DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.007

贾鲁河郑州段水质评价和污染源解析

刘修英[1,2],黄功学[1,2],郑志宏[1,2],高镜清[3],朱崇梅[1,2]

(1. 河南水利与环境职业学院,河南 郑州 450008; 2. 河南省湖库水生态环境保护与修复工程实验室,河南 郑州 450008; 3. 郑州大学生态与环境学院,河南 郑州 450001)

摘要:2016 年 7 月(有引水)和 9 月(无引水)分别对郑州贾鲁河水系 9 个断面进行了采样分析,采用综合水质标识指数法和因子分析法分别进行水质评价和污染来源分析。结果表明,贾鲁河郑州段上游水库综合水质为Ⅱ类或Ⅲ类,中游湖泊水质为Ⅳ类,下游为Ⅳ~劣Ⅴ类;索须河和七里河水质分别为劣Ⅴ类和劣Ⅴ类并黑臭;通过杨桥干渠向贾鲁河引黄补水只能暂时改变最近受水区的水质,对出郑州断面水质无明显影响。2 个因子可解释 5 个水质指标的信息;在干流下游和支流,第一污染因子代表性指标 TN、TP、NH_4^+-N 主要与市政污水处理厂排水相关,第二污染因子代表性指标 COD_{Cr}和 COD_{Mn}主要与未处理污水相关;贾鲁河上、中游主要为面源性和内源性污染。

关键词:水质评价;污染源解析;综合水质标识指数法;因子分析;贾鲁河;郑州

中图分类号:X824 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)04-0040-07

Water quality evaluation and pollution source apportionment to Zhengzhou section of Jialu River//LIU Xiuying[1,2], HUANG Gongxue[1,2], ZHENG Zhihong[1,2], GAO Jingqing[3], ZHU Chongmei[1,2] (1. *Henan Water Conservancy and Environment Vocational College*, *Zhengzhou* 450008, *China*; 2. *Henan Engineering Laboratory of Lake & Reservoir Water Ecological Protection and Remediation*, *Zhengzhou* 450008, *China*; 3. *College of Ecology and Environment*, *Zhengzhou University*, *Zhengzhou* 450001, *China*)

Abstract: Water samples were collected and analyzed respectively at nine sampling sites along Zhengzhou section of Jialu River in July (water diversion time) and in September (no water diversion time), and then comprehensive water quality identification index method and factor analysis were applied for the evaluation of water quality and apportionment of pollution sources respectively. The results showed that the comprehensive water quality of the upper reaches of the Zhengzhou section of the Jialu River was of level II or III, the water quality of the mid-stream Lakes was classified as IV level, and the downstream water quality was classified as IV to worse than V level; the water quality of Suoxu River and Qili River were worse than V level, worse than V level and black smelly water, respectively. Water diversion from Yellow River to the Jialu river through Yangqiao main canal can only change the water quality of the nearest receiving area temporarily, with no obvious impact on the water quality of Zhengzhou section. Two factors can explain the information of 5 water quality indicators. In the lower reaches of the main stream and the tributaries, the representative indices TN, TP, NH_4^+-N of the first pollution factor are mainly related to the drainage of the municipal sewage treatment, while the representative indexes of the second pollution factor, COD_{Cr} and COD_{Mn}, are mainly related to the untreated sewage. The pollution of upper and middle reaches of the Jialu River are mainly non-point source pollution and endogenous pollution.

Key words: water quality evaluation; pollution source apportionment; comprehensive water quality identification index method; factor analysis; Jialu River; Zhengzhou City

水质评价和污染源解析是河流有效管理和污染防治的基础工作[1]。在常见的水质评价方法中,单因子评价法不能反映水体综合情况,污染指数法不能评出水质类别,模糊数学法、灰色系统评价法、层次分析法、神经网络法对劣Ⅴ类水质评价结论偏保守[2]。综合水质标识指数法能对Ⅰ~Ⅴ类和劣Ⅴ类水做出合理的定性和定量评价,在我国水环境研究中常用于综合水质及水质时空变化评价[3-5]。因

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(14B610015)

作者简介:刘修英(1964—),女,副教授,博士,主要从事水环境监测与生态修复研究。E-mail: lxy7310@163.com

子分析可将多个水质指标转化为几个综合因子，避免信息损失，还可根据研究区域因子载荷得分识别污染因子的空间分布规律[6]，自此广泛应用于国内外水环境污染源解析[7-8]。

