

专栏:黄河流域生态保护

黄河流域中小河流水质评价的比较研究

史陈雪^{1,2},刘庆庆¹,杨艳霞³,安东妹³,刘玥¹,祖国峰⁴

(1.中国环境科学研究院,北京 100012;2.山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590;

3.郑州市生态环境局荥阳分局,郑州 450000;4.中关村中环土壤地下水污染防控与修复产业联盟,北京 100020)

摘要:我国中小河流众多,流域面积覆盖了全国85%的城镇及广大农村地区,是区域生产生活用水的主要来源和污染负荷排放的接纳者.开展中小河流水质综合评价对于客观、准确地评价水环境质量状况,制订水污染防治整体规划具有重要意义.以黄河流域河南省2条典型中小河流为研究对象,在识别河流水污染状况的基础上,采用单因子评价法、综合污染指数法、水质标识指数法和模糊综合评价4种方法对水质现状进行了综合评价,探讨了不同方法在中小河流水质评价中的适用性.结果表明:2条中小河流主要污染指标为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、挥发酚及TP;水质标识指数法的评价结果与可靠性分析中的水质评价结果一致性最高,该方法得到的水质类别结果更加可靠.

关键词:中小河流;单因子评价法;综合污染指数法;水质标识法;模糊综合评价

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)01-0016-12

随着城市化进程的加快和生态文明理念的深入,众多学者对评价指标、评价标准和评价方法等开展了深入研究,但多以黄河、长江和辽河等较大尺度河流为研究对象^[1-3],对于我国中小河流的研究相对较少,而中小河流作为全球物质流、能量流的重要环节,是淡水生态系统的重要组成部分.我国中小河流有5万多条,数量众多^[4-5],覆盖了全国85%的城镇及广大农村地区,与人类生产生活密切相关^[6],又是区域生产生活用水的主要来源和污染负荷排放的接纳者^[7].因此,对中小河流水污染特征、水质现状的研究变得尤为重要.

目前,国内外常用的水环境质量评价方法有单因子评价法、综合污染指数法、模糊综合评价法、主成分分析法、综合水质标识法、随机森林评价法、内梅罗指数法等^[8-11].单因子评价法直观地反映出监测断面的主要污染因子,选择水质最差指标所属类别来确定河流水质类别,评价结果“过保护”;综合污染指数法可以对河流断面水质情况进行排序,但不能反映水质与评价标准的关系^[12];模糊综合评价法考虑了各个水质监测值的程度和污染因子的权重,可解决水质评价过程中存在的不确定性问题^[13],水质标识指数可以对河道综合水质进行定性评价和定量评价,还可以对劣V类的河流进行水质评价,并判别河流水体是否黑臭.将多种水质评价方法有效结合更能科学合理地评价河流的水质状况^[14].

分析流域的水污染特征以及水质污染状况,是保证流域水安全的首要任务,对河流污染控制和水资源管理十分重要.以黄河流域河南省荥阳市水系2条典型中小河流为研究对象,围绕荥阳河流水质污染特征,基于

收稿日期:2022-11-23;**修回日期:**2023-04-04.

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3201500);中央财政科技计划结余经费专项(2021-JY-04).

作者简介:史陈雪(1998-),女,山东济南人,山东科技大学硕士研究生,研究方向为资源与环境,E-mail:1459078727@qq.com.

通信作者:刘玥,E-mail:liu.yue@craes.org.cn;祖国峰,E-mail:zuguo Feng1978@163.com.

引用本文:史陈雪,刘庆庆,杨艳霞,等.黄河流域中小河流水质评价的比较研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(1):16-27.(Shi Chenxue,Liu Qingqing,Yang Yanxia,et al.Comparative study on water quality assessment of small and medium-sized rivers in the Yellow River Basin[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(1):16-27.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.11.23.0001.)

评价方法计算的难易程度、定性/定量评价结果和是否考虑水质指标权重等因素,采用单因子评价法、综合污染指数法、水质标识指数法及模糊综合评价法 4 种方法对 2 条中小河流进行水质综合评价,分析主要污染因子及河流水质变化特征,探讨不同方法在水质评价中的适用性,以为中小河流水质的科学合理评价提供参考,并提出了加强该地区中小河流水环境保护的对策建议。

1 研究区概况

2 条河流(简称 S 河和 K 河)均属黄河水系,所在区域属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 14.8 °C,年平均降水量 608.8 mm,主要集中在 7—9 月,占降水量的 56.3%。S 河河道全长 39.1 km,流域面积 181.7 km²,南部为低山丘陵,总的趋势由南向北倾斜;K 河河道全长 40.6 km,流域面积 247.7 km²,土质为轻粉质沙壤土和细砂土,位于城市主城区以北,主要穿越城镇发展区,K 河所在区域土地利用类型相对单一,农村段为缓坡农田耕地及自然村落。2 条河流所设监测断面见图 S1 所示。

2 材料与方法

2.1 样品监测指标和检测方法

在 K 河及 S 河共布设 14 个监测断面(K1~K8、S1~S6)。根据国家 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[15] 监测原则和方法,于 10—12 月对 14 个监测断面进行采样,每月采样 1 次。常规监测指标为水温、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、高锰酸钾指数(COD_{Mn})、氟化物(F⁻)、粪大肠菌、重金属(As)、挥发酚,经常未检出的因子包括氰化物、石油类、六价铬、阴离子表面活性剂、汞、硒、铅、镉、锌、有机氯等 10 个。因此,需剔除未检出率高于 80% 及数据缺失过多的指标。其中,温度、pH 及 DO 用便携式仪器进行现场原位测定,取样前,用待取样的水润洗取样容器 2~3 次,避免样品污染。其余指标按照《水和废水监测分析方法》^[16] 测定。

2.2 数据处理与方法

数据分析图采用 Origin 8.5、ArcGIS 10.4 进行绘制,数据处理采用 Excel 统计分析。因 K 河及 S 河水域功能考核目标确定为Ⅳ类,故 2 条河流水质评价标准以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅳ类水质标准限值为依据,采用单因子评价法、综合污染指数法、水质标识指数法、模糊综合评价法对河流水质进行综合评价分析。

2.2.1 单因子评价法

单因子评价法^[17]是将水质监测实测值与相应的标准值进行对比,确定水质类别,选择水质最差的单项指标所属类别为最终结果。一般适用于河流的一类水质污染物对水质影响较大且所占比例较大时,通过此方法可以分析出水环境质量的大体情况。其计算公式为: $P_i = C_i / S_i$, C_i 为第 i 种水质指标的月平均实测质量浓度(mg/L); S_i 为第 i 种水质指标的评价标准(mg/L),具体见文献^[15]中的Ⅳ类水质标准限值。

2.2.2 综合污染指数法

综合污染指数^[18]是在单因子污染指数的基础上进行统计分析,根据所选水质指标 P_i 的算术平均、加权平均或其他数学手段得到的结果,来综合评价水体污染程度,通常分别根据指标的超标倍数和污染贡献率来筛选主要的污染指标。

综合污染指数公式为:

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i,$$

水质指标污染贡献率公式为:

$$K_i = \frac{P_i}{nP} \times 100\%,$$

P 为监测断面的综合污染指数; P_i 为单因子污染指数; n 为水质指标的个数。

2.2.3 水质标识指数法

水质标识指数法将水质表示为一个具有代数性质的小数,能够连续性描述水质状况.该方法首先计算水体监测数据中各评价因子的单因子水质标识指数,在此基础上,进行综合评价,计算综合水质标识指数.该方法是徐祖信^[19]最早提出的河流综合水质评价方法,可以定性定量评价河流水质,针对不同河流水质或同一河流不同断面水质进行评价比较.

