

黄河下游山东段五个城市氮含量的时空分布特征分析

宋佳伟, 孙广辉, 邱华亿, 孙德鑫

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2025年3月31日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

河流是地球生态系统的重要组成部分, 目前黄河下游地区因为人类活动频繁以及气候变化等因素, 水生态环境状况不容乐观。为探究黄河下游地区水生态环境状况, 研究人员于2022年1月~2023年12月分别对泰安、聊城、济南、滨州和东营市五个城市的氮素年度和季节变化进行了研究。研究发现, 从时间尺度上来看, 氮含量在年度上呈现下降趋势。在季节分布上大致可以把五个城市分为两组, 第一组是泰安市和聊城市, 其春、冬两季氮含量高于夏秋两季; 第二组是济南、滨州和东营市, 这三座城市夏季氮含量明显高于其他季节。在空间尺度上, 通过对五个城市水体中氮含量的比较分析, 发现各城市的氮浓度差异显著。从高到低依次为泰安、济南、滨州、东营和聊城。本文通过对黄河下游五个城市之间氮素含量的时空分布研究, 解释了氮含量的变化情况以及来源, 为合理的水生态环境安全战略思路 and 对策提供了参考, 并为其他地区的水污染治理和保护提供示范。

关键词

黄河下游, 山东河段, 氮含量, 时空分布特征

Characterization of Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen Content in Five Cities of the Shandong Section of the Lower Yellow River

Jiawei Song, Guanghui Sun, Huayi Qiu, Dexin Sun

School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai Shandong

Received: Mar. 31st, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

文章引用: 宋佳伟, 孙广辉, 邱华亿, 孙德鑫. 黄河下游山东段五个城市氮含量的时空分布特征分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 710-717. DOI: 10.12677/aep.2025.155080

Abstract

Rivers are an important part of the earth's ecosystem, and currently the water ecological environment in the lower Yellow River region is not optimistic because of frequent human activities and climate change. In order to explore the status of water ecosystem in the lower Yellow River region, the researchers studied the annual and seasonal changes of nitrogen in five cities, namely, Tai'an, Liaocheng, Jinan, Binzhou, and Dongying, from January 2022 to December 2023, respectively. It was found that on the time scale, the nitrogen content showed a decreasing trend on an annual basis. The five cities could be roughly divided into two groups in terms of seasonal distribution, the first group being Tai'an City and Liaocheng City, whose nitrogen contents were higher in spring and winter than in summer and fall, and the second group being Jinan, Binzhou and Dongying City, whose nitrogen contents were significantly higher in summer than in other seasons. On the spatial scale, the comparative analysis of the nitrogen content in the water bodies of the five cities revealed significant differences in nitrogen concentration among the cities. From high to low, they are Taian, Jinan, Binzhou, Dongying and Liaocheng. By studying the spatial and temporal distribution of nitrogen content among five cities in the lower reaches of the Yellow River, this paper explains the changes in nitrogen content as well as its sources, provides a reference for designating reasonable strategic ideas and countermeasures for water ecological and environmental security, and provides a model for water pollution management and protection in other regions.

Keywords

Lower Reaches of the Yellow River, Shandong Reach, Nitrogen Content, Spatial and Temporal Distribution Characteristics

Copyright © 2025 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. 背景

河流是地球生态系统的重要组成部分，作为地表水循环的主要通道，也是连接陆地与海洋的桥梁。河流不仅为生物圈的物质循环提供了渠道，还为人类提供工业、农业和生活用水，同时承载着防洪、航运等社会经济功能[1]。河流生态系统的演变和发展与人类生存和社会经济的发展密切相关[2]。

自然界中氮化合物的大规模积累与释放导致流域的氮输入量明显增加。近年来，氮污染持续侵蚀淡水资源，已成为多数地区水体恶化的主要污染源[3] [4]。太湖总氮输入量从 2000 年至 2005 年的每年 21 至 27 吨，增加到 2007 年至 2012 年的每年 41 至 45 吨[5]。氮过量引入水体将引发一系列水生态环境问题。

