

乌江流域水环境质量评价及污染源解析

郑群威¹, 苏维词^{1,2}, 杨振华², 龙海飞³, 周奉¹, 刘振振¹

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047;

2. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 3. 贵州省水文水资源局, 贵阳 550002)

摘要:为全面了解乌江流域贵州段的水质污染状况,根据2016年乌江流域贵州段丰水期、平水期、枯水期的水质监测数据,采用单因子和综合水质标识指数对其水质状况进行了评价,并用绝对主成分多元线性回归分析(APCS-MLR)量化不同主成分对各污染物的贡献率。结果表明:溶解氧、总磷在丰水期和平水期水质标识指数高于枯水期,高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮在各水期变化并不明显;氨氮、总磷是乌江流域水环境的主要污染因子,其次为化学需氧量、五日生化需氧量和溶解氧。乌江流域内各小流域之间差异显著,清水河流域水质最差,三水期平均样点超标率高达62%,湘江流域有20%样点超标严重,超标样点均劣于V类水,乌江干流中游水质次之,其余流域样点均处于Ⅱ类以上,且无样点超标;总体上乌江流域丰水期水质受农业面源影响略低于平水期和枯水期。根据PCA(主成分分析)和APCS-MLR分析结果,丰水期第一主成分与氨氮呈显著相关,对其贡献率为45.99%,表明丰水期氨氮为主要污染物,平水期第一主成分主要与化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮呈显著相关,对其贡献率分别117.88%,117.39%,118.38%,表明化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮为平水期主要污染物,枯水期第一主成分与化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷相关性较高,对其贡献率分别为6.38%,6.08%,6.21%,6.26%,表明这几个因子是枯水期主要污染物。研究表明,污染物主要来源于流域内沿岸乡镇、村寨、部分市县生活污水、生活垃圾排放以及农业面源和磷化工企业的废水排放,水质最差的清水河流域和湘江流域的J33样点受城市点源污染主导。

关键词:乌江流域;水环境评价;水质标识指数;绝对主成分多元线性回归(APCS-MLR)

中图分类号:X824

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0204-09

Assessment of Water Environmental Quality and Analysis of Pollution Sources in Wujiang River Basin

ZHENG Qunwei¹, SU Weici^{1,2}, YANG Zhenhua², LONG Haifei³, Zhoufeng¹, LIU Zhenzhen¹

(1. School of geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

2. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: In order to fully understand the water pollution situation in Guizhou section of the Wujiang River Basin. According to the water quality monitoring data of high water period in Guizhou section of Wujiang River Basin in median water period, low water period of 2016, the water quality status was evaluated by single factor and comprehensive water quality marking index. And absolute principal component multiple linear regression analysis (APCS-MLR) was used to quantify the contribution of different principal components to each pollutant. The results showed that the water quality indexes of dissolved oxygen and total phosphorus in high water period were higher than those in dry water period, permanganate index, chemical oxygen demand, 5 days biochemical oxygen demand and ammonia nitrogen did not change obviously in each water period; total phosphorus was the main pollution factor of water environment, followed by chemical oxygen demand, 5 days biochemical oxygen demand and dissolved oxygen; the water quality of Qingshuihe River Basin was the worst, the average sample point exceeding standard rate is 62% in the three water period, 20% of the sample points in Xiangjiang River Basin exceeded the standard seriously, the exceeding standard point was inferior to water, the water quality of the middle reaches of Wujiang River main stream was the second,

收稿日期:2018-08-16

修回日期:2018-08-31

资助项目:国家十三五重点研发计划课题“西部石漠化地区农村饮用水与污水处理关键技术与示范”(2016YFC0400708);重庆师范大学研究生科研创新项目“三峡库区岩溶山区耕地撂荒影响因素及作用机制研究”(YKC18034)

第一作者:郑群威(1993—),男,河南省周口市扶沟县,硕士研究生,研究方向:水环境监测及规律挖掘研究。E-mail:zhengqw158@163.com

通信作者:苏维词(1966—),男(苗),湖南绥宁,硕士,研究员,研究方向:喀斯特地区资源,生态环境与可持续发展。E-mail:suweici@sina.com

and the water quality of the middle reaches of Wujiang River was inferior to that of the water in the middle reaches of Wujiang River. The other watershed samples were above II and no samples exceeded the standard, and the water quality of Wujiang River Basin in the high water period was slightly lower than that in the plain and dry water periods by agricultural non-point sources. According to the results of principal component analysis) and APCS-MLR analysis, the first principal component was significantly correlated with ammonia nitrogen in high water period, and the contribution rate was 45.99, which indicated that ammonia nitrogen was the main pollutant in high water period, and the first principal component was mainly chemical oxygen demand in normal water period. 5 days biochemical oxygen demand and ammonia nitrogen were significantly correlated, and their contribution rates were 117.88%, 117.39% and 118.38%, respectively, indicating that chemical oxygen demand, five days' biochemical oxygen demand, ammonia nitrogen were the main pollutants in the normal water period; the first principal component was correlated to chemical oxygen demand, five days' biochemical oxygen demand, ammonia nitrogen, and total phosphorus in dry season, respectively, the contribution rates of chemical oxygen demand, five days' biochemical oxygen demand, ammonia nitrogen, and total phosphorus were 6.38%, 6.08%, 6.21% and 6.26%, respectively, indicating that these factors were the main pollutants in the dry season. The results show that the pollutants mainly came from the domestic sewage, domestic refuse discharge, agricultural non-point source and phosphorus chemical industry wastewater discharge from towns, villages, and some cities and counties in the river basin. The worst water quality in Qingshui River Basin and Xiangjiang River Basin on J33 testing station was dominated by urban point source pollution.

