

小清河干流水质时空变化特征及其污染物溯源解析

潘维艳^{1,2}, 尹锐铃¹, 刘凤森¹, 耿玉莹¹, 刘洋¹, 徐征和¹, 徐立荣¹

(1. 济南大学 水利与环境学院, 山东济南 250022; 2. 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东航空学院, 山东滨州, 256603)

摘要: 河流作为人类及其他生物赖以生存的重要自然生态系统, 其水质状况直接关系到生态安全与可持续发展。为探究小清河干流水质时空变化特征, 基于2019~2022年的水质监测数据, 采用综合水质指数法(WQI)分析小清河干流水质时空变化特征, 并利用主成分-多元线性回归模型(APCS-MLR)解析干流污染物来源及其贡献率。结果表明: 2019~2022年小清河干流水质年均WQI值呈现增加趋势, 水质等级从“中等”转变为“良好”; 水质状况在季节尺度上未呈现显著波动, 但丰水期WQI均值相对较低。空间上, 小清河干流水质WQI值总体上表现为中游<上游<下游, 水质较差的区域主要分布在中上游, 尤其是干流沿岸建设用地和耕地面积占比较大的地区。源解析结果显示, 干流污染物来源较为复杂, 主要为工业废水排放源(25.81%)、农业种植活动源(24.92%)、生活污水排放和畜禽养殖源(17.60%); 干流各监测断面的污染物来源组成相似, 然而, 其污染源的贡献结构存在差异, 这种差异与沿岸的土地利用方式及人类活动强度密切相关。研究结果可为小清河流域的污染防控与治理决策提供关键科学依据。**关键词:** 水质评价; 综合水质指数法; 时空分布特征; 主成分-多元线性回归模型; 源解析

中图分类号 X824

收稿日期: 2025-11-27

Spatio-temporal Variation Characteristics of Water Quality and Pollutant Source Apportionment in the Xiaoqing River Mainstream

Pan Weiyan^{1,2}, Yin Ruiling¹, Liu Fengsen¹, Geng Yuying¹, Liu Yang¹, Xu

Zhenghe¹, Xu Lirong¹

1.University of Jinan, School of Water Conservancy and Environment, Jinan, 250022, China

2.Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta,

Shandong University of Aeronautics, Binzhou, 256603, China

Abstract: As a critical natural ecosystem supporting the survival of humans and other organisms, the water quality of rivers directly influences ecological security and sustainable development. To investigate the spatiotemporal variations in water quality of the Xiaoqing

基金项目: 国家自然科学基金(42307083); 济南大学2023年学科交叉会聚建设项目(XKJC-202305)

作者简介(通讯作者): 潘维艳(1987-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为地表水-地下水交互作用下污染物迁移转化, E-mail:stu_panwy@ujn.edu.cn, ORCID: 0009-0005-6063-9759

River mainstream, this study analyzed and evaluated these characteristics using the comprehensive water quality index (WQI) method based on monitoring data from 2019 to 2022. Additionally, a principal component analysis-multiple linear regression (PCA-MLR) model was employed to identify pollution sources and quantify their contribution rates in the mainstream. The results indicated that the annual average WQI of the Xiaoqing River mainstream showed an increasing trend, with the water quality grade improving from "moderate" to "good" from 2019 to 2022. No significant seasonal variation in water quality grade was observed, though the WQI during the wet season was slightly higher than in other periods. Spatially, the WQI values along the Xiaoqing River mainstream generally exhibited a pattern of midstream < upstream < downstream, with the best water quality observed in the downstream section. Poorer water quality was primarily distributed in the midstream and upstream regions, particularly in areas with a high proportion of built-up and agricultural land along the main channel. Source apportionment results revealed that pollutant sources in the Xiaoqing River mainstream were diverse, with primary contributions from industrial wastewater discharge (25.81%), agricultural activities (24.92%), and domestic sewage coupled with livestock farming (17.60%). The predominant pollution sources were generally consistent across all monitoring sections, though dominant types varied spatially, which was closely associated with land use patterns and anthropogenic activities along the river. The findings of this study can provide an important scientific basis for pollution control decision-making in the Xiaoqing River Basin.

Key words: Water quality evaluation, Comprehensive water quality index (WQI), Spatio-temporal Variation, APCS-MLR, Source apportionment

0 引言

在人类活动日益加剧的背景下,水质恶化已成为一个凸显的全球性环境问题,其后果不仅危及公众健康与生物多样性,也导致了广泛的水生生态系统问题 (Nong *et al.*, 2019)。水质的时空演变直观反映了污染源与人类活动的地理异质性,并受到气候、水文及社会经济因素的综合影响,厘清水质的时空变化特征及其污染物的来源,是进行有效污染控制与可持续水管理的关键基础。小清河位于山东省内,是黄河流域渤海水系的重要支流,其源头位于省会济南的泉群区域,最终汇入渤海,小清河沿岸经由山东半岛蓝色经济区、黄河三角洲高效生态经济区和省会城市群经济圈,作为历史上的“黄金水道”,对区域经济社会发展和生态安全保障具有战略意义。然而,随着工业化与城镇化的快速推进,工业废水、生活垃圾与农业化肥等污染物持续溢入河道,致使流域承纳了巨大的环境压力,作为莱州湾主要入海河流之一,小清河在区域氮输入中占据重要地位,其氮的输送贡献量达到 30%,仅次于黄河 (王一诺等, 2023)。作为沿线地区重要的排水通道和地下水补给源,小清河流域的水环境状况对于维持区域水平衡与水安全至关重要。因此,开展小清河流域水质时空演化特征研究与污染物溯源,对于实现流域水资源的可持续管理与保护具有重要实践意义。

近年来“河长制”和“幸福河湖”等政策的实施已使小清河流域水质总体改善,但现有研究多集中在水源地水质评价和综合治理成效分析 (代雪静等, 2022; 王好芳等, 2024),以及入海口水质评价等方面 (范新风等, 2020),缺乏对小清