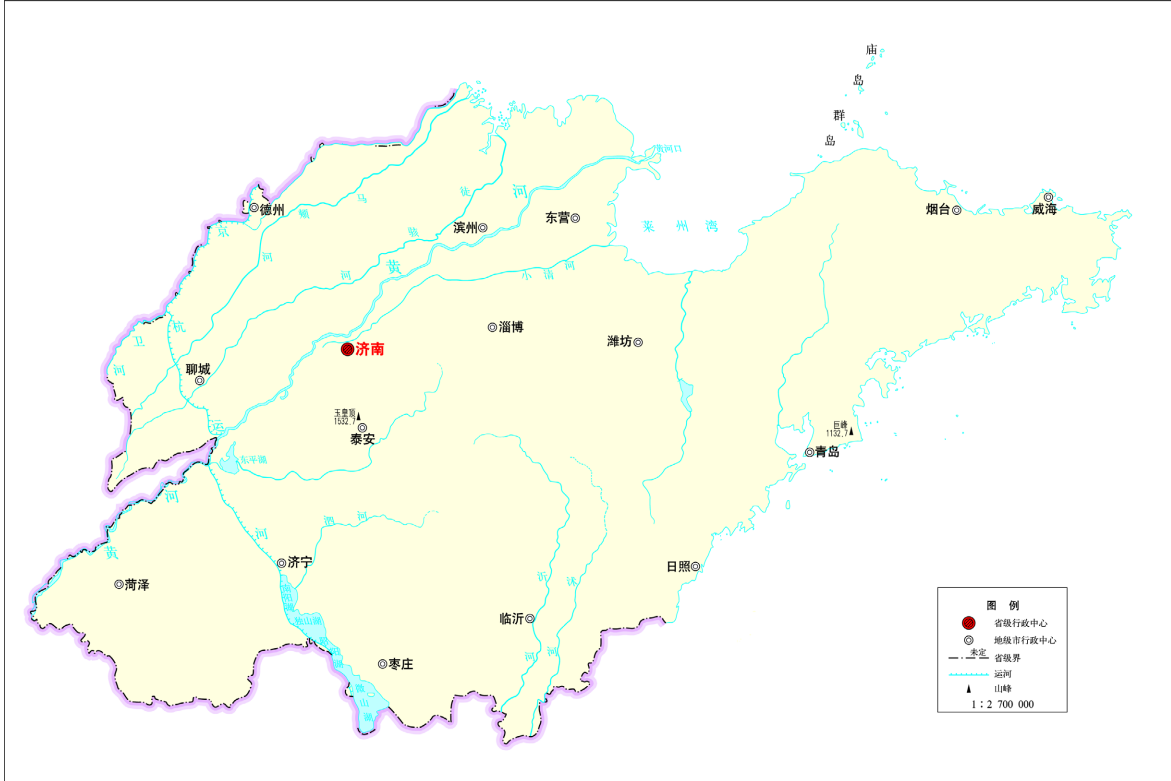
近年来，随着工业化和城市化进程的加速，河流生态系统面临着巨大的压力。氮素作为水体富营养化的关键指标，其过量输入会导致水质恶化，影响水生生物的生存和繁衍，进而对人类的生产和生活造成负面影响[6]。黄河作为中国的第二长河，其下游地区人口密集，城市化程度较高，氮素污染问题尤为突出[7]。因此，对黄河下游地区氮素的时空分布特征进行深入分析，对于理解河流生态系统的演变规律、制定科学的水环境管理策略具有重要意义。本研究选取黄河下游山东段的泰安、聊城、济南、滨州和东营市五个城市作为研究对象，旨在通过实地监测和数据分析，揭示该地区氮素的时空分布特征，为水生态环境的保护和修复提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

本论文的研究区域位于黄河流域下游的山东省(见图 1)。山东省属于温带季风气候。作为黄河流域唯一河海交汇区,山东段河道全长 628 公里,流经菏泽、济南等 9 市 25 个区县,最终在东营注入渤海,其“二级悬河”特征显著(河床高出地面 4~6 米),该区域年均降水量 679.5 毫米,但水资源总量仅占全国 1.09%,人均水资源量(334 立方米)仅为世界水平的 4%,属严重缺水地区。值得注意的是,大汶河作为黄河下游唯一主要支流,自东向西汇入东平湖,年均径流量 18.2 亿立方米,对区域水循环具有特殊意义。研究区涵盖泰安、济南、东营、聊城、滨州 5 个城市,值得注意的是仅泰安黄河段占据了黄河山东段流域面积的 47.5%。该研究区域作为黄河流域生态保护与高质量发展战略的关键实施区,氮含量时空分布研究机制具有重要科学价值。