Keywords: Wujiang River Basin; water environment assessment; water quality identification index; absolute principal component multiple linear regression (APCS-MLR)

随着社会经济发展,生态环境问题日益突出^[1],而水环境作为生态环境的重要组成部分,其好坏对人类生活和社会经济发展起着重要作用^[2]。为更加系统、深入的研究水环境质量、水资源可持续利用等水问题,诸多学者在评价水资源质量的方法上不断改进,并日趋成熟。目前,比较典型、应用较多的水质评价方法有单因子评价法、综合污染指数法、物元分析法、灰色系统评价法、水污染指数法、模糊综合评判法、综合水质标志指数法等^[3-7]。宋焱等采用改进后倍斜率聚类分析的方法对南沙红树林湿地公园水环境质量进行了时空差异分析^[8];郑德凤等采用基于熵权的模糊物元模型对伊通河水环境质量进行了评价^[9];李名升等针对长江流域和淮河流域190个国控断面监测数据分别采用单因子评价法、内梅罗综合指数法、模糊综合评价法、物元可拓评价法等7种评价方法进行了实证研究,并结合环境管理需求、综合各种评价方法理论的优缺点,认为单因子评价法和综合水质标识指数法是两种优选方法^[10]。上述研究均对水环境的发展研究有贡献,但却不能进一步分析各污染物的贡献率,进而导致无法对水环境进行精确治理,Singh认为对河流水质评价需要确定其污染源并量化的确定其污染贡献率^[11]。与传统的水质评价方法相比,单因子水质标识法^[12]不仅能对水质类别

进行评价,亦能对属于同一类水的水质指标进行定量比较,综合水质标识法^[13]既能够对I~V类水进行评价,也能对劣V类水的水质级别进行详细划分和评价;而主成分分析法(APC)^[14-15]和绝对主成分多元线性回归分析法(APCS-MLR)^[16-19]更可筛选影响水质的主要因子,并量化各污染物的贡献率。

不同河流,自然河道形态差异不同,自净能力也不相同^[20],随社会经济发展,受污染程度不同,水质亦千差万别,当前对水环境的研究文献中,研究对象多集中在东部沿海地区及中部发达城市,但对具有典型喀斯特地貌背景的河流水质的研究相对较少。乌江是贵州省第一大河,受工业、城镇生活、农业和规模化禽畜养殖等的影响,造成水环境问题日益突出,对贵州生态文明建设和长江经济带尤其是三峡库区生态大保护造成威胁。因此,本文依据乌江流域水文规律,对乌江流域贵州段枯水期(典型月份1月)、丰水期(典型月份7月)、平水期(典型月份11月)3个时期进行采样,采用单因子水质标识指数法和综合水质标识指数法对其进行水质综合评价,采用主成分分析法(APC)选取影响水质的主要污染物,进而采用绝对主成分多元线性回归分析法(APCS-MLR)对各水期各污染物的污染贡献率进行量化研究,以期为乌江流域贵州段水环境的保护和管理提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

乌江是长江上游南岸最大支流,乌江干流在化屋基以上为上游,化屋基至思南为中游,思南至涪陵为下游,全长 1 037 km,其中贵州省境内乌江干流长 889 km,流域面积 6.68 万 km²,乌江水系呈羽状分布,地势西南高,东北低,主要支流有六冲河、猫跳河、清水河、洪渡河、偏岩河、洋水河、息烽河、翁安河等,乌江流域属亚热带季风气候,年平均气温为 13~18℃,年均降雨量 900~1 400 mm。乌江上游受威宁、六盘水、水城县煤矿企业污水排放以及居民生活污水排放的影响,六冲河支流、响水河支流、三岔河干流上游水质受污严重;乌江流域中下游开阳县、息烽县、织金县等共有 28 家涉磷企业,总磷污染严重。

1.2 水质数据

本研究共在乌江流域设置 38 个各采样点位(图 1),其中 J1-J3 位于六冲河流域,J4-J13 位于三岔河流域,J14-J16 位于乌江干流中游,J17-J23 位于清水河流域,J24-J30 位于乌江干流下游,J31-J35 位于湘江流域,J36-J38 位于芙蓉江流域。于 2016 年 1 月、7 月、11 月进行采样,将样品放置于温度为 4℃的低温保温箱中,并在 48 h 内带回实验室,根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》流域监测原则和方法测定污染物浓度;并用样品瓶采集 2 个容量为 2 L 的平行水样来反映仪器测试精密性,测试结果可行。根据检测结果,Cr6+(<0.004 mg/L)、Hg(<0.000 01 mg/L)、Cu(<0.05 mg/L)、Pb(<0.001 mg/L)、Cd(<0.005 mg/L)、Zn(<0.05 mg/L)、As(<0.000 2 mg/L)、Se(<0.000 3 mg/L)、挥发酚(<0.000 3 mg/L)、氰化物(<0.004 mg/L)等低于检出限,对水质评价研究没有意义,故选择 DO(溶解氧含量 mg/L)、COD_{Mn}(高锰酸盐指数 mg/L)、COD_{Cr}(化学需氧量 mg/L)、BOD₅(五日生化需氧量 mg/L)、NH₃-N(氨氮 mg/L)、TP(总磷 mg/L)共 6 个影响水质的指标作为主要水质评价因子。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子水质标识指数 单因子水质标识指数 P_i 由 1 位整数、小数点后 2 位或者 3 位有效数字组成,可表示为:

$$P_i = X_1 \cdot X_2 X_3 \quad (1)$$

式中: P_i 表示第 i 项指标的水质标识指数; X_i 表示第 i 项评价指标的水质类别; X_2 表示监测数据在 X_1 类水质变化区间所处的位置; X_2 越大,表示在同一类别的水质中污染越严重; X_3 表示水质类别与功能区划定类别的比较结果。