河干流长期水质时空动态演变规律的分析,对流域内污染状况及来源的定性定量溯源研究不足。地表水环境质量评价作为水体污染评估的有效手段,能够定量、定性评估地表水水体的污染状况。在诸多水质评价方法中,综合水质指数法(WQI)相较于单因子指数法、模糊综合评价法和内梅罗指数法等传统方法,其优势在于能够整合多个环境参数,并将其转化为反映水质状态的单一值,进而提供更为集成的综合水质信息。如胡莹莹等(2022)采用综合水质指数法以白洋淀流域为例验证了WQI评价方法在北方典型流域水质评价的适用性,Nong *et al.* (2020)采用改进的WQI对南水北调工程进行水质评价,并筛选出了关键水质参数,因此WQI是一种有效的水质评价方法。近年来,水环境污染源解析研究多集中于地下水或特定污染物(Meng *et al.*, 2018),而对地表水污染来源的综合解析则相对缺乏。相较于主成分分析法、化学质量平衡法等传统手段,绝对主成分-多元线性回归法(APCS-MLR)无需依赖准确的源成分谱即可定量计算贡献率,其在污染源分配上更高效、便捷(Cao *et al.*, 2020),现已被广泛应用于相关研究(Cheng *et al.*, 2020; Du *et al.*, 2020)。然而由于不同受体模型在具体原理上存在差异,在不同研究区源解析结果存在不确定性,且易受土地利用类型和人类活动的干扰,因此需紧密结合区域具体条件进行综合分析,以确定可靠的源解析结果(丁启振等, 2024; Zhu *et al.*, 2025)。

本研究以小清河干流为研究对象,针对其污染源多样且难以定量解析的问题,基于2019~2022年的水质监测数据,采用综合水质指数法(WQI)评价水质并识别其时空变化特征;运用APCS-MLR模型综合解析污染来源,并结合土地利用类型量化各污染源的贡献率。研究成果旨在为小清河流域的污染防控与生态保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

小清河发源于济南市泉群,流经济南、淄博、滨州、东营及潍坊五市,最终于寿光市羊角沟注入渤海(图1),流域面积10366 km²,干流全长233 km,是一条集防洪、灌溉、排污、航运等多功能于一体的综合性河道。流域地势南高北低,共有46条一级支流,且多数由南岸汇入。该流域属暖温带大陆性季风气候,年均气温12~14℃,多年平均降水量为620 mm;降水年内分配不均,主要集中在汛期(6~9月)。

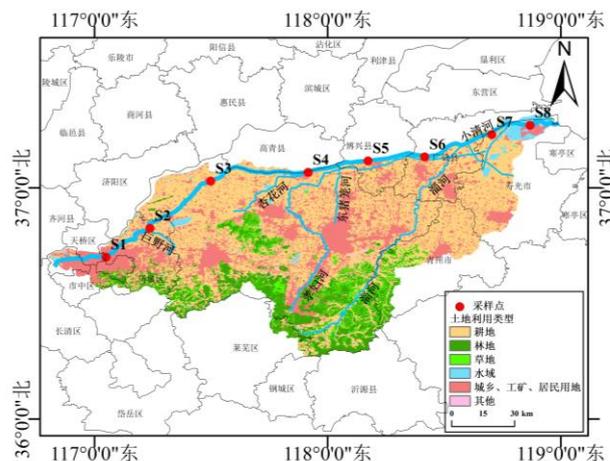


图1 小清河流域地理位置

Fig. 1 Geographical location of Xiaoqing River basin

1.2 数据来源

沿小清河干流自上游至下游布置 8 处地表水监测断面，分别为黄台桥、柴庄闸（上游），魏桥、岔河、博昌桥（中游）以及石村、候辛庄和羊角沟（下游），各断面分布如图 1 所示。使用采样器在水面以下 30 cm 深度处采集水样，在同一个采样点采集 2 个平行样品，水样放入冷藏箱内贮存运输，72 h 内完成水质指标的测定，采样时间为 2019 年 1 月~2022 年 12 月，采样频率为每月 1 次。测定的水质指标包括溶解氧（DO）、总氮（TN）、总磷（TP）、氨氮（NH₄-N）、硝态氮（NO₃-N）、化学需氧量（COD_{Cr}）和氟化物（F⁻）。DO 采用便携式溶解氧电极现场测定，TN、TP、NH₄-N 和 NO₃-N 利用连续流动分析仪测定（AA3 型），COD_{Cr} 采用重铬酸钾法测定，F⁻ 采用分光光度法测定。土地利用类型数据来源于中国土地利用遥感监测数据（<https://www.resdc.cn/DataList1.aspx?FieldTypeID=1,3>）。

1.3 研究方法

1.3.1 综合水质指数评价法

本研究采用 WQI 法，将测定的水质指标分为 2 类，包括易净化指标（CI1）和其他指标（CI2），易净化指标包括 DO、TN、NH₄-N、NO₃-N 和 COD_{Cr}，都是常见生化指标，通过污水处理可以有效降低其浓度，其他指标包括 TP 和 F⁻。中国《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）将每个水质项目划分为 I-V 类，分别代表优秀（I）、良好（II）、中等（III）、较差（IV）和极差（V），不同水质指标的分类和等级阈值见表 1。WQI 的计算公式（Nong *et al.*, 2020; Pesce *et al.*, 2000）如下式（1）所示：

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

式中：WQI 为水质综合评价指数； n 为研究中水质参数的总数； C_i 为第 i 项参数的归一化数值； P_i 为第 i 项参数的权重，它表示第 i 个参数对水生生物和人类健康的重要性，权重的相对值是根据前人研究选取（Pesce *et al.*, 2000; 夏诗语等, 2025; 毛德华等, 2024），具体见表 1。

本研究借鉴《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）及 Hou 等人（Hou *et al.*, 2016）的研究成果，将 C_i 归一化数值的计算公式确定为公式（2）：

$$C_i = \begin{cases} 100 - \left[\frac{(T_i - S_{i,k})}{(S_{i,k+n} - S_{i,k})} \times 20n + I_{i,k} \right], & T_i \in [S_{i,k}, S_{i,k+n}) \\ 100 - \frac{T_i}{S_{i,k+n}} \times 20n, & T_i \in [0, S_{i,k}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： T_i 为第 i 项参数的实测浓度； $S_{i,k}$ 和 $S_{i,k+n}$ 分别为第 i 项参数在 K 级和 $(K+n)$ 级的标准浓度，mg/L； $I_{i,k}$ 为评估分类项的 k 级指数值； n 为具有相同标准阈值的个数，若没有相同指标，则 $n=1$ 。易净化指标和其他指标均用上式进行计算。

表 1 WQI 中各水质指标权重值和标准化因子

Table 1 The normalization values and weights of water quality parameters used in the WQI calculation

权重	参数	地表水质量标准
----	----	---------

(P_i)		I	II	III	IV	V
		$I_{i,1}=20^b$	$I_{i,2}=40^b$	$I_{i,3}=60^b$	$I_{i,4}=80^b$	$I_{i,5}=100^b$
4	DO (mg/L) \geq	7.5	6	5	3	2
3	NH ₄ -N (mg/L) \leq	0.15	0.5	1	1.5	2
4	TP (mg/L) \leq	0.02	0.1	0.2	0.3	0.4
-	TN (mg/L) \leq	0.2	0.5	1	1.5	2
2	F ⁻ (mg/L) \leq	1	1	1	1.5	1.5
2	COD _{Cr} (mg/L) \leq	15	15	20	30	40

