

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.022

苏州市景观水体表观污染类型识别及特征指标筛选

戴天杰^{1,2}, 魏攀龙^{1,2}, 潘杨^{1,3}, 司壮壮^{1,2}, 王静⁴

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 江苏 苏州 215009;
3. 苏州科技大学城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 江苏 苏州 215009;
4. 达州职业技术学院基础部, 四川 达州 635001)

摘要:为解决表观污染成因的问题,以苏州市区河网为主要研究对象,采集796个数据样本,对景观水体的表观污染类型进行划分界定,并通过对数据样本的统计分析,探究水体表观污染类型和水质指标之间的关系。结果表明:氧化还原电位、溶解氧、叶绿素a、高锰酸盐指数和浊度对不同污染类型的水体具有很好的区分度,可作为主要特征指标;景观水体可分为有机主导型、无机主导型、营养主导型和混合型4种表观污染类型;不同表观污染水体判别的优先次序为有机主导型、无机主导型、营养主导型、混合型。

关键词:表观污染;污染类型;特征因子;地表水;城市景观水体;苏州市

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)02-0141-07

Identification of apparent pollution types and screening of characteristic indexes of landscape water body in Suzhou City // DAI Tianjie^{1,2}, WEI Panlong^{1,2}, PAN Yang^{1,3}, SI Zhuangzhuang^{1,2}, WANG Jing⁴ (1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Environment Biotechnology Research Institute, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. National & Local Joint Engineering Laboratory for Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 4. Basic Education Department, Dazhou Vocational and Technical College, Dazhou 635001, China)

Abstract: In order to solve the problem of apparent pollution causes, 796 data samples were collected from Suzhou urban river network. The types of apparent pollution of landscape water were divided and defined, and the relationship between the types of apparent pollution of water and water quality index was explored through statistical analysis of data samples. The results show that oxidation-reduction potential, dissolved oxygen, chlorophyll-a, permanganate index and turbidity have good discrimination for different types of water pollution, which can be used as the main characteristic indexes. The landscape water can be divided into four types of apparent pollution: organic-dominated type, inorganic-dominated type, nutrient-dominated type and mixed type. The order of priority discrimination for different types of surface polluted water bodies is determined, which is organic dominant type, inorganic dominant type, nutrient dominant type, mixed type.

Key words: apparent pollution; pollution type; characteristic factor; surface water; landscape water body; Suzhou City

苏州境内河网交织,水体是苏州城市景观的重要组成部分。近年来,随着城市工业化进程的推进,受点源、面源、内源的复合污染影响,城市景观水体污染问题愈发严重,黑臭、水华等引起人体感官不适的表观污染现象时有发生。城市水体的景观功能正在逐渐丧失,恢复城市水体的景观功能已成为城市河道治理的首要目标^[1]。目前对水体污染程度的

评价方法研究较多,而对水体表观污染类型分类的研究尚不充分,表观污染指数(surface pollution index, SPI)法虽可对城市景观水体表观污染程度进行表征,但无法对表观污染成因进行分析,更无法对表观污染类型进行划分识别^[2]。林鹏等^[3]研究了不同土地利用类型情况下区域水体污染类型,发现土地利用类型对水体污染类型具有显著影响;王立

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2017ZX07205003)

作者简介:戴天杰(1993—),男,硕士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail: 863193369@qq.com

通信作者:潘杨(1972—),男,教授,主要从事地表水水质修复研究。E-mail: panyang@mail.usts.edu.cn

新等^[4]在污染程度等级分类的基础上,对不同城市河流污染类型进行分类,并阐释了各河道的污染成因;Yuichi 等^[5]使用水体沉积物中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、大肠杆菌等指标对城市河道进行划分,得出了“工业污染和人口密度为主要污染原因”的结论;谈旭初^[6]依据污染分担率,划分并命名了地表水污染类型;刘邵俊等^[7]以浮游植物群落结构为手段对星云湖水体营养状态进行了评价;Kannel 等^[8]设立了 4 种水质参数,将不同城市水体分为了优、良、差 3 个等级。水体污染类型的识别有助于深入了解污染成因,提出更有针对性的治理措施。而针对城市景观水体,表观污染类型的识别更具有实际意义。本课题组前期结合国内外研究现状对表观污染类型进行了初步研究,周雪^[9]以水体中硫化物、腐殖酸等指标含量结合水体颜色将城市水体分为 6 类表观污染类型,其指标体系中水体颜色的判别主观性较大,也没有明确提出水体颜色和表观污染类型的关系;孙娜^[10]以硫化物、叶绿素 a 等指标的累计频率为依据,结合水体颜色将表观污染类型分为 4 类,在后期验证中,发现其分类方法中的硫化物等指标的测定较为困难,该分类方法可行度不高。鉴于此,本文通过对苏州境内城市景观水体的广域采样,识别出不同表观污染类型水体的特征指标,对不同水体的表观污染类型进行了分类,提出了一种简便快捷的表观污染分类方法,简化了指标测定难度,可为针对不同表观污染类型水体的防治提供参考。