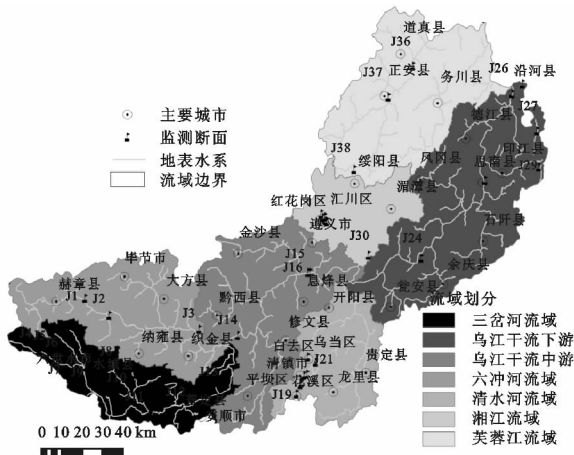


图 1 乌江流域采样点分布

(1) 当水质介于 I 类和 V 类之间时, X_1, X_2 分开计算:

X_1 的确定。当水质介于 I 类和 V 类之间时, X_1 由监测数据与国家标准的比较确定,其意义为: $X_1 = 1$,表示为 I 类水, $X_1 = 2$,表示为 II 类水, $X_1 = 3$,表示为 III 类水, $X_1 = 4$,表示为 IV 类水, $X_1 = 5$,表示为 V 类水。

X_2 的计算。对于非溶解氧指标(PH、温度、溶解氧除外) X_2 根据公式 2 确定:

$$X_2 = \frac{\rho_i - \rho_{i,k下}}{\rho_{i,k上} - \rho_{i,k下}} \quad (2)$$

对溶解氧指标 X_2 根据公式 3 确定:

$$X_2 = 10 - \frac{\rho_i - \rho_{i,k下}}{\rho_{i,k上} - \rho_{i,k下}} \times 10 \quad (3)$$

式中: ρ_i 表示第 i 项指标的实测浓度; $\rho_{i,k上}$ 和 $\rho_{i,k下}$ 表示第 i 项指标第 k 类水区间质量浓度的上限值和下限值; X_2 根据四舍五入的原则取一位整数确定。

(2) 当水质等于或低于 V 类水上限值时, X_1, X_2 同时计算:

对于非溶解氧指标:

$$X_1, X_2 = 6 + \frac{\rho_i - \rho_{i,5上}}{\rho_{i,5上}} \quad (4)$$

对于溶解氧指标:

$$X_1, X_2 = 6 + \frac{\rho_{D0,5下} - \rho_{D0}}{\rho_{D0,5下}} \times 4 \quad (5)$$

式中: ρ_i 表示第 i 项指标的实测浓度; $\rho_{i,5上}$ 表示第 i 项指标 V 类水区间质量浓度的上限值; $\rho_{D0,5下}$ 表示溶解氧 V 类水区间质量浓度的下限值; ρ_{D0} 表示溶解氧实测浓度。

(3) X_3 的确定。 X_3 主要通过该单项水质类别与水环境功能区设定类别的比较得出,若水质达到或好于水环境功能区设定类别,则 $X_3 = 0$;若水质类别差于水环境功能区设定类别,且 X_2 不等于 0,则 $X_3 = X_1 - f_i$,若水

质类别差于水环境功能区设定类别,且 X_2 等于 0,则 $X_3 = X_1 - f_{i-1}$, f_i 为水环境功能区设定类别。

1.3.2 综合水质标识指数 综合水质标识指数法是在单因子水质标识指数法的基础上提出的,主要由 1 位整数和 3 位或 4 位小数位构成:

$$I_{\text{wq}} = X_1 \cdot X_2 X_3 X_4 \quad (6)$$

式中: X_1 表示河流的综合水质类别; X_2 表示综合水质在 X_1 类水质变化区间中所处位置; X_3 表示参与综合水质评价的各项指标中劣于水功能区目标的指标数量; X_4 表示综合水质类别与水功能区设定类别的比较结果。

(1) X_1 、 X_2 的计算

$$X_1, X_2 = \frac{1}{m} \sum (P_1 + P_2 + \dots + P_m) \quad (7)$$

式中: m 表示参与综合水质评价的单项水质标识指数指标的个数, P_1, P_2, P_3, P_m 分别表示第 1, 2, m 项指标的单因子水质标识指数中的 X_1, X_2 , 按照四舍五入原则保留小数点后一位小数。

(2) X_3 的确定。 X_3 表示参与综合水质评价的单项指标中低于水环境功能区目标的指标个数, 若 $X_3 = 0$, 表示所有指标均达到水环境功能区目标, 若 $X_3 = 1$, 则表示有一个指标未达到水环境功能区目标, 以此类推。

