

张贺玉, 杨莉园, 卢少勇, 等. 基于主成分分析的城市河流水质时空分布特征研究: 以沧州市为例 [J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(4): 1273-1283.
ZHANG H Y, YANG L Y, LU S Y, et al. Research on spatio-temporal distribution characteristics of urban river water quality based on principal component analysis: a case study of Cangzhou City [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(4): 1273-1283.

基于主成分分析的城市河流水质时空分布特征研究

——以沧州市为例

张贺玉^{1,2,3}, 杨莉园^{1,2*}, 卢少勇^{1,2,3}, 王永强^{1,2}, 刘树栋⁴, 毕斌^{1,2}, 张静^{1,2,3*}

1. 湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 中国环境科学研究院
2. 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站, 中国环境科学研究院
3. 环境基准与风险评估国家重点实验室, 中国环境科学研究院
4. 沧州市生态环境保护科学研究院

摘要 客观、综合评价城市河流水质的污染状况对城市河流水污染精准防治具有重要意义。以2022年沧州市13条重要河流的pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、化学需氧量(COD_{Cr})、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、氟化物(F⁻)共7项水质指标数据为基础, 采用主成分分析法, 提取引起河流水质变化的主导指标, 诊断河流污染状况, 再运用水质指标权重计算各河流监测断面和不同季节综合得分, 分析河流水质时空分布特征。结果表明: 1) 2022年沧州市13条河流水质整体较好, 大部分河流水质为GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类, 少数河流COD_{Mn}、COD_{Cr}达到Ⅳ类水质标准; 2) 使用主成分分析法, 可将7个水质指标转化为2个主成分, 累计方差贡献率达78.492%, 其中与第一主成分显著相关的水质指标COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP和F⁻主导着研究区域水质变化, 且4个水质指标之间呈显著正相关; 3) 空间分析表明, 沧浪渠为13条监测河流中污染程度最高的河流, 且沧州市东北区域河流污染程度高于西北区域和中南区域; 4) 季节分析表明, 13条河流不同季节水质污染严重程度表现为夏季>春季>冬季>秋季。研究结果可为沧州市城市河流水污染控制策略的制定提供参考。

关键词 城市河流; 水质; 主成分分析; 污染因子; 时空分布

中图分类号: X522 文章编号: 1674-991X(2024)04-1273-11 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20230926

Research on spatio-temporal distribution characteristics of urban river water quality based on principal component analysis: a case study of Cangzhou City

ZHANG Heyu^{1,2,3}, YANG Liyuan^{1,2*}, LU Shaoyong^{1,2,3}, WANG Yongqiang^{1,2},
LIU Shudong⁴, BI Bin^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2,3*}

1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
2. State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongting, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences
4. Cangzhou Research Academy of Environmental Protection

Abstract Comprehensive and objective evaluation of the pollution status of urban river water quality is of great significance to the precise prevention and control of urban river water pollution. Based on the data of 7 water quality indicators of pH, dissolved oxygen (DO), permanganate index (COD_{Mn}), chemical oxygen demand (COD_{Cr}), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₃-N) and fluoride (F⁻) of 13 important rivers in Cangzhou City in 2022, the principal component analysis (PCA) method was employed to extract the leading indicators causing changes in river water quality and to diagnose the pollution status of the rivers. Subsequently, the weights of water quality indicators were used to calculate the comprehensive scores for each river monitoring section and different seasons and analyze

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201505); 国家自然科学基金项目(42207154)

作者简介: 张贺玉(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事湖泊水体富营养化修复研究, 2446485042@qq.com

* 通信作者: 1. 杨莉园(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事湖泊水环境污染与水文模拟研究, yang_liyuan@foxmail.com

2. 张静(1988—), 女, 助理研究员, 主要从事湖泊水污染控制技术研究, jingzhang.ecp@foxmail.com

the spatial and temporal distribution characteristics of river water quality. The results showed that : (1) The overall water quality of the 13 rivers in Cangzhou City was relatively good in 2022, with most water bodies meeting the Class III water standards of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), while a few rivers reached the Class IV water standards in terms of COD_{Mn} and COD_{Cr} indicators. (2) The application of the PCA method allowed the transformation of the 7 water quality indicators into 2 principal components, with a cumulative variance contribution rate of 78.492%. Among them, the water quality indicators, COD_{Mn} , COD_{Cr} , TP, and F^- , were significantly correlated with the first principal component and dominated the water quality changes in the study area. Moreover, these four indicators showed a significant positive correlation between each other. (3) The spatial analysis revealed that Canglang Channel was the most polluted among the 13 monitored rivers, and the river pollution in the northeast of Cangzhou City was worse than that in the northwestern and southern areas. (4) The seasonal analysis indicated that the seasonal variation for water pollution in urban rivers was in the following order: summer>spring>winter>autumn. The analysis results could provide reference for the control strategy of urban river water pollution in Cangzhou City.

Key words urban river; water quality; principal component analysis (PCA); pollution factor; spatio-temporal distribution

城市河流是城市生态环境和经济发展的主要载体,但随着城市化水平的提高,其受人为干扰的影响越来越大,河流水体受到不同程度的污染,其中人口增长、工业化、密集的农业活动和快速城市化是主要原因^[1-3]。为解决城市河流水体污染问题,缓解城市河流与城市快速发展之间的关系,推进可持续发展,需对河流污染进行治理,其中水体水质的评价和主要污染物时空分布特征的研究是河流污染治理的重要基础性工作^[4]。

城市不同区域的河流由于其所处环境不同,受到的自然因素(气温变化、降水和土壤侵蚀)和人为影响(工业污染、农业面源和生活污水)也不同,因此水环境质量和污染源也存在差异^[5-7]。城市水环境系统是多因子构成的复杂系统,每个因子都具有不同的权重,运用单因子评价法不能全面反映水质状况^[8],而综合污染指数法(WQI)人为将污染程度分为不同级别,可能影响与国家水质标准的比较^[9]。主成分分析(PCA)法是环境质量综合评价中一种简单高效的方法,旨在利用降维思想将多个变量转化为少数几个变量,且这些综合变量能够反映原变量提供的大部分信息^[10-12]。国内外学者运用 PCA 法对河流水质变化特征和污染因子识别进行了大量的研究。如 Liu 等^[13]综合运用聚类分析法(CA)、判别分析法(DA)、PCA 法和因子分析法(FA)对淮河支流双洎河流域水质时空变化进行分析,提取出水质变化的主导因子;邢洁等^[14]运用 PCA 法分析了松花江流域黑龙江段水质时空分布特征,得出主要污染指标为生化需氧量(BOD_5)、化学需氧量(COD)、总磷(TP)以及总氮(TN); Lu 等^[15]运用 PCA 法、系统聚类分析法(HCA)和 WQI 对长江干流水质进行综合评价,

得出长江干流中上游水质主要与高锰酸盐指数(COD_{Mn})相关,下游水质主要受浊度、温度、TP 浓度和溶解氧(DO)浓度的影响; Liu 等^[16]采用 PCA 法和 WQI 分析了牡丹江流域水质时空变化,表明 COD_{Mn} 和氨氮(NH_3-N)在所有季节均为该流域的主要污染物;国外学者运用多元分析法分析了印度 Doyang 河^[17]、泰国 Chao Phraya 河^[18]以及越南 Nhue 河^[19]的水质时空变化特征。

