

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2023.01.013

宿州市城区河流沱河与新汴河水质评价及污染来源对比研究

崔国瑞¹, 王运好¹, 黄海燕¹, 杨红旗¹, 张雨嫣¹, 杜佩君¹, 李致春^{1,2*}

(1. 宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州 234000; 2. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州 234000)

摘要:煤炭型城市河流污染评价与溯源是国内外学者关注的热点问题。以典型的煤炭型城市宿州市城区河流沱河与新汴河为研究对象, 测定水体中污染物指标化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})等指标, 利用单因子水质标识指数法、相关性分析等方法对比 2 条河流的水质与污染来源。结果表明: (1) 沱河与新汴河水体中 TN 质量浓度较高, NH₃-N 与 TP 所对应的水质类别全部符合安徽省水功能区划对应的标准, 2 条河流的 COD 与 COD_{Mn} 质量浓度均存在不同程度的超标。(2) 新汴河中 NH₃-N 与 TP 质量浓度存在极显著正相关($r = 0.701, P < 0.01$), 有着相似的污染源, 主要受河流周边农田肥料使用的影响; 沱河中 TN 与 COD_{Mn}、NH₃-N 质量浓度之间均存在极显著正相关(r 分别为 0.637 和 0.555, $P < 0.01$), NH₃-N 与 COD_{Mn} 质量浓度之间存在显著正相关($r = 0.418, P < 0.05$), 而 NH₃-N 与 TP 质量浓度之间存在显著负相关($r = -0.469, P < 0.05$), 说明氮污染物与磷污染物存在着不同的污染来源, 氮污染分布可能是受煤炭开采矿井废水排放影响较大, 磷污染分布可能是受居民生活洗涤污水排放的影响较大。研究结果可为人类活动对煤炭型城市城区河流污染分布的影响机制提供理论参考。

关键词:水质评价; 来源解析; 煤炭型城市; 城区河流; 相关性分析

中图分类号: X824 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2023)01-0083-07

Comparative Study on Water Quality Evaluation and Pollution Sources of Tuohe River and Xinbian River in Suzhou City

CUI Guorui¹, WANG Yunhao¹, HUANG Haiyan¹, YANG Hongqi¹,
ZHANG Yuyan¹, DU Peijun¹, LI Zhichun^{1,2*}

(1. School of Environment and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou, Anhui 234000, China;
2. National Coal Mine Water Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Suzhou, Anhui 234000, China)

Abstract: The assessment and source identification of river pollution in coal cities is highly concerned by researchers at home and abroad. This study focused on Tuohe River and Xinbian River in Suzhou City which is a typical coal city. The chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₃-N) and permanganate index (COD_{Mn}) in two rivers were measured. The water quality and pollution sources between two rivers were comparatively revealed based on single factor water quality identification index and correlation analysis. The results show that the contents of TN in Tuohe River and Xinbian River were relatively high while the water quality levels of NH₃-N and TP met the corresponding standards of Water Functional Division in Anhui Province. However, the concentrations of COD_{Mn} and COD exceeded the standard. NH₃-N and TP concentrations in Xinbian River showed a significant correlation ($r = 0.701, P < 0.01$), indicating similar pollution sources which were mainly affected by the use of fertilizer in farmland around the river. TN concentrations presented the significant positive correlation with COD_{Mn} and NH₃-N in Tuohe River ($r = 0.637$ and 0.555 , respectively, $P < 0.01$). NH₃-N showed a positive correlation with COD_{Mn} ($r = 0.418, P < 0.05$)

收稿日期: 2022-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42107280); 宿州学院博士科研启动基金项目(2019jb26); 宿州学院博士后科研启动基金(2021bsh003); 安徽省大学生创新创业训练计划项目(S202010379040); 宿州学院大学生创新创业训练计划项目(KYLXYBXM22-031)。

作者简介: 崔国瑞(2001—), 男, 安徽蚌埠人, 本科生, 主要研究方向: 生态环境污染。*通信作者: 李致春(1986—), 男, 山西大同人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 污染水体生态修复。

but a negative correlation with TP ($r = -0.469$, $P < 0.05$). The correlation between pollutants in Tuohe River indicated that there are different pollution sources of nitrogen and phosphorus pollutants. The distribution of nitrogen pollution in Tuohe River was probably affected by the discharge of coal mining wastewater while the discharge of domestic washing sewage caused the accumulation of phosphorus pollutants. This study can provide a theoretical reference for the impact mechanism of human activities on the distribution of urban river pollution in coal cities.