(3) X_4 的确定。 X_4 通过综合水质类别与水环境功能区设定类别的比较得到, 若水质达到或好于水功能区类别, 则 $X_4 = 0$, 若水质类别差于水功能区类别, 且 X_2 不等于 0, 则 $X_4 = X_1 - f_i$, 若水质类别差于水功能区类别, 且 X_2 等于 0, 则 $X_4 = X_1 - f_{i-1}$ 。

1.3.3 主成分分析(APC)及 APCS-MLR Shrestha 认为采用多元统计技术可分析复杂数据矩阵, 有助于了解研究区的水质及生态状况^[21]。APC 是基于降维思想, 将具有相关性的多个变量转换为几个不相关并能保留以前多数变量所反映的大部分信息的新变量的方法, 主要通过奇异值的分解、维数的选择以及旋转进行主成分分析, 并依据 kaiser 标准即特征值大于 1 选择合适的因子数目, 更多关于 APC 的介绍详见 Thurston^[22] 和 Miller^[23] 的介绍。

绝对主成分多元线性回归分析(APCS-MLR)是一种根据因子得分^[24-26], 评价各因子对各变量贡献的统计方法。具体公式如下:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_i}{\delta_i} \quad (8)$$

式中: Z_{ij} 为标准化后的浓度值; \bar{C}_i 为评价指标 i 的平均浓度; δ_i 为评价指标 i 的标准差。从 PCA 得到归一化的因子分数, 并对各因子引入一个浓度为 0 的样

本, 计算得到该样本的因子分数:

$$(Z_0)_i = \frac{0 - \bar{C}_i}{\delta_i} \quad (9)$$

将通过 PCA 得到的归一化的各指标的因子分数减去 0 浓度样本的因子分数, 得到各指标的绝对主成分得分(APCS), 并以 APCS 为自变量, 以污染物浓度为因变量进行 APCS-MLR, 得到相应的回归系数, 确定各主成分对污染物的贡献率:

$$C_i = b_{0i} + \sum_{p=1}^n (\text{APCS}_p \times b_{pi}) \quad (10)$$

式中: b_{0i} 表示指标 i 经过多元线性回归得到常数项; b_{pi} 为源 P 对指标 i 的回归系数; APCS_p 表示调整后的因子 P 的分数; n 表示因子个数; $\text{APCS}_p \times b_{pi}$ 表示因子 P 对 C_i 的浓度贡献, 所有样本的 $\text{APCS}_p \times b_{pi}$ 的平均值表示因子平均绝对贡献率。

2 结果与分析

2.1 单因子水质标识指数法评价

从表 1 和图 2 来看, 溶解氧(图 2A)在丰水期和平水期其水质标识指数高于枯水期, 其原因是丰水期径流量较大, 水中溶解氧未达到饱和时, 大气中的氧气会向水体渗入, 而且丰水期主要集中在夏季, 水生植物通过光合作用释放氧气强烈, 导致水体中溶解氧在丰水期较高; 水体中总磷的质量浓度因稀释作用, 通常丰水期浓度要低于枯水期, 而研究中总磷含量(图 2F)在丰水期反而高于枯水期, 其因为丰水期正值农田耕种、施肥期, 河流沿岸农田过量施用磷肥, 大量未经有效利用的磷肥通过雨水冲刷等方式进入河流, 导致总磷含量在丰水期过高; 高锰酸盐指数(图 2B)、化学需氧量(图 2C)、五日生化需氧量(图 2D)在丰、平、枯三水期内的水质标识指数变化并不明显, 表明三水期水中有有机物、还原性物质的质量浓度变化不大, 但丰水期受径流量大的影响, 其含量大于其他水期, 原因在于夏季用水较多, 所产生的生活垃圾、生活污水也较多, 加之夏季工业生产过程中产生的冷却废水等也较冬季多, 共同导致丰水期水中有有机物、还原性物质等的含量较大; 以氨氮计算的单因子水质标识指数(图 2E)在丰水期要略低于平水期和枯水期, 表明氨氮的质量浓度在丰水期要低于平水期和枯水期, 是因为枯水期和平水期主要集中在秋冬两季, 水温较低时, 氨氮转化速率较慢, 随着水温的升高, 水中活跃的微生物促进氨氮向硝氮转化, 使水中氨氮含量逐渐降低。

从各因子的污染严重程度来看, 氨氮、总磷是乌江流域水环境的主要污染因子, 其中总磷在三水期

均有 10 个及以上的样点超标,超标率达 30%左右,且均有 7 个以上的样点处于Ⅳ类水以下,这主要受流域内磷化工企业排放的工业废水以及规模化畜禽养殖的影响,流域内主要的磷化工企业磷石膏年产生量为 700 万 t,规模化畜禽养殖产生总磷约 1 475 t,其中有 743 t 排放入环境中,导致总磷污染严重。氨氮在三水期亦均有 8 个左右样点超标,超标率达 21%,且低于Ⅳ类水的样点数均超过 5 个,污染程度仅次于总磷,2016 年乌江流域氨氮总排放量分别为 2.28 万 t,其中,生活污染源排放量所占比例最大为 70.93%,流域内河流沿岸乡镇、村寨生活污水、生活垃圾直接排放入河,且部分市、县城区未实现雨污分流或污水收集管网不完善,部分生活污水未能有效处理便直接排入河流;其次是农业污染源占 26.80%,流域内农田、