沧州市作为环渤海区域经济发达地区之一,近年来统筹水资源利用、水生态保护与水环境治理,水环境质量持续改善,但 2019 年和 2020 年仍分别存在 2 个地表水劣 V 类断面和 6 个地表水 V 类断面^[20-21],水环境质量有待进一步提升。较多学者针对沧州市入海河流水环境质量开展了系列工作。如宋玉等^[22]综合评价了 2016 年 5 月—2017 年 4 月南运河沧州段水质污染特征,得出污染指数最高的指标为 TN、COD 和 NH_3-N ;王淑荣^[23]对沧州境内宣惠河水质空间变异特征进行了分析,得出主要污染物为 NH_3-N 、COD 和挥发酚;孙玉娟等^[24]综合分析了 2011—2016 年沧州市 4 条入海河流(廖家洼河、南排河、石碑河和宣惠河)水质污染状况,得出超 III 类水质标准的主要污染物为 COD_{Mn} 、COD、 NH_3-N 和 TP。但是对沧州市内流河的关注相对较少,特别是将城市内流河和入海河流对比的研究更少,因此对沧州市河流水质状况进行综合评估具有必要性。笔者采用 PCA 法分析沧州市主要河流水质时空分布特征,识别主导河流水质变化的指标,判别水质时空差异性,并对形成时空差异的原因进行探讨,以期为进一步开展沧州市河流水环境保护与治理提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区域概况

沧州市地处河北省东南部(115°42'E~117°50'E, 37°29'N~38°57'N),东临渤海,设新华区、运河区2个区,辖4个市(渤海新区黄骅市、任丘市、泊头市、河间市)、10个县(沧县、青县、东光县、海兴县、盐山县、肃宁县、南皮县、吴桥县、献县和孟村回族自治县)以及沧州经济开发区和沧州高新技术产业开发区。沧州全境属暖温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,雨热同季,多年平均气温为12.3℃,多年平均蒸发量为1 840~2 340 mm,多年平均降水量为536.1 mm,其中80%集中在6—9月^[25]。

沧州市境内水网贯通,交织成网,素有“九河下梢”之称,境内的河流主要分四大水系,即黑龙港及运东水系,漳卫河水系、子牙河水系和大清河水系。本次主要选择黑龙港及运东水系的8条河流以及漳卫新河、子牙河和子牙新河共13条城市河流进行研究(图1)。其中,宣惠河是沧州东南部地区的主要排沥河道,青静黄排水渠是南运河以东、子牙新河以北、马厂减河以南地区一条主要排沥渠道,新石碑河

是沧州东部区域重要季节性排水河道,南运河是承泄上游漳卫河洪水的骨干河道之一,廖家洼河承担着沧县、渤海新区黄骅市、南大港的排沥任务,沧浪渠是沧州市东部地区主要季节性排水渠道,八团排干渠属排沥河道,北排河主要排泄子牙新河以南地区的沥水,南排河主要承泄黑龙港河上游清凉江、江江河、老盐河等河道的沥水,大浪淀水库是河北省第一座平原水库,漳卫新河、子牙河均属沧州市的排沥河道,子牙新河属人工泄洪河道。所选的大部分河流承担着城市防洪排沥和工农业用水等任务,水环境影响较大,受关注度较高。

13条河流的监测断面分别为:宣惠河,大口河口(S1);青静黄排水渠,何老营(S2);新石碑河,李家堡桥(S3);南运河,南运河北街(S4);廖家洼河,四埝村桥(S5);漳卫新河,小泊头桥(S6);子牙河,小王庄(S7);子牙新河,阎辛庄(S8);沧浪渠,杨官庄(S9);八团排干渠,伊庄子闸(S10);北排河,永红桥(S11);南排河,朱庄闸(S12);大浪淀水库,大浪淀水库(S13)。上述断面均为2022年国控或省控监测断面。

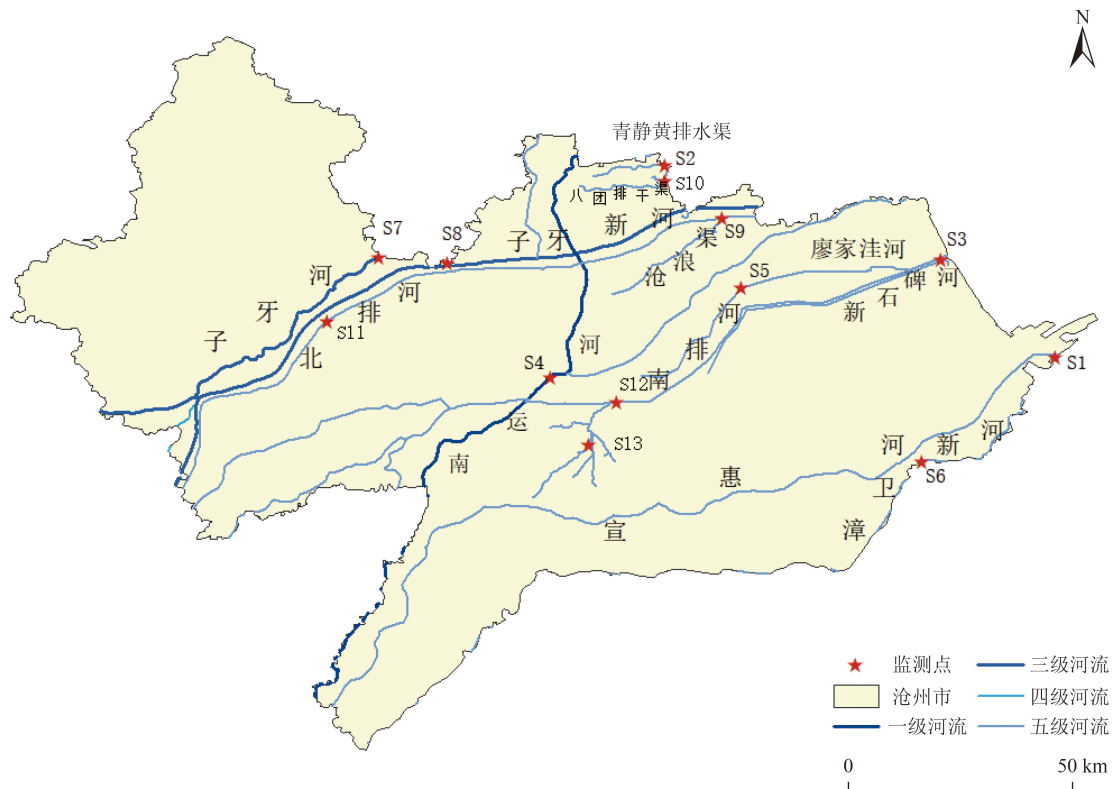


图1 沧州市13条河流水质监测断面

Fig.1 Water quality monitoring sections of 13 rivers in Cangzhou City

1.2 数据来源

研究数据由沧州市生态环境局提供,为2022年逐月监测数据。主要监测的水质指标包括pH、DO、

COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP、NH₃-N、氟化物(F⁻)共7项。其中pH和DO采用便携式水质分析仪进行原位监测,其他水质指标按照《水和废水监测分析方法》^[26]