注：根据《中国地表水环境质量标准》（2002年），在评价河流地表水时，总氮不作为基本项目，不参与评价，因此在本研究中，水质指数（WQI）的计算将不包括总氮。

参考中国水质等级分级和其他学者研究成果（Iloba *et al.*, 2021; Nong *et al.*, 2019），将 WQI 值划分为 5 个等级：分别为优秀（ $80 < \text{WQI} \leq 100$ ）、良好（ $60 < \text{WQI} \leq 80$ ）、中等（ $40 < \text{WQI} \leq 60$ ）、差（ $20 < \text{WQI} \leq 40$ ）、极差（ $0 < \text{WQI} \leq 20$ ）。

1.3.2 APCS-MLR 源解析模型

（1）绝对主成分分析

APCS-MLR 模型的第一步是提取水质指标的主成分，作为污染源判别和量化的依据，提取的主成分得分计算公式为式（3）和（4）：

$$(A_z)_k = \sum_{j=1}^p (w_j \times z_k) \quad (3)$$

$$z_k = (c_k - \bar{c}) / \sigma \quad (4)$$

式中： $(A_z)_k$ 为主成分的得分值； w_j 为第 j 主成分的因子系数，其中 j 为 PCA 过程中得到的主成分序号； z_k 为 k 观测点污染物浓度标准化后的值； c_k 为 k 观测点污染物浓度，mg/L； \bar{c} 为污染物浓度的算术平均值，mg/L； σ 为污染物浓度的标准差，mg/L。

由于 $(A_z)_k$ 是标准化值，不能直接用于计算主成分（PCs）的原始贡献，必须把标准化的因子得分转化为非标准的绝对主成分得分（APCS）才能用于 PCs 对污染指标的贡献分析。APCS 的计算方法如式（5）~（7）所示：

$$\text{APCS}_{jk} = (A_z)_{jk} - (A_0)_j \quad (5)$$

$$(A_0)_j = \sum_{i=1}^q [S_{ij} \times (Z_0)_i] \quad (6)$$

$$(Z_0)_i = (0 - \bar{c}_i) / \sigma_i \quad (7)$$

式中： APCS_{jk} 为第 j 主成分的绝对主成分得分值； $(A_z)_{jk}$ 为第 j 主成分的得分值； $(A_0)_j$ 为 0 值下的主成分得分值； S_{ij} 为因子得分系数，其中 i 为水化学因子序号； $(Z_0)_i$ 为观测点污染物浓度设为 0 时标准化后的值； \bar{c}_i 为 i 水化学因子浓度的算术平均值，mg/L； σ_i 为 i 水化学因子浓度的标准差，mg/L。

（2）多元线性回归

以实测污染因子浓度 C 为因变量，以绝对主成分 APCS 为自变量，与污染因子浓度之间建立多元线性回归方程见式（8）：

$$C_i = \sum_{m=1}^n (a_{im} \times \text{APCS}_{im}) + b_i \quad (8)$$

式中： C_i 为 i 水化学因子的实测浓度，mg/L； a_{im} 为污染源 m 对水化学因子 i 的

回归系数； $APCS_{im}$ 为水化学因子 i 的所有样本绝对主成分得分值； b_i 为常数项。

(3) 污染源贡献

回归方程中 a_{im} 与 $\overline{APCS_{im}}$ 的乘积表示污染源对水化学因子的贡献，常数项 b_i 一般认为是未被识别源项的贡献值。污染源 m 对水化学因子 i 的贡献比例可用式 (9) 计算，未识别源的贡献比例可用式 (10) 计算。

$$PC_{im} = \frac{|a_{im} \times \overline{APCS_{im}}|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{APCS_{im}}|} \quad (9)$$

$$PC_{im} = \frac{|b_i|}{|b_i| + \sum_{m=1}^n |a_{im} \times \overline{APCS_{im}}|} \quad (10)$$

式中： PC_{im} 为针对水化学因子 i 、污染源 m 的贡献率； $\overline{APCS_{im}}$ 为水化学因子 i 的所有样本绝对主成分因子得分平均值。

2 结果与讨论

2.1 小清河干流水质 WQI 值时间变化特征

2019~2022 年小清河干流 8 处断面年均 WQI 值箱型图如图 2 (a) 所示，2019~2022 年小清河干流水质年均 WQI 值呈现缓慢上升趋势，WQI 值中位数从 2019 年的 43.64 升高到 2022 年的 61.45，表明小清河干流水质呈逐渐好转趋势。根据水质分类标准，2019~2022 年各断面水质等级从“中等”转变为“良好”，水质改善明显，说明 2019 年开展的小清河流域综合治理工程效果显著。各断面水质等级占比如图 2 (b) 所示，由图可知，2019~2021 年干流中无“优秀”等级水体，“差”等级水体占比呈现逐年下降趋势，占比从 2019 年的 39% 下降到 2022 年的 0%，“良好”等级水体占比呈逐年上升趋势，从 2019 年的 6% 增加至 2022 年的 58%，干流水质整体上有较大提升。在此期间，小清河河道治理工程的推进以及相关政策的制定与实施，对小清河流域水环境质量的提升起到了关键作用。例如，2019 年 12 月，小清河防洪综合治理工程被确定为山东省重点水利工程的“头号工程”。在该工程实施过程中，开展了污水集中收集处理设施建设、工业企业转型关停搬迁、河道清淤、河床加深与拓宽等工作，这些举措有效促进了流域水质与水生态系统的初步改善（代雪静等，2022；范新风等，2020）。此外，2021 年山东省签发的第 7 号总河长令《加快美丽幸福河湖建设进程》，强调应科学编制“一河（湖）一策”，持续改善河湖生态环境，扎实推进美丽幸福河湖建设。这些举措显著提升了小清河水环境治理成效。

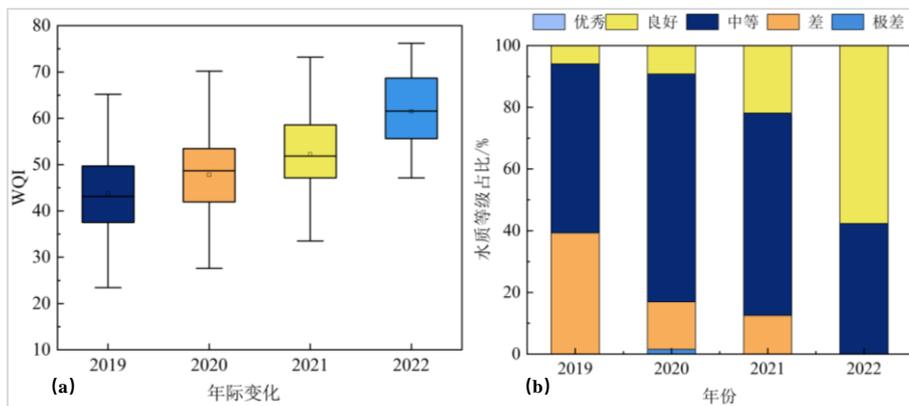


图 2 2019~2022 年干流各监测断面 WQI 值 (a) 及其各水质等级百分比的年份

变化 (b)