果园等在耕作期均需施用氮肥促进作物生长,部分氮肥随农田径流等进入河流;工业污染源占 15.65%,这主要与三岔河流域威宁县、钟山区、水城县的煤矿废水排放有关。化学需氧量、五日生化需氧量在三水期均有 6 个左右样点超标,2016 年化学需氧量排放总量为 16.73 万 t,其中,生活污染源排放比例占 57.55%,农业污染源和工业污染源分别占 26.80%和 15.65%,其污染来源与氨氮相似;五日生化需氧量属耗氧有机污染物,质量浓度越高,表示水中有机污染物越多,流域内居民生活垃圾年产生量达 283.68 万 t,是导致水体有机污染物增加的主要因素,溶解氧为水质评价的重要指标,并不直接来自某一项污染源,而以高锰酸盐指数得到的水质标识指数基本不存在超标。

表 1 评价指标各水期各水质类别样点数及超标数

评价指标	时期	I	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	V	劣Ⅴ类 不黑臭	劣Ⅴ类 黑臭	标识指数 平均值	超标数
溶解氧	枯水期	31	2	2	3	0	0	0	1.64	3
	丰水期	14	18	1	4	0	1	0	2.33	5
	平水期	19	13	0	3	2	1	0	2.23	5
高锰酸盐指数	枯水期	33	1	3	1	0	0	0	1.86	1
	丰水期	31	3	3	1	0	0	0	1.77	1
	平水期	30	5	2	1	0	0	0	1.79	0
化学需氧量	枯水期	29	0	4	4	1	0	0	1.95	6
	丰水期	30	0	2	6	0	0	0	1.90	6
	平水期	31	0	1	5	0	1	0	1.89	6
五日生化需氧量	枯水期	32	0	0	3	1	1	1	2.32	6
	丰水期	32	0	0	1	2	3	0	2.37	6
	平水期	32	0	1	4	0	1	0	2.15	4
氨氮	枯水期	21	6	5	1	0	2	3	2.90	8
	丰水期	22	8	2	2	1	2	1	2.47	6
	平水期	20	10	2	0	0	4	2	2.91	8
总磷	枯水期	21	6	4	0	2	4	1	2.65	10
	丰水期	11	14	4	5	1	2	1	2.98	12
	平水期	16	12	1	2	1	4	2	3.00	10

2.2 综合水质标识指数法评价

综合水质标识法不仅能够对 I—V 类水进行评价,而且能够将劣Ⅴ类水细分为劣Ⅴ类但不黑臭以及劣Ⅴ类并黑臭两个类别,解决劣Ⅴ类水的模糊性描述问题^[14]。从表 2 和附图 6 可以看出,乌江全流域丰水期、平水期和枯水期综合水质标识指数法的评价结果差异并不明显,均有 80%以上的样点处于Ⅱ类水以上,仅低于Ⅳ类水质的样点数略有差异,丰水期共 10.52%的样点处于Ⅳ类水及以下,略低于平水期的 15.78 和枯水期的 13%,且丰水期并无劣Ⅴ类

样点,而平水期和枯水期均有 2.63%的样点劣于Ⅴ类水;从各样点实测水质与目标水质的对比来看,丰水期样点超标率为 10.53%,也略低于平水期的 15.79%和枯水期的 13.16%。丰水期的水质状况主要反映非点源污染造成的河流污染程度,枯水期的水质状况最能反映点源污染的强度^[27],乌江流域枯水期、平水期水质略差于丰水期,表明非点源污染所占比重稍大。

若水体中污染物含量固定,当水量增加时,污染物浓度会有所下降,因此,若无外来污染,丰水期水质

一般要好于枯水期水质。从各流域各水期水质状况看,三岔河流域、芙蓉江流域、湘江流域和乌江干流下游多数样点在丰水期和平水期水质反而比枯水期略差,分析其流域内各因子水质状况,发现主要是氨氮和总磷的含量在丰水期和平水期比枯水期高,导致枯水期水质反而较好,这主要是由于丰水期正值农作物

耕作、施肥时期,流域内农业农药、化肥过度施用,大量未有效利用氮肥、磷肥随农田径流或雨水冲刷进入河道所致;其余流域丰水期水质均略好于枯水期,基本符合这一规律,而对于那些水质较差的样点区域,如清水河流域以及湘江流域的 J33 样点区域,受贵阳市和遵义市点源污染主导,也基本符合这一规律。