1 材料与数据来源

1.1 研究区域概况

苏州市位于北纬 $30^{\circ}47' \sim 32^{\circ}20'$ 、东经 $119^{\circ}55' \sim 121^{\circ}20'$ 之间,全市地势低平,自西向东缓慢倾斜。由于地处亚热带季风气候区,四季分明,雨量充沛,年均降水量约为 1100 mm。城市水系发达,河道密布,具有“三纵三横一环”的河网体系,是典型的江南河网城市^[11]。

1.2 数据来源

2018—2019 年在研究区域内进行广域采样,共涉及 40 个采样点(图 1)。采样点的选取原则为针对苏州城区各片区内不同的水力条件选取具有典型表观污染特征的水体,采样频率为 1 周 1 次,截至 2019 年 3 月,共采集有效数据 796 个。每组监测数据包括现场评价记录和相关指标测定:依据 SL 219—2013《水环境监测规范》,结合河道实际情况,采集 0.5 m 处的上表层水^[12];按照《水和废水监测分析方法》(第四版)规范要求,采集的水样采用洁净干燥的聚乙烯瓶盛放,置于 4℃ 的冰箱中保存,

并于 24 h 内完成指标测定^[13]。

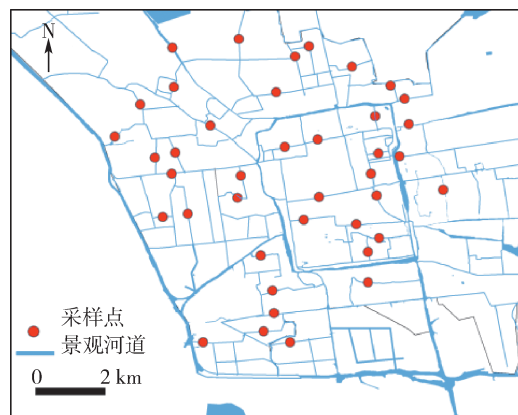


图 1 采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points

2 研究方法

2.1 指标测定及分析方法

监测指标包括氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chl-a)、pH 值、浊度、温度(T)和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),同时现场记录水体颜色、河道环境等。ORP 采用 HACH2100 便携式 ORP 仪测定;DO 和 T 采用 HACH2100 便携式溶氧仪测定,并与 HJ 506—2009《水质溶解氧的测定电化学探头法》附表 A.2 不同大气压和水温条件下氧的溶解度进行对照;浊度采用 HACH2100 便携式浊度仪测定;Chl-a 采用 Water-pam 水样荧光仪测定; COD_{Mn} 采用高锰酸钾酸性法测定。水体表观污染采用吸收光谱法进行研究,该方法用 SPI 值衡量表观污染程度^[14],根据 SPI 值将表观污染等级分为 5 类, $[0,10)$ 为好、 $[10,25)$ 为较好、 $[25,45)$ 为尚可、 $[45,70)$ 为较差、大于或等于 70 为差。表观污染指数计算方法为

$$I_{\text{SP}} = 26\ln(\beta x + 10) - 60 \quad (1)$$

式中: I_{SP} 为表观污染指数 SPI 值; x 为水样过滤前后吸收光谱扫描曲线的围合面积; β 为修正系数。

针对不同表观污染类型水体的特征指标采用 SPSS 进行方差齐性检验,以检验分类方法中的特征指标是否来自同一个整体。当 $P < 0.05$ 时说明样本方差不齐,特征指标不是来自同一个整体,特征指标的分布差异较大且其差异不是随机差异^[13],即通过该指标可将目标水体与其他水体区分开,所选取的特征指标具有统计学意义。