Keywords: water quality evaluation; source apportionment; coal cities; urban rivers; correlation analysis

0 引言

城市河流是水生态系统的重要组成部分^[1],是城市居民可持续利用的淡水资源,具有供水输水、农业灌溉、抗洪排涝、改善当地气候等多种功能^[2]。然而,当前我国面临的城市河流污染问题较为突出。国内外学者对城市河流水环境评价进行了大量研究,水质评价及来源分析是最基础的内容,目前常用的污染评价方法有单因子指数法^[3]、污染指数法^[4]、模糊评价法^[5]等,污染来源分析方法主要有因子分析法^[6]、PMF 模型法^[7]等。

随着社会发展对煤炭能源需求增加,煤炭开采量日益加大,开采过程不可避免地会造成煤炭型城市河流污染,其河流还会受到居民生活用水以及其他工业废水的影响。因此,煤炭型城市城区河流污染问题复杂,其多元来源的污染物会通过多种途径威胁城市居民用水安全^[8],需要进一步地深入系统研究。

本文以煤炭型城市宿州市的沱河与新汴河为例,通过单因子水质标识指数法和相关性分析法,对 5 个污染物指标化学需氧量(COD)、总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)和高锰酸盐指数(COD_{Mn})进行分析,分别对河流进行水质评价以及污染源解析,对比 2 条河流的污染物质量浓度分布、污染程度以及污染来源,为当地河流整治和生态建设提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宿州市位于安徽省北部,地处北纬 33°18′~34°38′,东经 116°09′~118°10′。宿州市拥有皖北矿业集团大型煤炭企业,全市储存煤炭资源面积约 2 000 km²,预测煤炭储量为 60 亿 t,占淮北煤田储量的 75% 以上,是国家规划的 13 个大型煤炭基地之一^[9]。

沱河全长 203 km,流域面积 4 500 km²,深 2.0~4.0 m;水流方向由西北方向流向东南方向,最高洪水位标高 26.20 m,多年平均最大流量 412 m³/s,多

年平均最小流量 164 m³/s^[10]。新汴河的全长约 127.0 km,在宿州市境内约有 80 km,是宿州市工农业生产和居民生活的重要水源;随着城市规模扩大,人口数量不断增多,排入河内的工业废水以及生活污水也在不断增多,造成了严重的水污染问题^[11]。

1.2 样品采集与分析

2019 年 7 月,在沱河与新汴河分别设置 28 个采样点(T1~T28)和 20 个采样点(X1~X20)(图 1),使用手持设备 GPS 记录采样点的坐标。在相应点位展开水样采集,取采样点河水润洗采样器以及 2.5 L 聚乙烯水桶后开始采集水样。每个采样点的样品各取 2 桶,并分别贴上标签(填写采样点编号、采样日期和测定项目等)。利用便携式水质测定仪现场测定水体的氧化还原电位(ORP)、pH 值、电导率(EC)和总溶解度(TDS)。水样采取完后尽快送往实验室并在 24 h 内完成实验分析工作。利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮(TN)、钼酸铵分光光度法测定水体中的总磷(TP)、纳氏试剂分光光度法测定氨氮(NH₃-N)、重铬酸钾法(COD_{Cr})测定化学需氧量(COD),酸性法测定高锰酸盐指数(COD_{Mn})^[12]。

1.3 水质评价

1.3.1 单因子水质标识指数法

单因子水质标识指数法不仅可以评价一个断面的水质类别,还可以对同一类别的水质指标进行定量比较。该方法科学准确、易操作。

单因子水质标识指数(P_i)由一位整数和小数点后 2 或 3 位有效数字组成,其可以表示为式(1)。

$$P_i = X_1.X_2X_3 \quad (1)$$

式中: X_1 为第 i 项水质指标的水质类别; X_2 为监测数据在 X_1 型水质变化范围内的位置,按公式以及四舍五入原则计算确定; X_3 为水质类别与功能区划设定类别的比较结果,视评价指标的污染程度, X_3 可以是 1 位或 2 位有效数字。

