

城市黑臭水体整治前后上覆水和孔隙水的生物毒性对比和评价

徐柔柔^{1,2}, 裴舟韬^{1,2}, 高月香³, 张萌^{1,2}, 张李凌^{1,2}, 张静^{1,2}, 王文强^{1,2}, 王仁⁴, 张毅敏³, 孙丽伟^{1,2*}

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210018; 2. 东南大学无锡分校, 江苏 无锡 214028; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 4. 山东大学生命科学院, 山东 即墨 266237)

摘要:以常州市典型城市黑臭水体神童浜为对象,采用小球藻和大型溞作为急性毒性测试手段,对整治前、后神童浜4个点位的上覆水和孔隙水的毒性效应进行了对比和评价。结果表明,整治后神童浜上覆水水质明显改善;上覆水在整治前、后对小球藻生长均无抑制作用,反而呈促进作用;对黑臭水体的整治降低了上覆水和孔隙水的生物毒性,但整治后的上覆水仍存在富营养化问题,且孔隙水对水生生物仍具有一定的毒性风险。提出,利用生物毒性测试能反映出黑臭水体整治前、后的毒性变化,可应用于对黑臭水体整治效果的评价。

关键词:黑臭水体;生物毒性;急性毒性评价;小球藻;大型溞;神童浜

中图分类号:X835

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2020)04-0012-06

Assessment of Toxicity of Overlying Water and Interstitial Water for Urban Black and Odorous Water Before and After Remediation

XU Rou-rou^{1,2}, PEI Zhou-tao^{1,2}, GAO Yue-xiang³, ZHANG Meng^{1,2}, ZHANG Li-ling^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, WANG Wen-qiang^{1,2}, WANG Ren⁴, ZHANG Yi-min³, SUN Li-wei^{1,2*}

(1. School of Energy & Environment, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. Southeast University Wuxi Campus, Wuxi, Jiangsu 214028, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Nanjing, Jiangsu 210042, China; 4. School of Life Sciences, Shandong University, Jimo, Shandong 266237, China)

Abstract: The *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna* acute toxicity tests were employed to compare and evaluate the toxicity of the overlying water and interstitial water in an urban black and odorous water (Shentongbang in Changzhou) before and after remediation. The results indicated that the water quality was improved by the remediation. The growth rate of *C. vulgaris* were not inhibited by the overlying water, by contrast stimulated both before and after remediation. The results showed that the remediation of black and odorous river reduced the biological toxicity of the overlying water and interstitial water, but there was still eutrophication in the overlying water and the interstitial water also had certain toxic risk to aquatic organisms after remediation. The present research proved that the toxicity changes of black and odorous water could be reflected by biological toxicity tests, which could be used on the assessment of remediation effects on urban black and odorous water.

Key words: Black and odorous water; Biological toxicity; Acute toxicity assessment; *Chlorella vulgaris*; *Daphnia magna*; Shengtongbang

黑臭水体,以令人不悦的颜色和气味,影响着人居环境。早在2015年初,国务院颁布的《水污染

防治行动计划》^[1]提出,“到2030年,城市建成区黑臭水体得到消除”。《江苏省“两减六治三提升”

收稿日期:2020-04-14;修订日期:2020-06-14

基金项目:江苏省环境监测科研基金资助项目(1803);太湖水污染治理专项资金(第10期)科研课题基金资助项目(JSZC-G2016-198);国家科技重大专项课题基金资助项目(2017ZX07202006)