分省(区、市)地图—山东省



注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3333 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Water system distribution map of Shandong section of the Yellow River Basin
图 1. 黄河流域山东段水系分布图

2.2. 样品采集

为探究泰安、济南、东营、聊城、滨州 5 个城市五个城市的氮素变化, 分别于 2022 年 1 月、2022 年 4 月、2022 年 7 月、2022 年 10 月以及 2023 年 1 月、2023 年 4 月、2022 年 3 月、2023 年 10 月共八个季度对于五个城市分别进行水样采集工作, 并采样点周边的土地利用类型、植被覆盖率、人为活动影响(工厂污水, 生活污水)等要素进行记录。

2.3. 研究方法

本论文选取 2022 年 1 月至 2023 年 12 月的采样数据作为数据支持，并将 2022 年 1 月至 2023 年 12 月两年内对 8 个季节的氮含量进行分析。按照上述时间划分标准计算各季度各城市的水体氮含量，并取三个月的平均值作为该季度各城市的氮含量。四个季度的平均氮含量定义为该市年均氮含量。从时间的角度，比较了两年内同一城市八个季度的氮含量变化趋势及动态演变规律。结合水体中可能存在的氮源，解释了这种变化趋势的可能原因。从空间的角度，研究了研究区域五个城市的水体氮含量的变化情况，分析并解释了五个城市水体氮含量差异性及变化趋势。并采用线性拟合方法进行氮含量和流域面积相关性分析，线性拟合是一种曲线拟合形式。设 x 和 y 为可观测量， y 为 x 的函数： $y = f(x)$ 。曲线拟合的目标是从 x 和 y 的观测值中确定最优理论曲线 $y = f(x, b)$ ，并获得参数 b 的最佳估计值。

3. 结果

3.1. 氮含量的时间分布特征

3.1.1. 年度分配

从对五个城市水体中氨氮和总氮含量的年度数据进行的详细分析中可以看出，水体中的总氮含量呈下降趋势(见图 2)。其中，泰安市水体中的氨氮含量从 0.4 mg/L 降至 0.34 mg/L，下降了 15%，总氮含量从 10.76 mg/L 降至 8.36 mg/L，下降了 22%。聊城市水体中的氨氮含量在两年内保持不变，而总氮含量从 3.54 mg/L 降至 3.47 mg/L，下降了 1.9%。济南市水体中的氨氮含量从 0.08 mg/L 升至 0.1 mg/L，上升了 25%，总氮含量从 6.53 mg/L 降至 5.08 mg/L，下降了 22%。滨州市水体中的氨氮含量从 0.18 mg/L 升至 0.2 mg/L，上升了 11%，而总氮含量从 5.12 mg/L 降至 4.1 mg/L，下降了 19%。东营市水体中的氨氮含量从 0.1 mg/L 升至 0.13 mg/L，上升了 30%，而总氮含量从 4.65 mg/L 降至 3.67 mg/L，下降了 21%。