2.2 景观水体表观污染类型定义及指标筛选

由于不同表观污染类型水体中主要污染物质的不同,导致水体呈现特点的不同。结合前期研究,将景观水体的表观污染类型分为 4 类:有机主导型、无机主导型、营养主导型和混合型^[10]。

a. 有机主导型。有机主导型表观污染水体主要由有机物引起,包括水体黑臭现象及藻类过度繁殖所导致的水华现象,水体多呈现黑色、墨绿色。根据水体黑臭产生的机理,水体中有机物的增加加剧了 DO 的消耗,使硝化、反硝化反应加强,产生氨气、硫化氢等具有刺激性气味气体,同时硫离子会与水体中金属离子(铁、锰)生成黑臭物质硫化亚铁、硫化锰^[15-18],最终导致水中氧化还原性的改变。孙慧群等^[19-20]的研究也指出 ORP 值越低,还原性越强,黑臭物质产生的就越多。结合住建部《城市黑臭水体整治工作指南》中对黑臭水体的定义及其规定的黑臭水体黑臭程度评价等级的指标体系,并考虑水质指标测定的简便性及可操作性,将能够反映水体氧化还原状态的水质指标 ORP 值作为有机主导型(黑臭)表观污染水体的特征指标。

水华水体是由藻类过度繁殖引起的。依据藻类的生长规律,藻类的过度繁殖会消耗水体中的氮、磷等元素^[21-23],当水体中氮、磷元素无法满足藻类生长时,藻类会发生自解现象使得水体中有机物大量增加,水华水体会转化为黑臭水体,因此将其归为有机主导型。水华水体的主要污染物质为藻类,直接测定藻类含量较为困难,相关研究^[24]表明,藻类浓度 $\rho(\text{Chl-a})$ 的变化可反映藻类的总生物量变化规律,因此选择 $\rho(\text{Chl-a})$ 作为特征指标。根据藻类的生长规律,藻类在大量繁殖时光合作用加剧会释放出大量氧气,使水体 DO 处于过饱和状态。寸黎辉等^[25-26]的研究指出藻类等水生植物的光合作用是引起水体中 DO 过饱和的主要原因之一;李天深等^[27]的研究也表明在水华水体中监测到高 DO。根据这一特点,选择水体中 DO 与在采样时大气压及水体温度条件下对应氧的溶解度比值 R_{DO} 作为特征值。综上,选择 R_{DO} 值和 $\rho(\text{Chl-a})$ 两个指标共同作为有机主导型(水华)表观污染水体的特征指标。

b. 无机主导型。无机主导型表观污染水体主要由无机颗粒(泥沙等)引起,浊度偏高,水体多呈现黄色、土黄色。根据黄文典等^[28-29]的研究结果,水体中泥沙等颗粒物的存在会加快有机物的降解,无机主导型污染水体呈现浊度较高、有机物含量低的特点。选择单位浊度所含有机物的量 R_{T} 做为无机主导型表观污染水体的特征值,侧面反映水体中无机物含量,该值越大说明水体中所含无机物越少,反之,所含无机物越多。

c. 营养主导型。营养主导型表观污染水体主要由水体中少量无机营养物(N、P 等)引起,水体表观污染较轻,清澈、无明显悬浮物、呈浅绿色。陈鸣

等^[30]关于表观污染成因的研究结果表明,非溶解性物质是造成城市水体表观污染的主要原因。而营养主导型表观污染水体中 N、P 元素等污染物质均具有溶解性,因此选取浊度值作为营养主导型水体特征指标来反映表观污染水体清澈、无明显悬浮物的特征;同时由于 N、P 等营养元素的少量存在,反映藻类存在的 $\rho(\text{Chl-a})$ 也可以作为营养主导型表观污染水体的特征指标之一。综上,选取浊度值与 $\rho(\text{Chl-a})$ 两个指标共同作为营养主导型表观污染水体的特征指标。

d. 混合型。混合型表观污染水体处于上述三者之间,由无机物、有机物、无机营养物共同引起,具有向有机主导型、无机主导型、营养主导型某一类型转变的特点,水体多呈现黄绿色、灰色。由于混合型表观污染水体污染物成分复杂,各指标含量差异不大,且会较快转变为其他 3 类主导型水体,因此使用排除法将混合型表观污染水体与其他 3 类表观污染水体进行区分。

3 结果与分析

3.1 特征指标的验证

a. 有机主导型。根据前文定义,有机主导型水体包括黑臭型和水华型两种,分别对黑臭型(图 2)和水华型(图 3)选取的特征指标进行验证。图 2 为选取样品的 ORP 值分布情况。由图 2 可见,有机主导型(黑臭)的 ORP 值皆为负值,而其他 3 类表观污染水体的 ORP 值均是正值,可见 ORP 可以作为有机主导型(黑臭)表观污染水体的特征指标,将其较好地与其他 3 种表观污染类型的水体区分开来。为进一步验证 ORP 作为特征指标的合理性,对样本进行齐性检验,结果表明 4 类水体的 ORP 显著性 $P = 0.00$,小于 0.05,方差不齐,区分结果具有统计学意义,较为合理。