1) X_1, X_2 值的确定。

(1) 当水质介于 I 类水和 V 类水之间时,一般指标(DO(溶解氧)、pH、水温等除外) X_1, X_2 值的确定

表 1 新汴河与沱河理化指标分布

河流	项目	pH	TDS/(mg·L ⁻¹)	EC/ ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	ORP/mV	浊度 /NTU	透明度 /m
新汴河	最大值	8.760	953.000	1 910.000	106.000	138.100	0.430
	最小值	8.470	682.000	1 375.000	84.000	9.300	0.100
	平均值	8.633	813.450	1 645.750	95.700	36.947	0.189
	变异系数	0.010	0.009	0.009	0.005	0.768	0.421
沱河	最大值	9.140	715.000	1 445.000	122.000	91.600	0.380
	最小值	8.240	598.000	1 023.000	61.000	10.230	0.150
	平均值	8.770	633.590	1 263.960	91.560	25.230	0.240
	变异系数	0.025	0.046	0.067	0.153	0.651	0.298

属于Ⅱ类水,也达到了目标水质标准。2条河流TP的变异系数均为0.167 4,表明2条河流TP的质量浓度变化波动较小。(3)新汴河TN质量浓度范围为1.604~19.170 mg/L,平均值为4.823 mg/L,质量浓度最大值与最小值相差较大,整体水质类别属于V至劣V类水,质量浓度较大的点位于X8、X9和X10这3处,可能与附近农田灌溉、工厂排放的工业废水有关;沱河的TN质量浓度平均值为3.220 mg/L,属于劣V类水,低于目标水质标准,质量浓度范围为1.219~8.490 mg/L,属于Ⅳ至劣于V类水,质量浓度较大值出现在T20、T21和T26这3处,可能是由于制煤炭工业中产生的矿井废水进入水体而造成的污染。新汴河TN的变异系数大于沱河TN的变异系数,这可能是由于新汴河周围不仅有工厂排放含氮废水进入河流,而且雨水径流以及农田化肥流失也造成了新汴河的严重污染,故TN分布影响因素多元。(4)新汴河的NH₃-N质量浓度平均值为0.407 mg/L,质量浓度范围为0.285~0.541 mg/L,整体属于Ⅱ至Ⅲ类水,水质类别与目标水质标准相符;沱河NH₃-N平均值为0.340 mg/L,属于Ⅱ类水,与目标水质标准相符。沱河NH₃-N的变异系数大于新汴河NH₃-N的变异系数,表明沱河NH₃-N质量浓度变化波动较大。沱河位于市区,市区煤炭企业、化工厂的污水排放或者私家车尾气排放均有可能造成沱河的NH₃-N质量浓度变化。(5)新汴河COD_{Mn}质量浓度的平均值为6.697 mg/L,水质类别为Ⅳ类,低于目标水质标准;沱河COD_{Mn}质量浓度均值为4.500 mg/L,属于Ⅲ类,符合目标水质标准。沱河COD和COD_{Mn}质量浓度的变异系数均大于新汴河COD和COD_{Mn}质量浓度的变异系数,原因可能是沱河流经市区,沱河COD和COD_{Mn}的分布会受到城市人类活

动多元因素的影响,质量浓度波动更明显。

表 2 新汴河与沱河污染物质量浓度 mg/L

河流	项目	COD	TP	TN	NH ₃ - N	COD _{Mn}
新汴河	最大值	54.180	0.183	19.170	0.541	10.836
	最小值	15.050	0.086	1.604	0.285	3.010
	平均值	33.484	0.140	4.823	0.407	6.697
	变异系数	0.317	0.167	0.948	0.226	0.317
沱河	最大值	74.500	0.116	8.490	0.866	11.210
	最小值	15.800	0.060	1.219	0.165	2.830
	平均值	27.490	0.080	3.220	0.340	4.500
	变异系数	0.432	0.167	0.475	0.486	0.377

对沱河和新汴河污染物指标进行分析,结果表明:(1)沱河的TP质量浓度出现2个异常值,为0.109和0.116 mg/L,对应的采样点分别为T21和T22;新汴河的TN质量浓度出现1个异常值,为9.17 mg/L,对应的采样点为X8(083乡道和G206交界处)。(2)沱河的TN质量浓度出现4个异常值,为5.301、8.490、6.219和6.198 mg/L,对应的采样点分别为T11、T20、T21和T26。(3)新汴河的NH₃-N质量浓度无异常值,沱河的NH₃-N质量浓度出现3个异常值,为0.701、0.866和0.650 mg/L,对应的采样点分别为T17、T20和T22。(4)新汴河的COD质量浓度无异常值,沱河的COD质量浓度有1个异常值,为74.50 mg/L,对应的采样点为T21。(5)新汴河的COD_{Mn}质量浓度无异常值,沱河的COD_{Mn}有1个异常值,为11.21 mg/L,对应的采样点为T21。T20、T21这2个采样点位于宿州市火车站附近,该处位于G206国道和沱河两岸部分交通带附近,大多数汽车