贾鲁河是淮河流域最大污染河流之一，而贾鲁河郑州段污染物排入量约占整条贾鲁河污染物的81%[9]，贾鲁河郑州段综合治理被列为淮河流域治理的重点。有关贾鲁河郑州段的研究主要偏重于重金属[10]、内分泌干扰物[11]、多环芳烃[12]、生态系统健康[13]的评估及中牟陈桥断面污染状况的分析[14]，鲜见针对各控制单元水质评价和污染源的研究。引黄补水是解决贾鲁河郑州段基流匮乏和水质污染的常用手段，于鲁冀等[15]研究了贾鲁河的生态基流计算方法。引水后受水区水质评价有助于找出引水方案存在问题及优化引水方案[16]。基于贾鲁河陈桥断面 TN、TP 和 NH_4^+-N 质量浓度在 6—9 月高温季节最低且年内变化较小[17]，笔者于 2016 年 7 月（有引水）和 9 月（无引水）对郑州贾鲁河水系 9 个采样点分别进行了两次采样和分析，采用综合水质标识指数法和因子分析法进行水质评价和污染源解析，以期为贾鲁河郑州段的污染防治提供参考。

1 研究区概况

贾鲁河郑州段位于郑州贾鲁河水系（图 1），介于东经 113°34′24″～114°06′33″、北纬 34°40′53″～34°41′32″之间，包括贾鲁河干流、常庄水库、索须河、七里河。贾鲁河属于淮河二级支流，发源于河南省新密市，由郑州市西南部蜿蜒而下，从中牟县出郑州，至周口市汇入沙颍河。贾鲁河郑州段长 137 km，流域面积 2750 km^2。郑州市城区河流皆为贾鲁河支流，常庄水库位于贾鲁河支流贾峪河的中下游，七里河和索须河是贾鲁河郑州段两个最大支流。根据

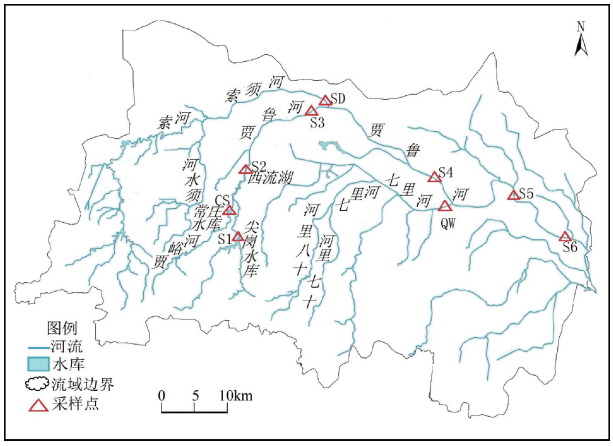

图 1 郑州贾鲁河水系及采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites of Jialu River system in Zhengzhou

《河南省水环境功能区划》（豫环 2006），贾鲁河郑州段划分为 3 段：上段为水源至尖岗水库出口，为Ⅱ类水质；中段尖岗水库出口至西流湖南阳坝，为Ⅲ类水质；下段南阳坝至郭辛庄，为Ⅳ类水质。贾鲁河源头泉水早已干枯，在西流湖以下沿途接收郑州市排水为水源。2014—2016 年，郑州实施了水生态文明建设试点工程，对城区大部分河道进行了截污和清淤，并向贾鲁河水系间歇式引入黄河水[18]，贾鲁河的水质有所改善，但距离郑州市规划的“水清岸绿、鸟鸣鱼戏、人水和谐”的景观河流目标还差很远。

2 研究方法

2.1 采样点布设

根据 SL219—2013《水环境监测规范》和《河南省水环境功能区划》（豫环 2006），在郑州贾鲁河水系设 9 个采样点（图 1），其中，贾鲁河干流设 6 个采样点：尖岗水库（S1）、西流湖南阳坝（S2）、中州大道断面（S3）、郑开大道断面（S4）、中牟水文站断面（S5）、中牟陈桥断面（S6）；支流设 3 个采样点：常庄水库（CS）、索须河的大河路断面（SD）和七里河的万三公路断面（QW）。S1、CS、S2 位于贾鲁河郑州饮用水源区，S3、S4、QW 位于贾鲁河郑州排污控制区，S5、S6 和 SD 分别位于贾鲁河郑州中牟农业用水区、贾鲁河中牟排污控制区、荥阳郑州过渡区。

2.2 水样采集与分析方法

水样采集时间为 2016 年 7 月 8—10 日和 9 月 16—18 日。水样采集后带回实验室立即分析，当天不能分析的置于 4 ℃冰箱保存，待次日分析。7 月采样时，杨桥干渠正向贾鲁河输入黄河水。

水质分析根据 HJ-T91—2002《地表水和污水监测技术规范》进行，采用纳氏试剂光度法测定氨氮（NH_4^+-N）、碱性过硫酸钾消解-紫外光度法测定总氮（TN）、钼酸盐光度法测定总磷（TP）、酸性法测定高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、重铬酸钾法测定化学需氧量（COD_{Cr}）质量浓度。