作者简介:徐柔柔(1995—),女,硕士在读,研究方向为生态毒性评价研究。

*通讯作者:孙丽伟 E-mail:liwei-sun@seu.edu.cn

专项行动实施方案》里也指出,“治理太湖水环境、生活垃圾、黑臭水体、禽畜养殖污染、挥发性有机物污染和环境隐患”^[2],黑臭水体的整治已刻不容缓。

目前,国内外对黑臭水体尚无明确的评价方法和标准^[3]。国内评价黑臭水体常用的指标是物理化学指标和感官指标,如透明度、溶解氧(DO)、氨氮(NH₃-N)和氧化还原电位(ORP)^[4]。除此之外,还有臭阈值、色度等感官指标,有机污染综合指标,无机金属离子等水质指标^[5-6]。一些国外学者则通过模型方法评价和预测水体黑臭^[7-8],Canfield等^[9]通过叶绿素a、总磷(TP)、总氮(TN)等指标建立用于评价水体黑臭的多元线性回归方程,Sugiura等^[10]利用人工神经网络技术(ANN)预测水体黑臭。这些方法的依据都是感官性物理指标和水质化学指标,缺乏生物毒性指标^[11],不能反映黑臭水体对生态系统的毒性效应。

生物毒性实验已被证明是水生生态毒理学中评估混合污染物潜在生态风险的有用工具。美国环保总署(U. S. EPA)提出的全排水毒性测试^[12](Whole Effluent Toxicity Test, WET)建议在评估排放废水毒性时,使用不同营养级的代表性生物,如淡水的标准化植物和无脊椎动物,可对废水中所有污染物毒性进行总体评价。这种成组生物毒性测试用于评估自然水体的潜在风险被证明是可行的。陈瑞瑞等^[13]在研究温州市典型城市黑臭河道水体的生物毒性时,发现其对发光细菌、鱼类和爪蟾胚胎具有不同程度的生物毒性效应。蒋宇霞^[14]选取发光菌、绿藻和斑马鱼胚胎,分析了东江流域20个采样点的孔隙水和全沉积物对水生生物的生物毒性效应。魏铮^[15]利用成组生物(斑马鱼胚胎、发光细菌、大型溞)毒性测试方法测试了西苕溪流域内典型工业废水及地表水的生物毒性。

现以常州市典型城市黑臭水体神童浜为研究对象,采用标准化小球藻(*Chlorella vulgaris*)和大型溞(*Daphnia magna*)为急性毒性测试生物,对整治前、后神童浜上覆水(沉积物表层至接近空气的那层水体)和孔隙水(沉积物颗粒之间及岩石颗粒之间孔隙的水溶液)的毒性进行对比和评价,为有效进行城市黑臭水体的整治和管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验生物

小球藻(*Chlorella vulgaris*),购自中国科学院

(武汉)水生生物研究所。以BG 11培养基(Blue-Green Medium)进行培养,实验用藻为在本实验室培养3代后的小球藻。培养条件:温度(23±2)℃,pH值=7.1,t(光):t(暗)=12 h:12 h,光照强度为4 000~6 000 lx。

大型溞(*Daphnia magna*),购自中国科学院(武汉)水生生物研究所,用曝气自来水进行培养,喂食新鲜的普通小球藻,实验用溞取同龄同母体培养3代后,出生6~24 h内的幼溞。培养条件:温度(19±1)℃,pH值=7.0~8.0,t(光):t(暗)=16 h:8 h,光照强度<1 000 lx。正式实验前使用重铬酸钾测试大型溞的敏感性,结果显示,20℃时重铬酸钾对大型溞的24 h EC₅₀(在24 h内暴露在实验液中50%的大型溞活动受抑制甚至死亡时实验液的浓度)为1.05 mg/L(95%置信区间为0.717~1.594 mg/L),符合文献[16]的质量控制标准。

1.2 仪器和试剂

1.2.1 仪器

7600-1CRT紫外可见分光光度计(上海高致精密公司);GZX-300BS恒温光照培养箱(上海新苗公司);HQ-30d pH计/溶氧仪(美国哈希公司);nai-t4-50真空冷冻干燥机(上海那艾公司)。

1.2.2 试剂

(1)BG11培养基:根据文献[16]的标准方法配备,所用药剂碳酸钠(Na₂CO₃)、乙二胺四乙酸二钠(EDTANa₂)、二水合氯化钙(CaCl₂·2H₂O)、七水合硫酸锰(MgSO₄·7H₂O)、磷酸氢二钾(K₂HPO₄)、硝酸钠(NaNO₃)均购自上海麦克林生化科技有限公司,纯度>99%。