水质标识指数公式为: $I_{wq} = X_1 X_2 X_3 X_4$, X_1 表示河流综合水质的类别, X_2 为综合水质在该类别变化区间中所处的位置, X_3 是参与评价的所有指标中劣于河流水质目标的指标个数, X_4 为水质类别与水体功能区类别比较的结果.

2.2.4 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法^[20],把定性评价转化为定量评价.主要步骤如下:

(1) 建立评价对象因子集和评价集

根据本研究中断面水质监测数据,选取所监测的 10 个污染指标作为评价因子,建立以下评价因子集: $U = \{DO, BOD_5, COD_{Mn}, NH_3-N, TP, COD, F^-, As, \text{挥发酚}, \text{粪大肠菌}\}$, 根据 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》,确定水质评价集 $V = \{I, II, III, IV, V\}$, I, II, III, IV, V 分别代表 GB 3838-2002《地表水环境质量标准》中的 I, II, III, IV, V 类水.

(2) 确定权重系数及归一化处理

通过超标法计算河流水质指标权重,即:

$$I_i = C_i / \bar{S}_{i0} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$\bar{S}_{i0} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_{ij} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k),$$

$$W_i = I_i / \left(\sum_{i=1}^n I_i \right),$$

C_i 为第 i 个评价因子的实测质量浓度; I_i 为第 i 个评价因子的权重; \bar{S}_{i0} 为第 i 个评价因子各级评价标准的平均值; k 为水质评价级别数; S_{ij} 为第 i 个评价因子第 j 级的评价标准; n 为评价因子总数; W_i 为第 i 个评价因子的权重,取值介于区间 $[0, 1]$.

(3) 建立隶属度函数及模糊关系矩阵

隶属度函数用降半梯形分布函数法确定隶属度函数,隶属度函数可表达为:

$$j = 1 \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 1, C_i < S_{i1}, \\ \frac{S_{i2} - C_i}{S_{i2} - S_{i1}}, S_{i1} < C_i < S_{i2}, \\ 0, C_i < S_{i2}, \end{cases} \quad j = 2, 3, 4 \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 0, S_{i(j+1)} \leq C_i \leq S_{i(j-1)}, \\ \frac{C_{ij} - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}}, S_{i(j-1)} < C_i < S_{ij}, \\ \frac{S_{i(j+1)} - C_1}{S_{i(j+1)} - S_{ij}}, S_{ij} < C_i \leq S_{i(j+1)}, \end{cases}$$

$$j = 5 \text{ 时, } r_{ij} = \begin{cases} 0, C_i \leq S_{i4}, \\ \frac{C_i - S_{i4}}{S_{i2} - S_{i1}}, S_{i4} < C_i < S_{i5}, \\ 1, C_i > S_{i5}, \end{cases}$$

C_i 表示 i 污染物的实测值; S_{ij} 表示 i 污染物对应 j 级水质标准.

构建模糊矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}.$$

(4) 构建模糊综合评价结果矩阵

将模糊权重矩阵 W 和模糊关系矩阵 R 相乘,求得模糊综合评价结果 B .

$$B = W_i \times R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

3 结果与讨论

3.1 水质因子特征空间分布特征

为了解 K 河及 S 河各采样断面的水质状况,取各断面监测点的月平均值绘制水质指标空间分布图,分析河流主要监测断面污染因子的空间变化规律,结果见图 1 和图 2(为更清晰表示河流各指标空间变化情况,绘制 2 条河流时沿法向向量方向拓宽 50 m)。

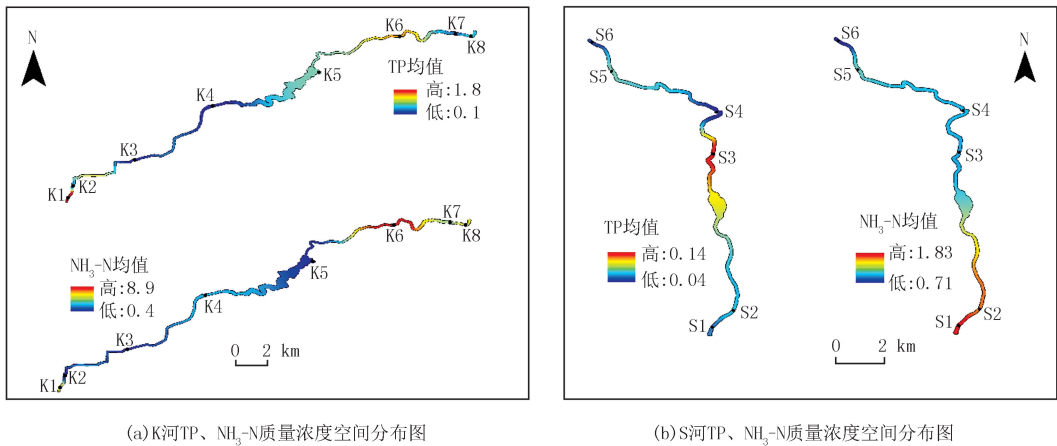


图1 水质指标空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of water quality indices