2.3 综合水质及其时空变化评价方法

水质评价和水质时空变化评价采用综合水质标识指数法，该法以 GB 3838—2002《地表水质量标准》和单因子标识指数为基础，综合评价水质级别、功能区目标达标状况、水质时空变化程度。

2.3.1 综合水质标识指数计算方法

综合水质标识指数（I_{WQ}）由整数位和 3 位小数排列构成，结构式为：$R_1.R_2R_3R_4$，其中 R_1、R_2、R_3 和 R_4 分别表示综合水质级别、水质判断为该等级的隶

属度、未达到水环境功能区目标的单因子水质指标个数、综合水质级别劣于水环境功能区划目标几个等级。综合水质级别标识指数 G 的计算公式[19]为

$$G = \frac{1}{m}\sum_{i-1}^{m} P'_i \quad (1)$$

其中 $$P'_i = 6 + \frac{\rho_i - \rho'_{iu}}{\rho''_{iu}}$$

式中：m 为参加评价的水质指标个数；P'_i为参与评价的单因子标识指数前两位数 r_1 和 r_2，当水质为 Ⅰ ~ Ⅴ 类时，r_1 为通过ρ_i 查 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》所获得的水质类别；$r_2 = \frac{(\rho_i - \rho'_{id})}{(\rho'_{iu} - \rho'_{id})} \times 10\%$，$\rho'_{iu}$、$\rho'_{id}$分别为污染物质量浓度 ρ_i 在 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中所对应的水质类别判断区间上、下限值。当水质为劣 Ⅴ 类时，P'_i按式（1）计算，小数点后保留一位数[20]。

2.3.2 综合水质级别及其时空变化评价方法

综合水质级别和水质时空变化评价按照表 1 进行。

表 1 水质级别及其时空变化评价标准

Table 1 Evaluation standard of grade and tempo-spatial variation of water quality

综合水质类别判定		水质时空变化判定		
G 值	水质类别	变化率范围		水质变化
		$\lvert T\rvert$/%	$\lvert S\rvert$/%	
[1,2]	Ⅰ类	≤10	≤10	基本不变
(2,3]	Ⅱ类	(10,20]	(10,20]	轻微变化
(3,4]	Ⅲ类	>20	>20	显著变化
(4,5]	Ⅳ类			
(5,6]	Ⅴ类			
(6,7]	劣Ⅴ类			
>7	劣Ⅴ类并黑臭			

水质随时间和空间变化程度分别根据水质时间变化率 T 和空间变化率 S 判断，T、S 的计算公式[21]为

$$T = \frac{G_{t1} - G_{t2}}{G_{t1}} \times 100\% \quad (4)$$

$$S = \frac{G_{S1} - G_{S2}}{G_{S1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：G_{t1}、G_{t2}分别为比较时间内起始时刻和终止时刻采样点综合水质级别标识指数；G_{S1}、G_{S2}分别为比较空间内起始断面和终止断面采样点综合水质级别标识指数。

2.4 污染源解析方法

污染源解析采用因子分析法。因子分析从原始变量的相关系数矩阵出发，通过降维找出少数几个不可观测的隐变量（因子），少量因子通常能揭示出隐含在原始变量之间的内部联系和重要信息，尤其是成因上（污染源）的联系，解释基于获得的旋转因子载荷、旋转特征值和采样点因子得分[22]。因子分析之前原数据经过 Z 标准化（Z-Score），以消除不同污染物浓度量程差异的影响[23]。

2.5 数据处理方法

数据处理采用 ArcGIS10.5 和 IBM SPSS Statistic19 软件。

3 结果与分析

3.1 采样点污染物质量浓度

7 月和 9 月采样点污染物质量浓度见表 2，各污染物质量浓度为 3 个平行样测定的平均值。

3.2 综合水质级别和水质时空变化评价

3.2.1 综合水质级别评价

表 3 为采样点综合水质评价结果，7 月除 S1、S4 综合水质类别达到水功能区划目标外，其余均超标；9 月所有采样点综合水质均超标。9 月水质与 7 月相比，S1、S4、S5 分别由 Ⅱ 类、Ⅳ 类、Ⅴ 类降为 Ⅲ 类、Ⅴ 类、劣 Ⅴ 类；S3 水质由劣 Ⅴ 类变为 Ⅴ 类；S2、CS、S5、S6、SD、QW 仍然为劣 Ⅴ 类，QW 仍黑臭。7 月采样点综合水质从优到劣顺序为：S1、CS、S4、S2、S5、SD、S3、S6、QW；9 月采样点综合水质从优到劣排序为：CS、S1、S2、S4、S3、S5、S6、SD、QW，除了 S4 外，干流水质从上游到下游逐步恶化，支流水质劣于干流。

