

杭州西湖风景名胜区主要溪流水质评价

姚通, 陈福疆, 阮兵, 赵茜垠, 陈琼熙, 李必峰, 石利云, 沈鼎

[杭州西湖风景名胜区城市管理保障中心(杭州西湖风景名胜区环境监测中心), 浙江 杭州 310012]

摘要: 分别通过单因子水质评价、综合水质指数、主成分分析法对杭州西湖风景名胜区 6 条溪流 2018—2023 年水质特征进行分析评价。结果表明, 杭州西湖风景名胜区 6 条溪流总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(I_{Mn}) 年均质量浓度均满足地表水Ⅲ类及以上水质要求。综合水质指数和主成分分析结果表明, 6 条溪流中梅坞溪和进龙河水质相对波动较大, 关键影响指标分别为 NH₃-N 和 TP。季节性水质分析结果发现, 梅坞溪水质波动主要出现在秋季(9—11 月)和冬季(上年 12 月—2 月), 可能与周边农业非点源污染有关; 进龙河水质波动主要出现在春季(3—5 月), 其受到底泥内源污染释放影响。建议通过加强内源污染控制、开展农业面源污染监测与防治、优化排口管理等方式完善水环境管理措施。

关键词: 水质评价; 单因子; 综合水质指数; 主成分分析法

中图分类号: X824

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2025)01-0000-06

Water Quality Evaluation of Main Streams in Hangzhou West Lake Scenic Area

YAO Tong, CHEN Fujiang, RUAN Bing, ZHAO Qianyin, CHEN Qiongxi, LI Bifeng, SHI Liyun, SHEN Ding

[Hangzhou West Lake Scenic Area Urban Management Guarantee Center (Hangzhou West Lake Scenic Area Environmental Monitoring Center), Hangzhou, Zhejiang 310012, China]

Abstract: The water quality analysis of 6 streams in the West Lake Scenic Area of Hangzhou from 2018 to 2023 was conducted through single-factor water quality evaluation, comprehensive water quality index, and principal component analysis. The results indicate that the annual average concentrations of total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH₃-N), dissolved oxygen (DO), and permanganate index (I_{Mn}) in all 6 monitored sample sectors stably reached the limits of surface water class III. The comprehensive water quality index and principal component analysis indicated that the water quality in the Meiwu Stream and Jinlong River exhibited relatively significant fluctuations, with key influencing factors being NH₃-N and TP, respectively. Seasonal water quality analysis revealed that the water quality fluctuations in the Meiwu Stream mainly occurred in autumn (September–November) and winter (December–February), potentially related to agricultural non-point source pollution in the surrounding areas. The water quality fluctuations in the Jinlong River primarily occurred in spring (March–May), influenced by the release of internal source pollution from the sediment. It is recommended to improve water environment management measures by strengthening internal pollution control, conducting monitoring and prevention of agricultural non-point source pollution, and optimizing outfall management.

Key words: Water quality evaluation; Single-factor; Comprehensive water quality index; Principal component analysis

水质评价是根据评价目标选择合适的方法对水体的利用价值和处理要求作出评定, 是采取有效措施进行水环境管理、预防水污染的基本前提^[1-5]。杭州西湖风景名胜区(以下简称“西湖景区”)水生态景观资源丰富, 主要水体包括西湖、西湖流域上游溪流(金沙涧、龙泓涧、长桥溪、赤山溪)、钱塘江(景区段)上游河溪(九溪、进龙河、梅

坞溪)等。一直以来, 西湖景区的水体特征和评价主要围绕西湖展开, 对西湖流域上游溪流、钱塘江(景区段)上游溪流的水质特征研究较少^[6-10]。西湖景区游客众多, 主要溪流沿岸村庄、茶田密布, 人为活动产生的面源污染极易造成溪流水质波动。为全面掌握西湖景区主要溪流水质时空特征, 通过单因子水质评价^[5, 11]、综合水质指数(WQI)^[4, 12]以

收稿日期: 2024-03-15; 修订日期: 2024-05-23

基金项目: 杭州西湖风景名胜区管委会科技发展计划项目(2023-018)