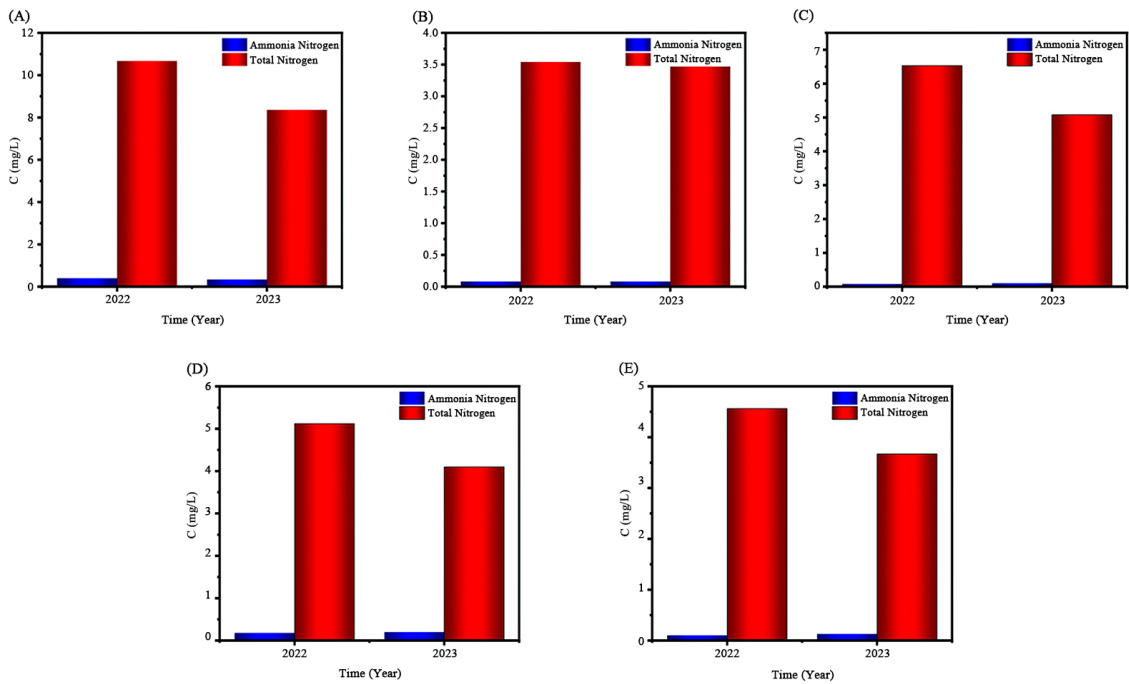


Figure 2. Annual changes of water nitrogen content in five cities (A)~(E) represent the water bodies of Tai'an, Liaocheng, Jinan, Binzhou and Dongying, respectively
图 2. 五个城市水体氮含量年变化情况(A)~(E)分别代表泰安、聊城、济南、滨州、东营市的水体

3.1.2. 季度分配

五个城市的水体氮含量变化呈现出两种趋势。一种趋势是春、冬两季浓度较高，夏、秋两季浓度较低。表现出这种分布趋势的城市有泰安市和聊城市。泰安市和聊城市水体氮含量的季度平均值(见图 3)：

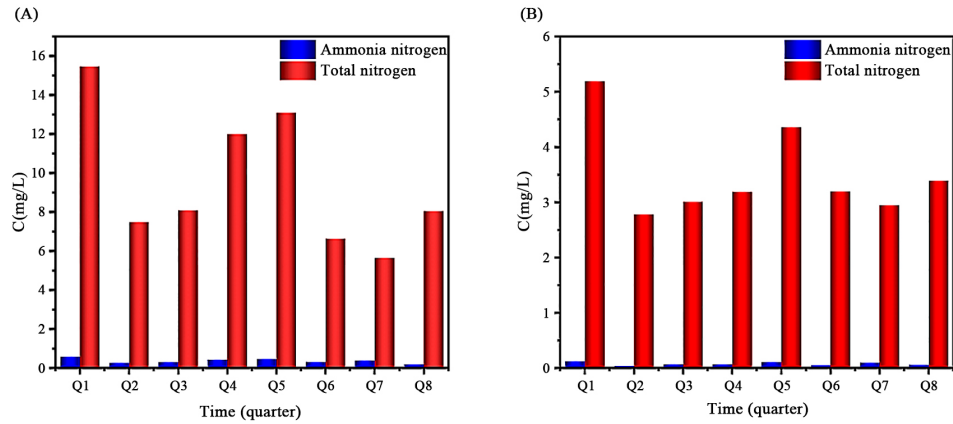


Figure 3. Average quarterly nitrogen content of water bodies in Tai'an City and Liaocheng City. (A) Tai'an City; (B) Liaocheng City
图 3. 泰安市、聊城市水体季度平均含氮量。(A) 泰安市；(B) 聊城市