(2)标准稀释液:根据文献[16]的标准方法配备,所用药剂CaCl₂·2H₂O、MgSO₄·7H₂O、碳酸氢钠(NaHCO₃)、氯化钾(KCl)、氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl)均购自国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

1.3 样品采集和保存

根据水质调查结果,影响神童浜水质的主要因素是水体富营养化和从底泥释放出的有机污染物。水样采集地点为3#、4#、5#和7#(根据神童浜整治工程编号命名)。根据文献[18-19],在24 h内采集上覆水和沉积物,并现场测定上覆水溶解氧(DO)、温度和pH值。所有样品采集后立即送实验室,上覆水在0~4℃下保存,一周内完成水质的常规指标测定。孔隙水的制备采取冷冻干

燥法^[20]。

1.4 水质的常规指标检测

水样在4℃静置后,使用0.45 μm滤膜过滤,根据文献[18],测定化学需氧量(COD)、TN、TP和NH₃-N。

1.5 生物毒性测试方法

毒性测试方法和质量控制根据文献[16-17]。毒性实验的受试水体采用稀释液与上覆水或孔隙水按一定比例混合配制。随后将小球藻和大型溞暴露在受试水体中,根据实验结果,计算小球藻的96 h EC₅₀(96 h使小球藻生长抑制率达到50%时的受试物浓度)和大型溞的48 h LC₅₀(48 h使大型溞致死率达到50%的受试物浓度),判断上覆水和孔隙水的急性毒性效应。

1.6 实验数据处理和评价方法

1.6.1 小球藻急性毒性实验数据处理

绘制680 nm下的藻密度-吸光度相关曲线,实验中定时测定小球藻的吸光度,带入曲线方程计算出藻密度,最后根据藻密度计算小球藻的比生长率μ,即实验期间小球藻每天的生长量,实验期间比生长率μ_{i-j}的计算见公式(1)。

$$\mu_{i-j} = \frac{\ln x_j - \ln x_i}{t_j - t_i} \quad (1)$$

式中:μ_{i-j}——从*i*时间到*j*时间的比生长率;
x_i——*i*时间的藻密度,10⁶/L;x_j——*j*时间的藻密度,10⁶/L。

若水样对小球藻产生抑制作用,则以比生长率为基础的生长抑制率*I*的计算见公式(2)。

$$I = \frac{\mu_c - \mu_t}{\mu_c} \quad (2)$$

式中:μ_c——对照组平均比生长率;μ_t——实验组平均比生长率。

数据分析采用IBM SPSS Statistics 25软件完成,差异性分析方法应用单因素方差分析(ANOVA)和Dunnett-t检验,P<0.05认为有显著性差异。

1.6.2 大型溞急性毒性实验数据处理

用origin 2018软件,绘制致死率-稀释比关系图,再利用IBM SPSS Statistics 25软件计算大型溞48 h LC₅₀值和95%的置信区间,差异性分析方法同小球藻。

1.6.3 毒性等级评价

以受测生物半数毒性效应为终点,计算上覆

水和孔隙水的毒性单位,判断其毒性等级。毒性评价利用环境样品毒性单位(TU)^[21]计算,见公式(3)。

$$TU = \frac{100\%}{LC_{50}(EC_{50})} \quad (3)$$

式中:LC₅₀(或EC₅₀)——受测生物半数出现毒性效应(死亡或生长抑制)时,环境样品的稀释倍数或浓缩倍数。对大型溞而言,如果原水样的死亡率为10%~49%,则TU=0.02×死亡率;如果原水样的死亡率为0~10%,则TU=0^[22]。