Fig 2 Interannual variation in WQI (a) and interannual in percentage of each water quality grade (b) at various monitoring sites from 2019 to 2022

依据小清河流域水文特征及监测断面实测资料,将6~9月作为丰水期,11月~次年4月作为枯水期,5、10月作为平水期,2019~2022年小清河干流各监测断面WQI值及其各水质等级百分比的季节变化如图3(a)所示。由图可知,丰水期、平水期和枯水期的平均WQI值分别为44.07、49.51和51.59,中位数分别为43.33、49.83和53.72,各个时期小清河干流水质均为“中等”,水质占比主要以“中等”和“良好”为主(图3(b)),从年内变化上看,丰水期小清河干流水质最差,这主要是因为丰水期充沛的降水,导致雨水冲刷携带大量面源污染物进入河道,雨污合流以及沿河截污管存在雨季溢流,加重了水体污染。

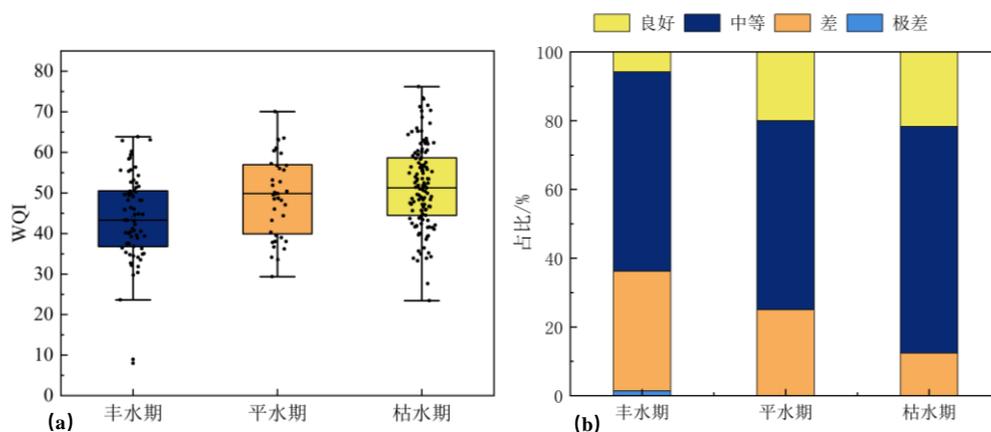


图 3 2019~2022 年干流各监测断面 WQI 值及其各水质等级百分比季节变化

Fig. 3 Seasonal variation in WQI and seasonal variation in percentage of each water quality grade at various monitoring sites from 2019 to 2022

2.2 小清河干流水质 WQI 值空间变化特征

从河流水质空间差异性来看(图4),各断面年均WQI值大小为:羊角沟(56.04)>岔河(55.37)>石村(55.25)>柴庄闸(55.09)>博昌桥(49.33)>侯辛庄(47.69)>黄台桥(47.41)>魏桥(44.40),总体上WQI均值大小表现为:中游<上游<下游。从水质指数的空间分布来看,干流各断面水质状况均为“中等”,WQI最大值出现在中游的魏桥,侯辛庄和黄台桥断面易净化指标(CI1)指数值是干流中最低的,魏桥和博昌桥的其他指标(CI2)指数值是干流中最低的,在制定水污染防治规划时应对其重点关注。

小清河干流水质WQI值的空间变化趋势为下游最高,上游次之,中游最低,污染比较严重的区域主要分布在小清河干流中上游,一般情况下,河流污染物的累积效应越往下游越严重(毛德华等,2024;毕业亮等,2022),而小清河干流的水质指数在下游区域却是最高,这可能与小清河干流沿岸人类活动和土地利用类型特点相关,上游建设用地占比大且人口密度高,受沿岸化工企业的分布影响污染源众多,上游济南城区承纳10余个污水处理厂(如光大水务、大金污水处理厂等)的外排水,干流上游受沿途污水处理厂外排水影响明显,济南郊区以耕地为主,受农业面源污染影响;干流中游途径区域土地利用类型以耕地、建设用地为主,受农业面源污染、生活和工业污水排放影响,中游河段支流较多且来水水