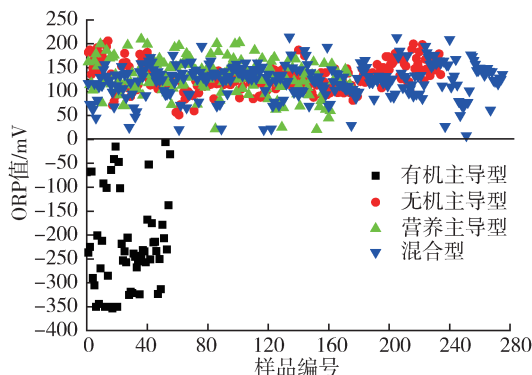


图 2 选取样品的 ORP 值分布

Fig. 2 Distribution of ORP values of selected samples

由图 3(a)可见,有机主导型(水华)的 R_{DO} 均大

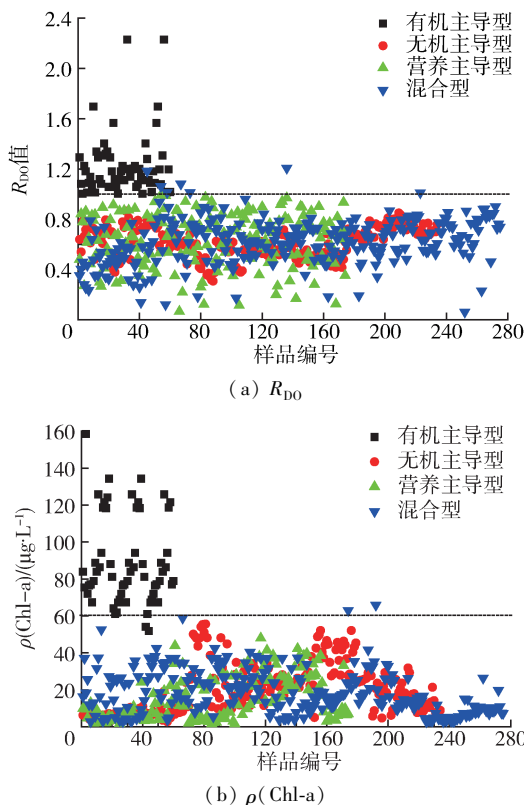


图3 选取样品的 R_{D0} 和 $\rho(\text{Chl-a})$ 分布
Fig.3 Distribution of R_{D0} value and $\rho(\text{Chl-a})$ of selected samples

于1,而其他3种表观污染类型水体的 R_{D0} 除个别水体外,均小于1,因此可以将 R_{D0} 作为有机主导型(水华)的表观污染特征指标。同时,根据水华水体叶绿素含量较大的特性,引入 $\rho(\text{Chl-a})$ 作为有机主导型(水华)的辅助验证指标,由图3(b)可见,有机主导型(水华)的 $\rho(\text{Chl-a})$ 均在 $60\mu\text{g/L}$ 以上,因此可确定 $\rho(\text{Chl-a}) > 60\mu\text{g/L}$ 为有机主导型(水华)的辅助验证指标。对4种污染类型水体的 R_{D0} 和 $\rho(\text{Chl-a})$ 进行齐性检验,其结果为: R_{D0} 齐性检验 $P=0.00$,小于0.05,方差不齐; $\rho(\text{Chl-a})$ 齐性检验 $P=0.00$,小于0.05,方差不齐,说明区分结果具有统计学意义和合理性。

有机主导型黑臭水体 ORP 值低于0,是由水体中存在大量还原性物质引起的。对于有机主导型水体,应先进行截污控源,控制高污染废水的排入,同时加强河道清淤,控制水体中的底泥内源污染;针对有机污染较为严重的水体,可采用充氧曝气的方法加快黑臭物质的降解,提高水体净化能力^[31]。有机主导型水华水体中的过饱和 DO 和高质量浓度 Chl-a 是由藻类大量繁殖时光合作用产生了大量氧气引起的,应该加强水面浮藻的打捞,降低藻类生物量,控制富含氮磷元素的水体排入,避免产生新的藻类。

b. 无机主导型。对选取的无机主导型表观污染水体特征值 R_{IT} 进行验证,图4为选取样品的 R_{IT} 分布情况。由图4可见,无机主导型水体的 R_{IT} 均小于0.1,而其他3类水体均大于0.1,可见 R_{IT} 作为无机主导型水体的表观污染特征指标与其他3类水体有明显的区分。同时,对目前所收集样品的 R_{IT} 进行齐性检验,验证结果表明水体 R_{IT} 的齐性检验 $P=0.00$,小于0.05,方差不齐,分类具有统计学意义。