3.1.1 理化和营养盐指标

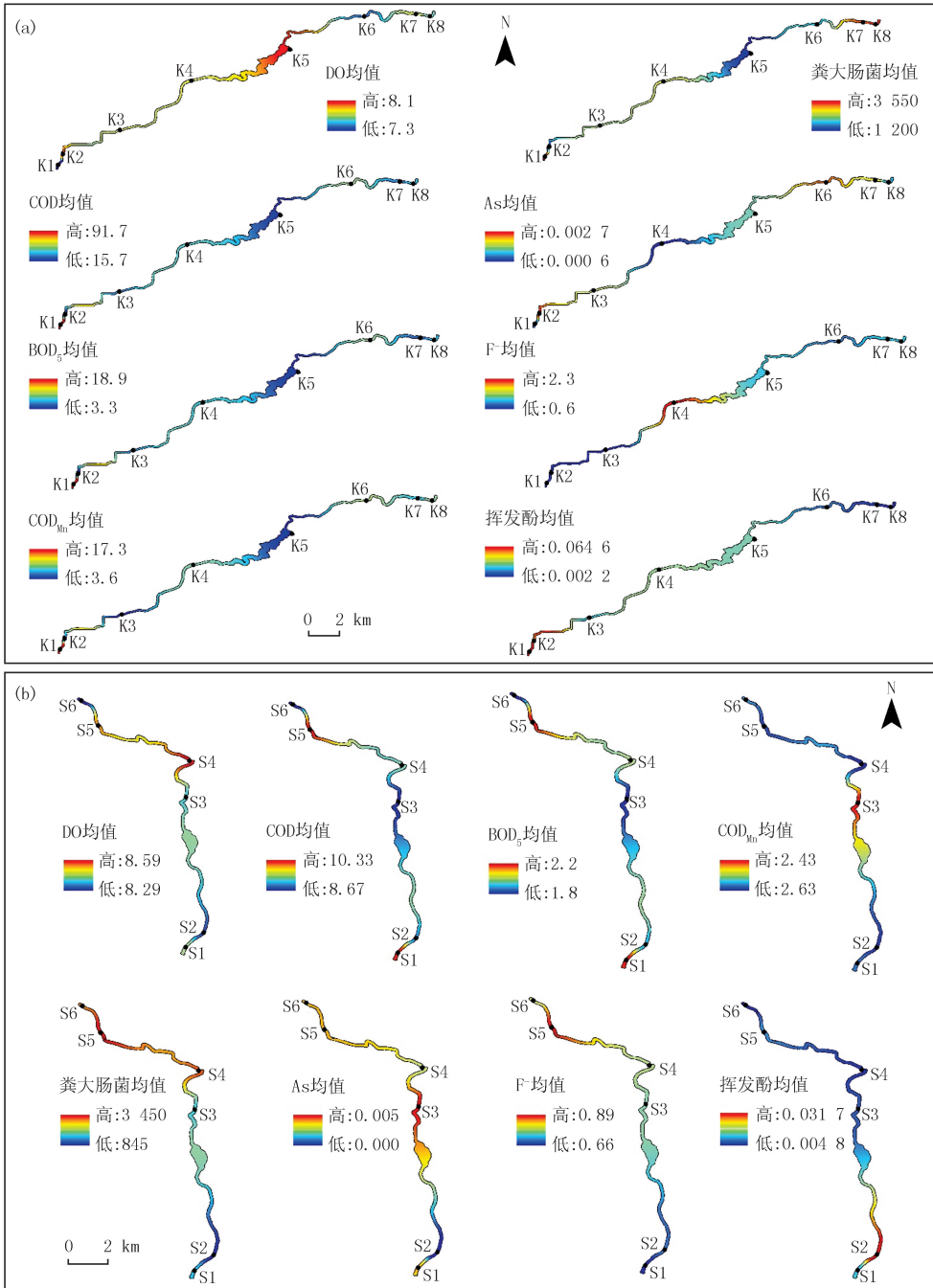
理化参数可以反映河流水质的污染状况,河流监测的理化和营养盐指标包括 pH、NH₃-N 和 TP(图 3),其中 pH 值是评价水质状况的综合性指标,NH₃-N 和 TP 可作为表征水体营养物污染水平的参数.K 河及 S 河各断面监测点 pH 均值为 7.4~7.7,水质整体呈弱碱性,河流平均温度在 15 °C 左右.其中,K 河 TP 均值在 0.1~1.8 mg/L 的区间内变化,NH₃-N 均值变化范围为 0.4~8.9 mg/L,整体质量浓度波动大.总体来说,K 河中下游 TP、NH₃-N 超标严重,造成此现象可能的原因是周边区域土地利用类型相对单一,为耕地及村庄,耕地主要种植玉米、小麦等作物,河岸带存在面源污染输入^[21],大量的复合肥会随着雨水进入水体,造成水体营养物质超标^[22].其次,河流中下游周边为人口聚集区,未建设污水管网,生活污水直接排入河^[23],导致 K 河富营养化严重.S 河 TP 均值变化范围为 0.04~0.14 mg/L,NH₃-N 质量浓度为 0.71~1.83 mg/L,沿河流流向 NH₃-N 含量呈现降低趋势,随着经济的发展,上游污水排放量逐渐增加,未经处理的污水排入 S 河,导致 S 河上游河段受到污染,河水部分化学指标超标^[24].

3.1.2 有机物及其他污染指标

本研究中有有机物指标包括 DO、COD_{Mn}、BOD₅ 和 COD(图 2).其中,DO 是衡量水体自净能力的指标,并间接反映水体有机污染状况^[25],水温是影响 DO 质量浓度的主要因素;COD_{Mn}、COD 和 BOD₅ 是反映水中有机物污染的常用指标,在一定程度上可以用来描述有机物对水体的污染程度^[26];粪大肠菌群是衡量水体粪便污染的指示微生物,水体存在粪大肠菌群表明已被粪便污染;F⁻ 被世界卫生组织列入致癌物清单,如果经常饮用高氟饮用水,可能会对人体健康有害.挥发酚等化学污染物主要来自于工业废水的排放,是评价水质的重要指标.

从各指标质量浓度均值的空间分布图(图 2)可知,对于 DO 指标,K 河监测断面(K1~K8)DO 质量浓度变化范围为 7.3~8.1 mg/L,S 河监测断面(S1~S6)DO 质量浓度变化范围为 8.29~8.59 mg/L.整体上,河流沿程变化范围不大且 2 条河流 DO 质量浓度相差不大,水体自净能力较好.K 河 COD_{Mn} 质量浓度范围为 3.63~17.3 mg/L,K1 断面质量浓度最高,除此断面外,其余断面 COD_{Mn} 值有一定波动,但均小于 10.00 mg/L;

BOD₅ 范围为 3.3~18.9 mg/L, K1 断面质量浓度达 18.9 mg/L, 其余断面 BOD₅ 值在 3~6 mg/L 范围内变化; COD 质量浓度范围 15.7~91.7 mg/L, K1 断面质量浓度最高. 除 K1 断面外, K 河 BOD₅、COD_{Mn} 值沿程变化范围较小, K3 断面 F⁻ 质量浓度最高, 为 2.3 mg/L; 粪大肠菌浓度范围为 1 200~3 550 L⁻¹, As 质量浓度范围为 0.000 6~0.002 7 mg/L, 受工业企业废水排放影响, K 河挥发酚质量浓度沿河流向逐渐降低, K1 断面挥发酚质量浓度最高, 达 0.064 6 mg/L.



(a) K河DO、COD、BOD₅、COD_{Mn}、粪大肠菌、As、F⁻、挥发酚空间分布图;
 (b) S河DO、COD、BOD₅、COD_{Mn}、粪大肠菌、As、F⁻、挥发酚空间分布图.

图2 水质指标空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of water quality indices

S 河 COD_{Mn} 质量浓度范围为 1.63~2.43 mg/L, 中游质量浓度高于上、下游, BOD₅ 质量浓度范围为 1.8~2.2 mg/L, COD 质量浓度范围为 8.67~10.33 mg/L, F⁻ 质量浓度在 0.66~0.89 mg/L 变化, BOD₅、COD、F⁻ 质量浓度空间差异不大, 挥发酚质量浓度范围为 0.004 8~0.031 7 mg/L, As 质量浓度在 0.005 mg/L 上

下波动,S3 断面质量浓度最高,粪大肠菌浓度范围为 845~3 450 L⁻¹,下游浓度明显高于上游,整体上,S 河各水质指标质量浓度沿程变化不大,较稳定.综上,K 河在空间尺度上,污染物质量浓度整体呈现“V”型波动趋势,除 K1 断面外,其余断面水质指标质量浓度起伏较小,西南沿岸河流污染物质量浓度较高;S 河污染物质量浓度沿程变化较为平稳.总体上 K 河污染物质量浓度高于 S 河.

3.2 评价结果分析

选取水质监测断面的溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、总磷、氨氮、氟化物、砷、挥发酚及粪大肠菌 10 项主要污染指标,采用 2021 年河流各断面水质监测值进行水质现状评价.