质差、污染物衰减距离短（焦贞，2022），污染物容易滞留和堆积在干流河（王雪松等，2021）；与中上游相比，下游水域面积占比较大，影响因素减少。

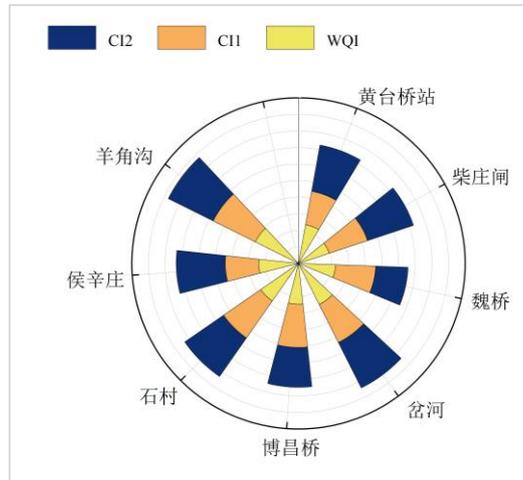


图 4 两类分类指数空间分布玫瑰图

Fig 4 Rose chart of spatial distribution of two groups of classification indexes

2.3 小清河干流水质影响因素分析

土地利用类型是河流水质的重要驱动因子，分析土地利用类型与水环境之间的响应关系，可进一步解释干流水质空间差异性的原因。土地利用类型按照一级分类分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地 6 类（图 1），耕地和林地是小清河流域的主要土地利用类型，从空间分布来看，耕地占地面积最大，占流域面积的 60% 以上，林地、草地次之（顾佳韬，2023）。受尺度效应的影响，不同空间尺度和数据的精度型差异会使得水质和土地利用之间存在不同的响应关系。有研究表明，500 m~10 km 缓冲区内不同尺度的土地利用方式对水环境有显著影响（毛德华等，2024; Yang *et al.*, 2021; Xiang *et al.*, 2021）。小清河流域土地利用类型对水质的影响在 1 km 缓冲区范围内效果较好（顾佳韬，2023），因此，本研究选择以干流监测断面为中心建立 1 km 圆形缓冲区，得到该尺度下各断面处土地利用类型占比如图 5 所示。将该尺度下土地利用面积与水质参数进行 Pearson 相关分析，结果如表 2 所示，不同污染物与土地利用类型面积呈现出一定的相关关系，结果表明在 1 km 尺度下土地利用类型对小清河流域干流水质的解释度较好，能够解释流域干流水质空间变化。根据相关性可知，TP、NH₄-N 与建设用地、耕地面积呈正相关关系，与水域、未利用土地面积呈负相关；COD_{Cr}、F 与建设用地呈正相关，与草地、耕地呈负相关关系；TN、NO₃-N 与耕地、建设用地呈正相关关系，这与周波等（2024）的研究结果基本一致。小清河干流 1 km 缓冲尺度下土地利用类型结构与水质的响应结果表明，建设用地与耕地占比大能够加剧干流污染，这是因为建设用地主要为居民、城乡用地，其下垫面由混凝土覆盖，与其他土地利用类型（如林地、草地）相比，降水无法从地表渗漏，在短时间内更易形成地面径流，携带更多污染物进入河流；耕地与各水质指标之间的相关性，则可能是由于作物生产过程中施用的肥料淋失导致的水质成分尤其是氮、磷的变化；此外，研究也表明，干流水体中 TP 与 NH₄-N，COD_{Cr} 与 F，TN 与 NO₃-N 均有相似的污染物来源。综上可知，土地利用类型是影响小清河干流水体污染的主要因素之一。

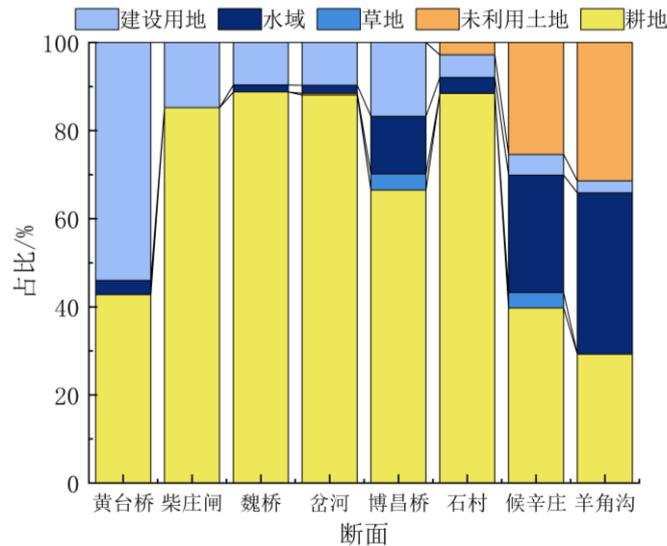


图 5 各断面处不同土地利用类型面积占比

Fig 5 Proportion of land use type area at various monitoring sites

表 2 水质指标与土地利用类型的相关性

Table 2 Relationship between landscape pattern and water quality

土地利用类型	TP	COD _{Cr}	DO	NH ₄ -N	F ⁻	TN	NO ₃ -N	CI1	CI2	WQI
耕地	0.351	-0.354	0.346	0.014	-0.203	0.809*	0.472	-0.265	0.346	0.248
林地	-0.389	-0.096	0.053	-0.171	-0.216	0.414	-0.066	-0.163	-0.343	-0.367
草地	0.167	-0.654*	-0.438	-0.270	-0.500	0.026	-0.106	0.282	0.124	0.097
水域	-0.374	0.188	-0.304	-0.563	-0.267	-0.443	-0.717*	-0.143	-0.014	-0.448
建设用地	0.313	0.217	0.113	0.891*	0.737*	0.464	0.312	0.537	0.010	0.303
未利用土地	-0.528	0.295	-0.437	-0.537	-0.199	-0.516	-0.512	-0.056	-0.394	-0.402

1) *表示在 0.05 水平上显著相关

2.4 基于 APCS-MLR 模型的主要污染物来源解析

2.4.1 流域主要污染物来源解析

选取小清河干流主要水质指标,包括 DO、TN、TP、NH₄-N、NO₃-N、COD_{Cr}、F⁻,其中,TN和NO₃-N虽在前文没有参与评价,但考虑到两种水质指标在小清河流域中浓度较大且不容忽略,因此同样进行污染物溯源解析。采用最大方差标准化对原始数据进行标准转换,采用 KMO 和 Bartlett 球形检验对变量间的相关程度进行检验,通过 Bartlett 球形度检验结果 (0<0.05) 与 KMO 度量值检验结果 (0.574>0.5) 发现,各个变量之间有较强的相关性,适合开展主成分分析和因子分析。基于 SPSS 软件开展 PCA 分析,根据 Kaiser 特征值大于 1.0 的标准,共提取 3 个主成分,累积方差贡献率为 68% (表 3),可以表示研究对象的大部分信息。运用正交变换对初始因子载荷矩阵进行旋转,使各因子载荷尽量趋近于 0 或 1 两极,得到旋转后的因子载荷分布,如图 6 所示,其中因子载荷>0.75、0.75~0.50 和 0.50~0.30 分别对应强载荷、中等载荷和弱载荷。将提取到的 3 个主成分的标准化因子进行正交旋转,计算旋转因子荷载,根据因子荷载大小识别潜在污染源。第一主成分 (F1) 的贡献率为 25.81%,其中 F⁻和 COD_{Cr} 为强荷载。第二主成分 (F2)、第三主成分 (F3) 的贡献分别为 24.92%和 17.60%,NO₃-N、

TN 在 F2 上为强荷载，TP 在 F3 上为强荷载。

表 3 研究区主成分总方差解释

Table 3 Interpretation of total variance of principal components in the study area

成分	初始特征值			初始提取载荷平方和			旋转后载荷平方和		
	合计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	合计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	合计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
F1	2.36	29.44	29.44	2.36	29.44	29.44	2.07	25.81	25.81
F2	1.83	22.88	52.32	1.83	22.88	52.32	1.99	24.92	50.74
F3	1.28	16.01	68.33	1.28	16.01	68.33	1.41	17.60	68.33