测定。

1.3 研究方法

首先依据沧州市 2022 年 13 条河流断面的逐月水质监测数据,分析研究区域的水质现状;然后运用 PCA 法提取引起河流水质变化的主导指标,基于主成分计算水质综合得分,对各河流及其不同季节水质进行综合评价,同时利用主成分分析双标图对水质季节分布差异进行分析;最后对河流污染源进行分析。其中主成分分析的具体步骤如下^[27-29]。

(1)原始数据 Z-Score 标准化处理

假设进行主成分分析的样本有 n 个,共有 p 项评价指标,可得数据矩阵:

$$X = (x_{ij})_{n \times p} \quad (1)$$

式中 x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标值。

将 x_{ij} 转化成标准化指标 \tilde{x}_{ij} :

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (2)$$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (3)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \quad (4)$$

式中 \bar{x}_j 、 S_j 、 S_j^2 分别为第 j 个指标的样本均值、标准差、方差。

(2)计算指标数据的相关矩阵 R

$$R = (r_{uv})_{p \times p} \quad (5)$$

式中 r_{uv} 为第 u 个指标与第 v 个指标的相关系数,计算公式如下:

$$r_{uv} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n \left[\frac{(x_{ku} - \bar{x}_u)}{S_u} \right] \left[\frac{(x_{kv} - \bar{x}_v)}{S_v} \right] \quad (6)$$

$$r_{uv} = \frac{\sum_{k=1}^n \tilde{x}_{ku} \times \tilde{x}_{kv}}{n-1} \quad (7)$$

式中: x_{ku} 表示第 u 个指标的第 k 次采样数据; \bar{x}_u 表示第 u 个指标的第 k 次采样数据的平均值; S_u 表示第 u 个指标的样本标准差; x_{kv} 表示第 v 个指标的第 k 次采样数据; \bar{x}_v 表示第 v 个指标的第 k 次采样数据的平均值; S_v 表示第 v 个指标的样本标准差; \tilde{x}_{ku} 表示第 u 个指标的第 k 次采样标准化数据; \tilde{x}_{kv} 表示第 v 个指标的第 k 次采样标准化数据。

(3)计算相关矩阵 R 的特征值和特征向量,确定主成分

根据特征方程式 $|\lambda E - R| = 0$ 计算相关矩阵 R 的特征值,可求得 p 个特征值 $\lambda_q (q=1,2,\dots,p)$ 由大到小分别为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$, 根据特征方程式得到特征值对应的特征向量分别为 l_1, l_2, \dots, l_p , 其中 $l_q = (l_{1q},$

$l_{2q}, \dots, l_{nq})^T$ 。

将标准化后的指标变量转化为主成分:

$$F_q = l_{1q}\tilde{x}_1 + l_{2q}\tilde{x}_2 + \dots + l_{nq}\tilde{x}_n \quad (8)$$

式中 F_q 是原 p 项评价指标的第 q 主成分。

(4)对 $m(m \leq p)$ 个主成分进行综合评价

计算特征值 λ_q 的信息贡献率以及累计贡献率:

$$a_q = \frac{\lambda_q}{\sum_{q=1}^p \lambda_q} \quad (9)$$

$$E = \frac{\sum_{q=1}^m \lambda_q}{\sum_{q=1}^p \lambda_q} \quad (10)$$

式中: a_q 为第 q 个主成分的信息贡献率; E 为 m 个主成分的累计贡献率。

计算综合得分(F):

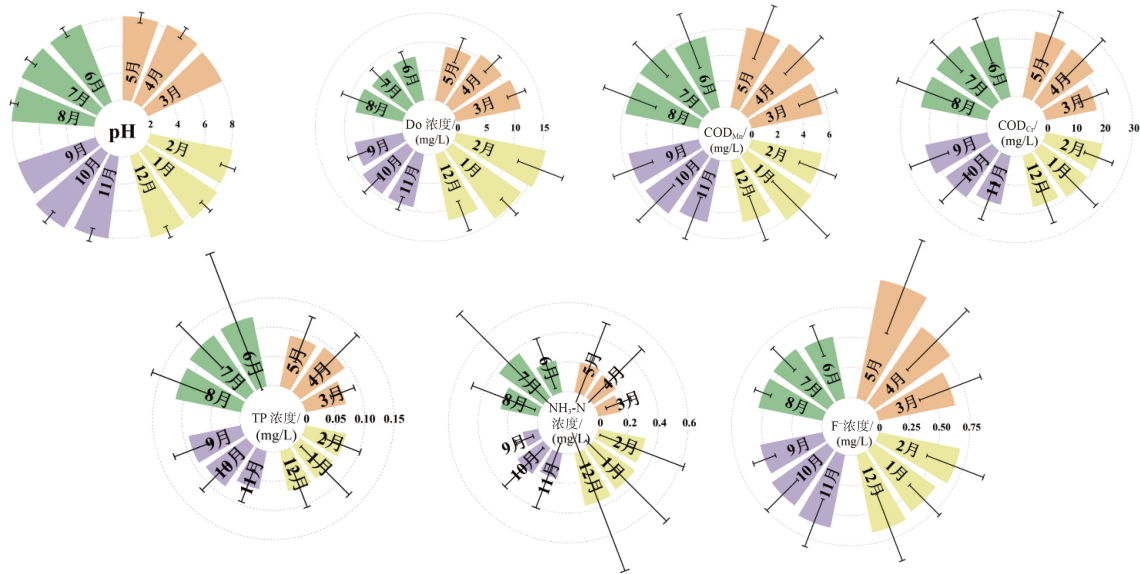
$$F = \sum_{q=1}^m a_q F_q \quad (11)$$

2 结果与讨论

2.1 沧州市 13 条河流水质总体情况

2022 年 13 条河流各监测断面水质指标月度分布见图 2, 取各月份监测断面水质指标的平均值进行分析。pH 在各月份均高于 8.00, 无明显时间变化; DO 浓度的最高值和最低值分别出现在 2 月和 7 月, 为 15.77 和 7.48 mg/L; COD_{Mn} 平均值在 1 月、4 月、5 月和 7 月(均大于 6 mg/L)高于其他月份, 在 4 月达到全年最高值(6.47 mg/L); COD_{Cr} 在 8—12 月有明显的降低, 11 月达到全年最低值(17.29 mg/L); NH₃-N 各月浓度均较低, 平均值为 0.24 mg/L; TP 浓度夏季的平均值和 F 浓度春季的平均值均高于其他季节, 分别为 0.12 和 0.81 mg/L。

2022 年 13 条河流各监测断面水质指标空间分布见图 3, 取各监测断面全年水质指标的平均值进行分析。各监测断面 pH 的平均值为 8.00~8.42; DO 浓度的平均值均大于 8.00 mg/L, 其中杨官庄监测断面 DO 浓度平均值最大, 达 13.03 mg/L; 各监测断面 COD_{Mn} 平均值均小于 10 mg/L, 其中小泊头桥、小王庄和大浪淀水库监测断面 COD_{Mn} 平均值均小于 5 mg/L, 低于其他河流监测断面; 各监测断面 COD_{Cr} 平均值均小于 30 mg/L, 其中四埝村桥监测断面 COD_{Cr} 平均值最大, 达 29.33 mg/L; 大口河口、何老营、李家堡桥和杨官庄这 4 个监测断面的 N、P 营养物质浓度高于其他河流监测断面, 其中 TP 浓度平均