3.2.1 单因子评价法结果

以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》为评价依据,采用单因子评价法对各断面水质进行了分析.图 3 为单因子指数法对河流主要水质因子超标倍数评价结果,若污染指数 $P_i > 1$,表明该水质指标劣于规定的水质标准(Ⅳ类).从水质指数值看,K 河在 K1 点位 NH₃-N、TP、BOD₅、COD、挥发酚、COD_{Mn}均出现不同程度的超标,水质指标超标数量最多,河流污染最严重,水体中挥发酚、TP 的单因子污染指数值高达 6.46、6.00.F⁻污染主要出现在 K4 断面,超标 1.5 倍,其余断面均未超标;而 K2、K3 断面水质指标出现超标现象较少,除挥发酚超标外,其余指标均达到Ⅳ类水质标准.总的来说,K 河水质污染的主要原因为挥发酚、TP 及 COD_{Mn}超标,其次为 BOD₅、COD 超标.所有点位中,K2、K5、K7、K8 的水质相对较好,K1、K4 和 K6 点位的水质相对较差.S 河 S1、S2 监测断面 NH₃-N 污染指数分别为 1.22、1.11,挥发酚污染指数分别为 1.15、3.17,DO、COD_{Mn}、COD、BOD₅ 及 TP 等指标均未超标,说明水体中可生物降解的有机物污染并不严重.

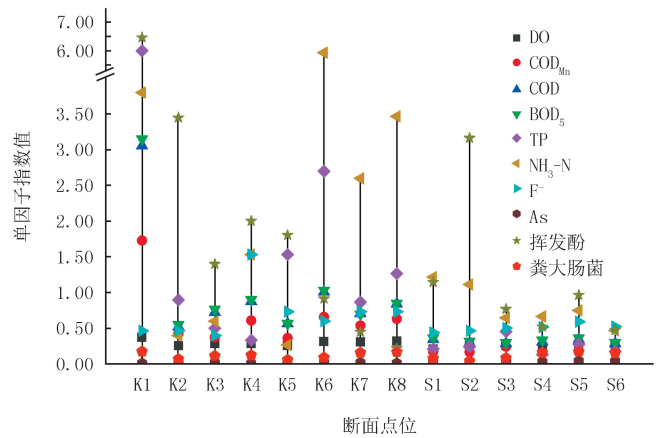


图3 单因子指数值

Fig.3 Single-factor index value

由表 1 可知,K 河各断面水质均为 V 类水,As、粪大肠菌、DO、COD_{Mn}均处于地表水Ⅳ类标准及以上,NH₃-N、挥发酚及 TP 为单因子评价结果的决定性因子.S 河各监测点除 S1、S2 均处于Ⅳ类水体及以上,NH₃-N 及挥发酚为决定性因子.

表 1 河流单因子评价结果

Tab. 1 Single factor evaluation results of the rivers

| 指标 | K 河断面监测点 | | | | | | | | S 河断面监测点 | | | | | |
|--------------------|----------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----------|----|-----|-----|-----|-----|
| | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
| DO | I | II | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I |
| COD _{Mn} | V | III | II | IV | II | IV | III | IV | I | I | II | I | I | I |
| COD | V | III | IV | IV | III | V | IV | IV | I | I | I | I | I | I |
| BOD ₅ | V | III | IV | IV | III | V | IV | IV | I | I | I | I | I | I |
| TP | V | IV | III | II | V | V | IV | V | II | II | III | II | II | II |
| NH ₃ -N | V | III | III | V | II | V | V | V | V | V | III | III | IV | III |
| F ⁻ | I | I | I | V | I | I | IV | IV | I | I | I | I | I | I |
| AS | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I | I |
| 挥发酚 | V | V | V | V | V | IV | III | III | IV | V | IV | IV | IV | III |
| 粪大肠菌 | III | II | III | III | II | II | III | III | II | II | II | III | III | III |
| 评价结果 | V | V | V | V | V | V | V | V | V | V | IV | IV | IV | III |

3.2.2 综合污染指数评价结果

2 条河流各断面点位综合污染指数如图 4 所示.K 河各断面综合污染指数为 2.52、0.71、0.52、0.82、0.62、1.33、0.71、0.85,水质从优到劣依次为 $K3 > K5 > K7 = K2 > K4 > K8 > K6 > K1$.根据水质级别得出,K1、K6 水质污染较严重,其余断面点位为中度污染,这表明 K 河水水质整体污染较严重;S 河污染综合指数为 0.29~0.61,根据水质分级标准,S2 断面为中度污染,S3、S4、S5、S6 断面较为清洁,表明 S 河水水质整体较好.

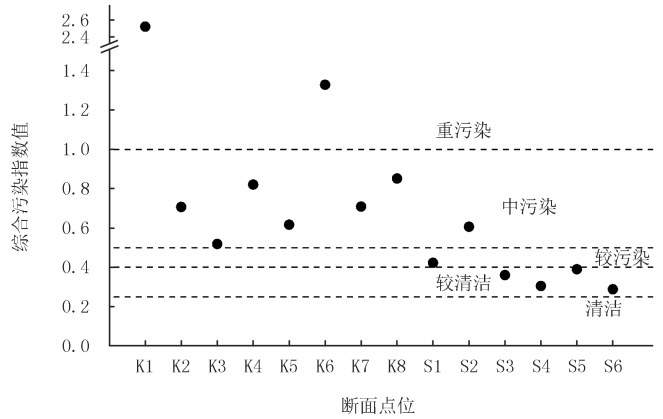


图4 各断面点位综合污染指数

Fig.4 Comprehensive pollution index values

进一步利用综合污染指数计算污染负荷贡献率,计算结果见图 5.K 河断面点位水质指标中,DO、COD_{Mn}、COD、BOD₅、TP、NH₃-N、F⁻、As、挥发酚、粪大肠菌的平均贡献率分别为 4.34%、7.62%、10.02%、9.88%、12.23%、36.68%、10.35%、0.28%、6.35%、2.26%,说明挥发酚、NH₃-N、TP、COD、BOD₅ 对 K 河水水质影响最大,其次为 F⁻、COD_{Mn}、DO,其他指标对水质的影响较小.K 河中下游 TP、NH₃-N 超标的主要原因有:周边为村庄和新建农村社区,人口密集,未建设污水管网,生活污水直接排入河道.中下游区域污染来源主要是生活污水和农田施肥,主要受人类活动影响,生活污水排放量显著增加,因此河流下游 TP、NH₃-N 超标严重.除生活污水排放外,生活垃圾也是非点源污染的主要来源之一.人为活动产生较多的垃圾堆放在中下游河道两侧,暴雨后也会成为非点源污染物的重要组成部分^[27].S 河平均贡献率最大的为挥发酚、NH₃-N 及 F⁻,贡献率依次为 26.51%、20.42%、13.71%.BOD₅、COD、TP、DO、COD_{Mn} 污染贡献率次之,说明挥发酚、NH₃-N 及 F⁻ 对 S 河水水质有较大的影响.