表 2 采样点污染物质量浓度

Table 2 Pollutant concentrations of sampling sites mg/L

采样点	COD_{Mn}		TN		TP		NH_4^+-N		COD_{Cr}	
	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月	9 月	7 月	9 月
S1	3.47	4.78	1.19	1.39	0.028	0.048	0.18	0.18	10.0	15.4
CS	4.34	4.95	0.70	0.53	0.098	0.032	0.12	0.18	21.6	21.6
S2	4.93	6.74	2.39	1.61	0.116	0.098	0.54	0.19	20.5	22.1
S3	8.00	5.58	11.90	9.25	0.578	0.265	2.57	2.14	27.7	16.8
SD	12.19	15.70	5.19	6.77	0.586	0.590	1.69	4.00	66.1	62.3
S4	3.86	6.77	8.30	7.31	0.267	0.230	0.48	1.05	13.0	23.3
QW	8.92	7.13	18.00	19.80	1.226	0.925	5.29	5.45	46.2	31.8
S5	5.79	6.79	11.20	8.82	0.536	0.530	1.02	2.81	20.4	29.0
S6	7.46	7.55	11.80	9.31	0.521	0.480	1.88	2.53	33.9	32.4

表 3　采样点综合水质级别评价

Table 3　Determination of comprehensive water quality grades of sampling sites

采样点	水质目标	I_{WQ}		综合水质级别	
		7 月	9 月	7 月	9 月
S1	Ⅱ类	2.720	3.441	Ⅱ类	Ⅲ类
CS	Ⅱ类	3.541	3.341	Ⅲ类	Ⅲ类
S2	Ⅲ类	4.431	4.141	Ⅳ类	Ⅳ类
S3	Ⅳ类	6.632	5.521	劣Ⅴ类	Ⅴ类
SD	Ⅳ类	6.352	6.752	劣Ⅴ类	劣Ⅴ类
S4	Ⅳ类	4.210	5.211	Ⅳ类	Ⅴ类
QW	Ⅳ类	8.244	7.943	劣Ⅴ类并黑臭	劣Ⅴ类并黑臭
S5	Ⅳ类	5.821	6.332	Ⅴ类	劣Ⅴ类
S6	Ⅳ类	6.642	6.342	劣Ⅴ类	劣Ⅴ类

3.2.2　水质时空变化评价

表 4 显示,9 月水质与 7 月相比,采样点 S1 和 S4 皆明显恶化($|T|>20\%$),S3 有轻微改善($10\%<|T|<20\%$),而 CS、S2、SD、QW、S5、S6 变化不明显($|T|<10\%$)。尖岗水库(S1)是郑州市反季节调蓄备用水源,因为夏季用水高峰时库水被调用,9 月采样时水位比 7 月下降,加上夏季雨水带来的面源性污染,从而造成 9 月水质变差。7 月采样时贾鲁河采样点 S3 上游有城中村排水明渠截污施工,9 月采样时此排水口未见有水流入贾鲁河,也许造成了 9 月采样点 S3 水质比 7 月的稍微改善。7 月采样时位于 S4 上游杨桥干渠正在向贾鲁河引入黄河水,而 9 月采样时无此引黄补水,故 9 月 S4 水质比 7 月明显恶化,说明通过杨桥干渠向贾鲁河引黄补水只能当时改变最近受水河段水质。

表 4　采样点水质时空变化

Table 4　Temporal and spatial variations of water quality of sampling sites

采样点	G		T/%	S/%	
	7 月	9 月		7 月	9 月
S1	2.7	3.4	-25.9		
CS	3.5	3.3	5.7		
S2	4.4	4.1	6.8		
S3	6.6	5.5	16.7		
S4	4.2	5.2	-23.8	36.4	5.5
S5	5.8	6.3	-8.6	-38.1	-21.2
S6	6.6	6.3	4.5	-13.8	0.0
SD	6.3	6.7	-6.3		
DW	8.2	7.9	3.7		

选择贾鲁河干流下游采样点 S3—S6 段分析水质空间变化,原因是上游湖库(S1、S2)平常与贾鲁河下游隔离,CS、SD、QW 位于贾鲁河支流,故这 5 个采样点不参与水质空间变化分析。表 4 显示,采样点 S4 水质比 S3 在 7 月明显改善($S>20\%$),在 9 月无明显变化($S<10\%$)。无论 7 月或 9 月采样点 S5 水质比 S4 的均明显恶化($|S|>20\%$);而采样点 S6 水质比 S5 的在 7 月轻微恶化($10\%<|S|<20\%$),在 9 月没变化($S=0$)。