注: 橙色代表春季; 绿色代表夏季; 紫色代表秋季; 黄色代表冬季。

图2 2022年13条河流各监测断面7个水质指标的月度分布

Fig.2 Monthly distribution of 7 water quality indicators in 13 river monitoring sections in 2022

值均超过 0.1 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度平均值均超过 0.2 mg/L, 何老营监测断面 TP 浓度月份间差异显著, 大口河口、李家堡桥和杨官庄监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度月份间差异显著。各监测断面 F^- 浓度平均值均小于 1 mg/L, 其中大口河口监测断面 F^- 浓度平均值最大, 达 0.84 mg/L。

综上所述, 沧州市 13 条河流整体水质较好, 大部分监测断面水质指标均处在 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ类或Ⅳ类, 无超出Ⅳ类标准的监测断面, 除 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 外, 13 个监测断面各指标全年基本符合Ⅲ类水质要求。

2.2 沧州市 13 条河流水质污染因子确定

2.2.1 数据分析

利用 SPSS 软件对 13 条河流各监测断面的原始水质数据进行 KMO 检验 (Kaiser-Meyer-Olkin) 和 Bartlett 球形检验, KMO 统计量为 0.622 (>0.600), 表明变量间的偏相关性强, 可进行因子分析。Bartlett 球形度检验的 P 为 0 (<0.001), 表明各变量存在较强的相关性, 适合做 PCA 分析。

2.2.2 主成分的确定

在 SPSS 软件中对水质标准化数据进行主成分分析, 结果见表 1 和表 2。按照特征值 $\lambda > 1$ 的原则 (特征值表示成分对指标变量影响力的大小, 若 $\lambda < 1$, 说明主成分的解释力度不够), 提取了引起水质变化的 2 个主成分, 累计方差贡献率为 78.492%, 即可用 2 个主成分替代 7 个水质指标, 其包含的信息量能够充分反映原始数据的绝大部分信息。

由表 2 可知, 2 个主成分中第一主成分 PC1 的方差贡献率更大, 达到 55.226%, 其中主要显著相关的水质指标为 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、TP 和 F^- 。 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 可以反映河流水体中有机物浓度, 进一步反映流域受工业、农业以及生活有机物污染程度^[30-31]; TP 是导致水体富营养化的重要元素之一, 主要通过生活污水、含磷工业废水的排放和部分农耕化肥随地表径流进入水体^[32]; 河流中的 F^- 主要来自于高氟地下水和通过电力、采矿、冶炼、化肥、玻璃、水泥陶瓷等行业生产工艺不同环节使用含氟物质产生的工业废水^[33]。 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、TP、 F^- 均相互正相关 (表 1), 表明人类活动造成的有机污染物 (COD_{Mn} 和 COD_{Cr})、高氟地下水和工业含氟污染物 (F^-) 以及水体富营养物 (TP) 变化主导区域河流水质的变化, COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 与 PC1 呈显著正相关, 因子载荷量分别为 0.969 和 0.918, 变化特征明显。第二主成分 PC2 的方差贡献率为 23.266%, 主要显著相关的水质指标为 DO, 因子载荷量为 0.737, 表明 DO 主导区域水质变化, DO 与 PC2 呈显著正相关, 而水温是影响 DO 浓度的主要因素 (水温越高, 水中饱和 DO 浓度越低), 表明研究区域的全年气温变化对河流水质有一定程度的影响。

为了更加清晰地反映研究区域各水质指标之间的相关性, 利用 Origin 软件对 2022 年 13 条河流水质数据进行主成分分析。如图 4 所示, 箭头较长 (水质指标箭头越长, 其因子载荷越大, 对排序的贡献率越高) 的水质指标有 DO、 COD_{Cr} 、 COD_{Mn} 、 F^- 、TP,

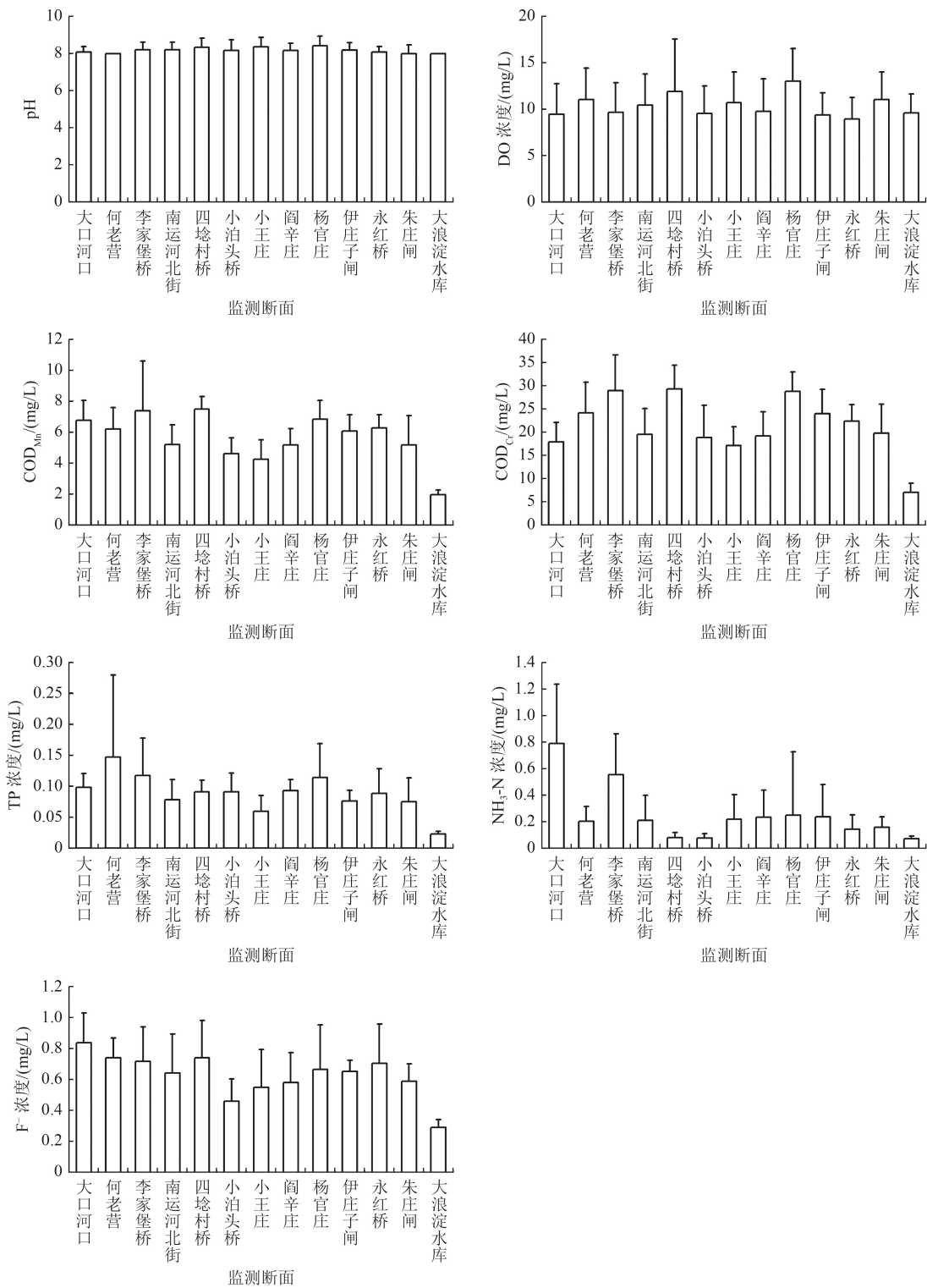


图 3 2022 年 13 条河流各监测断面 7 个水质指标的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of 7 water quality indicators in 13 river monitoring sections in 2022