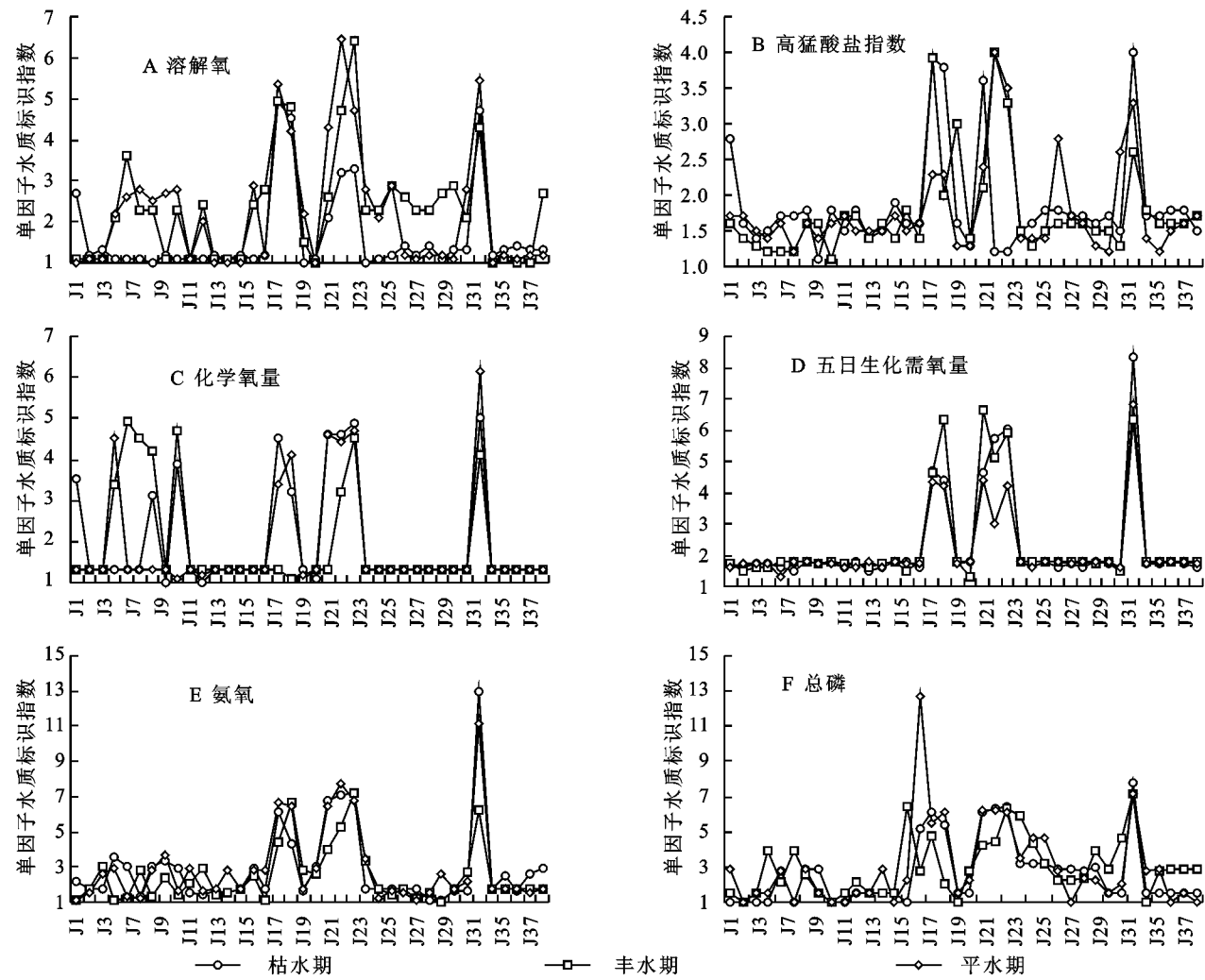


图 2 丰水期、平水期和枯水期各单因子水质标识指数分布

从全流域水质状况看,清水河流域水质最差,三水期平均样点超标率高达 62%,流域内氨氮、总磷超标严重,亦受溶解氧、化学需氧量、五日生化需氧量不同程度的污染,主要受生活污水、农业面源和畜禽养殖的污染,2009 年贵阳市生活污水排放量达 13 190 万 t,依据其历年变化趋势,随居民生活条件的提高,2016 年生活污水排放量将会更高(2016 年生活污水排放量贵阳市环境状况公报中并未公布);2016 年贵阳市农用化肥施用量(折纯)6.04 万 t,其中施用氮肥 2.93 万 t、磷肥 0.59 万 t、农药 507 t,农业面源产生的化学需氧量 20 812 t,氨氮 4 163 t,畜禽养殖产生的化学需氧量为 7 399 t,氨氮 505 t,同时乌江上游

磷化工企业也对清水河流域的总磷污染有贡献。湘江流域虽仅有 20%样点超标,但超标样点污染严重,均劣于 V 类水,遵义市现有污水处理设施尚不能完全净化污水,导致部分生活污水排入河,加上当地工业企业众多,大量工业废水排入河,导致其水质受污严重;乌江干流中游水质次之,仅平水期有 33%的样点超标,其余流域样点均处于 II 类以上,且无样点超标。

2.3 因子贡献率分析

为明确各因子对水质状况的影响程度,本研究采用因子贡献率的方法对其进行定量分析。

乌江流域 38 个监测站点的丰水期、平水期和枯

水期的主成分值见表 3,根据因子分析提取的碎石图变化情况,丰、平、枯三水期均从第二主成分趋于平缓,且特征值小于 1,故皆提取 1 个主成分。丰水期 PCA1 的总方差贡献率为 68%,从因子载荷值看,氨氮与 PCA1 的相关性达 0.934,呈显著相关;平水期

与第一主成分呈显著相关的主要有溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量和氨氮,总方差贡献率为 73.35%;枯水期基本包含了 6 中污染物的主要信息,化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮。总磷与 PCA1 的相关性均达 0.9 以上,总方差贡献率为 80.78%。