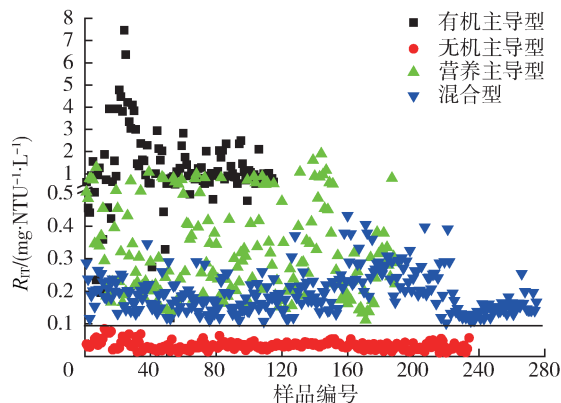


图4 选取样品的 R_{IT} 分布
Fig.4 Distribution of R_{IT} of selected samples

无机主导型水体是由泥沙等无机悬浮污染物含量过大引起的,由于泥沙等颗粒物有加快降解有机污染物的作用,因此该类型水体有机污染较低,浊度较高,应加强河道调水^[32],引入清洁水源对目标水体进行稀释,降低水体浑浊度。其次,需要增强堤岸绿化率,建设生态护坡^[33],进行生态固化,有效降低雨水对堤岸土壤的冲刷以降低水体中泥沙含量。

c. 营养主导型。根据浊度值和 $\rho(\text{Chl-a})$ 对营养主导型水体与其他3类水体的区分进行验证。由前文的研究结果可以看出,有机主导型及无机主导型水体特征指标与其他水体具有明显的区分,因此,对于营养主导型特征指标的验证只需在营养主导型和混合型表观污染水体中进行。图5为选取样品的浊度和 $\rho(\text{Chl-a})$ 的分布情况。由图5可见,营养主导型水体浊度与混合型水体浊度具有明显区分,而二者 $\rho(\text{Chl-a})$ 无明显区分度且具有交叉重叠部分,同时发现表观状态良好的营养主导型水体 $\rho(\text{Chl-a})$ 均小于 $50\mu\text{g/L}$ 。对选取样品的浊度和 $\rho(\text{Chl-a})$ 分别进行齐性检验,发现浊度齐性检验 $P=0.01$,小于0.05,方差不齐,具有统计学意义; $\rho(\text{Chl-a})$ 齐性检验中 $P=0.205$,大于0.05,单以 Chl-a 作为营养主导型表观污染水体和混合型水体进行区分的特征指标没有意义。

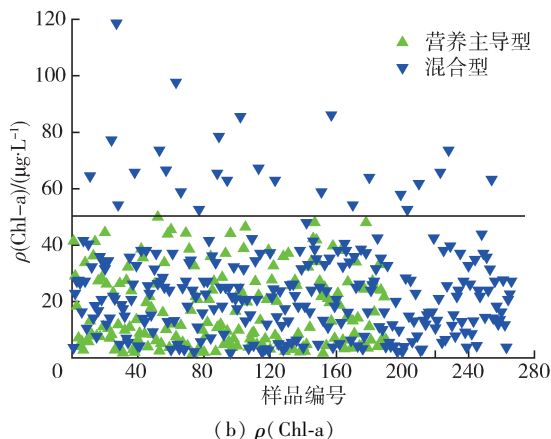
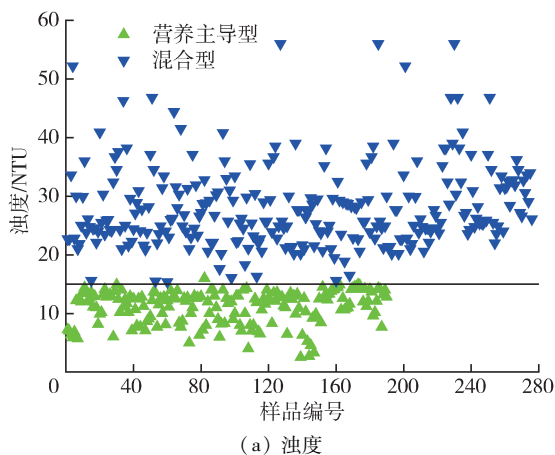