参照Persoone等^[23]提出的毒性分级体系(表1),判断上覆水和孔隙水的毒性等级。

表1 毒性分级体系

TU	等级	毒性
TU<0.4	I	无毒
0.4≤TU<1	II	微毒
1≤TU<10	III	中毒
10≤TU<100	IV	高毒
TU≥100	V	剧毒

1.7 神童浜整治措施

(1)控源截污。包括分散式生活污水集中处理,以初期雨水为主的工业区低污染污水处理,沿岸排放口污染控制,支流污染拦截。(2)内源治理。包括底泥清淤和建设底泥生态化护坡。(3)水动力优化。进行水闸调控和推流。(4)生态修复。设置生态浮床,栽培水生植物,引入微生物净化技术。

2 结果与讨论

2.1 上覆水水质分析

表2是神童浜整治前后上覆水的水质分析结果。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)^[24],整治前4个点位的COD、TN、TP、NH₃-N和DO全部严重超标,属于劣V类水体。整治后,水体中的所有指标都得到明显改善,尤其是DO值,除了7#点位,其他点位都达到Ⅳ类甚至Ⅱ类标准。根据《城市黑臭水体整治工作指南》^[4]中关于黑臭水体的分级标准,ρ(DO)<2 mg/L可以促进厌氧菌繁殖,水体易形成黑臭,故整治前所有点位的水体达到轻度黑臭级别。整治后,3#、4#、5#点位的上覆水已不属于黑臭水体,只有7#点位的上覆水ρ(DO)接近2 mg/L,说明对黑臭水体的整治取得

良好效果。

整治后,神童浜上覆水的 COD、TP、NH₃-N 和 DO 都显著改善,TN 质量浓度相对整治前只略微下降,但 4#、5#、7#点位的 TP 质量浓度仍高于河道水体 V 类标准,说明水体仍存在磷污染,这可能由于附近生活污水的直接排放,农田肥料中磷酸盐流失,以及水底沉积物中动植物残骸的分解导致^[25]。

除此之外,7#点位的 COD、NH₃-N 和 DO 质量浓度在整治后略超 V 类标准,说明该点位仍然污染严重。7#点位附近有一个冷库制造厂,平常排出的废水中污染物以 COD、挥发酚和 NH₃-N 为主,加之附近农田和居民较多,存在生活污水直接排放和农田排水的现象,导致 7#点位污染难以在短时间内得到改善。

表 2 神童浜整治前后各点位水质指标

mg/L

水质参数	3#		4#		5#		7#	
	整治前	整治后	整治前	整治后	整治前	整治后	整治前	整治后
$\rho(\text{COD})$	55.68 ^①	34.55	54.18 ^①	28.73	49.66 ^①	36.15	91.80 ^①	46.64 ^①
$\rho(\text{TN})$	13.05	9.55	13.97	10.15	11.51	9.89	15.85	14.41
$\rho(\text{TP})$	0.72 ^①	0.36	0.83 ^①	0.41 ^①	0.60 ^①	0.48 ^①	1.62 ^①	1.07 ^①
$\rho(\text{NH}_3-\text{N})$	5.01 ^①	1.91	6.09 ^①	1.43	7.53 ^①	1.81	9.69 ^①	2.02 ^①
$\rho(\text{DO})$	0.52 ^①	6.97	0.36 ^①	3.57	0.77 ^①	4.94	0.23 ^①	1.64 ^①
pH 值 ^②	7.32	7.71	7.51	7.94	7.46	8.12	7.29	8.17

①水质指标超过《GB 3838—2002》V 类标准;②pH 值无量纲。

2.2 上覆水对小球藻的急性毒性评价

表 3 是神童浜整治前后上覆水对小球藻的急性毒性测试结果。单因素方差分析结果表明,各点位上覆水中小球藻的 96 h 比生长率在整治前后没有显著性差异($P > 0.05$),部分点位与 BG 11 培养基对照组的差异性显著($P < 0.05$),且所有点位上覆水中的小球藻生长速度均高于对照组,说明上覆水对小球藻的生长起促进作用。