第二种趋势是春季和夏季氮素浓度较高，秋季和冬季浓度较低，呈现这种趋势的城市有济南、滨州和东营，其水体氮含量的季度平均值(见图 4)：

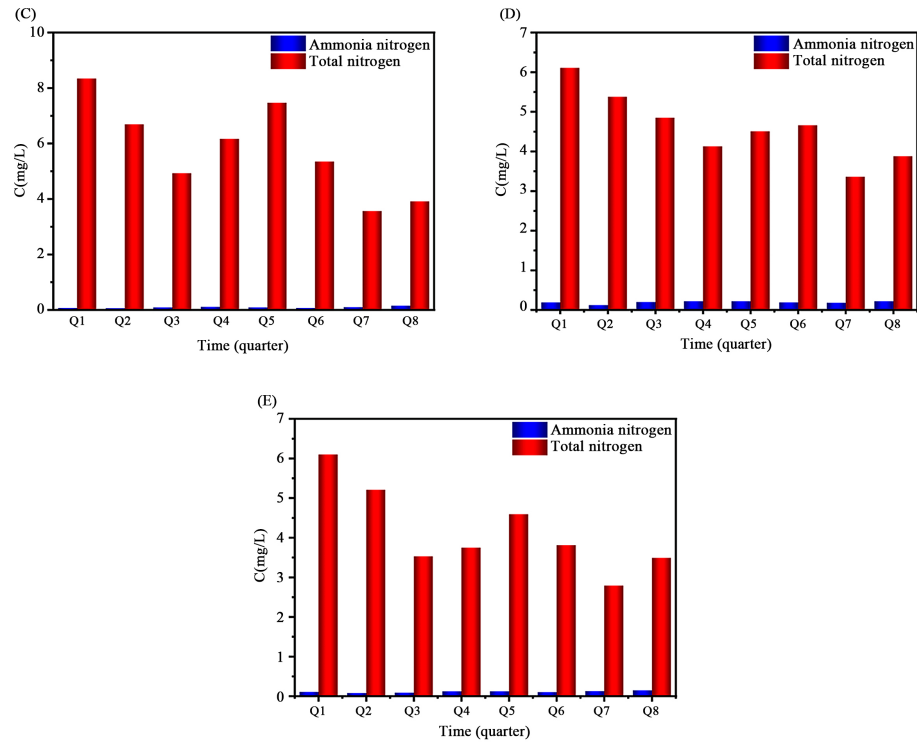


Figure 4. Average quarterly nitrogen content of water bodies in Jinan, Binzhou and Dongying cities. (C) Jinan City; (D) Binzhou City; (E) Dongying City
图 4. 济南、滨州、东营市水体季度平均含氮量。(C) 济南市；(D) 滨州市；(E) 东营市

3.2. 氮素的空间分布特征

3.2.1. 氮素含量分布特征分析

本文对两年内 8 个季度内 5 个城市水体中氮的总量进行了区域分析，并绘制了 5 个城市水体中氮含量的饼状图，如图 5 所示：五城市水体中的总氮含量从高到低排序为泰安市、济南市、滨州市、东营市和聊城市。

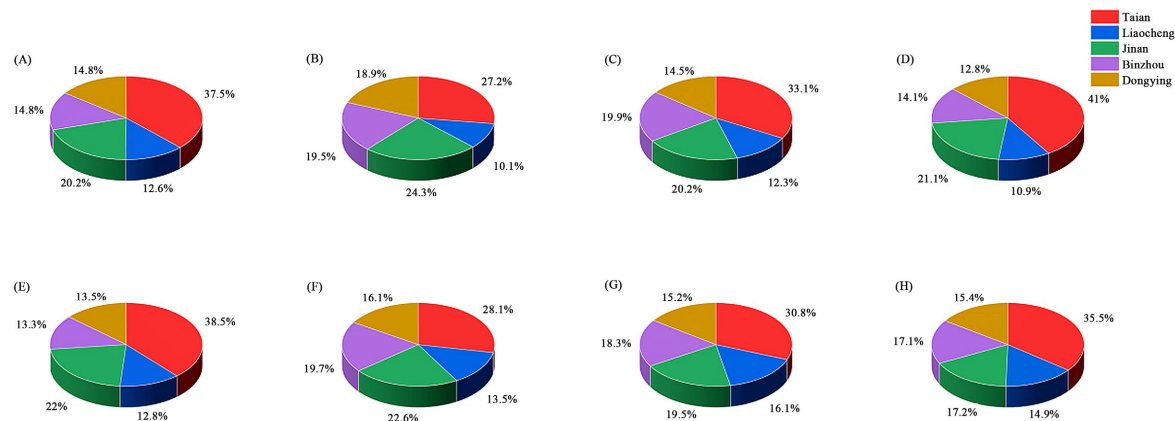


Figure 5. 5 Spatial changes of water nitrogen content in eight quarters of cities. (A)~(H) represent quarters 1 through 8, respectively