表 2 各流域不同水质类别所占比例和超标率

流域	水期	I	II	III	IV	V	劣 V 类 不黑臭	劣 V 类 黑臭	综合指数 平均值	超标率
乌江全流域	丰水期	47.37	36.84	5.26	5.26	5.26			2.33	10.53
	平水期	60.35	21.05	2.63	7.89	5.26	2.63		2.35	15.79
	枯水期	73.68	10.53		10.53	2.63		2.63	2.33	13.16
六冲河流域	丰水期	100.00							1.58	
	平水期	100.00							1.53	
	枯水期	66.67	33.33						1.70	
三岔河流域	丰水期	40.00	60.00						2.01	
	平水期	70.00	30.00						1.83	
	枯水期	80.00	20.00						1.67	
乌江干流中游	丰水期	66.67	33.33						2.04	
	平水期	33.33	33.33	33.33					2.34	33.33
	枯水期	66.67	33.33						1.77	
清水河流域	丰水期	28.57		28.57	28.57	14.29			3.60	42.86
	平水期	28.57			42.86	28.57			3.97	57.14
	枯水期	28.57			57.14	14.29			3.82	57.14
乌江干流下游	丰水期	42.86	57.14						2.05	
	平水期	57.14	42.86						1.91	
	枯水期	100.00							1.78	
湘江流域	丰水期	40.00	40.00			20.00			2.53	20.00
	平水期	60.00	20.00				20.00		2.73	20.00
	枯水期	80.00						20.00	2.67	20.00
芙蓉江流域	丰水期	66.67	33.33						1.80	
	平水期	100.00							1.47	
	枯水期	100.00							1.68	

表 3 乌江流域主成分载荷矩阵及总方差的解释

项目	丰水期	平水期	枯水期
	PCA1	PCA1	PCA1
溶解氧	-0.862	-0.874	-0.844
高锰酸盐指数	0.880	0.913	0.802
化学需氧量	0.599	0.952	0.956
五日生化需氧量	0.817	0.948	0.911
氨氮	0.934	0.956	0.931
总磷	0.816	0.290	0.938
特征值	4.083	4.401	4.847
总方差贡献率	68.052	73.350	80.778
累积方差贡献率	68.052	73.350	80.778

依据主成分分析结果,进一步利用 APCS—

MLR 对因子贡献率进行计算。由表 4 可知,除化学需氧量在丰水期 R^2 较小外,其余 R^2 都在 0.6 以上,表明进行回归分析在统计学上具有可行性。对于 PCA/APCS 来说,污染物的贡献率可能为负数,也可能大于 100%,主要与污染物的选择有关^[24]。丰水期第一主成分对氨氮的贡献率为 45.99%,根据主成分分析结果及上述水质评价结果,表明丰水期的污染物主要来源于流域内煤矿废水、生活污水排放入河以及农业面源;平水期第一主成分主要影响高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量和氨氮,对其贡献率分别为 113.05%,117.88%,117.39%和 118.38%,表明平水期污染物主要来源于乌江流域内河流沿岸乡镇及

村寨的生活垃圾、生活污水以及部分市、县未经有效处理的生活污水;枯水期第一主成分对溶解氧、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷的贡献率分别为

—5.63%,6.38%,6.08%,6.21%,6.26%,表明枯水期污染物主要来源于生活污水、农业面源、流域内规模化畜禽养殖、下游磷化工企业及矿产开发。

表 4 各时期主成分对因子的贡献率

污染物	丰水期		平水期		枯水期	
	PCA1/%	R ²	PCA1/%	R ²	PCA1/%	R ²
溶解氧	—42.45	0.862	—108.22	0.76	—5.63	0.71
高锰酸盐指数	43.33	0.78	113.05	0.83	5.35	0.64
化学需氧量	29.50	0.36	117.88	0.91	6.38	0.92
五日生化需氧量	40.23	0.67	117.39	0.90	6.08	0.83
氨氮	45.99	0.87	118.38	0.91	6.21	0.87
总磷	40.18	0.67	35.91	0.84	6.26	0.88

3 结 论

(1) 采用单因子水质标识指数法对乌江流域水质进行评价,结果表明溶解氧、总磷在丰水期和平水期水质标识指数高于枯水期,其余指标在各水期变化并不明显;氨氮、总磷是乌江流域水环境的主要污染因子,其次为化学需氧量、五日生化需氧量和溶解氧,而高锰酸盐指数基本不存在污染。

(2) 采用综合水质标识指数法对乌江流域水质进行综合评价,结果表明丰水期受农业面源影响水质略差于平水期和枯水期;在空间上,清水河流域水质最差,三水期平均样点超标率高达 62%,湘江流域虽仅有 20%样点超标,但超标样点污染严重,均劣于 V 类水,乌江干流中游水质次之,仅平水期有 33%的样点超标,其余流域样点均处于 II 类以上,且无样点超标。

(3) 采用 PCA 和 APCS-MLR 对乌江流域丰、平、枯三水期的主要污染源贡献率进行分析计算,结果表明丰水期第一主成分对氨氮的贡献率为 45.99%、平水期第一主成分对化学需氧量、五日生化需氧量和氨氮的贡献率分别为 117.88%,117.39%和 118.38%,主要受生活污水排放入河和农业面源污染的影响,枯水期第一主成分对化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总磷的贡献率分别为 6.38%,6.08%,6.21%,6.26%,主要受工业企业、规模化畜禽养殖、农业面源、生活污水的影响。

参考文献:

[1] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1249-1254.

[2] 邵田. 中国东部城市水环境代谢研究:以上海市为例[D]. 上海:复旦大学,2008.

[3] Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, et al. River quality analysis using fuzzy water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil[J]. Ecological Indicators,

2009,9(6):1188-1197.

[4] 武玮,徐宗学,于松延. 渭河流域水环境质量评价与分析[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2013,49(2/3):275-281.

[5] 郑倩玉,刘硕,万鲁河,等. 松花江哈尔滨段水环境质量评价及污染源解析[J]. 环境科学研究,2018,31(3):507-513.