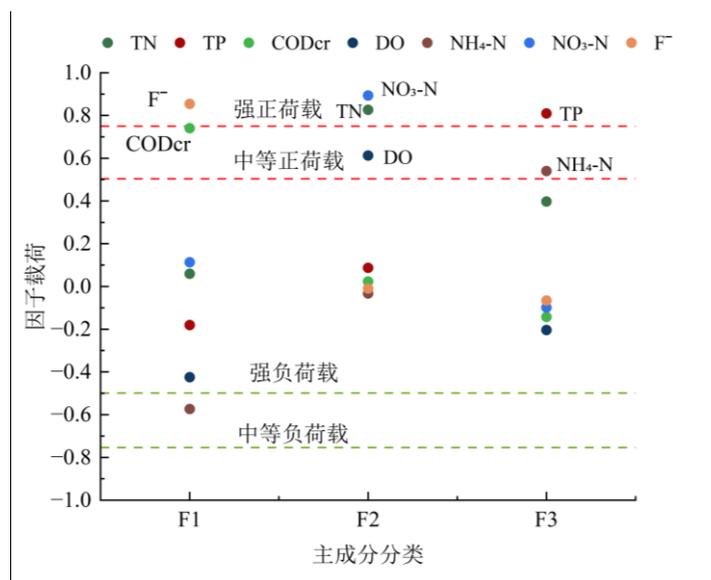


图 6 旋转因子载荷矩阵

Fig.6 Rotation factor loading matrix

F1 对 F⁻和 COD_{Cr}有较强的正荷载，分别为 0.85 和 0.74，对 NH₄-N 和 DO 有弱负荷载，分别为-0.574 和-0.425。孙琳婷等（2020）的研究指出小清河流域沿岸氟工业园区的点源排放是导致流域水体氟化物污染的重要原因之一，氟工业园排放的含氟污染物同时包含无机氟化物和全氟多氟烷基化合物（Liu *et al.*, 2025），Liu *et al.*（2025）研究也指出氟工业园生产活动与小清河下游水体氟化物含量之间存在相关性。上述研究与本文数据结果基本一致，在各处监测断面中，中下游 F⁻浓度较其他上游断面高，可见下游工业废水排放是干流 F⁻的主要来源。对多数水体而言，COD_{Cr}的来源主要包括工业和生活源，因此，工业废水排放也是干流 COD_{Cr}的主要来源之一。这与前文分析得到的 COD_{Cr}、F⁻浓度与建设用地呈正相关的结果一致，综上，F1 以有机污染物为主，可以被识别为工业废水排放影响。

F2 对 NO₃-N 和 TN 具有较强的正荷载，分别为 0.89 和 0.83，说明 F2 反映的是氮污染。小清河干流水体中 NO₃-N 含量占 TN 含量的 70%以上，说明 NO₃-N 是干流水体中氮素的主要存在形式，水体中 NO₃-N 一般来自于氮肥过量使用、生活污水排放和土壤氮素等（马恩朴等，2021），其中，作物生产过程中过量配施氮肥是我国诸多河流氮磷污染的主要来源（Li *et al.*, 2023），据统计，小清河流域的年均氮肥施用密度为 135 kg·ha⁻¹，其中干流流经的章丘区和寿光市的氮肥施用密度为 250~330 kg·ha⁻¹，该值明显高于发达国家对化肥施用的安全上限临界值

225 kg·ha⁻¹ (王琼, 2015)。分析发现, 小清河干流 1 km 缓冲区内各监测断面的耕地面积占比与相应断面处的 NO₃-N 浓度成正相关关系 (相关系数为 0.472), 这与王琼等研究发现的小清河流域 NO₃-N 浓度与耕地面积比例呈显著正相关的结果基本一致, 该研究还指出氮污染物排放总量中非点源污染所占比重较大, 贡献最大的是氮肥施用源 (王琼, 2015)。综合考虑小清河干流沿岸主要以耕地为主, 且小清河干流 NO₃-N 浓度最大值出现在平水期和枯水期 (也是农作物施肥关键期) 的情况, 表明农业面源污染是小清河干流 NO₃-N 的主要来源, 具体而言, 农作物生产过程中施用的化肥与农药, 在灌溉或降雨后形成的地表径流携带下汇入河道, 从而导致其水体中 NO₃-N 浓度升高。因此, F2 可认为是农业种植活动的影响。

F3 对 TP 有较强的正载荷 (0.81), 对 NH₄-N 有中等正载荷 (0.54), 对 TN 有弱正载荷, 为 0.40。结合干流土地利用类型特点, 干流沿岸的农业活动、生活污水、畜禽养殖和工业活动均能导致大量氮、磷随降雨、径流进入水体 (Jia *et al.*, 2023), 王好芳等 (2024) 研究发现生活污水、工业废水和农田退水等是小清河流域邹平段水体中 NH₄-N 的主要来源, 王琼等 (2015) 研究发现生活污水、畜禽养殖废水和化工废水排放是流域内 TP 和 NH₄-N 的主要来源, 综上, F3 可以被认为受生活污水排放和畜禽养殖的共同影响。

2.4.2 不同污染源污染贡献率计算结果

基于 PCA 分析识别来源, 采用 APCS-MLR 模型确定各来源具体贡献, 源解析结果如图 7 所示。结果表明, 小清河干流沿岸工业废水排放是流域干流 F⁻、COD_{Cr} 和 NH₄-N 的主要来源, 工业废水排放源对各指标的贡献率分别为 82.9%、67.3%和 39.5%; 农业种植活动是 NO₃-N 和 TN 的主要来源, 贡献率分别为 68.4%和 64.3%; 生活污水和畜禽养殖是 TP 的主要来源, 贡献率为 55.8%; 除上述来源外, 各水质参数未识别源的贡献率为 7.6%~43.2%, 平均为 21.2%, 对 NH₄-N 和 DO 的贡献最大, 可能是多种因素综合作用的结果。小清河干流污染源贡献率的定量解析结果, 为流域实施分区分级、精准溯源的科学治污策略提供了直接与关键的科学依据。

