污染物进入水体。此时以地表径流带来冲刷效应为主, 导致水体总氮浓度上升[34] [35]。当降雨量达到大雨和强降雨强度时, 随着降雨持续时间增加表层土壤水分逐渐饱和, 径流入渗率减小[36], 在降雨前期, 侵蚀作用占主导, 雨水通过径流携带外源污染物进入水体, 总氮浓度呈现上升趋势; 在降雨后期, 随着表层土壤趋于饱和, 入渗能力下降, 稀释作用占主导, 总氮浓度因此开始下降。本研究随着降雨强度的增大总氮浓度呈现先降低后升高再降低的变化趋势, 与辽河流域和太湖乌溪港地区的研究结果相似[37] [38]。

在降雨的季节性变化方面, 丰水期降雨大多以中雨为主, 降雨强度大, 总氮浓度升高不仅因为地表径流携带污染源进入河流, 还因为抬升地表和地下水位, 增强陆域与水体之间的水文连通性, 为氮素迁移创造通道[39]。并且丰水期时雨后总氮的滞后效应达到 48 h 以上, 梅雨期连续降雨会导致流域总氮浓度持续较高。枯水期降雨较少, 以小雨为主, 但少量降雨会对总氮形成强烈的初期冲刷效应[40]。枯水期时流域内的地表和土壤中积累大量的污染物, 长期干旱后的初期降雨会导致总氮浓度的大幅度升高[41]。此外, 有相关研究表明, 城市污水处理厂受到处理工艺影响, 处理厂尾水呈现季节性变化, 丰水期时出水总氮浓度较低, 冬季(枯水期)出水总氮浓度较高[42], 与本研究的结论相吻合。

5. 结论

(1) 基于 5 年的水质监测数据可知, 掘苴河流域的总氮污染情况较为严峻, 总氮浓度月均值超过 V 类的月份占 85%以上。总氮年均值在 2.42~3.12 mg/L。总氮浓度整体在年内分布呈现明显的季节性分布规律, 夏冬季节浓度高, 春秋季节浓度较低。

(2) 总氮浓度受到降雨强度和降雨季节性变化的影响。在降雨强度方面, 总氮浓度随着降雨强度的增大呈现先降低后升高再降低的变化趋势, 降雨产生的侵蚀、渗透和稀释作用共同影响水体的氮素浓度。在降雨量季节性变化方面, 丰水期降雨量大且持续时间长, 总氮浓度受到冲刷作用和总氮滞后效应的双重影响; 另外, 长时间降雨增加水体连通性, 为氮素迁移提供通道。枯水期降雨量少且降雨次数少, 少

量强降雨易造成初期冲刷作用导致总氮浓度升高; 同时, 降雨匮乏会导致河流补水减少, 枯水期外源污染物持续输入使总氮保持较高水平。

参考文献

- [1] Gruber, N. and Galloway, J.N. (2008) An Earth-System Perspective of the Global Nitrogen Cycle. *Nature*, **451**, 293-296. <https://doi.org/10.1038/nature06592>
- [2] 生态环境部发布《2024 中国生态环境状况公报》[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/sthjcg/hjzljcypj/202506/t20250605_1120773.shtml, 2025-06-05.
- [3] 生态环境部. 关于进一步加强入海河流总氮等污染治理与管控推动近岸海域水质持续改善的意见[EB/OL]. <https://www.ezhuanet.net/view-2000002-1910231441628372992.html>, 2024-10-31.
- [4] 关于印发《“十四五”海洋生态环境保护规划》的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202202/t20220222_969631.html, 2022-01-11.
- [5] 江苏省近岸海域污染物削减和水质提升三年行动方案[EB/OL]. http://sthjt.jiangsu.gov.cn/art/2020/12/24/art_83554_10117452.html, 2020-12-24.
- [6] 王妍. 长江流域氮磷污染物的空间分布特征及关键源区识别研究[J]. 常州工学院学报, 2022, 35(2): 1-6.
- [7] 张小磊, 孙颖雪, 张桐, 等. 南方某城市河流沿岸农田降雨径流面源污染输出特征[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 147-158.
- [8] 林伟, 李玉中, 李昱佳, 等. 氮循环过程的微生物驱动机制研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1146-1155.
- [9] 万伟帆, 美丽, 红梅, 等. 内蒙古阴山北麓滴灌马铃薯田氨挥发和氧化亚氮排放特征[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(8): 36-41.
- [10] 蒋锐, 朱波, 唐家良, 等. 紫色丘陵区小流域典型降雨径流氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2008(4): 1353-1358.
- [11] 张小磊, 裴颖春, 夏长会, 等. 黄河下游典型潮土区玉米地径流氮素流失特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 113-121.
- [12] Zhao, X., Christianson, L.E., Harmel, D. and Pittelkow, C.M. (2016) Assessment of Drainage Nitrogen Losses on a Yield-Scaled Basis. *Field Crops Research*, **199**, 156-166. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.015>
- [13] 田洪阵, 张政, 邓少福, 等. 2003-2023 年珠江口-江门海域总氮时空变化[J]. 海洋学研究, 2025, 43(2): 79-87.
- [14] 沈志良, 刘群, 张淑美. 长江总氮和有机氮的分布变化与迁移[J]. 海洋与湖沼, 2003(6): 577-585.
- [15] 王颢, 陈克亮, 吴烨飞, 等. 闽江入海断面溶解无机氮长时间序列分析及入海通量估算[J]. 中国环境监测, 2023, 39(6): 98-109.
- [16] 王丽萍, 常伊梅林, 曹英杰. 珠江口复杂河网氮素时空分布特征和来源解析[J]. 中国农村水利水电, 2025(12): 75-81.
- [17] 胡艳平, 王振华, 邵东国, 等. 2010-2023 年江汉平原四湖总干渠水量水质特征及其对农业种养模式变化的响应[J]. 湖泊科学, 2025, 37(6): 2009-2023.
- [18] 张乃明, 张玉娟, 陈建军, 等. 滇池流域农田土壤氮污染负荷影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2004(5): 148-150.
- [19] 任智慧, 赵春发, 王青青, 等. 复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 174-184.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50095-2014 水文基本术语和符号标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [21] 白雨诗, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地沟谷不同坡位土壤水分特征及对降雨过程的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(10): 2261-2273.
- [22] Zhang, Y., Shi, K., Zhou, Y., Liu, X. and Qin, B. (2016) Monitoring the River Plume Induced by Heavy Rainfall Events in Large, Shallow, Lake Taihu Using MODIS 250m Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **173**, 109-121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.020>
- [23] 刘懿枢, 张立进, 金晓毅, 等. 降雨条件下稻田非点源污染氮磷流失特征[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(4): 1000-1008.
- [24] 彭程亮, 黄敏, 陆文龙, 等. 长江中下游不同水旱轮作模式农田氮磷流失规律[J/OL]. 农业资源与环境学报: 1-15.