[6] Ip W C, Hu B Q, Wong H, et al. Applications of grey relational method to river environment quality evaluation in China [J]. Journal of Hydrology, 2009,379(3):284-290.

[7] 杨振华,苏维词,吴克华,等. 基于级别特征值的岩溶含水层水质模糊综合评价修正[J]. 中国岩溶,2015,34(6):551-559.

[8] 宋焱,徐颂军,刘贤赵,等. 南沙红树林湿地公园水环境质量时空差异分析:基于改进后倍斜率聚类分析的视角[J]. 地理科学,2016,36(2):303-311.

[9] 郑德凤,张卓,姜俊超. 基于熵权的模糊物元模型在水环境质量评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理,2016,41(6):184-187.

[10] 李名升,张建辉,梁念,等. 常用水环境质量评价方法分析与比较[J]. 地理科学进展,2012,31(5):617-624.

[11] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river(India) using multivariate statistical techniques: A case study[J]. Analytica Chimica Acta, 2005,538(1):355-374.

[12] 徐祖信. 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:自然科学版,2005,33(3):321-325.

[13] 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.

[14] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management—application to a tropical lake system [J]. Ecological Modelling, 2004,178(3/4):295-311.

[15] Liu R X, Kuang J, Gong Q, et al. Principal component regression analysis with SPSS [J]. Computer Methods & Programs in Biomedicine, 2003,71(2):

- 141-147.
- [16] 杨学福,王蕾,关建玲,等. 基于多元统计分析的渭河西咸段水质评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1560-1565.
- [17] Nazeer S, Ali Z, Malik R N. Water Quality Assessment of river Soan(Pakistan) and source apportionment of pollution sources through receptor modeling [J]. Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2016, 71(1): 1-16.
- [18] Zhou F, Huang G H, Guo H, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. Water Research, 2007, 41(15): 3429-3439.
- [19] Yang L, Mei K, Liu X, et al. Spatial distribution and source apportionment of water pollution in different administrative zones of Wen-Rui-Tang (WRT) river watershed, China [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2013, 20(8): 5341-5352.
- [20] 王庆鹤. 典型自然河道形态结构差异对水体自净作用的关系[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [21] Shrestha S, Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(4): 464-475.
- [22] Thurston G D, Spengler J D. A qualitative assessment of source contribution to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston [J]. Atmospheric Environment, 1985, 19(1): 9-25.
- [23] Miller S L, Anderson M J, Daly E P, et al. Source apportionment of exposures to volatile organic compounds. I. Evaluation of receptor models using simulated exposure data [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(22): 3629-3641.
- [24] Li Q, Shang L, Gao T, et al. Use of principal component scores in multiple linear regression models for simulation of chlorophyll-a and phytoplankton abundance at a karst deep reservoir, southwest of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 72-78.
- [25] Zou R, Lung W S, Guo H. Neural network embedded monte carlo approach for water quality modeling under input information uncertainty [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(2): 135-142.
- [26] Gulgundi M S, Shetty A. Identification and apportionment of pollution sources to groundwater quality [J]. Environmental Processes, 2016, 3(2): 1-11.
- [27] 张嘉嘉, 赵景波, 董雯, 等. 关中平原近十年来渭河水环境演变研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(1): 68-72.



(上接第 203 页)

- [7] 刘佳, 马振峰, 杨淑群, 等. 1961—2010 年大渡河流域极端降水事件变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(12): 2167-2176.
- [8] 陆苗, 高超, 苏布达, 等. 淮河流域极端降水空间分布及概率特征 [J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 160-168.
- [9] 刘鑫, 顾乐雨, 王屏, 等. 近 30 年太湖流域极端降水特征分析 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 1-4.
- [10] 陈金明, 陆桂华, 吴志勇, 等. 长江流域极端降水过程事件的年内分布特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(4): 588-594.
- [11] 贺振, 贺俊平. 1960—2012 年黄河流域极端降水时空变化 [J]. 资源科学, 2014, 36(3): 490-501.
- [12] 郭志辉, 杨贵羽, 王喜凤. 松辽流域近 50 年来降水演变规律分析 [J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 35-37.
- [13] 李想, 李维京, 赵振国. 我国松花江流域和辽河流域降水的长期变化规律和未来趋势分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 595-598.
- [14] 曹铮. 松辽流域水资源演变规律分析 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [15] 马铁民, 尤晓敏, 宁方贵. 松辽流域近年旱情分析 [J]. 东北水利水电, 2004, 22(3): 7-8, 12, 55.
- [16] 尤晓敏. 2005 年松辽流域汛期降雨的分析和预报 [J]. 东北水利水电, 2005, 23(12): 32-33.
- [17] 贺俊平, 贺振. 近 53 年黄河流域降水时空分布特征 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 95-100.
- [18] 马开玉, 陈星, 张耀存. 气候诊断 [M]. 北京: 气象出版社, 1996. 105-160.
- [19] 袭祝香, 纪玲玲, 高晓获. 吉林省极端严寒事件时空分布特征及评估方法研究 [J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1341-1346.
- [20] 白美兰, 郝润全, 李喜仓, 等. 1961—2010 年内蒙古地区极端气候事件变化特征 [J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 189-193.
- [21] 孙凤华, 杨修群, 路爽, 等. 东北地区平均、最高、最低气温时空变化特征及对比分析 [J]. 气象科学, 2006, 26(2): 157-163.