贾鲁河郑州段为典型基流匮乏型河流,除雨季外,水源主要为 6 个市政污水处理厂和工业排水,间歇式引黄补水。采样点 S3 ~ S4 段位于贾鲁河郑州市污染控制区,S3 的水源主要有位于郑州市西部的五龙口污水处理厂一级 B 排水(约 10 万 m^3/d),在 S3—S4 段先后汇入了污染较重的索须河水、陈三桥污水处理厂一级 A 排水(约 10 万 m^3/d)、马头岗污水处理厂水质较好的排水(约 60 万 m^3/d),各种水源混合后 S4 水质与 S3 水质相比一般变化不明显(9 月),但在 S3—S4 之间杨桥干渠进行引黄补水时(7 月),黄河水的稀释作用使 S4 比 S3 水质明显改善。S4—S5 段汇入大量七里河黑臭水,其中包括王新庄污水处理厂二级 B 排水(约 40 万 m^3/d)和南三环污水处理厂一级 A 排水(约 10 万 m^3/d),造成 S5 的水质比 S4 的水质无论 7 月或 9 月均明显恶化。采样点 S5—S6 段汇入了中牟县污水处理厂二级 B 排水(约 2.0 万 m^3/d)和少量农村生活污水,因上游黄河引水的稀释作用,7 月采样时采样点 S5 比 S6 污染稍轻,9 月采样二者无明显差别。由此说明,因大量王新庄污水处理厂出水汇入贾鲁河,通过杨桥干渠对贾鲁河进行引黄补水只能改善受水区一段水质,对 S5 和 S6 水质影响不明显。

郑州市是水源型缺水和水质型缺水并存的城市[24],引黄补水是郑州市水系连通不可缺的方法,根据郑州水务局公布数据,郑州每年向贾鲁河水系引黄补水约 1.2 亿 m^3。本研究发现,通过杨桥干渠引黄补水不能有效解决贾鲁河出郑州断面的劣Ⅴ类水质问题。建议加强贾鲁河受水区和黄河水源的水质、水量监测,按照贾鲁河目标水质科学计算需水量,合理调配引水量,提高贾鲁河引黄补水的生态效益和经济效益。

3.3　污染来源分析

将 7 月和 9 月水样污染物质量浓度分别进行因子分析适宜性检验,结果显示 KMO 值大于或等于 0.6,Bartlett 球形检验显著性相伴概率皆为 0,说明原变量都适合因子分析。采用方差最大化正交旋转,按照初始特征值大于 1 的原则抽取,皆获得两个公因子(表 5)。7 月因子 1 和因子 2 方差贡献率分别占 76.52% 和 20.18%,累积贡献率为 96.70%;9 月因子 1 和 2 方差贡献率分别为 71.95% 和 26.68%,累积贡献率为 98.63%。说明这两个公因子可以解释贾鲁河郑州段 5 个原始变量的基本信息。根据旋转后载荷得分可将因子载荷划分为强、中等和弱 3 级,对应的因子载荷得分绝对值分别为

大于 0.75、0.50 ~ 0.75 和 0.30 ~ 0.50；采样点载荷得分若为正，说明该采样点对因子总方差构成上有重要贡献，为负则贡献较弱。表 5 显示，7 月和 9 月 TN、TP 和 NH_4^+-N 在因子 1 上均有较高的载荷（相关系数大于 0.75），说明 TN、TP 和 NH_4^+-N 与因子 1 强烈相关，这 3 个营养盐为影响贾鲁河水质主要参数；而 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 在因子 1 上载荷得分较低（相关系数小于 0.5），但在因子 2 上均有较高载荷（相关系数大于 0.9），说明 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 与因子 2 强烈相关，与因子 1 关系较弱。

表 5　污染物旋转因子载荷

Table 5　Matrix of rotated factor loadings for Pollutant

水质指标	因子 1		因子 2	
	7 月	9 月	7 月	9 月
COD_{Mn}	0.323	0.147	0.934	0.982
TN	0.968	0.991	0.116	−0.005
TP	0.882	0.927	0.456	0.354
NH_4^+-N	0.881	0.905	0.396	0.411
COD_{Cr}	0.232	0.266	0.967	0.959
初始特征值	3.826	3.598	1.009	1.334