作者简介: 姚通(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事环境污染防控相关研究。

及主成分分析法^[13-14]等评价手段对金沙涧、龙泓涧、长桥溪、九溪、进龙河、梅坞溪等 6 条溪流 2018—2023 年的水质整体状况、季节性特征进行综合评价,分析水质波动影响因素,为后续优化西湖景区水环境管理举措、防范水体面源污染提供数据支撑和参考。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究选取杭州西湖风景名胜区 6 条溪流为研究对象(图 1),其中,九溪、梅坞溪、进龙河为钱塘江(西湖景区段)上游溪流,金沙涧、长桥溪、龙泓涧为西湖上游溪流。

6 条溪流均设有水质监控断面,水质监控频次为每月 1 次。常规水质监测项目包括 pH 值、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)、高锰酸盐指数(I_{Mn})、溶解氧(DO)、透明度、氧化还原电位共 7 项指标,补充水质监测项目包括总氮、硝态氮、叶绿素 a、正磷酸盐 4 项指标。



图 1 杭州西湖风景名胜区溪流分布示意

1.2 分析方法

分别采用单因子、综合水质指数(WQI)以及主成分分析法对杭州西湖风景名胜区 6 条溪流水质状况和时空特征进行分析。主成分分析法是通过将数据降维和因子分析,实现将众多相关性指标转换成少数综合性指标的分析方法。此方法有利于降低工作量,同时又能全面反映水质状况^[15-16],采用 SPSS 26.0 软件进行,计算公式如下:

$$F_i = \sum_{i=1}^n Z_i X_i \tag{1}$$

$$F = \sum_{i=1}^n A_i F_i \tag{2}$$

式中: F_i ——主成分表达式; n ——参加评价的水质指标个数; Z_i ——主成分因子载荷, X_i ——标准化后的各指标因子原始数据; A_i ——各主成分贡献率; F ——主成分分析综合评价指数, F 值越大,水质越差。

WQI 计算公式如下:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^n C_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \tag{3}$$

式中: n ——参加评价的水质指标个数; C_i 和 P_i ——变量 i 的归一化值和权重^[4,12,17]。参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),将 C_i 值按照 11 个类别从 0~100 分进行赋值, P_i 最小值为 1,最大值为 4。根据 WQI 值将水质状况分为 5 个等级: $WQI > 90$ 为优秀, $70 < WQI \leq 90$ 为良好, $50 < WQI \leq 70$ 为中等, $25 < WQI \leq 50$ 为一般, $0 \leq WQI \leq 25$ 为差。分别以 DO、I_{Mn}、TP 和 NH₃-N 4 项指标计算 WQI 值,各项参数取值见表 1。

表 1 水质指标权重值(P_i)及归一化值(C_i)

指标	P_i	归一化因子 C_i										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
DO	1	≥ 7.5	> 7.0	> 6.5	> 6.0	> 5.0	> 4.0	> 3.5	> 3.0	> 2.0	≥ 1.0	< 1.0
TP	4	< 0.01	< 0.02	< 0.05	< 0.10	< 0.15	< 0.20	< 0.25	< 0.30	< 0.35	≤ 0.40	> 0.4
NH ₃ -N	3	< 0.01	< 0.05	< 0.10	< 0.20	< 0.30	< 0.40	< 0.50	< 0.75	< 1.00	≤ 1.25	> 1.25
I _{Mn}	2	< 1.0	< 2.0	< 3.0	< 4.0	< 6.0	< 8.0	< 10	< 12	< 14	≤ 15	> 15

2 结果与讨论

2.1 单因子水质情况分析

根据西湖景区 6 条溪流日常水质监测情况,水质定类指标主要是 I_{Mn}、TP、NH₃-N 以及 DO。上述

4 项监测指标作为西湖景区溪流水质单因子评价依据,其监测指标质量浓度年均值结果见图 2(a)—(d)。由图 2 可见,6 条溪流的 I_{Mn}、TP、NH₃-N、DO 年均质量浓度均满足地表水 III 类及以上水质要求。