第一主成分中 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 F^- 、 TP 的载荷系数分别为 0.493、0.467、0.453、0.424, 对排序的贡献大, 主导研究区域河流水质的变化, 且 COD_{Mn} 、 TP 、 F^- 之间夹角较小(指标之间夹角越小, 表明相关性越强), 相关性高。 F^- 、 TP 、 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 之间呈显著正相关($P < 0.01$), 表明河流水体中营养盐和氟化物浓

度显著影响有机污染物水平。 DO 仅与 pH 呈显著正相关, 这与游亮等^[34] 的研究结果一致, 一方面是水生植物光合作用生成 O_2 同时消耗水生生物呼吸作用产生的 CO_2 , 使水体 pH 升高; 另一方面是水体中的有机物在生物化学氧化作用下产生酸性物质, 导致 pH 降低^[35-36]。 pH 与 NH_3-N 呈显著负相关($P <$

表 1 相关系数矩阵

Table 1 Correlation coefficient matrix

水质指标	pH	DO	COD _{Mn}	COD _{Cr}	TP	NH ₃ -N	F ⁻
pH	1						
DO	0.535	1					
COD _{Mn}	0.354	0.294	1				
COD _{Cr}	0.506	0.473	0.908**	1			
TP	0.110	0.288	0.761*	0.741**	1		
NH ₃ -N	-0.018	-0.198	0.458	0.158	0.345	1	
F ⁻	0.143	0.180	0.915*	0.709**	0.719*	0.596	1

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

表 2 旋转之后的主成分载荷矩阵

Table 2 Principal component load matrix after rotation

指标	PC1	PC2
pH	0.438	0.669
DO	0.441	0.737
COD _{Mn}	0.969	-0.103
COD _{Cr}	0.918	0.226
TP	0.834	-0.149
NH ₃ -N	0.458	-0.666
F ⁻	0.890	-0.333
特征值	3.866	1.629
方差百分比/%	55.226	23.266
累计方差贡献率/%	55.226	78.492

注: 黑体数值为因子载荷大于 0.7 的值。

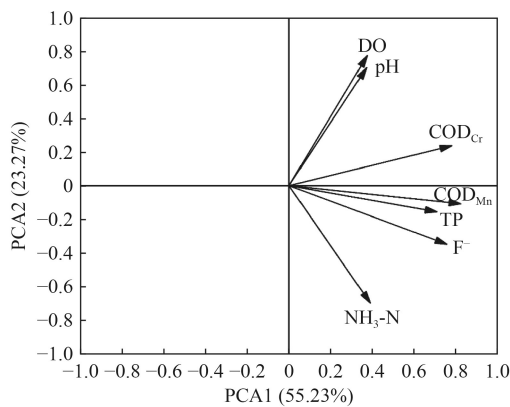


图 4 PCA 水质指标主成分载荷分析

Fig.4 PCA water quality index principal component load analysis diagram

0.05), 这是因为当水体中的 NH₃-N 浓度较高时, 其会与水分子结合生成氢离子和氨气, 氨气会逸出水体, 而氢离子会增加水体的酸度, 使 pH 降低; 相反, 当水体中的 NH₃-N 浓度较低时, pH 往往会偏高^[37]。F⁻与 TP、NH₃-N 呈显著正相关, NH₃-N 一般来自生

活污水和化肥厂废水等, 表明排入水体的工业废水和农田污水等使得河流中的氟化物和营养元素浓度同时升高。

2.3 沧州市 13 条河流水质空间分布特征

为探究 13 条河流各监测断面污染状况, 利用 PCA 法计算出各监测断面的综合得分^[38]。通过系数相关矩阵计算各监测断面 2 个主成分得分 F_1 、 F_2 , 再根据 PC1、PC2 对应的方差贡献率之和, 计算得出综合主成分得分 F , 结果见表 3。监测断面得分越高, 表明其水体污染越严重, 水质越差^[30,39]。

表 3 2022 年沧州市 13 条河流监测断面水质状况评价综合得分

Table 3 Comprehensive scores of water quality status of 13 river monitoring sections in Cangzhou City in 2022

监测断面	F_1	F_2	F	排序
杨官庄	2.414	1.784	1.748	1
四埝村桥	1.959	1.368	1.400	2
李家堡桥	2.149	-0.861	0.987	3
何老营	1.385	-0.429	0.665	4
大口河口	1.260	-2.108	0.205	5
伊庄子闸	0.071	-0.233	-0.015	6
永红桥	-0.025	-0.705	-0.178	7
南运河北街	-0.501	-0.105	-0.301	8
阎辛庄	-0.526	-0.129	-0.321	9
小王庄	-1.094	-0.948	-0.384	10
朱庄闸	-0.781	0.088	-0.411	11
小泊头桥	-1.376	0.277	-0.696	12
大浪淀水库	-4.935	0.105	-2.701	13

F_1 、 F_2 和 F 的表达式分别为:

$$F_1 = 0.493\tilde{x}_1 + 0.467\tilde{x}_2 + 0.453\tilde{x}_3 + 0.424\tilde{x}_4 + 0.224\tilde{x}_5 + 0.223\tilde{x}_6 + 0.233\tilde{x}_7 \quad (12)$$

$$F_2 = -0.063\tilde{x}_1 + 0.139\tilde{x}_2 - 0.204\tilde{x}_3 - 0.091\tilde{x}_4 + 0.452\tilde{x}_5 + 0.411\tilde{x}_6 - 0.409\tilde{x}_7 \quad (13)$$

$$F = 0.552F_1 + 0.233F_2 \quad (14)$$

式中 $\tilde{x}_1 \sim \tilde{x}_7$ 分别为 COD_{Mn}、COD_{Cr}、F⁻、TP、DO、pH 和 NH₃-N 标准化后的数据得分。

如表 3 所示, 2 个主成分得分在沧州市大部分监测断面间呈显著的空间变化, 大口河口、何老营、李家堡桥监测断面的 F_1 显著高于 F_2 ($P < 0.05$), 表明这 3 个监测断面河流水质受 COD_{Mn}、COD_{Cr}、TP 和 F⁻ 的影响较大; 小泊头桥、小王庄、朱庄闸和大浪淀水库监测断面的 F_2 显著高于 F_1 ($P < 0.05$), 表明这 4 个监测断面受 DO 的影响较大, 受有机污染物 (COD_{Mn} 和 COD_{Cr})、营养盐 (TP) 和氟化物 (F⁻) 的影

响较小;四埝村桥、杨官庄监测断面的 F_1 与 F_2 均较高,表明这 2 个监测断面的营养物质、有机污染物和 DO 浓度均较高,同时 2 个主成分之间差异较小,受 2 种类型污染物的影响较为均衡。