根据水质分析结果,整治后上覆水的 TP 质量浓度大部分都超过《GB 3838—2002》V 类标准,且 TN 质量浓度也很高。结合蒋宇霞^[13]研究污染流域沉积物孔隙水对绿藻的生物毒性结果,研究区域部分点位的孔隙水对绿藻生长显示促进作用,这是因为水体中氮(N)、磷(P)等营养物质浓度较高而有毒物质浓度较低。故可判断上覆水中 N、P 元素浓度较高,对藻类生长起到促进效果,并可能高于水体中有害物质对藻类生长的抑制作用,导致实验组比生长率高于对照组。而神童浜内所有点位上覆水对小球藻的生长都呈现促进作用,说明黑臭水体上覆水的主要问题是 TN、TP 质量浓度过高导致的水体富营养化。结果说明,将藻类生长测试应用于黑臭水体的毒性效应测试,不仅可以测试黑臭水体整治前后来自化学污染物的毒性变化,而且通过浮游藻类的生长率变化,还可以测试黑臭河体中营养元素的效应。

表 3 整治前后上覆水对小球藻的急性毒性结果

点位	96 h 比生长率/%	
	整治前	整治后
3#	89.11 ± 6.95 ^②	91.04 ± 4.44
4#	93.80 ± 1.34 ^③	94.01 ± 2.36 ^②
5#	88.55 ± 2.69	92.62 ± 3.71 ^②
7#	86.32 ± 0.73	88.47 ± 5.82
BG11 ^①	81.47 ± 1.85	85.27 ± 1.44

①小球藻的标准培养液,作为对照组;②与 BG11 差异有统计学意义, $P < 0.05$;③与 BG11 差异有统计学意义, $P < 0.01$ 。

2.3 上覆水对大型蚤的急性毒性评价

表 4 是神童浜整治前后上覆水对大型蚤的急性毒性测试结果。从 48 h LC₅₀ 值可以看出,神童浜整治前后,所有点位上覆水在原文所占比例为 100% 时,其死亡率也均未超过 50%,可根据公式 $TU = 0.02 \times \text{死亡率}$ ^[22] 计算毒性等级。

根据 Persoone 等^[23]提出的毒性分级,该黑臭河体整治前,上覆水 3#点位对大型蚤的急性毒性表现为微毒,其余点位为无毒,各点位上覆水对大型蚤的毒性由强到弱依次为 3#、7#、5#、4#。整治后,所有点位上覆水对大型蚤都没有急性毒性作用,且大部分点位的 TU 相对于整治前都有所下降,证明对黑臭河体的整治改善了上覆水的水质。

根据水质分析结果,7#点位污染最严重,但是对大型蚤的毒性反而低于 3#点位,说明化学指标不能反映水体中污染物对生物的实际毒性效应。这和高小辉等^[26]的研究结果一致,即混合物体系

中的单一组分处于无毒性效应浓度,但对混合物体系的总毒性效应仍有一定的贡献。进一步证明传统理化分析方法得出的各组分的浓度信息不能完整反映总体污染物对水生生态系统的影响,生物毒性检测是评价水环境安全性的必要手段。

此外,上覆水虽然对小球藻的生长呈现促进作用,但是对大型溞显示出一定的毒性,这可能和水体中过高的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度有关。 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 是沉积物中微生物活动的天然副产物,人为污染也会导致 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 产生,在水溶液中以电离(NH_4^+)和非电离

(NH_3)两种形式存在。水生生物的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 毒性急性中毒表现为氧化应激损伤、生理代谢紊乱和呼吸功能受损^[27]。 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 污染物造成的慢性毒性效应包括生长缓慢、摄食困难、幼体存活率下降^[28]。因此,水体中的 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 过多会促进小球藻生长,且对大型溞造成毒性作用。该结果进一步验证了用生物毒性实验检验水体毒性的优点,即利用不同种类水生生物可以反映污染物毒性的不同效应程度。

表 4 整治前后上覆水对大型溞的急性毒性评价

项目	3#		4#		5#		7#	
	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后	治理前	治理后
48h $\text{LC}_{50}/\%$	218.67	299.94	629.80	/ ^①	519.70	500	311.64	1515.15
TU	0.46	0.33	0.16 ^②	0	0.19 ^②	0.20 ^②	0.32	0.07 ^②
毒性	微毒	无毒	无毒	无毒	无毒	无毒	无毒	无毒