其中,九溪、金沙涧、龙泓涧、长桥溪 4 条溪流主要监测指标年均质量浓度满足地表水 II 类水质要求,梅坞溪和进龙河部分年份水质为地表 III 类(梅坞溪水水质定类指标为 $\text{NH}_3\text{-N}$,进龙河水水质定类指标为 TP)。

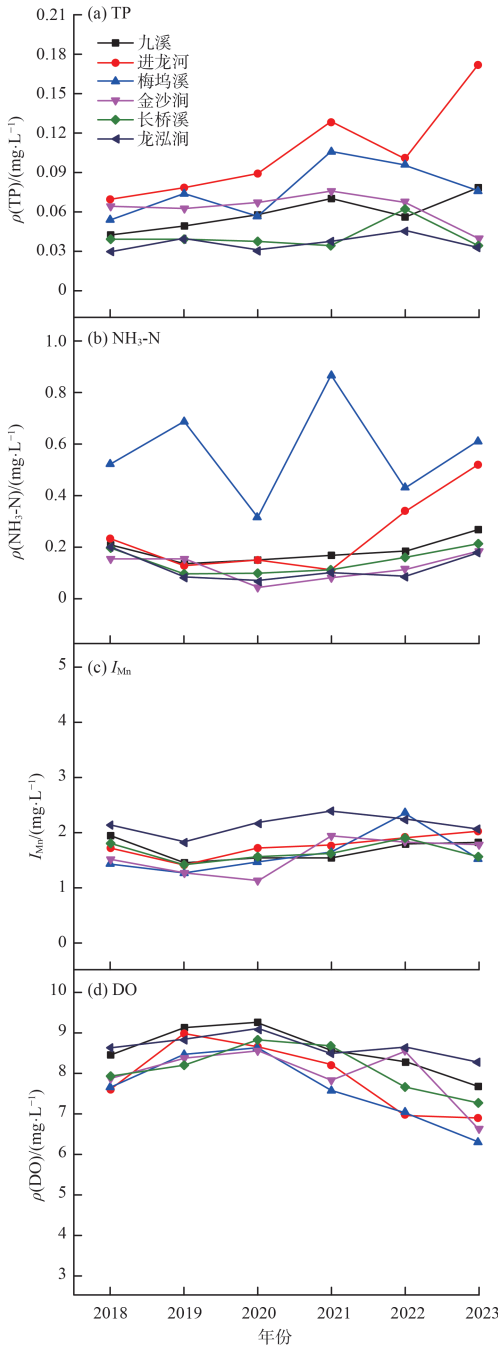


图 2 西湖景区 6 条溪流主要监测指标质量浓度年均值

为进一步考察各条溪流主要监测指标月均质量浓度变化情况,利用西湖景区 6 条溪流 2018—

2023 年 I_{Mn} 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、DO 月监测数据绘制箱式图,具体见图 3(a)一(d)。