在因子 1 上得分为正的采样点为 S3、QW、S5、S6（表 6），说明这 4 个采样点对因子 1 方差贡献较大，污染物主要为 TN、TP 和 NH_4^+-N。采样点 S3、QW、S5、S6 水源包括郑州市区、荥阳市和中牟县的排水。根据郑州市环境局统计，全市排放 TN、TP 和 NH_4^+-N 中来自城镇生活源的占比分别为 94.55%、92.57% 和 95.06%，这说明郑州市 TN、TP 和 NH_4^+-N 主要来自生活污水，2016 年郑州城市污水处理率达到 98.03%，生活污水多数经过了市政污水处理厂处理，而许多工业废水也进入污水处理厂处理[25-26]，故这 4 个采样点中 TN、TP 和 NH_4^+-N 主要来自贾鲁河流域内的污水处理厂尾水。我国城市污水处理多采用二级生化处理（如 A^2/O、A/O、SBR、氧化沟等），COD 去除率高，而全国 90% 污水处理厂脱氮除磷不达标，排水能达一级 A 的多为 2010 年以后建设。郑州市政污水处理厂分别采用 A^2/O、增强型氧化沟系统、两级内循环厌氧反应器等工艺，执行标准低于一级 A 的污水处理厂分别是王新庄、五龙口和马头岗的一期，分别建于 2000 年、2005 年和 2007 年。采样点 S3 上游的五龙口污水处理厂一期氮磷去除率较差。2017 年穆小玲等[27]调查发现，经七里河汇入的 NH_4^+-N 和 COD_{Cr} 分别占贾鲁河郑州段入河量的 41.58% 和 29.9%。七里河上游的王新庄污水处理厂处理工艺为 A^2/O，出水执行二级标准，存在设备老化、脱氮除磷效果差、污水溢流现象，这是采样点 QW、S5、S6 水质恶化主要原因。中牟县污水处理厂 2007 年建成投用，采用奥贝尔氧化沟工艺，排水执行二级标准。由此说明，对因子 1 贡献大的 4 个断面中 TN、TP、NH_4^+-N 质量浓度高主要与流域内存在落后处理工艺和超负荷运行的老污水处理厂有关。

表 6　采样点因子得分

Table 6　Factor scores at different sampling sites

采样点	因子 1		因子 2	
	7 月	9 月	7 月	9 月
S1	−0.84	−0.90	−0.84	−0.66
CS	−1.02	−1.04	−0.27	−0.38
S2	−0.79	−0.97	−0.29	−0.12
S3	0.63	0.23	0.01	−0.76
SD	−0.82	−0.07	2.37	2.57
S4	−0.01	−0.24	−1.00	−0.28
QW	2.06	2.17	0.43	−0.36
S5	0.41	0.47	−0.55	−0.12
S6	0.38	0.34	0.14	0.10

在因子 2 上得分为正的采样点有 SD、S6 及 7 月的 S3 和 QW（表 6），说明这些采样点 COD_{Mn} 与 COD_{Cr} 质量浓度对因子 2 贡献较大。一般认为 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 与城市化带来的生活污水排放相关[28]。根据郑州市环保局统计，郑州市 2016 年污水排放 COD_{Cr} 为 28 196.94 t，其中生活源、工业源、农业源 COD_{Cr} 分别占总排放量的 80.85%、18.38% 和 0.72%。由于郑州市生活污水和工业污水多经处理排放，且我国污水处理厂 COD_{Cr} 消除率高，推定这 4 个采样点 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 高主要与某些未处理污水相关。采样点 QW 上游的王新庄污水处理厂污水溢流入七里河，是造成 QW、S6 的 COD_{Mn} 与 COD_{Cr} 质量浓度高的主要原因。此外，采样时调查发现：S3 上游城中村（7 月），七里河的支流十七里河、S5—S6 段中牟县沿河农村都有生活污水直排现象。近几年郑州西部城市化加快，荥阳市城镇人口和工厂增多而污水处理厂建设滞后，造成索河严重污染，索河入索须河口日排污水量约为 1.6 万 m^3[29]；但索须河水源还有执行一级 A 标准的马寨污水处理厂排水和上游水库间歇式下泄，采样点 SD 总体表现为 COD_{Mn} 和 COD_{Cr} 质量浓度高、TN 质量浓度比贾鲁河下游低（表 2），所以 SD 对因子 2 方差贡献率最大，在因子 1 上得分低于平均值。以上分析说明因子 2 主要与未处理污水有关。

采样点 S1、CS、S2、S4 在因子 1、2 上得分为负值（表 6），说明这 4 个采样点污染物与因子 1、2 相关程度低于平均值。采样点 S1、CS、S2 水源主要为黄河水。尖岗水库库形狭长，流域内马寨镇、白寨镇和侯寨乡的工业、畜禽养殖和旅游业发达，水库上游所受面源性污染压力大[30]。常庄水库库区小流域属土质浅山丘陵区，耕地多为坡地或阶田，水土流

失、农业施肥和周围村庄等给水库带来面源性污染。多年来,西流湖周围城中村的生活污水直排入湖,湖底积累很深黑色淤泥,采样时尽管已经实施截污工程,不能避免来自城中村的面源性污染随雨水入湖,这些因素导致湖水富营养化,只因为其水源为黄河水,水质比贾鲁河下游好。因此,郑州贾鲁河中上游现在主要为面源性污染和内源性污染。采样点 S4 水源主要为水质较好的马头岗和陈三桥污水处理厂排水,故无论杨桥干渠有无引黄补水,采样点 S4 污染物质量浓度在贾鲁河下游最低,从而使其与因子 1、2 的相关程度低于平均值。