图5 选取样品的浊度和 $\rho(\text{Chl-a})$ 分布

Fig.5 Distribution of turbidity and $\rho(\text{Chl-a})$ of selected samples

营养主导型水体污染状况较轻,表观状态良好,浊度较低。同时发现营养主导型水体中氮磷比均低于12,抑制了藻类生长,应保持水体现状,控制富含N、P等营养元素的废水排入。可适当地种植水生植物^[34],在吸收固定水体中氮磷物质的同时提高河道景观,增强水体环境稳定性。对于污染状况较为复杂的混合型表观水体可加强监测,针对其表观污染类型的转变趋势采用适当的治理措施。

3.3 不同表观污染类型与表观污染指数关系

不同表观污染类型与对应SPI等级见图6。由图6可见,呈现有机主导型的水体SPI等级均在差与较差之间;呈现无机主导型水体中仅5%的SPI等级为尚可,超过90%为较差与差。这与现场观测中有机主导型和无机主导型水体表观污染严重相符。水体表观污染较轻的营养主导型水体SPI等级12%为好、72%为较好、16%为尚可,没有出现较差与差。混合型水体则出现了4个SPI等级,跨度较大。可见,不同水体表观污染类型的分类与SPI等级具有良好的响应关系。

通过对4种表观污染水体特征指标的筛选、鉴别,初步得出城市景观水体不同表观污染类型判别

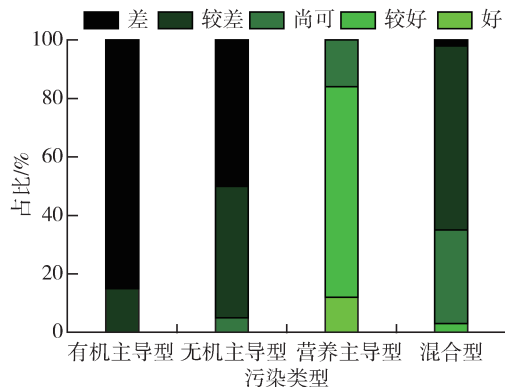


图6 不同表观污染类型与SPI等级

Fig.6 Different types of surface pollution and SPI levels

方法,有机主导型判定指标:ORP值小于0或 $R_{D0} > 1$ 且 $\rho(\text{Chl-a}) > 60 \mu\text{g/L}$;无机主导型判定指标: $R_{Tt} < 0.1 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{NTU})$;营养主导型判定指标:浊度小于15 NTU且 $\rho(\text{Chl-a}) < 50 \mu\text{g/L}$;混合型判定指标:其他。确定表观污染类型判定的优先次序为:有机主导型、无机主导型、营养主导型、混合型。

4 结论

a. 城市景观水体的表观污染是由不同的主导污染物引起的,ORP、 R_{D0} 、Chl-a、浊度和 R_{Tt} 可作为区分城市景观水体表观污染类型的特征指标。

b. 将城市景观水体的表观污染类型划分为4类,为有机主导型判定指标:ORP值小于0或 $R_{D0} > 1$ 且 $\rho(\text{Chl-a}) > 60 \mu\text{g/L}$;无机主导型判定指标: $R_{Tt} < 0.1 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{NTU})$;营养主导型判定指标:浊度小于15 NTU且 $\rho(\text{Chl-a}) < 50 \mu\text{g/L}$;混合型判定指标:其他。

c. 提出的城市景观水体表观污染类型的分类方法可以确定不同表观污染类型的特征指标,能对城市景观水体的污染成因进行识别。在苏州城区进行了验证,通过对目前采集到的200个样本的验证,吻合率达到90%。该方法应用在水力条件与苏州相差较大地区时阈值是否需要调整仍要进一步探索。

参考文献:

- [1] 周怀宇,刘滋菁,刘海龙,等.雨洪管理设施的监测与智慧景观设计结合的跨学科实证[J].水资源保护,2019,35(6):82-88. (ZHOU Huaiyu, LIU Zijing, LIU Hailong, et al. Interdisciplinary demonstration of combination of stormwater management facilities monitoring and smart landscape design[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6):82-88. (in Chinese))
- [2] 陈鸣,潘杨,黄勇.吸收光谱法表征城市景观水体表观污染的方法优化[J].苏州科技学院学报(工程技术