①水体对大型溞无致死作用;②可认为 $\text{TU} = 0$ 。

2.4 孔隙水对大型溞的急性毒性评价

对大型溞死亡率 $> 50\%$ 的原水(未经稀释的孔隙水)按照方法 1.5 进行稀释,直至大型溞 48 h 后的死亡率 $< 50\%$,根据实验结果计算出孔隙水对大型溞的 48h LC_{50} 值,从而得出整治前后不同点位孔隙水对大型溞的急性毒性。原水所占比例为 100% 时,大型溞死亡率未超过 50% 的孔隙水,可根据公式 $\text{TU} = 0.02 \times \text{死亡率}^{[22]}$ 计算毒性等级。

整治前,3#点位孔隙水对大型溞的 48 h LC_{50} 为 20.4% (95% 置信区间为 6.00% ~ 30.3%),为中毒;4#点位孔隙水原水对大型溞的死亡率只有 3.33% ($< 50\%$),为无毒;5#点位孔隙水对大型溞的 48h LC_{50} 为 67.52% (95% 置信区间为 60.98% ~ 74.55%),为中毒;7#点位孔隙水对大型溞的 48 h LC_{50} 为 39.59% (95% 置信区间为 31.07% ~

46.15%),为中毒。

整治后,3#点位孔隙水对大型溞的 48 h LC_{50} 为 44.08% (95% 置信区间为 38.03% ~ 49.01%),为中毒;4#点位孔隙水原水对大型溞的死亡率只有 36.67% ($< 50\%$),为微毒;5#点位孔隙水原水对大型溞的死亡率只有 35.00% ($< 50\%$),也为微毒;7#点位孔隙水原水对大型溞的死亡率只有 33.33% ($< 50\%$),为微毒。

根据神童浜整治前后 4 个点位孔隙水对大型溞的急性毒性评价结果(表 5)。由表 5 可知,整治前,除 4#点位孔隙水对大型溞表现为无毒,其他点位都为中毒。整治后,5#和 7#点位的孔隙水降为微毒,3#点位的孔隙水仍为中毒,而 4#点位孔隙水毒性有所上升,表现为微毒。

表 5 整治前后孔隙水对大型溞的急性毒性评价^①

项目	3#		4#		5#		7#	
	整治前	整治后	整治前	整治后	整治前	整治后	整治前	整治后
48h $\text{LC}_{50}/\%$	20.40	44.08	1501.50 ^①	136.36 ^①	67.52	142.86 ^①	39.59	150.02 ^①
TU	4.90	2.27	0.07	0.73	1.48	0.70	2.53	0.67
毒性	中毒	中毒	无毒	微毒	中毒	微毒	中毒	微毒

①原水中大型溞死亡率 $< 50\%$,以 $\text{TU} = 0.02 \times \text{死亡率}$ 计算毒性等级。

有研究表明,沉积物中富集了大量水体中的污染物,在一定条件下可重新释放到水体中,产生二次污染^[29],因此推测整治后 4#点位孔隙水的毒性

上升可能是沉积物中污染物释放引起的。3#、5#和 7#点位毒性显著下降证明了对黑臭河体的整治有助于改善沉积物中孔隙水的污染状况。不同于上

覆水的急性毒性结果,整治后的上覆水全都显示无毒,整治后的孔隙水却仍具有一定毒性,且不论是整治前还是整治后,孔隙水对大型蚤的急性毒性等级都远高于上覆水。此结果说明,沉积物中富集的污染物浓度比上覆水高得多,因此,对黑臭水体进行整治效果评价,既要检测上覆水的毒性,也要对孔隙水的毒性进行检测。