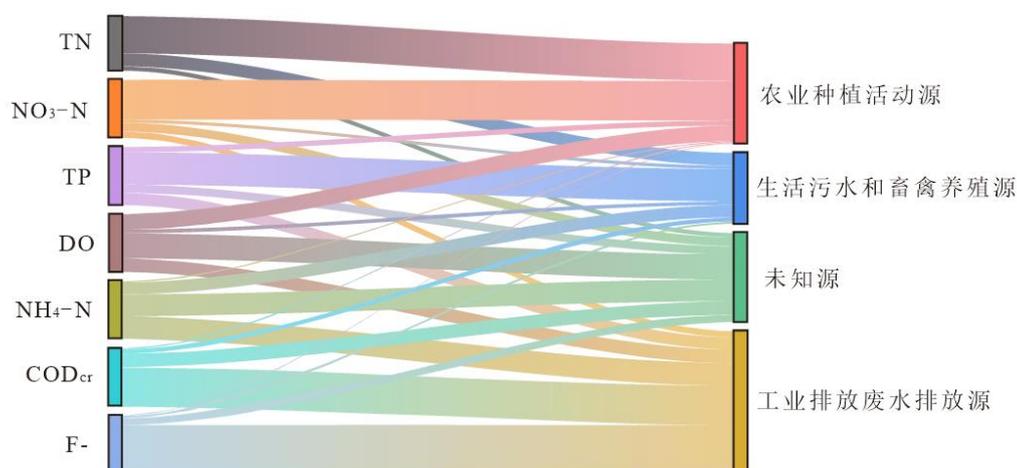


图 7 公因子对各指标的贡献率

Fig. 7 Common factor contribution rate of each index

2.4.3 流域污染源沿程分布特征

采用 KMO 和 Bartlett 球形检验对变量间的相关程度进行检验, 结果发现上述 8 处断面中柴庄闸断面的数据未通过检验, 因此只得到 7 处断面的污染源分析结果。根据 Kaiser 特征值大于 1.0 的标准, 各监测点处分别提取 4 个(黄台桥)、2 个(魏桥)、3 个(岔河)、3 个(博昌桥)、3 个(石村)、3 个(候辛庄)和 3 个主成分(羊角沟), 计算得到的累积方差贡献率分别为 77%、60%、74%、86%、66%、74%和 74%。识别确定黄台桥断面的主要污染源为工业废水排放、农业种植活动以及生活污水排放, 这与土地利用分析中黄台桥断面土地利用类型主要为工矿、城乡、居民用地以及耕地的结果基本一致。魏桥断面的主要污染源为农业种植活动、工业废水排放和生活污水, 岔河断面的主要污染源为农业种植活动、生活污水和工业废水排放, 博昌桥断面的主要污染源为农业种植活动和工业废水排放, 石村断面的主要污染源为农业种植活动和工业废水排放, 候辛庄断面的主要污染源为工业废水排放和农业种植活动, 羊角沟断面的主要污染源为农业活动、生活污水和畜禽养殖以及工业废水排放。其中魏桥、岔河、博昌桥、石村各断面处的主要污染源为农业种植活动和工业废水排放, 这与研究区 1 km 缓冲区内耕地面积占比 60%以上的结果相符, 农业面源污染导致干流水体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TN 浓度累积。候辛庄、羊角沟位于小清河流域下游入海口附近, 除农业种植活动外, 工业废水排放也是影响流域污染物的重要原因之一。研究表明小清河干流各监测断面的主要污染源基本一致, 但污染源主导类型有差异, 这与土地利用类型密切相关。本研究旨在为小清河流域的分段精准管控与生态治理提供核心技术支撑, 从而有效提升治理措施的针对性与实效性, 推动全流域的生态恢复与可持续发展。

3 结论

(1) 2019~2022 年小清河干流水质呈逐年改善趋势, 干流水质年均 WQI 值逐年增加, 小清河干流水质等级从“中等”转变为“良好”, 表明小清河防洪综合治理工程效果明显; 水质等级无明显季节性差异, 仅丰水期 WQI 值较其他时期略低。小清河干流水质 WQI 值总体上表现为中游<上游<下游, 下游水质最好, 水质较差的区域主要分布在中上游, 尤其是干流沿岸建设用地和耕地面积占比较大的区域。相关性分析发现建设用地和耕地面积的扩大对干流水质恶化表现出显著的驱动作用, 土地利用类型是影响小清河干流水体污染的关键因素之一。

(2) 小清河干流污染物来源较为复杂, 主要来源为工业废水排放源(25.81%)、农业种植活动源(24.92%)、生活污水排放和畜禽养殖源(17.60%); 从 TN 来看, 农业种植活动是主要污染源, 贡献率达 64.3%, 从 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 F 来看, 工业废水排放为主要污染源, 贡献率分别为 82.9%、67.3%和 39.5%。

(3) 小清河干流各监测断面污染物的主要污染源基本一致, 但污染源主导类型有差异, 这与沿岸土地利用类型及人类活动密切相关。结果表明小清河干流水体仍存在潜在污染风险, 应优先控制污染源为流域沿岸工业废水排放和农田径流氮素淋失。

4 参考文献

Cao, Y.X., Xin, M., Wang, B.D., et al., 2020. Spatiotemporal Distribution, Source, and ecological

- Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Urbanized Semi-enclosed Jiaozhou Bay, China. *Science of the Total Environment*, 717. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137224>.
- Cheng, G., Wang, M., Chen, Y., et al., 2020. Source Apportionment of Water Pollutants in the Upstream of Yangtze River Using APCS-MLR. *Environmental Geochemistry and Health*, 42:3795-3810. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00641-z>.
- Hou, W., Sun, S.H., Wang, M.Q., 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://10.1016/j.ecolind.2015.09.030>.
- Iloba, K.I., Akawo, N.O., Godwin, P.I., 2021. Assessment of Anwai River Water Quality Using the Weighted Arithmetic Water Quality Index (WQI) in Delta State, Nigeria. *Journal of Applied and Natural Science*, 13(3):913-922. <https://doi.org/10.31018/jans.v13i3.2758>.
- Jia, Q.Z., Xiang, H.C., Chun, Z.M., et al., 2023. What Drives the Change of Nitrogen and Phosphorus Loads in the Yellow River Basin During 2006-2017? *Journal of Environmental Sciences*, 126:17-28. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.04.039>.
- Liu, Y.J., Lei, H.J., Lu, Y.L., 2025. Multiple Impacts of Human Activities on Environmental Fate of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in the Xiaoqing River of China. *Environmental Pollution*, 382:126738. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126738>.
- Meng, L., Zuo, R., Wang, J., et al., 2018. Apportionment and Evolution of Pollution Sources in a Typical Riverside Groundwater Resource Area using PCA-APCS-MLR Model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 218:70-83. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.10.005>.
- Nong, X.Z., Shao, D.G., Zhong, H., et al., 2020. Evaluation of Water Quality in the South-To-North Water Diversion Project of China Using the Water Quality Index (WQI) Method. *Water Research*, 178:115781. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115781>.
- Nong, X.Z., Shao, D.G., Xiao, Y., et al., 2019. Spatio-temporal Characterization Analysis and Water Quality Assessment of the South to-North Water Diversion Project of China. *International Journal of Environmental Research and public health*, 16(12):2227. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122227>.
- Pesce, S.F., Wunderlin, D.A., 2000. Use of Water Quality Indices to Verify the Impact of Cordoba City (Argentina) on Suquia River. *Water Research*, 34 (11):2915-2926. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00036-1).
- Li, X.F., Xu, W.Z., Song, S., et al., 2023. Sources and Spatiotemporal Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Loads in the Haihe River Basin, China. *Marine Pollution Bulletin*, 189:114756-114756. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114756>.
- Xiang, R., Wang, L.J., Li, H., et al., 2021. Temporal and Spatial Variation in Water Quality in the Three Gorges Reservoir from 1998 to 2018. *Science of the Total Environment*, 768:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144866>.
- Yang, J., Huang, X., 2021. The 30 m Annual Land Cover Dataset and its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 13(8):3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>.
- Zhu, M., Cheng, R., Dong, P., et al., 2025. Exploring the Groundwater Quality Index and Its Pollution Sources in Southwest Karst Regions Using Machine Learning Models. *Journal of*