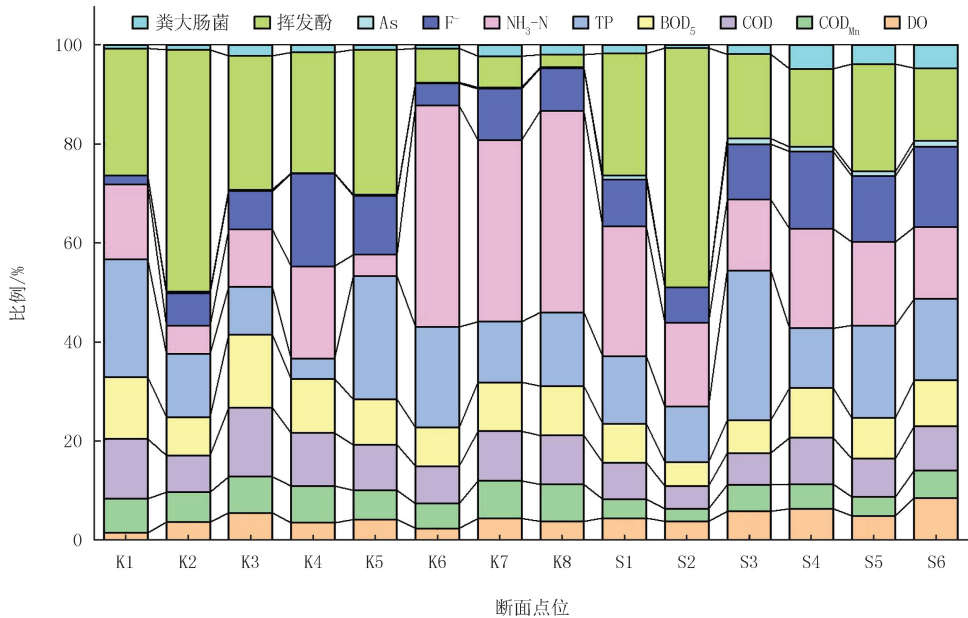


图5 综合污染指数法中河流各位点污染物的贡献率

Fig.5 Contribution rate of pollutants at each point in the river in the comprehensive pollution index method

3.2.3 水质标识指数评价结果

河流水质标识指数的结果见表 2.所有断面综合水质标识指数 I_{wq} 均小于 7.0,因此本研究中的 2 条河流均未形成黑臭.各监测断面水质综合水质标识指数最小值为 2.700,水质类别最优为 II 类,综合水质标识指数

最大值为 5.561,水质类别为 V 类.K 河 III 类水质共有 4 个点位,IV 类水质共有 3 个点位,V 类水质共有 1 个点位.K1 断面的综合标识指数最大,K 河断面水体污染程度由高到低依次为 K1、K6、K8、K4、K7、K5、K3、K2,除 K1 断面,其余断面水质均在 IV 类水质范围内.S 河 S2~S6 断面综合水质标识指数在 $2.0 < X1.X2 \leq 3.0$,水质判定类别都为 II 类水质,S1 综合水质指数最大为 3.020,属于 III 类水质.

表 2 综合水质标识法评价结果

Tab. 2 Evaluation results of comprehensive water quality identification method

| 断面点位 | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 综合水质标识指数 | 5.561 | 3.310 | 3.410 | 4.030 | 3.420 | 4.640 | 3.910 | 4.120 | 3.020 | 2.920 | 2.800 | 2.700 | 2.900 | 2.700 |
| 水质类别 | V 类 | III 类 | III 类 | IV 类 | III 类 | IV 类 | III 类 | IV 类 | III 类 | II 类 | II 类 | II 类 | II 类 | II 类 |

3.2.4 模糊综合评价过程及结果

河流各断面评价因子的权重结果见附录表 S1,采用超标倍数赋权法归一化计算各个评价因子的权重值,经过归一化处理后的权重计算结果见附录表 S2.

2 条河流断面的模糊关系矩阵为:

$$R_{K1} = \begin{bmatrix} 0.87 & 0.13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.39 & 0.61 \\ 0 & 0.81 & 0.19 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R_{K2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.87 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0.86 & 0.14 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.73 & 0.27 \\ 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

同方法可求出其余断面模糊关系矩阵,在此不逐一列出.

经过计算,得出 2 条河流各监测断面的模糊综合评价的结果(表 3),并采用最大隶属度原则确定河流断面水质类别.K 河 K1、K4~K8 监测断面综合水质类别均为 V 类水,K2 断面为 II 类水,K3 断面为 III 类水.S 河 6 个监测断面综合水质类别均为 I 类水.

表 3 模糊综合评价结果

Tab. 3 Fuzzy comprehensive evaluation results

| 河流断面 | I 类 | II 类 | III 类 | IV 类 | V 类 | 评价结果 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| K1 | 0.040 7 | 0.010 0 | 0.001 6 | 0.037 4 | 0.910 3 | V 类 |
| K2 | 0.184 4 | 0.312 8 | 0.138 4 | 0.304 4 | 0.060 0 | II 类 |
| K3 | 0.204 5 | 0.305 3 | 0.361 7 | 0.026 6 | 0.101 9 | III 类 |
| K4 | 0.065 5 | 0.070 8 | 0.087 9 | 0.315 5 | 0.460 3 | V 类 |
| K5 | 0.122 8 | 0.224 3 | 0.186 5 | 0.127 5 | 0.339 0 | V 类 |
| K6 | 0.078 6 | 0.006 6 | 0.046 7 | 0.156 7 | 0.711 4 | V 类 |
| K7 | 0.066 0 | 0.046 6 | 0.364 9 | 0.121 3 | 0.401 3 | V 类 |
| K8 | 0.053 0 | 0.023 9 | 0.214 6 | 0.147 7 | 0.560 7 | V 类 |
| S1 | 0.491 7 | 0.051 2 | 0 | 0.217 9 | 0.239 1 | I 类 |
| S2 | 0.417 2 | 0.044 5 | 0 | 0.384 4 | 0.153 9 | I 类 |
| S3 | 0.517 0 | 0.148 3 | 0.294 5 | 0.040 2 | 0 | I 类 |
| S4 | 0.619 3 | 0.061 8 | 0.316 6 | 0.002 3 | 0 | I 类 |
| S5 | 0.549 8 | 0.113 2 | 0.186 2 | 0.150 8 | 0 | I 类 |
| S6 | 0.664 6 | 0.196 3 | 0.139 1 | 0 | 0 | I 类 |

3.2.5 不同评价方法结果对比

总结评价结果可知,4种评价结果略微不同,主要是由于评价方法的原理及计算方式的不同所致.针对K河和S河的不同评价方法结果对比分别见表4和表5.

表4 K河4种评价方法结果对比

Tab. 4 Comparison of the results of four evaluation methods for River K

| 断面 | 单因子评价 | 综合污染指数评价 | 水质标识指数评价 | 模糊综合评价 | 断面 | 单因子评价 | 综合污染指数评价 | 水质标识指数评价 | 模糊综合评价 |
|----|-------|-----------|----------|--------|----|-------|-----------|----------|--------|
| K1 | V类 | 重污染(2.52) | V类 | V类 | K5 | V类 | 中污染(0.82) | Ⅲ类 | V类 |
| K2 | V类 | 中污染(0.71) | Ⅲ类 | Ⅱ类 | K6 | V类 | 重污染(1.33) | Ⅳ类 | V类 |
| K3 | V类 | 中污染(0.52) | Ⅲ类 | Ⅲ类 | K7 | V类 | 中污染(0.71) | Ⅲ类 | V类 |
| K4 | V类 | 中污染(0.82) | Ⅳ类 | V类 | K8 | V类 | 中污染(0.85) | Ⅳ类 | V类 |