- <https://link.cnki.net/doi/10.13254/j.jare.2025.0808>, 2026-06-23.
- [25] 赖敏, 王伟力, 郭灵辉. 长江中下游城市群农业面源污染氮排放评价及调控[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(8): 1-11.
- [26] 徐春春. 长江中下游地区水稻生产化肥施用、环境效应与减施对策研究[D]: [博士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [27] Omoregie, A.I., Silini, M.O.E., Wong, L.S. and Rajasekar, A. (2025) Nitrogen Eutrophication in Chinese Aquatic Ecosystems: Drivers, Impacts, and Mitigation Strategies. *Nitrogen*, **6**, Article 92. <https://doi.org/10.3390/nitrogen6040092>
- [28] Jin, Z., Zhang, X., Li, J., Yang, F., Kong, D., Wei, R., *et al.* (2017) Impact of Wastewater Treatment Plant Effluent on an Urban River. *Journal of Freshwater Ecology*, **32**, 697-710. <https://doi.org/10.1080/02705060.2017.1394917>
- [29] 赵朔, 桂峰兰, 柳后起. 基于三种机器学习模型的太湖总氮浓度预测[J]. 中国农村水利水电, 2022(6): 24-28, 39.
- [30] Li, T., Zhou, P., Ding, Y., Tang, Q., Zhou, S. and Liu, Y. (2022) Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Different Rivers in Two Water Period: A Case Study of Pi River and Shiting River in the Upper Reaches of Tuo River in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 12433. <https://doi.org/10.3390/ijerph191912433>
- [31] 张燕, 王自林, 李永梅, 等. 滇池流域农田土壤氮素流失影响因子研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 916-922.
- [32] 王金杰, 张克荣, 吴川, 等. 汉江上游金水河流域氮湿沉降[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 66-72.
- [33] Li, W., Wang, J., Zhou, Y., Zhang, P. and Bai, X. (2023) Effects of Heavy Rain on the Concentrations and Forms of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Urban Rivers of Northern China. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 64971-64981. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27061-7>
- [34] 包鑫, 江燕, 胡羽聪. 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3316-3327.
- [35] Wang, R., Zhang, J., Cai, C. and Wang, S. (2023) Mechanism of Nitrogen Loss Driven by Soil and Water Erosion in Water Source Areas. *Journal of Forestry Research*, **34**, 1985-1995. <https://doi.org/10.1007/s11676-023-01640-3>
- [36] Wang, Y., Fang, Y.Q., Ji, J., *et al.* (2019) The Loss of Nitrogen and Phosphorus from Dryland Farmland under Different Rainfall Intensities. *Journal of Agriculture Resources and Environment*, **36**, 814-821.
- [37] 周波, 李晓光, 童思陈. 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2373-2384.
- [38] 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 等. 典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5047-5055.
- [39] Zheng, W., Wang, S., Sun, H., Shen, Y. and Cao, J. (2025) Rainfall Driven Nitrate Transport in Runoff of Hilly Area by Combining Time-Series Monitoring of Hydrochemistry and Stable Isotopes. *Journal of Hydrology*, **654**, Article ID: 132830. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132830>
- [40] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007(2): 326-331.
- [41] 杜立宇, 刘艳茹, 董淑萍, 等. 太子河小流域氮素输出特征研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 268-72.
- [42] 赵白恩, 王维红, 康增彦. 新疆某污水厂冬季出水总氮及氨氮超标的优化调控[J]. 净水技术, 2023, 42(12): 97-102, 182.