以上分析说明,贾鲁河各控制单元彻底控源截污、上游库区农业面源污染治理、河湖清淤疏浚、市政污水处理厂提标改造是贾鲁河郑州段水质改善的必要措施。

4 结 论

a. 郑州贾鲁河上游水库综合水质为Ⅱ类或Ⅲ类,中游湖泊Ⅳ类,干流下游一般为Ⅳ类~劣Ⅴ类;索须河和七里河水质分别为劣Ⅴ类或劣Ⅴ类并黑臭。9 个采样点两次采样中只有 7 月尖岗水库和郑开大道断面达到水质规划目标,其他全超标。

b. 在无引水情况下,贾鲁河干流水质从上游到下游逐步恶化,支流水质劣于干流;通过杨桥干渠向贾鲁河应急性引黄补水仅当时改善最近受水区河段水质,对贾鲁河出郑州断面水质无明显改变。

c. 贾鲁河中上游主要为面源性污染,西流湖还存在内源性污染;干流下游和支流主要为点源性污染,第一污染因子方差贡献率为 76.52%(7 月)和 71.95%(9 月),代表性指标为 TN、TP、NH_4^+-N,主要与市政污水处理厂排水有关;第二污染因子代表性指标为 COD_{Mn} 与 COD_{Cr},主要与未处理的污水有关。

参考文献:

[1] VAROL M, GÖKOT B, BEKLEYEN A, et al. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Tigris River (Turkey) using multivariate statistical techniques-a case study [J]. River Research and Applications, 2012, 28(9): 1428-1438.

[2] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733. (YIN Hailong, XU Zuxin. Comparative study on typical river comprehensive water quality assessment methods [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(5): 729-733 (in Chinese))

[3] 徐宗学,顾晓昀,刘麟菲. 渭河流域河流健康调查与评价[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 1-7. (XU Zongxue, GU Xiaoyun, LIU Linfei. Investigation and assessment on river health of Weihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 1-7. (in Chinese))

[4] BAN Xuan, YU Cheng, PAN Baozhu, et al. Application of the CWQII method and a 2D water quality model to assess diversion schemes for East Lake (Donghu), Wuhan, China [J]. Lake and Reservoir Management, 2014, 30: 358-370.

[5] 周密,陈龙赞,马振. 基于变权重的水质综合评价体系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 20-25. (ZHOU Mi, CHEN Longzan, MA Zhen. Study on the comprehensive evaluating system of water quality based on variable weight [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 20-25. (in Chinese))

[6] 张欣,徐宗学,况新宇,等. 济南市河流水体污染源解析及空间分布特征[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 63-68. (ZHANG Xin, XU Zongxue, KUANG Xinyu, et al. Source apportionment of urban fresh water quality and spatial distribution of Jinan city [J]. Yellow River, 2018, 40(2): 63-68. (in Chinese))

[7] 赵海萍,陈旺,李清雪,等. 漳河上游水质时空分异特征及污染源识别[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 47-54. (ZHAO Haiping, CHEN Wang, LI Qingxue, et al. Spatio-temporal variation of water quality and pollutant source identification in upper reaches of Zhanghe River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 47-54. (in Chinese))

[8] NAJAFPOUR Sh, ALKARKHI A F M, KADIR M O A, et al. Evaluation of spatial and temporal variation in river water quality [J]. International Journal of Environmental Research, 2008, 2(4): 349-358.

[9] ZHANG Y Z, TANG C Y, SONG X F, et al. Behavior and fate of alkylphenols in surface water of the Jialu River, Henan Province, China [J]. Chemosphere, 2009, 77(4): 559-565.

[10] FU Jie, ZHAO Changpo, LUO Yupeng, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 270: 102-109.

[11] ZANG Y, SONG X, KINDOH A, et al. Behavior, mass inventories and modeling evaluation of xenobiotic endocrine-disrupting chemicals along an urban receiving wastewater river in Henan Province, China [J]. Water Research, 2011, 45(1): 292-302.

[12] FU Jie, SHENG Sheng, WEN Teng, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of the Jialu River [J]. Ecotoxicology, 2011, 20: 940-950.

[13] 童玲,陈伟胜. 贾鲁河流域郑州段水域生态系统健康评估[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 108-114. (TONG Ling, CEN Wei sheng. Health assessment of the aquatic ecosystem of Zhengzhou part of the Jialu River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(9): 108-114.