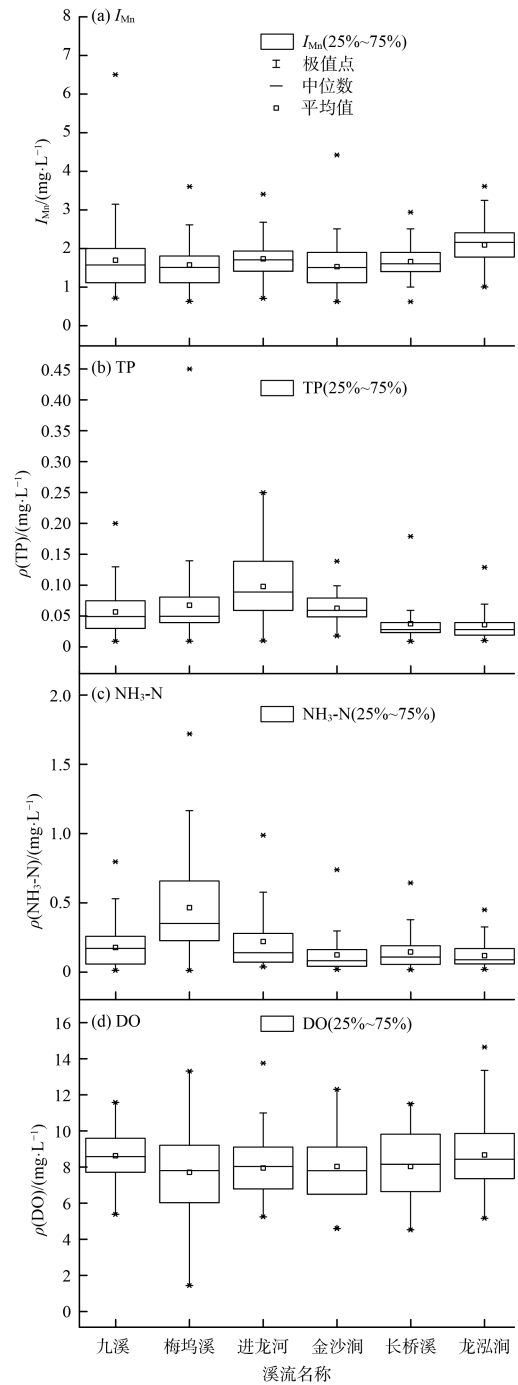


图 3 西湖景区 6 条溪流 2018—2023 年主要监测指标月均质量浓度范围

由图 3 可见,西湖上游 3 条溪流(金沙涧、长桥溪、龙泓涧)总体水质较为稳定,按照单因子水质评价方法,4 项指标所有月份监测数据均达到地表水 III 类以上水质。与之相较,钱塘江(西湖景区

段)上游 3 条溪流月监测数据波动更大,部分月份水质超出地表水Ⅲ类标准。

由图 3(b)、(c)可见,进龙河 $\rho(\text{TP})$ 和梅坞溪 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 波动范围较大,说明 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别是进龙河和梅坞溪水环境关键影响因素。由图 3(d)可见,DO 因受气温等因素影响明显,各条溪流 DO 变化幅度均较大,夏、秋季气温较高,DO 相对较低。

2.2 综合水质指数评价

采用综合水质指数评价法对西湖景区 6 条河道溪流 2018—2023 年水质状况进行评价,以 I_{Mn} 、DO、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 4 项指标的年均质量浓度为依据,根据表 1 和式(3)分别计算河道溪流历年 WQI 值(表 2)。由表 2 可见,近 6 年西湖景区主要溪流水质均在中等及以上,其中西湖上游 3 条溪流(金沙涧、长桥溪、龙泓涧)历年综合水质评价均为良好。钱塘江(景区段)上游 3 条溪流中九溪历年综合水质评价为良好;进龙河 2022 和 2023 年综合水质评价为中等,其余年份为良好;梅坞溪仅在 2020 年综合水质评价为良好,其余年份均为中等。

表 2 西湖景区 6 条溪流 2018—2023 年 WQI 值统计结果

溪流名称	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
九溪	76	77	77	77	77	74
梅坞溪	65	65	71	58	61	62
进龙河	74	77	77	73	65	53
金沙涧	77	77	83	80	77	79
长桥溪	81	81	84	81	77	77
龙泓涧	76	84	82	82	78	79

2.3 主成分分析评价

利用 SPSS 26.0 软件对西湖景区 6 条溪流 2018—2023 年水质监测数据年均值进行主成分分析,主成分提取结果见表 3。由表 3 可见,按照累积贡献率 $\geq 85\%$ [18] 筛选得到前 3 个主成分(累积贡献率为 92.699%),其中又以主成分 1 的贡献率最高,为 58.897%。

表 3 主成分提取结果

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	5.301	58.897	58.897	5.301	58.897	58.897
2	1.938	21.532	80.429	1.938	21.532	80.429
3	1.104	12.271	92.699	1.104	12.271	92.699
4	0.413	4.592	97.291			