- Earth Science*,1-27. <https://link.cnki.net/urlid/42.1788.p.20250813.1343.002>.
- 毕业亮,王华彩,夏兵,等. 2022.雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价:以深圳龙岗河为例.*环境科学*,43(2):782-794.
- Bi, Y.L., Wang, H.C., Xia, B., et al., 2022. Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen. *Environmental Science*, 43(2): 782-794. (in Chinese with English abstract)
- 丁启振,周殷竹,周金龙,等. 2024.新疆东部平原区地下水无机污染物空间分布、源解析及健康风险评价.*地球科学*, 49(11):4008-4021.
- Ding, Q.Z., Zhou, Y.Z., Zhou, J.L., et al., 2024. Spatial Distribution, Source Apportionment and Health Risk Assessment of Inorganic Pollutant in Groundwater in Eastern Plain of Xinjiang. *Journal of Earth Science*, 49(11):4008-4021. (in Chinese with English abstract)
- 杜展鹏,王明净,严长安,等. 2020.基于绝对主成分-多元线性回归的滇池污染源解析.*环境科学学报*, 40(3):1130-1137.
- Du, Z.P., Wang, M.J., Yan, C.A., et al., 2020. Pollution Source Apportionment of Lake Dianchi Based on Absolute Principal Component Score Multiple Linear Regression. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40(3):1130-1137. (in Chinese with English abstract)
- 代雪静,姜腾龙,刘杨,等. 2022.近二十年小清河济南段污染状况及其趋势分析.*干旱区资源与环境*, 36(01):143-150.
- Dai, X.J., Jiang, T.L., Liu, Y., et al., 2022. Pollution Status and Trend Analysis of Xiaoqing River in Jinan Section in Recent 20 Years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 36(01):143-150. (in Chinese with English abstract)
- 范新风,韩美,王磊,等. 2020.小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析.*环境科学*,41(04):1619-1628.
- Fan, X.F., Han, M., Wang, L., et al., 2020. Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years. *Environmental Science*, 41(04):1619-1628. (in Chinese with English abstract)
- 顾佳韬.2023.基于小清河流域的“幸福河”综合评价及驱动因子研究.济南大学.
- Gu, J.T., 2023. Study on Comprehensive Evaluation and Driving Factors of “Happy River” Based on Xiaoqing River Basin. University of Jinan. (in Chinese with English abstract)
- 胡莹莹,王义成,周毓彦,等. 2022.基于综合水质指数的白洋淀流域水质评价.*水利水电技术*,53(3):145-154. (in Chinese with English abstract)
- Hu, Y.Y., Wang, Y.C., Zhou, Y.Y., et al., 2022. Water quality assessment of Baiyangdian watershed based on a comprehensive water quality index. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 53(3):145-154. (in Chinese with English abstract)
- 焦贞.2022.多源汇流条件下小清河典型河段地下水环境生态效应综合评价.济南大学.
- Jiao, Z., 2022. Comprehensive Evaluation of Groundwater Environmental Ecological Effect in Typical Reach of Xiaoqing River under Multi-source Confluence. *University of Jinan*. (in Chinese with English abstract)
- 马恩朴,蔡建明,林静,等. 2021.近 30 年中国农业源氮磷排放的格局特征与水环境影响.*自然资源学报*, 36(03):752-770.
- Ma, E.P., Cai, J.M., Lin, J., et al., 2021. Spatial Pattern and Water Environmental Impact of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Sources in China in Recent 30 Years. *Journal of*

- Natural Resources*, 36(03):752-770. (in Chinese with English abstract)
- 毛德华,周滢,周懿林.2024.1990~2016 年湘江流域水质时空变化及驱动因素分析.环境科学,45(7):3953-3964.
- Mao, D.H., Zhou, Y., Zhou Y.L., 2024. Analysis of Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Water Quality in the Xiangjiang River Basin from 1990 to 2016. *Environmental Science*, 45(7):3953-3964. (in Chinese with English abstract)
- 孙琳婷,赵祯,唐建辉.2020.典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征.环境科学, 41(09):4069-4075.
- Sun, L.T., Zhao, Z., Tang, J.H., 2020. Distribution Characteristics of Per-/polyflouralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks. *Environmental Science*, 41(09):4069-4075. (in Chinese with English abstract)
- 王好芳,代晨洋,张祎珂,等. 2024.基于水质目标的小清河流域邹平段污染物综合治理效果评价.农业工程学报, 40(21):212-220.
- Wang, H.F., Dai, C.Y., Zhang, Y.K., et al., 2024. Evaluation of the Comprehensive Pollution Control Effectiveness in the Zouping Section of the Xiaoqing River Basin Based on Water Quality Targets. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 40(21): 212-220. (in Chinese with English abstract)
- 王琼.2015.基于 SWAT 模型的小清河流域氮磷污染负荷核算及总量控制.中国科学院烟台海岸带研究所.
- Wang, X., 2015. Calculation of the Discharge Amounts and Total Pollution Amount Control of Nitrogen and Phosphorus in Xiaoqinghe Watershed. *Yantai Institute of Coastal Zone Research Chinese Academy of Sciences*. (in Chinese with English abstract)
- 王雪松,李琪,高俊峰,等. 2021.常州市河流水质对滨岸带土地利用响应的初步分析.长江流域资源与环境, 30(12):2915-2924.
- Wang, X.S., Li, Q., Gao, J.F., et al., 2021. A Preliminary Analysis on Response of River Water Quality to Land Use in Riparian Zone of Changzhou. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 30(12):2915-2924. (in Chinese with English abstract)
- 王一诺,关纬城,邹立,等. 2023.环莱州湾主要河口氮磷组成特征及其输送贡献.海洋环境科学,42(5): 684-692.
- Wang, Y.N., Guan, W.C., Zou, L., et al., 2023. Composition and Transport of Nitrogen and Phosphorus in the Main Estuaries around Laizhou Bay. *Marine Environmental Science*, 42(5): 684-692.
- 夏诗语,吕文,杨金艳,等,2025.苏州市河流水质时空分布特征及影响因素分析.环境科学,46(7):4241-4250.
- Xia, S.Y., Lv, W., Yang, J.Y., et al., 2025. Analysis of the Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of River Water Quality in Suzhou City. *Environmental Science*, 46(7):4241-4250. (in Chinese with English abstract)
- 周波,李晓光,童思陈,等.2024.辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应.环境科学, 45(4):2373-2384.
- Zhou, B., Li, X.G., Tong, S.C., et al., 2024. Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall. *Environmental Sciences*, 45(4):2373-2384. (in Chinese with English abstract)