经过此地,所排放的汽车尾气会经过干湿沉降进入该区域,会污染水体,导致污染物出现高质量浓度异常值。整体来看,沱河水体污染富集情况比新汴河更严重,高质量浓度异常值点更多。

2.2 水质评价结果分析(单因子水质标识指数法)

采用单因子水质标识指数法对宿州市新汴河与沱河进行水质综合评价,选取COD、TP、TN、氨氮、 COD_{Mn} 为评价项目。根据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[16]各指标地表水环境质量标准基本项目标准限值,参照《安徽省水环境功能区划》^[17]和生态环境部的最新要求可知,新汴河与沱河的水环境功能目标都为Ⅲ类水,最后整合数据计算单因子水质标识指数。

通过单因子标识指数法的计算得出:(1)新汴河的COD水质标识指数 X_3 值有3个采样点(X_2 、 X_4 、 X_5)值为0,占比15%;低于水功能区划1个类别的有3个采样点,占比15%;劣于水功能区划2个类别的有9个采样点,占比45%;劣于水功能区划3个类别的有5个,占比25%。沱河的COD水质标识指数 X_3 有6个采样点(T9、T13、T16、T23、T24、T25)值为0,占比22.22%;低于水功能区划1个类别的有13个采样点,占比48.15%;劣于水功能区划2个类别的有6个采样点,占比22.22%;劣于水功能区划3个类别的有2个采样点,占比7.41%。(2)新汴河的TP水质标识指数 X_3 值均为0,其中Ⅱ类水有1个采样点,占比5%;Ⅲ类水有19个采样点,占比95%。沱河的TP水质标识指数中 X_3 值也均为0,说明2条河流的TP都已达到水环境功能区划目标,其中有24个采样点为Ⅱ类水,3个采样点为Ⅲ类水,但有3个采样点(T5、T13、T15)的 X_2 值为0.9,表明水体TP已接近于超标的程度。(3)新汴河的TN水质标识指数 X_3 值均不为0,且有6个采样点为Ⅴ类水,占比30%;有14个采样点为劣Ⅴ类水,占比70%。沱河的TN水质标识指数 X_3 值也均不为0,低于水功能区划1个类别的有1个采样点,低于水环境功能区划2个类别的也有1个采样点,皆占比3.7%;低于水功能区划3个类别的有25个采样点,占比92.6%,因此TN超标最为严重。(4)新汴河的 NH_3-N 水质标识指数 X_3 值均为0,Ⅱ类水的采样点有14个,占比70%;Ⅲ类水的采样点有6个,占比30%。沱河的 NH_3-N 水质标识指数 X_3 值也均为0,其中Ⅱ类水的采样点有24个,占比88.89%;Ⅲ类水有3个采样点,占比11.11%。以上结果表明, NH_3-N 在这2条河流中都已达到水环境功能区划目标。(5)新汴河的 COD_{Mn} 水质标识指数 X_3 值为0的采样点有6个;Ⅱ类水与Ⅲ类水的采

样点各有3个,各占比15%;Ⅳ类水有12个采样点,占比60%;Ⅴ类水有2个采样点,占比10%。沱河的 COD_{Mn} 水质标识指数 X_3 值为0的采样点有23个,占比85%,这23个采样点中有13个Ⅱ类水和10个Ⅲ类水,分别占比48.15%和37.04%;Ⅳ类水有3个采样点,占比11.11%,Ⅴ类水有1个采样点,占比3.7%^[18-19]。

新汴河与沱河水质污染情况如图2所示。2条河流总氮质量浓度都超标严重,氨氮与总磷都全部达标。根据单因子标识指数,氨氮与总磷的指标有少数低于水环境功能区划的标准。而对于有机污染物COD与 COD_{Mn} 来说,沱河中COD与 COD_{Mn} 的污染程度比新汴河的污染程度小,可能是由于新汴河周围工厂的污水、农田灌溉废水以及居民生活污水的排放导致其污染程度较高。