续表

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
5	0.244	2.709	100			

前 3 个主成分因子载荷量见表 4。因子载荷量越高,说明主成分与该指标的相关程度越高。由表 4 可见,主成分 1 主要与总氮、总磷、硝酸盐氮和氨氮指标相关,说明西湖景区溪流水质主要受到氮、磷浓度影响。

表 4 主成分因子载荷量

水质指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
总氮	0.946	0.054	0.295
总磷	0.853	0.323	-0.393
硝酸盐氮	0.842	-0.196	0.464
氧化还原电位	-0.817	-0.202	0.447
溶解氧	-0.795	0.254	0.174
氨氮	0.792	-0.037	0.557
叶绿素 a	0.775	0.525	-0.109
pH 值	-0.046	0.967	0.143
高锰酸盐指数	-0.664	0.688	0.273

根据式(2)计算西湖景区 6 条溪流的综合评价指数(F),结果见图 4。由图 4 可见,综合评价指数 F 值由高到低依次为:进龙河>梅坞溪>金沙涧>九溪>龙泓涧>长桥溪,说明进龙河和梅坞溪在 6 条溪流中水质波动相对较大。

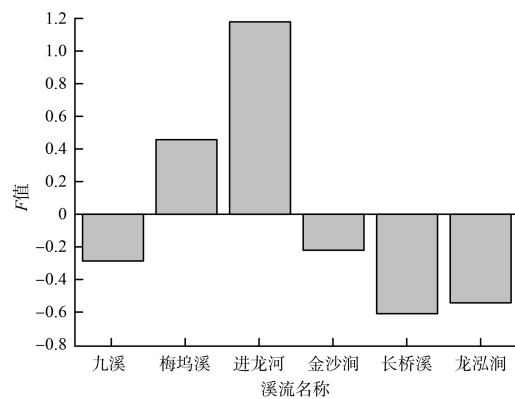


图 4 西湖景区 6 条溪流综合评价指数

2.4 进龙河、梅坞溪水质季节性特征分析

由上述分析可知,杭州西湖风景名胜区 6 条溪流中梅坞溪和进龙河水水质相对较为敏感,关键影响指标分别为 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP。为更好地评价梅坞溪、

进龙河水质波动特征,对其 2018—2023 年 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 季节性变化情况进行分析,季节按照冬(上年 12 月—2 月)、春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)进行划分。梅坞溪、进龙河 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 季节变化特征见图 5(a)—(d)。梅坞溪、进龙河 WQI 值季节性变化特征见图 6。由图