图 5. 5 个城市 8 个季度水体氮含量空间变化情况。(A)~(H)分别代表第 1 至第 8 个季度

3.2.2. 氮素含量与流域面积线性拟合分析

将五个城市的水体总氮含量在八个季度中取平均值，并与相应城市的流域面积进行统计，结果如表 1 所示。

Table 1. Total nitrogen content of water bodies in the five cities
表 1. 五市水体总氮含量

城市	总氮(mg/L)	流域面积(km²)
泰安	9.56	6093
聊城	3.51	122
济南	5.80	2778
滨州	4.61	129
东营	4.16	398.5

根据上表中的统计数据，可以对五个市镇水体中的总氮含量与其流域面积进行线性拟合，得到如图 6 所示的拟合结果。判断线性拟合是否合理的主要标准是看线性拟合的 R^2 值，这是用来评估自变量对因变量解释能力的指标以及模型与数据的拟合程度。有时也称为决定系数。其取值范围为 0 到 1，接近 1 的值表示模型的解释能力较强，即模型与数据的拟合较好；接近 0 的值则表示解释能力较弱，即模型与数据的拟合较差。

如图 6 所示，在五个城市和流域面积水体中总氮含量拟合结果中， R^2 为 0.96。拟合结果的 R^2 接近于 1，表明五个城市水体中的总氮含量与相应的流域面积有显著的正相关关系，即流域面积越大，水体中的总氮含量也越高。流域面积越大，点源和非点源污染越严重。点源污染包括污水处理厂、工业排放口等。这些点源固定且可控，但排放量大。流域面积越大，可能覆盖的点源污染越多，进入水体的污染负

荷相对增加。非点源污染包括农业径流等。非点源污染分布广泛且分散。农业种植面积随流域面积增加而增大，这可能表明非点源污染的潜在贡献更大。

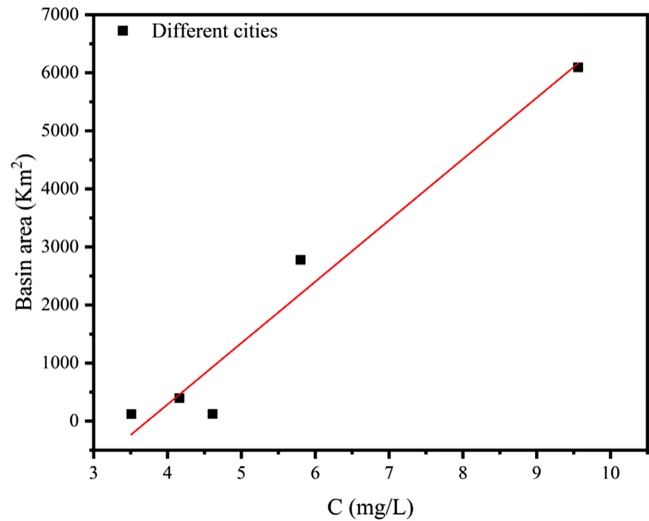


Figure 6.5 Linear fitting of nitrogen pollutants in urban water bodies and watershed area
图 6.5 个城市水体氮污染物与流域面积的线性拟合

4. 讨论

通过对黄河下游氮含量的时空分布特征分析，结果显示，时间尺度上，氨氮含量的变化与总氮含量的变化并不一致，原因可能是硝化作用和反硝化作用的不平衡导致的。硝化作用是将氨转化为硝酸盐和亚硝酸盐，反硝化作用是将这些无机氮化合物还原为氮，如果这两个过程中的任何一个受到干扰，就可能导致氨氮和总氮含量的趋势不一致。然而黄河下游水体缺氧可能存在缺氧问题，水中氧气不足，硝化反应过程就会受阻，导致氨氮含量相对较高，而总氮含量增加则不明显[8]。此外有机氮所占比例不同：总氮包括有机氮和无机氮，而氨氮只是无机的一部分，如果水中有机氮的比例发生变化，也会导致总氮和氨氮的变化趋势不一致[9]。生活污水、工业废水等点源污染往往含有较高的氨氮，会使氨氮含量较高。春季和夏季水体中氮含量较高的原因主要是春季往往是农作物生长的关键，因此，春季化肥的使用会大量增加，部分氮肥可能随自然降雨或灌溉水流失，从而进入水体，导致氮浓度升高。而夏季汛期河流量增大，冲刷河床沉积物，会释放历史累积的氮污染物。