表5 S河4种评价方法结果对比

Tab. 5 Comparison of the results of four evaluation methods for River S

| 断面 | 单因子评价 | 综合污染指数评价 | 水质标识指数评价 | 模糊综合评价 | 断面 | 单因子评价 | 综合污染指数评价 | 水质标识指数评价 | 模糊综合评价 |
|----|-------|-----------|----------|--------|----|-------|-----------|----------|--------|
| S1 | V类 | 轻污染(0.42) | Ⅲ类 | I类 | S4 | Ⅳ类 | 较清洁(0.30) | Ⅱ类 | I类 |
| S2 | V类 | 中污染(0.61) | Ⅱ类 | I类 | S5 | Ⅳ类 | 较清洁(0.39) | Ⅱ类 | I类 |
| S3 | Ⅳ类 | 较清洁(0.36) | Ⅱ类 | I类 | S6 | Ⅲ类 | 较清洁(0.29) | Ⅱ类 | I类 |

比较分析表中4种水质评价结果可知:单因子评价法结果为K河8个断面水质均为V类水,S河S1、S2断面为V类水,S3~S5断面为Ⅳ类水,S6断面为Ⅲ类水,评价结果最差.这是因为单因子评价法采用最差的水质等级代表最终评价结果,相较于综合评价法,该方法评价结果较片面,且采用单因子评价法得出的同一类别的水质结果无法体现差异,如K河8个断面水质均为V类水,S河S1、S2断面均为V类水不能区分其差异.

综合污染指数法结果为K河水质从优到劣依次为K3、K5、K7、K2、K4、K8、K6、K1,其中K1、K6断面为重污染,其余断面为中污染.S河水质从优到劣依次为S6、S4、S3、S5、S1、S2,其中S1断面为轻污染,S2断面为中污染,其余断面较清洁.综合污染指数计算污染负荷贡献率表明, $\text{NH}_3\text{-N}$ (36.68%)、TP(12.23%)、COD(10.02%)对K河水质影响最大,挥发酚(26.51%)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (20.42%)、 F^- (13.71%)对S河水质有较大的影响.该方法能对每个断面的多个指标进行综合评价^[28],消除由于某些监测指标污染过于严重而产生的影响,并判断不同断面水质的优劣程度和计算污染负荷贡献率.综合污染指数法与单因子评价的结果也存在矛盾,如在单因子评价中,K1、K2断面水质为V类;而这两个断面的综合污染指数值为2.52、0.71,污染程度分别为重污染及中污染,进一步反映了水质污染的差异.

水质标识指数法结果为K1断面为V类水,K4、K6、K8断面为Ⅳ类水,K2、K3、K5、K7断面为Ⅲ类水.S河S1断面为Ⅲ类水,其余断面为Ⅱ类水.该方法是一种基于单因子指数法优化而来的,计算简便,不会因某个水质指标较差而否定综合水质,既能判断综合水质类别,细分类别的污染程度,说明水质达标情况,识别单因子水质达标个数,更进一步反映水质的污染状况,从定量和定性两个方面表达综合水质信息,便于比较与分析水质变化趋势.

模糊综合评价法结果为K河只有K2、K3断面为Ⅳ类水,其余断面处于V类水.S河6个断面均为I类水.该方法在考虑各项水质指标的基础上,全面分析了污染因子对河流的贡献程度及隶属度,不仅能判断出各断面的水质类别,也能反映指标占比情况.

综上,虽然评价方法存在差异,但4种方法均显示K河断面K2、K3断面水质较好,S河水质较清洁.

3.2.6 可靠性分析结果

不同的方法得到的水质结果有一定差异,为了确定哪种评价方法结果最为可靠,采用可靠性分析计算其结果,公式如下^[29]:

$$M = 0.5 + \sum_{i=1}^{n'} N_i W_i, \sum_{i=1}^{n'} W_i = 1.$$

M 为最终的水质评价结果; N_i 为第 i 种水质评价方法的结果; W_i 为第 i 种水质评价方法对应的权重。

根据不同评价方法的优缺点进行权重计算.单因子评价法采用最差的水质等级确定最终水质类别,评价结果偏差,赋予权重 W_1 ;水质标识指数法降低了评价指标最大值对最终结果的影响,赋予权重 W_2 ;模糊综合评价法考虑了评价指标的权重又考虑了两者之间的非线性关系,赋予权重 W_3 ,权重值需满足 $W_3 > W_2 > W_1$,确定最终权重 $W_3 = 0.45, W_2 = 0.4, W_1 = 0.15$.3 种评价方法与可靠性分析水质类型的比较如表 6 所示。

表 6 3 种评价方法与可靠性分析的水质类别的比较

Tab. 6 Comparison of water quality types between three assessment methods and reliability analysis

| 评价方法 | 等级相同 | 相差 1 个等级 | 相差 2 个等级 | 相差 3 个等级 | 相差 4 个等级 |
|---------|------|----------|----------|----------|----------|
| 单因子评价法 | 6 | 2 | 5 | 1 | 0 |
| 水质标识指数法 | 8 | 4 | 2 | 0 | 0 |
| 模糊综合评价法 | 6 | 7 | 1 | 0 | 0 |

由表 6 可知,水质标识指数法的评价结果与可靠性分析的水质类型的一致性程度最高。

4 结论与建议

(1)2 条河流水质总体处于良好水平.K 河 TP 质量浓度为 $0.4 \sim 8.9$ mg/L,超过地表水 IV 类限值的点位占 50%,对比 K 河和 S 河的水质情况可知,K 河 COD_{Mn} 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 BOD_5 、COD 的监测结果均值要显著高于 S 河,说明 K 河流污染更严重,需着重治理.K 河上游水质提升在于降低挥发酚质量浓度,中下游需着重考虑 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等水质指标;整体来看,S 河水体中 F^- 、挥发酚等化学污染含量较少。

(2)中小河流两岸环境条件复杂,沿岸多分布着城镇、村庄和农田,沿岸农村生活污水及生活垃圾收集及处理能力有限,导致河流水质易受污染.其次,水资源不合理开发和长期存在的农业面源污染导致中小河流水质污染问题突出.针对中小河流的污染情况,地区应完善污水管网系统,提高污水处理能力,加强已建成污水处理设施的运行管理;明确中小河道管理范围;引导鼓励企业、居民等社会各界力量参与河流的治理保护。

(3)4 种评价方法得出的评价结果并不完全一致.其中,综合污染指数法虽然无法得到河流的水质类别,但通过计算污染负荷贡献率可知, $\text{NH}_3\text{-N}$ 对 K 河水质影响最大,挥发酚对 S 河水质有较大的影响.而水质标识指数法的评价结果与可靠性分析中的水质评价结果一致性最高,该方法得到的水质类别结果更加可靠。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2022.11.23.0001).