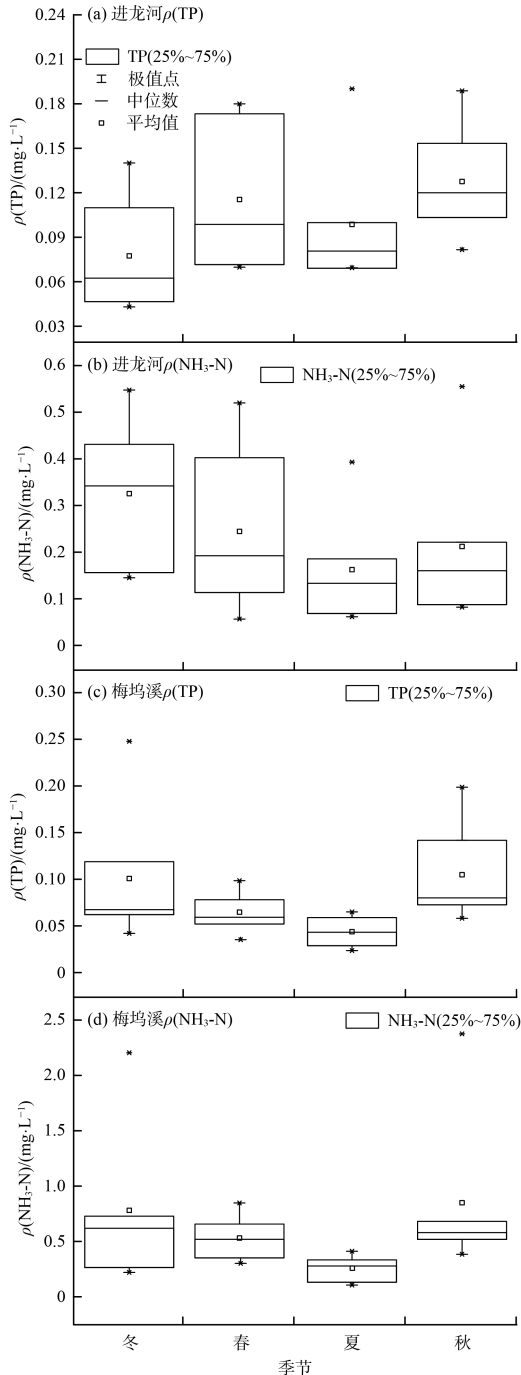


图 5 梅坞溪、进龙河 $\rho(\text{TP})$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 季节变化特征

5(a)、(b)可见,进龙河 TP 在春、秋季平均质量浓

度相对较高,进龙河 $\text{NH}_3\text{-N}$ 则在冬季和春季波动最大,在 4 个季节中进龙河春季 WQI 值最低(图 6),水质最为敏感,可能与底泥扰动有关。进龙河总体水深较浅(平均水深不足 1 m),随着春季气温逐渐回升,上下水体混合加速,扰动状态下沉积物氮、磷释放量显著高于静态释放,底泥中的营养盐重新释放进入水体,导致水质指标下降^[19-20]。由图 5(c)、(d)可见,与进龙河不同,梅坞溪 TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度高值主要出现在秋、冬季,且秋、冬季 WQI 值最低(图 6),可能与周边农业非点源污染有关。梅坞溪沿岸遍布龙井茶田,村民每年 2 月和 10 月左右会进行施肥作业(信息来源:杭州农业科技信息网 <http://www.hznky.com>),其中的营养盐会随降雨等流向溪流,导致水体氮、磷浓度的上升。相较而言,梅坞溪和进龙河夏季水质均相对较好,杭州夏季降雨量大,降水对河道污染物起到一定稀释作用。

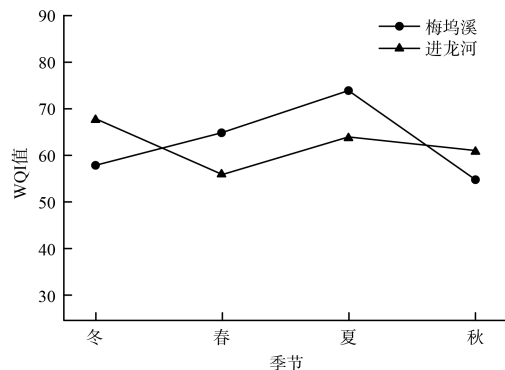


图 6 梅坞溪、进龙河 WQI 值季节变化特征

2.5 西湖景区溪流水质影响因素及应对措施

由以上分析可知,西湖景区主要溪流中梅坞溪和进龙河水质波动最为明显,影响因素主要来自溪流沉积物等内源污染释放和农业面源污染。此外,溪流沿岸居民偶发性生活源污染也可能对溪流水质造成影响。

经统计,西湖景区溪流沿线雨洪排口周边土地利用类型为村庄和居民区,其占比>70%。建议:(1)加强溪流内源污染控制。定期组织河道疏浚,同时加强水面漂浮物及枯水期裸露河床部分垃圾清理,降低溪流沉积物等内源污染累积。此外,探索天然矿物修复等方式对河底沉积物进行改良,降低污染释放。(2)开展农业面源污染监测。在溪流沿线重点区域开展农业面源污染监测,聚焦茶

田施肥以及茶忙前后等关键时期,评估农业面源污染入溪负荷,探索农业面源污染防治有效途径。(3)加强河道、溪流沿岸排口管理。定期开展溪流沿岸排口排查及排水水质监测,防范生活污水散排、污水管网破损等偶发性事故造成水体污染。