2.3 污染源分析

本研究采用相关性分析法分别对新汴河和沱河污染指标之间进行相关性分析,结果如表3和4所示。

2.3.1 新汴河污染源分析

新汴河的TP与 NH_3-N 质量浓度之间存在着极显著正相关($r=0.701, P<0.01$),表明新汴河中的这2个污染物指标具有相似的污染来源^[20-21]。 NH_3-N 与TP的污染来源包括内源污染与外源污染。外源污染指河流周围饲养业、水产养殖、农药、化肥、生活污水及工业废水的直接排放等原因造成的污染^[22]。内源污染由于大量氮、磷等营养物质进入缓流水体,发生富营养化后,形成底泥等沉积物,沉积物中的氨、氮、磷等物质再由于积聚的底泥及沉积物中的营养盐逐步释放,在动力作用下再悬浮,不断释放进入水中,造成水体总磷与氨氮污染^[23]。而且一般在碱性条件下,底泥磷释放潜力较大,也会造成河流磷污染^[24]。由于新汴河位于市区外,周边有大量农田,农田使用了大量的氮磷肥料,会导致大量氮磷污染物通过灌溉废水或通过雨水形成的地表径流冲刷排入新汴河。因此,农业生产会对新汴河中氮磷污染物分布产生重要影响。

2.3.2 沱河污染源分析

沱河的TN与 NH_3-N 之间存在极显著正相关($r=0.555, P<0.01$),TN与 COD_{Mn} 之间存在极显著正相关($r=0.637, P<0.01$), NH_3-N 与 COD_{Mn} 之间存在显著正相关($r=0.418, P<0.05$),表明3种污染源相似。然而,沱河中TP与 NH_3-N 之间存在显著负相关性($r=-0.469, P<0.05$),表明磷污染物与氮污染物来源不同。由于沱河流经宿州市区和工