参 考 文 献

- [1] 刘彦龙,郑易安.黄河干流水质评价与时空变化分析[J].环境科学,2022,43(3):1332-1345.
LIU Y L,ZHENG Y A.Water quality assessment and spatial-temporal variation analysis in Yellow River Basin[J].Environmental Science,2022,43(3):1332-1345.
- [2] 邱青彬,杨玉秀,牛梦姣,等.基于 GIS 的河南省沿黄区域农业面源污染分析[J].河南农业大学学报,2023,57(4):558-569.
QIU Q B,YANG Y X,NIU M J,et al.GIS-based analysis of agricultural non-point source pollution in regions along the Yellow River in Henan Province[J].Journal of Henan Agricultural University,2023,57(4):558-569.
- [3] 张彦,梁志杰,邹磊,等.黄河干流及主要支流水质时空差异性及其变化特征研究[J].灌溉排水学报,2021,40(9):125-133.
ZHANG Y,LIANG Z J,ZOU L,et al.Spatiotemporal variation in water quality in the Yellow River Basin[J].Journal of Irrigation and Drainage,2021,40(9):125-133.
- [4] SU Y,LI W,LIU L,et al.Health assessment of small-to-medium sized rivers:Comparison between comprehensive indicator method and biological monitoring method[J].Ecological Indicators,2021,126:107686.
- [5] BROWNE M A,CRUMP P,NIVEN S J,et al.Accumulation of microplastic on shorelines worldwide:sources and sinks[J].Environmental Science & Technology,2011,45(21):9175-9179.
- [6] 张红武,赵晨苏,冯长松,等.中小河流水质监测调控治理方案研究[J].人民黄河,2018,40(11):74-77.
ZHANG H W,ZHAO C S,FENG C S,et al.Small and medium-sized river water quality monitoring and control plan[J].Yellow River,

2018,40(11):74-77.

- [7] 温泉,马迎群,秦延文,等.成渝地区中小河流水生态环境保护存在的问题与对策[J].环境工程技术学报,2022,12(2):493-499.
WEN Q, MA Y Q, QIN Y W, et al. Problems and countermeasures for water ecological environment protection of small and medium-sized rivers in Chengdu-Chongqing area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(2): 493-499.
- [8] 刘贤梅,周忠发,张昊天,等.基于主成分分析的喀斯特山区河流水质评价及水质时空特征分析:以贵州省张维河为例[J].环境工程,2019,37(10):49-54.
LIU X M, ZHOU Z F, ZHANG H T, et al. Assessment of water quality and its spatial and temporal characteristics of rivers in Karst Mountain area based on principal component analysis: a case study on Zhangwei River in Guizhou Province[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(10): 49-54.
- [9] 田海兰,程林,刘西汉,等.基于水质标识指数法的秦皇岛市河流水质评价[J].中国农村水利水电,2019(9):100-105.
TIAN H L, CHENG L, LIU X H, et al. Application of water quality identification index in water quality evaluation of rivers in Qinhuangdao[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(9): 100-105.
- [10] 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.
- [11] 王学泽,朱长军,张普,等.基于GPCA和CCME-WQI方法的保山市东河水质分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2023,51(3):73-81.
WANG X Z, ZHU C J, ZHANG P, et al. Analysis of water quality of Donghe River in Baoshan City based on GPCA and CCME-WQI methods[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2023, 51(3): 73-81.
- [12] 郭鼎,王丑明,黄代中,等.洞庭湖水污染特征及水质评价[J].环境化学,2019,38(1):152-160.
GUO J, WANG C M, HUANG D Z, et al. Pollution characterization and water quality assessment of Dongting Lake[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(1): 152-160.
- [13] 杨浩,张国珍,杨晓妮,等.基于模糊综合评判法的洮河水环境质量评价[J].环境科学与技术,2016,39(S1):380-386.
YANG H, ZHANG G Z, YANG X N, et al. Comprehensive evaluation on water environment quality of the Tao River based on fuzzy comprehensive method[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S1): 380-386.
- [14] 王竹,朱士江,刘扬,等.不同水质评价方法在滦河下游段的比较应用[J].节水灌溉,2019(10):68-72.
WANG Z, ZHU S J, LIU Y, et al. Comparative application of different water quality evaluation methods in the downstream section of Luanhe River[J]. Water Saving Irrigation, 2019(10): 68-72.
- [15] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002
- [16] 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.
- [17] 宁阳明,尹发能,李香波.几种水质评价方法在长江干流中的应用[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(12):126-133.
NING Y M, YIN F N, LI X B. Application of several evaluation methods for river water quality in the Yangtze River mainstream[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2020, 42(12): 126-133.
- [18] 李慧明,候林丽,徐鹏.不同水质指数法在峡江水库水质评价中的应用[J].人民长江,2020,51(S2):32-36.
LI H M, HOU L L, XU P. Application of different water quality index methods in water quality evaluation of Xiajiang Reservoir[J]. Yangtze River, 2020, 51(S2): 32-36.
- [19] 徐祖信.我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(4):482-488.
XU Z X. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(4): 482-488.
- [20] 董春燕,周涛涛,李君轶,等.基于模糊综合评价的长江中游水质分析[J].淡水渔业,2021,51(2):55-62.
DONG C Y, ZHOU Y T, LI J Y, et al. Water quality analysis of the Middle Yangtze River based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(2): 55-62.
- [21] 饶永才,袁媛,孙挺,等.京杭运河(徐州段)水质评价及污染源分析[J].复旦学报(自然科学版),2021,60(5):596-606.
RAO Y C, YUAN Y, SUN T, et al. Water quality assessment and pollution source analysis of Xuzhou section of Beijing-Hangzhou canal[J]. Journal of Fudan University(Natural Science), 2021, 60(5): 596-606.
- [22] 刘娇妹,马莉萍,张婷,等.黄河流域(河南段)河流水质及有机物分布特征[J].铁道建筑技术,2022(12):212-216.
LIU J M, MA L P, ZHANG T, et al. Distribution characteristics of water quality and organic matter in the Yellow River Basin(Henan section)[J]. Railway Construction Technology, 2022(12): 212-216.
- [23] 夏祖伟,杨平,朱勃,等.城市内河生态环境治理规划及措施研究[J].人民黄河,2020,42(10):81-85.
XIA Z W, YANG P, ZHU Q, et al. Study on planning and measures of urban river ecological environment management[J]. Yellow River, 2020, 42(10): 81-85.
- [24] 郑秋生.郑州市上街区水功能区纳污能力分析研究[J].水资源开发与管理,2020,18(5):61-64.

- ZHENG Q S. Analysis and research on the capacity of water function zone in Shangjie district, Zhengzhou city[J]. *Water Resources Development and Management*, 2020, 18(5): 61-64.
- [25] 王嘉学,刘丛强,王锐良.滇池及入湖河道富营养化治理的人工辅助增氧[J]. *地球与环境*, 2008, 36(2): 183-187.
WANG J X, LIU C Q, WANG R L. Study on the artificial auxiliary aerobics for controlling the eutrophication of lake Dianchi and its tributaries[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(2): 183-187.
- [26] 李典宝,张玮,王丽卿,等.2013年上海市河流秋季水质空间分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, 31(1): 50-58.
LI D B, ZHANG W, WANG L Q, et al. Characteristics of spatial distribution of water quality in rivers of Shanghai in autumn 2013[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(1): 50-58.
- [28] 陈融旭,韩冰,张展硕,等."7.20"暴雨对黄河干流河南段水文水质影响及应对措施分析[J]. *中国农村水利水电*, 2022(11): 159-164.
CHEN R X, HAN B, ZHANG Z S, et al. Influence of "7.20" rainstorm on hydrology and water quality in Henan section of the main stream of the Yellow River and its countermeasures[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(11): 159-164.
- [28] 逯林方,王辉辉,胡亚伟,等.赵口引黄灌区二期工程区域地表水水质评价[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(9): 117-124.
LU L F, WANG H H, HU Y W, et al. Surface water quality in second-phase Zhaokou Yellow River irrigation district project[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(9): 117-124.
- [29] 时雯雯,周金龙,曾妍妍,等.新疆乌鲁木齐城市群地下水多重水质评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(2): 109-116.
SHI W W, ZHOU J L, ZENG Y Y, et al. Multiple groundwater quality evaluation of Urumqi-Changji-Shihezi city agglomeration in Xinjiang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(2): 109-116.