在监测的 13 条城市河流断面中,沧浪渠杨官庄断面水质最差,其次为廖家洼河四埝村桥断面。沧浪渠属于跨县域河流,是运东地区捷地减河以北的主要排水渠之一,作为沧州市的主要排污河道,沧浪渠处于全年有水过境的状态。李春光等^[40]研究发现 1993—2005 年沧浪渠水体 COD 平均值是 V 类水质标准值的 182%,沧浪渠水体有机物浓度较高;李桂然^[41]也得出了相同的结论,其分析沧浪渠水体 2001—2008 年水质数据发现,沧浪渠主要污染物为 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$,均处于劣 V 类水平,其中 COD 年平均值的超标倍数为 4.8。调查发现,沧州造纸厂曾是沧州市最大的造纸企业,也是沧浪渠的主要污染源之一。据报道^[42],在环保专项整治行动之前,该厂日均向沧浪渠排放未经处理的污水 4 000~5 000 t,使沧浪渠水体受到严重污染,且对临渠区域土壤、空气也造成了严重污染。经有效治理后,2022 年沧浪渠水体 COD_{Cr} 的年平均值为 29 mg/L,超过地表水 III 类标准值 45%,达到地表水 IV 类标准,满足《河北省水污染防治工作方案》2020 年水质目标要求(其中 $\text{COD} \leq 50$ mg/L,其他水质指标为 V 类)。而廖家洼是运东地区直接入海的排水干流之一,主要承担排污功能,沿线存在许多渔业养殖尾水、生活污水处理厂排污口,为雨污混流,污染物在汛期掺杂着降水直接入河,同时存在多个码头、渔港,船舶污染严重。

从空间整体上看,沧州市东北部区域河流水质污染最为严重。渤海新区黄骅市和沧县位于东北部区域,该区域有南大港大型产业园区和运东生活污水处理厂,存在多个养殖企业、造纸企业和石油化工企业排污口,港口和码头较多,航运船舶污染较为严重。根据 2018 年环境统计数据^[43],渤海新区黄骅市和沧县直排环境的工业废水量分别占直排环境工业废水总量的 44.78% 和 15.8%。同时该区域农村人口数占整个沧州市的 19%,承接的农村生活、农田径流污水量较多,受居民生活与工业点源和农田面源污染综合作用。西北区域河流水质污染次之,水体中营养盐和 F 浓度较高,主要受面源污染影响,原因在于该区域农村人口数占整个沧州市的 28%,农村生活污水和 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 排放量较大,且排放的污水未纳入管网收集而直接排入河流,造成河流水质较差。同时农村环境配套设施不够完善,农村生活污水和垃圾未能得到有效集中处理。地下水长

期超量开采是造成河流 F 浓度较高的主要原因。沧州市属严重资源型缺水地区,调查发现沧州市农村地区人畜用水量为 1.089 7 亿 m^3 ,其中深层水为 0.816 0 亿 m^3 ,占农村人畜用水量 75%,其余为浅层地下水^[44],因此农村居民生活用水主要是依靠深层地下水,而沧州市位于近代退海地沉积区,浅层水苦咸,深层地下水普遍含氟量高,农村居民饮水安全问题非常严峻。沧州市中南部区域河流水质受污染程度最轻,该区域存在大浪淀水库和杨埝水库 2 个城市饮用水水源地,其分别为国家大(II)型水库和大(III)型水库。其中大浪淀水库水源为“引黄济冀”的黄河水和南水北调中线工程的长江水,水库水质多年稳定达到或优于地表水 III 类标准。杨埝水库水源为长江水,与大浪淀水库形成水源互补,水质达到地表水 III 类标准。由于对中部河流水系的保护较严格,外来污染较少,其水质相对良好。

2.4 沧州市 13 条河流水质时间分布特征

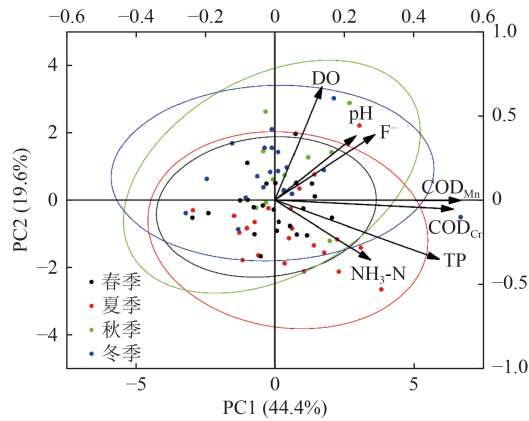
通过 PCA 法根据不同季节[春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)、冬季(12 月—次年 2 月)]计算出主成分综合得分,评价沧州市 13 条河流水质季节分布,13 条河流各监测断面不同季节水质指标的平均值见表 4。

表 4 13 条河流监测断面不同季节水质 PCA 评价综合得分
Table 4 Comprehensive scores of PCA evaluation of water quality of 13 river monitoring sections in different seasons

季节	F_1	F_2	F	排序
春季	1.583	-1.121	0.483	2
夏季	2.842	-1.219	0.863	1
秋季	-0.655	0.437	-0.205	4
冬季	-0.712	0.595	-0.199	3

为了区分河流不同季节主导的水质指标,对各河流监测断面按季节平均水质数据进行 PCA 分析,以观察不同季节水质指标的影响水平,结果见图 5。由表 4 和图 5 可得出,河流水质受污染水平在时间上的分布特征为夏季>春季>冬季>秋季,夏季的水质污染最为严重,且夏季与秋季河流水质差异较为明显;第一主成分中, COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 以及 TP 与季节的变化密切相关,第二主成分中, DO 与季节的变化密切相关;春夏季, COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 主导河流水质变化,秋冬季, DO 和 F 主导河流水质变化。

夏季降水集中且降水量大,加之沧州市 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 来源中面源污染分别占 46.59% 和 69.46%,雨水形成的地表径流将城市地面、乡村农田中的污



注:不同颜色椭圆代表数据点在主成分空间中不同季节的分布,椭圆的形状和大小反映数据点在2个主成分方向上的分散程度;圆圈内部数据点位于95%置信区间内,圆圈外部数据点无统计学意义。

图5 PCA水质指标主成分季节载荷分析

Fig.5 PCA water quality index principal component seasonal load analysis diagram

染物裹挟到河流中,使得河流污染物浓度升高。此外,地表径流携带的有机污染物会在表层浮游细菌的作用下降解耗氧,较高的气温使河流内微生物和底栖动物活动频繁,DO的消耗量大于浮游植物的光合作用及大气复氧,均促使夏季河流中的DO浓度偏低^[30,45]。同时春夏季农业活动高度密集,沧州市化肥施用强度为 346.07 kg/hm^2 ,高于中国生态县和生态乡镇建设的化肥施用强度要求(低于 250 kg/hm^2)^[46],且当地通常采用引水漫灌的灌溉方式,农田退水过程携带大量流失的N、P等营养物质进入河流,影响水质。秋冬季气温低、降水少,大部分河道处于枯水期,河道水体流动缓慢且低温造成的河流内水生生物大量休眠或死亡,使泥沙等冲刷物沉降,河流水体污染较轻,同时随着农业活动的减少,农田径流对水体的污染负荷降低。但由于沧州市秋冬季降水量和蒸发量显著低于春夏季(近40年沧州市春夏季平均降水量为 465.39 mm ,平均蒸发量为 303.4 mm ;秋冬季平均降水量为 101.2 mm ,平均蒸发量为 83.2 mm)^[47],区内蒸发浓缩作用十分强烈,从而使F在地下水中富集,农村地区地下水超量开采和使用导致河流中的F浓度较高^[48]。此外,陈靛等^[49]研究表明,1998—2016年白洋淀4个污染带断面雨季(6—9月)的 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP平均浓度均高于非雨季(11—3月);董立新等^[50]研究发现,2008—2009年海河、卫津河、外环河各断面5—8月水质较其他月份差, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP浓度平均值远超V类标准;王君等^[51]研究发现,沧州段大运河2020年春季和夏季 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP浓度和 COD_{Mn} 显著高于秋季,春夏季水体为富营养型,秋季水体为中营养型,