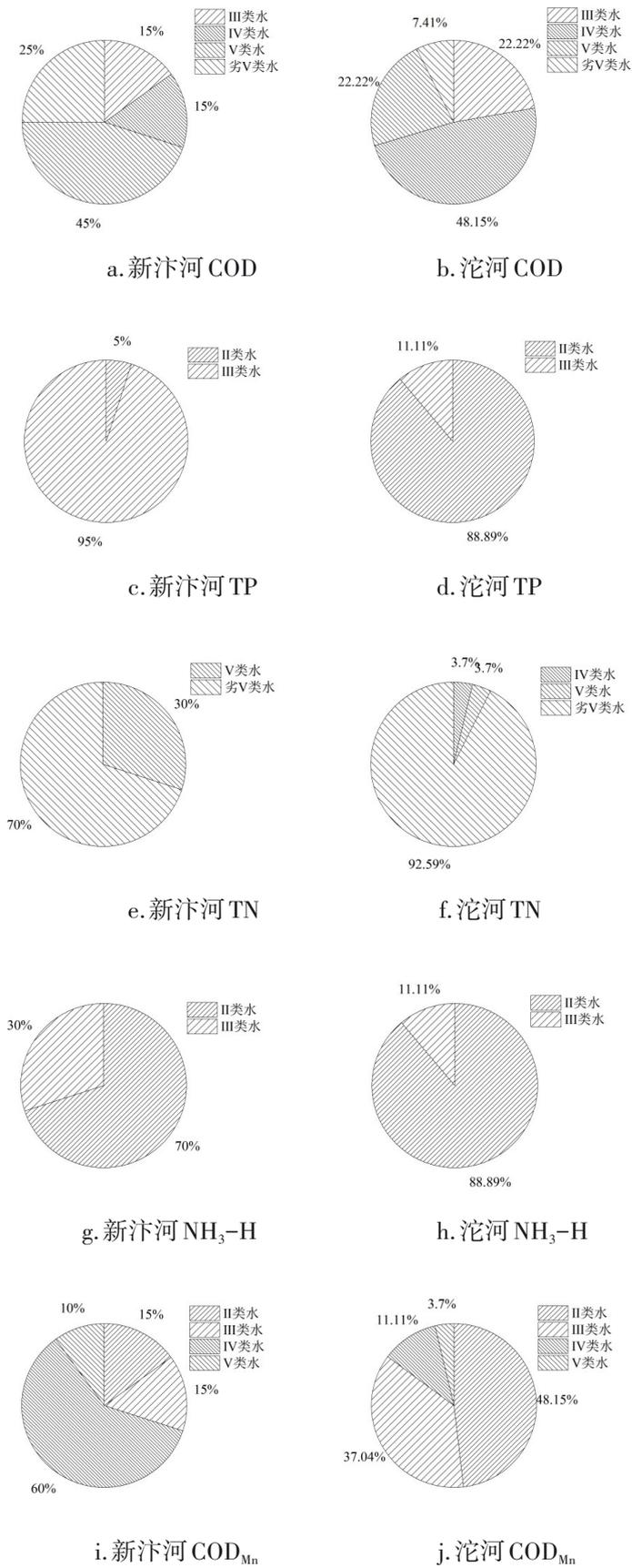


图2 新汴河与沱河水体各污染物指标水质变化图

表3 新汴河河流污染物指标之间的相关性系数

	TP	TN	NH ₃ -N	COD _{Mn}
TP	1			
TN	0.125	1		
NH ₃ -N	0.701**	0.137	1	
COD _{Mn}	-0.353	0.333	-0.309	1

注:“*”表示0.05水平显著;“**”表示0.01水平显著。

表4 沱河河流污染物指标之间的相关性系数

	TP	TN	NH ₃ -N	COD _{Mn}
TP	1			
TN	-0.099	1		
NH ₃ -N	-0.469*	0.555**	1	
COD _{Mn}	-0.050	0.637**	0.418*	1

注:“*”表示0.05水平显著;“**”表示0.01水平显著。

矿企业密集的经济技术开发区,污染物的分布会受到居民生活污水排放和工业废水的影响。洗涤剂

中磷的含量非常高,沱河中磷污染物分布可能受居民生活污水的排放影响较大^[25];煤矿企业开采矿井废水含有大量的含氮污染物,因此TN、NH₃-N、COD_{Mn}的分布可能受煤矿企业生产及其他工业废水的排放的影响较大^[26-27]。

3 结论

1)COD、COD_{Mn}和TN在新汴河、沱河中不同程度超标,TN在2条河流中超标最为严重,水质类别劣于水环境功能区类别较多。TP与NH₃-N各采样点水质类别全部达标,整体的水质类别也符合水环境功能区类别标准,但有个别采样点的TP指标即将超过水环境功能区划类别。新汴河与沱河的水质类别总体都呈IV类水,并未达到安徽省水环境功能区划的标准。

2)新汴河中氮磷污染物主要污染源为河流周边农业生产;沱河磷污染物主要污染源为居民生活污水的排放,而含氮污染物主要污染源为煤矿企业生产及其他工业废水的排放。

参考文献:

- [1] 崔志杰,冯明军,胡清,等.城市河流水质时空变化及富营养化评价:以深圳河及新洲河流域为例[J].绿色科技,2021,23(4):1-6.
- [2] 滕浩文.城市河流水质健康风险评估研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2022.
- [3] 郑琨,张蕾薛,晨亮.单因子指数法在水质评价中的应用研究[J].地下水,2018,40(5):79-80.
- [4] ZHANG Q, FENG M Q, HAO X Y. Application of nemerow index method and integrated water quality index method in water quality assessment of Zhangze Reservoir[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 128(1): 12-16.
- [5] WANG J Y, YANG H X, XIN K L, et al. Risk assessment methodology for iron stability under water quality factors based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Environmental Sciences Europe, 2020, 32(1): 187-198.
- [6] OUYANG L L, SHI Y R, YANG J Q, et al. Water quality assessment and pollution source analysis of Yaojiang River Basin: a case study of inland rivers in Yuyao City, China[J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2022, 22(1): 674-685.
- [7] REN C B, ZHANG Q Q, WANG H W, et al. Characteristics and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons of groundwater in Hutuo River alluvial-pluvial fan, China, based on PMF model[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(8): 9647-9656.
- [8] 于得水.煤炭资源型城市环境保护与经济可持续发展研究[D].包头:内蒙古科技大学,2019.
- [9] 李云鹏,李致春,余宝宝,等.宿州市沱河沉积物氮磷和有机碳分布及评价[J].环境监测管理与技术,2017,29(5):25-28.
- [10] 司方园.沱河水质对宿州市开发区水源地影响评价[J].建材与装饰,2019(29):160-161.
- [11] 李其华.新汴河宿州市段水质污染情况调查与分析[J].宿州师专学报,2003(2):63-64.
- [12] 国家环境保护总局.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.
- [13] 袁秀琴,曾亮,吴丹,等.综合营养指数法和单因子水质标识指数法在巴南区大中型水库水质评价中的应用[J].山东化工,2022,51(4):216-218.
- [14] 江峰,刘汉武,吉勤克补子,等.单因子水质标识指数法在贵州省洋水河流域地下水水质评价中的应用[J].四川地质学报,2021,41(1):151-153+176.
- [15] 薛薇.统计分析与SPSS的应用[M].北京:中国人民大学出版社,2011:228-246.
- [16] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB3838-2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [17] 安徽省环境保护局,安徽省水利厅.安徽省水环境功能区划[M].北京:水利水电出版社,2004.