氮污染负荷在空间上呈现明显的区域差异，工业城市周边(如滨州、东营)氮浓度较高，主要来自石油化工、制药等工业废水排放，且工业点源污染贡献稳定，导致氮含量常年超标[9]；农业区(如菏泽、聊城)氮污染以非点源为主，与化肥施用强度正相关，尤其在耕地集中的支流(如大汶河)表现出季节性峰值[10]。

5. 结论

在时间尺度上，本论文对 2022 年 1 月至 2023 年 12 月的水质数据进行了季度和年度分析。研究发现，氮含量在年度上呈现下降趋势，这与中国国情以及研究期间中国对水环境保护力度的加大有关。季度上，水体中的氮含量有显著的季节性波动，大致分为两组：一组在春、冬两季较高，在夏、秋两季较低；另一组春、夏两季较高，在秋、冬两季较低。这两种波动与工业生产、农业活动和城市化等因素密切相关。在空间尺度上，通过对五个城市水体中氮含量的比较分析，发现各城市的氮浓度差异显著。从高到低依次为泰安、济南、滨州、东营和聊城。通过将每个城市水体中的氮含量与其流域面积拟合，发现

这些差异主要归因于各城市不同的流域面积，流域面积越大，氮含量越高。

参考文献

- [1] Li, J., Zhu, D., Zhang, S., Yang, G., Zhao, Y., Zhou, C., *et al.* (2022) Application of the Hydrochemistry, Stable Isotopes and Mixsiar Model to Identify Nitrate Sources and Transformations in Surface Water and Groundwater of an Intensive Agricultural Karst Wetland in Guilin, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **231**, Article ID: 113205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113205>
- [2] Zhou, K. (2022) Application of Set-Pair Analysis and Extension Coupling Model in Health Evaluation of the Huangchuan River, China. *Applied Water Science*, **12**, Article No. 198. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01719-y>
- [3] Flemer, D.A. and Champ, M.A. (2006) What Is the Future Fate of Estuaries Given Nutrient Over-Enrichment, Freshwater Diversion and Low Flows? *Marine Pollution Bulletin*, **52**, 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.11.027>
- [4] Cerqueira, M.A., Silva, J.F., Magalhães, F.P., Soares, F.M. and Pato, J.J. (2007) Assessment of Water Pollution in the Antuã River Basin (Northwestern Portugal). *Environmental Monitoring and Assessment*, **142**, 325-335. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9932-7>
- [5] Wang, M., Stokal, M., Burek, P., Kroeze, C., Ma, L. and Janssen, A.B.G. (2019) Excess Nutrient Loads to Lake Taihu: Opportunities for Nutrient Reduction. *Science of the Total Environment*, **664**, 865-873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.051>
- [6] 张弼, 庞爱萍, 李春晖. 黄河流域农业农村氮流时空分布特征及演化规律研究[J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 80-91.
- [7] 韩谓, 潘保柱, 陈越, 等. 黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 5786-5795.
- [8] Liu, T., Xia, X., Liu, S., Mou, X. and Qiu, Y. (2013) Acceleration of Denitrification in Turbid Rivers Due to Denitrification Occurring on Suspended Sediment in Oxidic Waters. *Environmental Science & Technology*, **47**, 4053-4061. <https://doi.org/10.1021/es304504m>
- [9] Jiang, J., Wang, Z., Lai, C., Wu, X. and Chen, X. (2023) Climate and Landuse Change Enhance Spatio-Temporal Variability of Dongjiang River Flow and Ammonia Nitrogen. *Science of The Total Environment*, **867**, Article ID: 161483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161483>
- [10] Hou, W., Sun, S., Wang, M., Li, X., Zhang, N., Xin, X., *et al.* (2016) Assessing Water Quality of Five Typical Reservoirs in Lower Reaches of Yellow River, China: Using a Water Quality Index Method. *Ecological Indicators*, **61**, 309-316. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.030>
- [11] Yao, T., Zhao, Q., Li, X., Shen, Z., Ran, P. and Wu, W. (2020) Spatiotemporal Variations of Multi-Scale Drought in Shandong Province from 1961 to 2017. *Water Supply*, **21**, 525-541. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.332>