春夏季污染等级高于秋季。

3 结论

(1)沧州市13条河流2022年水质达到GB 3838—2002的II~IV类,整体水质状况较好。其中何老营、李家堡桥、四埝村桥、杨官庄、伊庄子闸和永红桥监测断面 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 超出III类标准,达到IV类标准,所有监测断面 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP和F均在III类标准内。

(2)运用PCA法通过降维的手段,将7个水质指标转化为2个主成分,累计方差贡献率达78.492%,其中第一主成分方差贡献率为55.226%,第二主成分方差贡献率为23.266%。主要显著相关的水质指标 COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、TP以及F主导沧州市13条河流水质的变化,河流水体F、TP、 COD_{Mn} 与 COD_{Cr} 之间呈显著正相关,即有机污染物(COD_{Mn} 和 COD_{Cr})、高氟地下水和工业含氟污染物(F)以及水体营养盐(TP)变化主导沧州市13条河流水质变化。

(3)空间上,沧州市河流水质污染表现为东北区域>西北区域>中南区域,杨官庄为污染最严重的监测断面,沧浪渠为沧州市13条河流中污染最为严重的河流。沧浪渠作为沧州市东部地区主要季节性排水渠道,污染来源包括有机物和营养盐成分污染,主要受工业点源污染影响。时间上,夏季沧州市河流水质污染最严重,秋季与夏季水质差异明显, COD_{Mn} 、 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP主导河流春夏季水质变化,DO和F主导河流秋冬季水质变化。

参考文献

- [1] LIU J R, DONG H W, TANG X L, et al. Genotoxicity of water from the Songhua River, China, in 1994-1995 and 2002-2003: potential risks for human health[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 357-364.
- [2] WANG Y, WANG P, BAI Y J, et al. Assessment of surface water quality via multivariate statistical techniques: a case study of the Songhua River Harbin Region, China[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2013, 7(1): 30-40.
- [3] ZHAI Y Z, XIA X L, YANG G, et al. Trend, seasonality and relationships of aquatic environmental quality indicators and implications: an experience from Songhua River, NE China[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 145: 105706.
- [4] 邓娟. 陕西省不同生态类型区河流水质时空变化及其评价[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [5] VALAPPIL N K M, VISWANATHAN P M, HAMZA V. Seasonal hydrochemical dynamics of surface water in the Limbang River, Northern Borneo: evaluating for spatial and temporal trends[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020,

- 13(19): 980.
- [6] BAI X L, SON Y. Perfluoroalkyl substances (PFAS) in surface water and sediments from two urban watersheds in Nevada, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141622.
- [7] TANG J F, LI X H, CAO C L, et al. Compositional variety of dissolved organic matter and its correlation with water quality in peri-urban and urban river watersheds[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 459-469.
- [8] 郭彤, 张永祥, 贾瑞涛. 多重水质评价方法在地下水水质评价中的对比研究: 以北京市朝阳区为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(6): 2020-2026.
- GUO T, ZHANG Y X, JIA R T. Comparative study of multiple water quality assessment methods in groundwater quality assessment: taking Chaoyang District of Beijing as an example[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(6): 2020-2026.
- [9] 张婷, 刘静玲, 王雪梅. 白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 261-267.
- ZHANG T, LIU J L, WANG X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 261-267.
- [10] 丁杰萍, 周静, 尚婷婷. 基于主成分分析的 Spearman 秩相关系数法在渭河干流甘肃段水质分析中的应用 [J]. *地下水*, 2022, 44(2): 82-85.
- DING J P, ZHOU J, SHANG T T. Analysis of water quality trend in the main stream of the Weihe River based on principal component analysis[J]. *Ground Water*, 2022, 44(2): 82-85.
- [11] 周炼, 安达, 王月, 等. 武烈河流域水质污染特征及污染源解析 [J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(6): 579-584.
- ZHOU L, AN D, WANG Y, et al. Water quality pollution characteristics and pollution source analysis of Wulie River Basin[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(6): 579-584.
- [12] JIANG Y Q, GUI H R, LI C, et al. Evaluation of the difference in water quality between urban and suburban rivers based on self-organizing map[J]. *Acta Geophysica*, 2021, 69(5): 1855-1864.
- [13] LIU J Z, ZHANG D, TANG Q J, et al. Water quality assessment and source identification of the Shuangji River (China) using multivariate statistical methods[J]. *PLoS One*, 2021, 16(1): e0245525.
- [14] 邢洁, 宋男哲, 陈祥伟, 等. 基于主成分分析的松花江流域黑龙江段水质评价 [J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 89-94.
- XING J, SONG N Z, CHEN X W, et al. Water quality assessment of Heilongjiang control section in Songhua River Basin based on principal component analysis[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 89-94.
- [15] LU J, GU J R, HAN J Y, et al. Evaluation of spatiotemporal patterns and water quality conditions using multivariate statistical analysis in the Yangtze River, China[J]. *Water*, 2023, 15(18): 3242.
- [16] LIU L, CAO T T, WANG X D, et al. Spatio-temporal variability and water quality assessment of the Mudan River Watershed, Northern China: PCA and WQI[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 238: 38-48.
- [17] LKR A, SINGH M R, PURO N. Spatio-temporal influence on river water chemistry of Doyang River, Nagaland, India, using multivariate techniques[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(1): 625-638.
- [18] AVAKUL P, JUTAGATE T. Spatio-temporal variations in water quality of the Chao Phraya River, Thailand, between 1991 and 2008[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2012, 4(9): 725-732.
- [19] HUE N H, THANH N H. Assessment of surface water quality by using multivariate statistical analysis techniques: a case study of Nhue River, Vietnam[J]. *International Journal of Environmental Science and Development*, 2020, 11(10): 488-492.
- [20] 沧州市生态环境局. 2019 年沧州市生态环境质量公报 [A/OL]. [2023-10-12]. <https://www.cangzhou.gov.cn/cangzhou/c100558/202007/1c7f0f55a7c140b39f5c659cb4372503.shtml>.
- [21] 沧州市生态环境局. 2020 年沧州市生态环境状况公报 [A/OL]. [2023-10-12]. <http://hb.cangzhou.gov.cn/hb/c100446/202107/b9acc7deb194409cb5476e53db972987.shtml>.
- [22] 宋玉, 刘健松, 陈玲, 等. 南运河沧州段水质污染特征分析及防治对策 [J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(4): 34-37.
- SONG Y, LIU J S, CHEN L, et al. An analysis of water pollution characteristics and countermeasures of Nan Canal River in Cangzhou[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018, 43(4): 34-37.
- [23] 王淑荣. 基于 WSAP 模型沧州境内宣惠河水质分析 [J]. *智能城市*, 2020, 6(10): 127-128.
- [24] 孙玉娟, 田建立, 韩丽君, 等. 2011—2016 年河北省主要入海河流水质及污染状况分析 [J]. *河北工业科技*, 2018, 35(5): 348-353.
- [25] 马毅妹. 沧州市城市用水健康循环与污水资源化研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [26] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [27] 李艳双, 曾珍香, 张闽, 等. 主成分分析法在多指标综合评价方法中的应用 [J]. *河北工业大学学报*, 1999, 28(1): 94-97.
- LI Y S, ZENG Z X, ZHANG M, et al. Application of primary component analysis in the methods of comprehensive evaluation for many indexes[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 1999, 28(1): 94-97.
- [28] 殷雪妍, 严广寒, 汪星, 等. 不同水质评价方法在通江湖泊中的适用性: 以洞庭湖为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(3): 1070-1078.
- YIN X Y, YAN G H, WANG X, et al. Applicability of different water quality evaluation methods in river-connected lakes: a case study of Dongting Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(3): 1070-1078.
- [29] 李茹霞, 迪丽努尔·阿吉, 赛米热·托合提, 等. 开都河水质时空分布特征研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2023, 45(3): 116-123.
- LI R X, DILINUER A J, SAIMIRE T H T, et al. Analysis on the spatial and temporal distribution characteristics of water quality in