(in Chinese))
[14] 周岩,李慧芳,李道荣. 郑州市贾鲁河水污染现状分析及治理对策研究[J]. 河南科学,2015,33(10):1823-1927. (ZHOU Yan, LI Huifang, LI Daorong. Water pollution analysis and treatment countermeasures of Jialu river in Zhengzhou[J]. Henan Science,2015,33(10):1823-1927. (in Chinese))
[15] 于鲁冀,陈慧敏,王莉,等. 基于改进湿周法的贾鲁河河道内生态需水量计算[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):5-9. (YU Luji, CHEN Huimin, WANG Li, et al. Study of ecological in stream flow requirement of Jialu River based on improved wetted perimeter method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016,36(3):5-9. (in Chinese))
[16] 张良平,王珏,徐骏. 调水改善武澄锡虞区河网水质效果评估[J]. 人民长江,2009,40(7):30-32. (ZHANG Liangping, WANG Yu, XU Jun. Evaluation on effect of water transfer for water quality improvement in Wuchengxiyu river network[J]. Yangtze River,2009,40(7):30-32. (in Chinese))
[17] 邢梦林,王潇磊,刘奕尧,等. 河南省典型污染河流水环境现状评价及相关性分析[J]. 干旱环境监测,2017,31(3): 97-131. (XING Menglin, WANG Xiaolei, LIU Yiyao, et al. The status evaluation and correlation analysis of typical polluted river in Henan Province[J]. Arid Environmental Monitoring, 2017, 31(3): 97-131. (in Chinese))
[18] 梁凌. 郑州市水生态文明城市试点建设综述[J]. 水资源开发与管理, 2018(8): 28-32. (LIANG Ling. Discussion on construction of water ecological civilized city pilot in Zhengzhou[J]. Water Resources Development and Management,2018(8):28-32. (in Chinese))
[19] 徐祖信,尹海龙. 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,2005,33(4):482-488. (XU Zuxin, YIN Hailong. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University,2005,33(4):482-488. (in Chinese))
[20] 徐祖信,尹海龙. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报,2005,33(3):321-324. (XU Zuxin, YIN Hailong. Single factor water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University,2005,33(3):321-325. (in Chinese))
[21] 徐祖信,尹海龙. 城市河流水质常规评价技术研究[J]. 环境污染与防治, 2005, 27(7): 515-518, 534. (XU Zuxin, YIN Hailong. Uses of conventional water quality assessment techniques on urban rivers system[J]. Environmental Pollution & Control, 2005, 27(7): 515-518,534. (in Chinese))
[22] REGHUNATH R, MRUTHY T R S, RAGHAVAN B R. The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies. an example from Karnataka, India[J]. Water Research,2002,36(10):2437-2442.
[23] SHRESTHA S, KAZAMA F, NAKAMURA T. Use of principal component analysis, factor analysis and discriminant analysis to evaluate spatial and temporal variations in water quality of the Mekong River[J]. Journal of Hydroinformatics,2008,10(1):43-56.
[24] 王晗,余文学,贾亦真. 郑州市水资源承载力综合评价[J]. 水利经济,2018,36(6):57-61. (WANG Han, YU Wenxue, JIA Yizhen. Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Zhengzhou City[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(6):57-61. (in Chinese))
[25] 杨蕾,贾彬,张雪华,等. 郑州市区地表水水量来源及水质状况调查分析[J]. 河南科学,2008,26(9):1121-1125. (YANG Lei, JIA Bin, ZHANG Xuehua, et al. Zhengzhou urban water sources and surface water quality analysis of survey[J]. Henan Science, 2008, 26(9): 1121-1125. (in Chinese))
[26] 杨小全,曲炜. 工业园区污水治理综合管控措施:以某工业园区污水厂为例[J]. 水利经济,2018,36(6):53-56. (YANG Xiaoquan, QU Wei. Comprehensive control measures for sewage treatment in industrial park: case study of sewage plant of an industrial park[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(6):53-56. (in Chinese))
[27] 穆小玲,席献军,朱洪生,等. 郑州市贾鲁河水环境容量及污染调控研究[J]. 人民黄河,2018,40(9):78-82. (MU Xiaoling, XI Xianjun, ZHU Hongsheng, et al. Research on water environmental capacity and containment control in Jialu River of Zhengzhou City[J]. Yellow River,2018,40(9):78-82. (in Chinese))
[28] SU Shiliang, ZHI Junjun, LOE Liping, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River(China) using neural-based modeling and multivariate statistical techniques[J]. Physics and Chemistry of the Earth,2011,36(9/10/11):379-386.
[29] 白家波. 郑州市生态水系河道截污工程初探[J]. 价值工程,2014(4):108-109. (BAI Jiabo. On ecological water system river way sewage interception engineering in Zhengzhou City[J]. Value Engineering, 2014(4): 108-109. (in Chinese))
[30] 马南,钟崇林. 郑州市尖岗水库流域生态健康压力研究与评估[J]. 河南科技,2016,7(5):157-158. (MA Nan, ZHONG Chonglin. Pressure ecological health research and evaluation of Zhengzhou City Jiangang Reservoir Basin[J]. Henan Science and Technology, 2016, 7(5): 157-158. (in Chinese))

(收稿日期:2020-01-22　编辑:彭桃英)