3 结论

(1)杭州西湖风景名胜区 6 条溪流水质总体较好,个别月份水质略有波动。6 条溪流 2018—2023 年 I_{mn} 、DO、TP 和 NH_3-N 4 项指标质量浓度年均值均满足地表水Ⅲ类及以上水质要求。

(2)单因子评价、综合水质指数及主成分分析法评价结果均表明,进龙河和梅坞溪在 6 条溪流中水质波动相对较大,影响水环境的关键因子分别是 TP 和 NH_3-N 。梅坞溪水质波动主要出现在秋季(9—11 月)和冬季(上年 12 月—2 月),可能与周边农业非点源污染有关;进龙河水质波动主要出现在春季(3—5 月),受到底泥内源污染释放影响。

(3)建议定期组织河道疏浚,加强内源污染控制,降低内源污染释放对水质的影响;开展溪流沿岸农业面源污染监测,全面评估农业面源污染对溪流水质的影响;定期开展溪流沿岸排口水质监测,优化排水口管理措施,防范不规范排水造成溪流水质污染。

[参考文献]

- [1] 胡开明,董锦云,冯彬,等. 河流水质时空变化特征及污染源解析研究——以斗龙港大团桥断面为例[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(1): 37-42.
- [2] 君珊,白凯,李魁,等. 综合水质标识指数法在海拉尔河水质评价中的应用研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(4): 175-180.
- [3] 高倩,赵强,邹春辉. 菏泽市水环境质量时空演变特征研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(11): 35-39.
- [4] 耿姣,王洋,胡术刚,等. 基于 WQI 的平原河网地区河流水质评价与时空变化分析[J]. 环境工程, 2023, 41(6): 187-193, 209.
- [5] 翟壮,张同亮,蔡文倩,等. 祖厉河流域水质评价与时空变化分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(7): 992-998.
- [6] 杨俊,饶利华,姚思鹏,等. 应用水质标识指数法评估杭州西湖综合治理效应[J]. 环境科技, 2020, 33(2): 65-69, 75.
- [7] 杨俊,陈琳,饶利华,等. 基于 2003—2017 年西湖 TP 时空变化的研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(3): 76-79.
- [8] 尤爱菊,吴芝瑛,韩曾萃,等. 引水等综合整治后杭州西湖氮、磷营养盐时空变化(1985—2013 年)[J]. 湖泊科学, 2015, 27(3): 371-377.
- [9] 徐丹亭. 杭州西湖入湖溪流水质变化及原位监测研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [10] 张小龙. 杭州西湖龙泓洞多级生态净化塘水质评价与水环境解析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [11] LIU C, HE H, TAN X H, et al. Establishment and application of water quality assessment model for Jiaozhou bay basin [J]. Advanced Materials Research, 2012, 518-523: 1165-1170.
- [12] PESCE S F, WUNDERLIN D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquia River[J]. Water Research, 2000, 34(11): 2915-2926.
- [13] ZEINALZADEH K, REZAEI E. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 13: 1-10.
- [14] 李晓玉,韩榛,邵光艺,等. 基于多元分析的北京市通州区主要河流水质时空变化[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2896-2907.
- [15] 王睿,左剑恶,张宇,等. 北京通州区主要河道水质分析及综合评价[J]. 给水排水, 2020, 56(S1): 724-728.
- [16] 吉祝美,方里,张俊,等. 主成分分析法在 SPSS 软件中的操作及在河流水质评价中的应用[J]. 环境研究与监测, 2012, 25(4): 68-73.
- [17] 田盼,王丽婧,宋林旭,等. 三峡水库典型支流不同时期的水质污染特征及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2021, 41(6): 2182-2191.
- [18] MARIET J, BART P, NICOLE V L, et al. Multivariate analysis of microarray data by principal component discriminant analysis: prioritizing relevant transcripts linked to the degradation of different carbohydrates in *Pseudomonas putida* S12[J]. Microbiology, 2006, 152(1): 257-272.
- [19] 姜敬龙,吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43-46.
- [20] 孙映宏,张飞珍,杨艳艳,等. 杭州市城区河道底泥污染特征分析[J]. 浙江水利科技, 2012(5): 4-6, 14.