Comparative study on water quality assessment of small and medium-sized rivers in the Yellow River Basin

Shi Chenxue^{1,2}, Liu Qingqing¹, Yang Yanxia³, An Dongmei³, Liu Yue¹, Zu Guofeng⁴

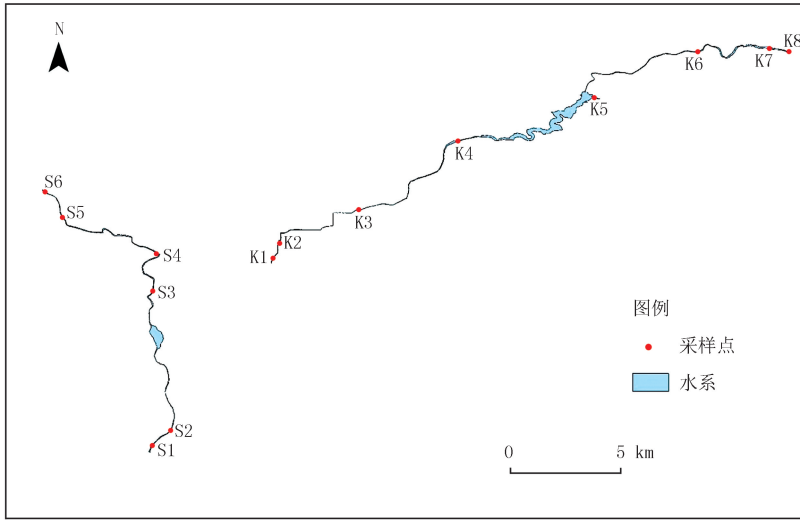
(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Xinyang Branch of Zhengzhou Ecological Environment Bureau, Zhengzhou 450000, China; 4. Soil-Groundwater Pollution Control and Remediation Industry Alliance, Beijing 100020, China)

Abstract: There are many small and medium-sized rivers in China, and the drainage area covers 85% of the towns and vast rural areas of the country. They play critical roles as both water resources for human uses and receiving water bodies for wastewater discharge. The water quality evaluations of the small and medium-sized rivers can assist assessing water environment quality and developing water pollution prevention and control action plans. In this study, two typical small and medium-sized rivers in Henan Province within the Yellow River Basin were investigated through four evaluation methods: single factor evaluation, comprehensive pollution index, water quality identification index and fuzzy comprehensive evaluation. The feasibility of these four methods in water quality evaluation was also discussed. The physicochemical indices monitored in these two rivers revealed that the contents of those indicators of $\text{NH}_3\text{-N}$, volatile phenol, and TP were accumulated significantly. The evaluation results of water quality identification index method are the most consistent with the results of water quality evaluation in reliability analysis, and the results of water quality category obtained by this method are more reliable.

Keywords: small and medium-sized river; single-factor assessment method; comprehensive pollution index; water quality identification index; fuzzy comprehensive evaluation

[责任编辑 刘洋 杨浦]

附 录



图S1 研究区域采样点示意图

Fig.S1 Distribution of sampling points in the study area

表 S1 各评价因子的权重

Tab. S1 Weights of each evaluation factor

| 因子 | DO | BOD ₅ | COD _{Mn} | NH ₃ -N | TP | COD | F ⁻ | As | 挥发酚 | 粪大肠菌 |
|----------------|---------|------------------|-------------------|--------------------|---------|----------|----------------|---------|---------|--------|
| \bar{S}_{0i} | 4.700 0 | 5.200 0 | 7.400 0 | 1.030 0 | 0.204 0 | 24.000 0 | 1.200 0 | 0.070 0 | 0.023 8 | 14 440 |

表 S2 各评价参数的权重归一化结果

Tab. S2 Weights of each evaluation parameters

| 断面 | 评价因子 | | | | | | | | | |
|----|---------|------------------|-------------------|--------------------|---------|---------|----------------|---------|---------|---------|
| | DO | BOD ₅ | COD _{Mn} | NH ₃ -N | TP | COD | F ⁻ | AS | 挥发酚 | 粪大肠菌 |
| K1 | 0.022 7 | 0.128 2 | 0.082 5 | 0.195 2 | 0.311 2 | 0.134 8 | 0.020 6 | 0.000 4 | 0.095 8 | 0.008 7 |
| K2 | 0.089 0 | 0.097 3 | 0.088 5 | 0.089 3 | 0.203 0 | 0.100 3 | 0.089 5 | 0.005 9 | 0.222 3 | 0.014 9 |
| K3 | 0.103 0 | 0.153 2 | 0.088 2 | 0.151 3 | 0.127 3 | 0.156 6 | 0.086 6 | 0.004 3 | 0.101 9 | 0.027 6 |
| K4 | 0.064 5 | 0.112 7 | 0.089 4 | 0.242 3 | 0.053 2 | 0.118 9 | 0.208 0 | 0.000 9 | 0.091 3 | 0.018 8 |
| K5 | 0.084 7 | 0.095 4 | 0.071 6 | 0.056 7 | 0.329 0 | 0.103 4 | 0.133 8 | 0.002 7 | 0.110 7 | 0.012 1 |
| K6 | 0.034 2 | 0.066 7 | 0.049 9 | 0.483 7 | 0.222 3 | 0.070 7 | 0.042 0 | 0.001 9 | 0.021 5 | 0.007 2 |
| K7 | 0.063 0 | 0.085 6 | 0.077 3 | 0.401 3 | 0.135 1 | 0.094 1 | 0.097 1 | 0.003 0 | 0.020 0 | 0.023 5 |
| K8 | 0.051 7 | 0.084 1 | 0.073 4 | 0.432 9 | 0.159 7 | 0.090 4 | 0.078 6 | 0.001 3 | 0.007 9 | 0.019 9 |
| S1 | 0.112 9 | 0.085 8 | 0.048 4 | 0.359 3 | 0.063 0 | 0.087 3 | 0.111 5 | 0.011 6 | 0.097 7 | 0.022 4 |
| S2 | 0.103 0 | 0.066 6 | 0.041 1 | 0.295 7 | 0.065 6 | 0.068 4 | 0.106 4 | 0.000 0 | 0.242 5 | 0.010 7 |
| S3 | 0.128 8 | 0.079 6 | 0.075 6 | 0.216 3 | 0.154 0 | 0.083 0 | 0.144 9 | 0.016 4 | 0.074 4 | 0.027 1 |
| S4 | 0.142 5 | 0.100 1 | 0.057 5 | 0.253 0 | 0.051 1 | 0.101 3 | 0.168 5 | 0.011 2 | 0.057 3 | 0.057 7 |
| S5 | 0.120 1 | 0.092 4 | 0.050 2 | 0.238 9 | 0.089 2 | 0.094 0 | 0.161 9 | 0.012 5 | 0.088 7 | 0.052 2 |
| S6 | 0.158 0 | 0.096 5 | 0.067 8 | 0.191 0 | 0.072 9 | 0.100 6 | 0.182 7 | 0.015 9 | 0.055 6 | 0.058 9 |