- Kaidu River[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2023, 45(3): 116-123.
- [30] 李志亮, 仲跻文. 生化需氧量、化学需氧量、高锰酸盐指数三者关系简析[J]. *水利技术监督*, 2015, 23(1): 5-6.
- [31] KAWABE M, KAWABE M. Temporal and spatial characteristics of chemical oxygen demand in Tokyo Bay[J]. *Journal of Oceanography*, 1997, 53(1): 19-26.
- [32] 王子为, 钱昶, 张成波, 等. 伊逊河流域总磷污染源解析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(10): 2290-2297.
- WANG Z W, QIAN C, ZHANG C B, et al. Source apportionment of total phosphorus pollution in Yixun River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(10): 2290-2297.
- [33] 嵇晓燕, 李波, 杨凯, 等. 中国地表水氟化物时空分布特征初步研究[J]. *地球与环境*, 2022, 50(6): 787-796.
- JI X Y, LI B, YANG K, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of fluoride in surface water of China[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(6): 787-796.
- [34] 游亮, 崔莉凤, 刘载文, 等. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(9): 42-44.
- YOU L, CUI L F, LIU Z W, et al. Correlation analysis of parameters in algal growth[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(9): 42-44.
- [35] 关兴中, 刘昭, 姚成慧, 等. 鄱阳湖典型流域水质综合评价及时空变化分析[J]. *人民长江*, 2023, 54(增刊1): 29-34.
- GUAN X Z, LIU Z, YAO C H et al. Water quality evaluation and spatial-temporal variation analysis in typical watershed of Poyang Lake[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(Suppl 1): 29-34.
- [36] 保宏运, 郭建阳, 杨海全, 等. 羊卓雍错水体 pH 偏高的成因[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(3): 567-575.
- BAO H Y, GUO J Y, YANG H Q, et al. Reasons for high pH value in Yamzhog Yumco, south Tibet[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(3): 567-575.
- [37] 梁喜珍, 李畅游, 李兴, 等. 乌梁素海富营养化水体 pH 值与其他指标的相关性初探[J]. *中国农村水利水电*, 2009(12): 1-3.
- LIANG X Z, LI C Y, LI X, et al. The relativity of pH and other indicators in eutrophication body of Wuliangsu Lake[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(12): 1-3.
- [38] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 473-480.
- FU T Y, ZOU Z H, WANG X J. Water quality assessment for Taizi River watershed in Liaoyang section based on multivariate statistical analysis and water quality identification index[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2): 473-480.
- [39] 何继山. 水质分析中聚类分析和因子分析的应用研究[J]. *地下水*, 2018, 40(3): 92-95.
- [40] 李春光, 哈建强, 朱艳飞, 等. 沧州市水污染状况分析与趋势研究[C]//变化环境下的水资源响应与可持续利用: 中国水利学会水资源专业委员会 2009 学术年会论文集. 大连, 2009.
- [41] 李桂然. 沧州市地表水污染现状与污染趋势分析[J]. *海河水利*, 2009(6): 33-34.
- LI G R. Surface water pollution condition and trend analysis in Cangzhou City[J]. *Haihe Water Resources*, 2009(6): 33-34.
- [42] 周万良, 刘长春, 傅强. 沧浪渠复见游鱼[N]. *河北日报*, 2007-12-24(7).
- [43] 沧州市统计局. 沧州统计年鉴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.
- [44] 王慧. 沧州农村集中供水工程研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [45] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 51-57.
- YANG L N, LI Z Y, ZHANG X Q. Distribution characteristics of dissolved oxygen and mechanism of hypoxia in the upper estuarine zone of the Daliaohe River[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 51-57.
- [46] 赵学娇, 郭芸芸, 徐会勇. 河北省农用化肥施用现状及对策分析[J]. *农业与技术*, 2022, 42(13): 4-9.
- ZHAO X J, GUO Y Y, XU H Y[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(13): 4-9.
- [47] 龚宇, 王璞, 荆开成. 近 40 年来沧州地区水资源的气候特征[J]. *干旱区研究*, 2007, 24(4): 528-531.
- GONG Y, WANG P, XING K C. Climatic characteristics affecting water resources in Cangzhou Prefecture since recent 40 years[J]. *Arid Zone Research*, 2007, 24(4): 528-531.
- [48] 孙丹阳, 李和学, 刘强, 等. 地下水停采后地面沉降区地下水氟的演化规律: 以沧州市为例[J]. *地质科技通报*, 2023(4): 218-227.
- SUN D Y, LI H X, LIU Q, et al. Evolution of groundwater fluoride in land subsidence areas after groundwater cessation: a case study at Cangzhou[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023(4): 218-227.
- [49] 陈靓, 吴文卫, 杨明祥, 等. 白洋淀 1998—2016 年水体污染物时空分布特征分析[J]. *环境科学导刊*, 2023, 42(2): 33-39.
- CHEN L, WU W W, YANG M X, et al. The spatiotemporal distribution of water pollutants from 1998 to 2016 in Baiyangdian Lake[J]. *Environmental Science Survey*, 2023, 42(2): 33-39.
- [50] 董立新, 白昊阳. 天津滞缓流型城市河网水质时空分布特征[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(4): 8-13.
- DONG L X, BAI H Y. Temporal and spatial distribution characteristics of water quality of stagnant river network in Tianjin City, China[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(4): 8-13.
- [51] 王君, 陈新, 李末, 等. 大运河(沧州段)浮游植物群落特征与水体营养状况分析[J]. *水产学杂志*, 2023, 36(2): 67-78.
- WANG J, CHEN X, LI M, et al. Characteristics of phytoplankton community and nutritional status in waters in Grand Canal (Cangzhou section)[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2023, 36(2): 67-78. ◇