- 版), 2013, 26 (4): 1-6. (CHEN Ming, PAN Yang, HUANG Yong. Optimizing absorption spectrometry characterization for apparent pollution of urban water[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2013, 26 (4): 1-6. (in Chinese))
- [3] 林鹏,陈余道,夏源. 漓江流域不同土地利用类型下水体污染类型与成因[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36 (3): 539-544. (LIN Peng, CHEN Yudao, XIA Yuan. Types and causes of water pollution under different land use types in Lijiang River Basin [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36 (3): 539-544. (in Chinese))
- [4] 王立新,刘华民. 模糊聚类法在我国城市内河水体污染分类研究中的应用[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2004 (6): 710-715. (WANG Lixin, LIU Huamin. Application of fuzzy clustering analysis for studying water pollution classification of the inland rivers in cities of China[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2004(6): 710-715. (in Chinese))
- [5] YUICHI Miyabara, JUNZO Suzuki, SHIZUO Suzuki. Classification of urban rivers on the basis of water pollution indicators in river sediment [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1994, 52 (1): 1-8.
- [6] 谈旭初. 依据污染分担率划分地表水污染类型的方法[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(4): 7-8. (TAN Xuchu. Research on method of surface water pollution classification based on pollution share rate [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(4): 7-8. (in Chinese))
- [7] 刘绍俊,吉正元,普发贵,等. 星云湖浮游植物群落结构及水体营养状态生物评价[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1439-1447. (LIU Shaojun, JI Zhengyuan, PU Fagui, et al. On phytoplankton community composition structure and biological assessment of water trophic state in Xingyun Lake[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(4): 1439-1447. (in Chinese))
- [8] KANNEL Prakash Raj, LEE Seockheon, LEE Young-Soo, et al. Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 132: 1-3.
- [9] 周雪. 城市水体景观污染特征物质识别及其污染特性研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2013.
- [10] 孙娜. 景观污染特征物质及污染水体分类研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015.
- [11] 季永兴,刘水芹. 苏州河水环境治理 20 年回顾与展望[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 25-30. (JI Yongxing, LIU Shuiqin. Review and prospect of Suzhou Creek water environment treatment in 20 years [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 25-30. (in Chinese))
- [12] 中华人民共和国水利部. 水环境监测规范: SL 219—2013 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [14] 申杰. 城市景观水体景观污染的吸收光谱表征方法研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
- [15] 唐玉兰, 项莹雪, 马甜甜, 等. 基于多元统计分析方法的浑河流域沈抚段水质时空特征[J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (5): 2008-2012. (TANG Yulan, XIANG Yingxue, MA Tiantian, et al. Spatial and temporal specific features of the water quality of Shenyang-Fushun basin of Hunhe River through amultivariate statistical analysis [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (5): 2008-2012. (in Chinese))
- [16] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (4): 1331-1340. (WANG Xu, WANG Yonggang, SUN Changhong, et al. Formation mechanism and assessment method for u-rban black and odorous water body: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27 (4): 1331-1340. (in Chinese))
- [17] 于玉彬, 黄勇. 城市河流黑臭原因及机理的研究进展[J]. 环境科技, 2010, 23 (增刊 2): 111-114. (YU Yubin, HUANG Yong. Review of reason and mechanism of black and stink in urban rivers [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 23 (Sup2): 111-114. (in Chinese))
- [18] 张列宇, 饶本强, 熊瑛, 等. 人工湿地黑臭水体处理系统微生物脱氮机理研究[J]. 水生生物学报, 2010, 34 (2): 256-261. (ZHANG Lieyu, RAO Benqiang, XIONG Ying, et al. The micobial mechanism of horizontal constructed wetland used to treated black-odor river [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34 (2): 256-261. (in Chinese))
- [19] 孙慧群, 盛守祥, 杨志, 等. 湖泊底泥黑臭因子分析及其消除的关键因子调控策略[J]. 环境科学导刊, 2019, 38 (3): 12-20. (SUN Huiqun, SHENG Shouxiang YANG Zhi, et al. Analysis of blackodor factors of lake sediment and elimination strategies of key factor [J]. Environmental Science Survey, 2019, 38(3): 12-20. (in Chinese))
- [20] 邢西刚, 赵丽平, 屈智慧, 等. 城市黑臭水体治理探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33 (增刊 1): 103-105. (XING Xigang, ZHAO Liping, QU Zhihui, et al. Study on treatment of black and smelly water in city [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (Sup1): 103-105. (in Chinese))
- [21] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 443-454. (LIU Defu, YANG Zhengjian, JI Daobin, et al. A review on the mechanism and its controlling methods of t-

- he algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 443-454. (in Chinese))
- [22] 吴凯,李正魁,冯露露,等. 水华蓝藻上浮特征与机理的试验研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 137-142. (WU Kai, LI Zhengkui, FENG Lulu, et al. Floating characteristics and mechanism about water-blooms cyanobacteria[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 137-142. (in Chinese))
- [23] 徐宪根,周游,黄骏,等. 蓝藻水华发生机理及预警研究进展[J]. 污染防治技术, 2017, 30(5): 22-24. (XU Xiangen, ZHOU You, HUANG Jun, et al. Research advances in occurrence mechanism and warning of cyanobacterial bloom[J]. Pollution Control Technology, 2017, 30(5): 22-24. (in Chinese))
- [24] 汪婷婷,杨正健,刘德富. 香溪河库湾不同季节叶绿素a浓度影响因子分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(3): 14-21. (WANG Tingting, YANG Zhengjian, LIU Defu. Seasonal distribution of Chlorophyll-a in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir and relationship to environment factors[J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(3): 14-21. (in Chinese))
- [25] 寸黎辉,林青,鲁芳. 保山中心城市地表水溶解氧过饱和原因分析[J]. 广东化工, 2019, 46(8): 83-84. (CUN Lihui, LIN Qing, LU Fang. Cause analysis of dissolved Oxygen supersaturation in surface water of Baoshan Central City[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(8): 83-84. (in Chinese))
- [26] 王建华,丘焱伦. 富营养化浅水池塘溶解氧过饱和成因分析[J]. 广东化工, 2013, 40(16): 151-152. (WANG Jianhua, QIU Yanlun. The analysis for the cause of over saturated dissolved Oxygen in eutrophic shallow pond[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(16): 151-152. (in Chinese))
- [27] 李天深,蓝文陆. 基于近岸海域自动监测浮标的水华发生过程分析[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 201-208. (LI Tianshen, LAN Wenlu. Process analysis of algal bloom in offshore area based on the automatic monitoring buoy[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(2): 201-208. (in Chinese))
- [28] 黄文典,李嘉,吕平毓. 含沙量对水体耗氧有机污染物降解耗氧影响[J]. 人民长江, 2005(4): 55-57. (HUANG Wendian, LI Jia, LYU Pingyu. The influence of sediment concentration in water on DO-consumption of biodegradable organic pollutants[J]. Yangtze River, 2005(4): 55-57. (in Chinese))
- [29] 夏星辉,周劲松,余晖,等. 黄河水体颗粒物对石油类污染物生物降解过程的影响研究[J]. 环境科学学报, 2003(5): 603-607. (XIA Xinghui, ZHOU Jinsong, YU Hui, et al. Effect of particulates on the biodegradation of petroleum contaminants in natural waters of the Yellow River under laboratory conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003(5): 603-607. (in Chinese))
- [30] 陈鸣,潘杨,黄勇. 非溶解态物质对苏州市景观水体表面污染的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(9): 3689-3694. (CHEN Ming, PAN Yang, HUANG Yong. Effect of non-dissolved substances on landscape water's apparent pollution of Suzhou [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(9): 3689-3694. (in Chinese))
- [31] 章双双,潘杨,李一平,等. 基于EFDC模型的尾水回用于城市景观水体优化计算[J]. 水资源保护, 2017, 33(6): 74-78. (ZHANG Shuangshuang, PAN Yang, LI Yiping, et al. Optimization calculation of tail water reused in urban landscape water based on EFDC model [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6): 74-78. (in Chinese))
- [32] 许益新,王文才,曾伟峰,等. 调水引流改善平原河网水环境质量模拟[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 70-75. (XU Yixin, WANG Wencai, ZENG Weifeng, et al. Simulation on improvement of water environment in plain river network by water diversion [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 70-75. (in Chinese))
- [33] 徐海顺,杜红玉,蔡超琳. 基于生态修复视角的上海市黄浦江河岸带景观格局空间特征分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 125-131. (XU Haishun, DU Hongyu, CAI Chaolin. Spatial characteristics of landscape pattern based on ecological restoration in the riparian zone of Huangpu River, Shanghai City [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(4): 125-131. (in Chinese))
- [34] 陈星,许钦,何新玥,等. 城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 77-81. (CHEN Xing, XU Qin, HE Xinyue, et al. Research on health evaluation and protection of urban shallow lake ecosystem [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 77-81. (in Chinese))

(收稿日期:2019-10-21 编辑:王 芳)