3 结语

神童浜经过整治,上覆水和孔隙水的生物毒性有所下降,但仍对水生生物具有一定的毒性风险。这是利用物理化学指标不能监测到的,因此,在理化分析的基础上结合生物毒性测试,能够使得黑臭水体整治后的生态安全性得到全面评价。同时,鉴于任何物种都不可能对所有污染物敏感并适用于所有暴露途径,因此在今后的研究中,需要增加多个营养级别的受试生物种类,对上覆水和孔隙水进行毒性测试,以期得到更全面的黑臭水体整治前后的生物毒性评价,为城市黑臭水体的整治效果评价提供科学依据。

[参考文献]

- [1] 中国环境报. 水污染防治行动计划[J]. 中国环保产业, 2015(5): 4-12.
- [2] 江苏省人民政府. 江苏省发布《“两减六治三提升”专项行动方案》[J]. 今日印刷, 2017(3): 5.
- [3] WU Q, ZHAO C, ZHANG Y. Landscape river water quality assessment by nemerow pollution index[C]. International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2010.
- [4] 林培.《城市黑臭水体整治工作指南》解读[J]. 建设科技, 2015(18): 14-15, 21.
- [5] 吕佳佳. 黑臭水形成的水质和环境条件研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011.
- [6] 魏文龙, 荆红卫, 华蕾, 等. 北京市城市河道水体黑臭分级评价研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 407-412.
- [7] DAVENPORT A J, GURNELL A M, ARMITAGE P D. Habitat survey and classification of urban rivers[J]. River Research and Applications, 2004, 20(6): 687-704.
- [8] MALMAEUS J M, HAKANSO L. Development of a Lake Eutrophication model[J]. Ecological Modelling, 2004, 171(1): 35-63.
- [9] CANFIELD D E, LINDA S B, HODGSON L M. Relations between color and some limnological characteristics of flodia lakes[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1984, 20: 323-329.
- [10] SUGIURA N, UTSUMI M, WEI B, et al. Assessment for the complicated occurrence of nuisance odours from phytoplankton and environmental factors in a eutrophic lake[J]. Lakes & Reservoirs: Research & Management, 2004, 9(3-4): 195-201.
- [11] 马瑛, 丁艳, 钱彬杰, 等. 城市黑臭水体评价方法研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(12): 187-189.
- [12] U. S. EPA. Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms - fifth edition; EPA 821-R-02-012[S]. Washington, DC, 2002.
- [13] 陈瑞瑞, 蔡晓妍, 杨波, 等. 典型城市黑臭河道水体生物毒性研究[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(2): 201-208.
- [14] 蒋宇霞. 东江流域沉积物生物毒性及其沉积物质量综合评价[D]. 广州: 中国科学院研究生院广州地球化学研究所, 2015.
- [15] 魏铮. 流域水质生物毒性监测技术集成和应用研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2016.
- [16] 中华人民共和国卫生部. 大型蚤急性毒性实验方法: GB/T 16125-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 化学品藻类生长抑制试验: GB/T 21805-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 国家环保局本书编委会. 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.
- [19] U. S. EPA. Methods for collection, storage, and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: technical manual; EPA-823-B-01-002[S]. Washington DC, 2001.
- [20] BUFLAP S E, ALLEN H E. Sediment pore water collection methods for trace metal analysis: A review[J]. Water Research, 1995, 29(1): 165-177.
- [21] TONKES M, DE GRAAF P J, GRAANSMA J. Assessment of complex industrial effluents in the Netherlands using a whole effluent toxicity (or WET) approach[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(10-11): 55-61.
- [22] RA J S, LEE B C, CHANG N I, et al. Comparative whole effluent toxicity assessment of wastewater treatment plant effluents using *Daphnia magna*[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 80(3): 196-200.
- [23] PERSOONE G, MARSALEK B, BLINOVA I, et al. A practical and user - friendly toxicity classification system with micro-biotests for natural waters and wastewaters[J]. Environmental Toxicology: An International Journal, 2003, 18(6): 395-402.
- [24] 中华人民共和国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: 中国标准出版社, 2002.
- [25] 陈水勇, 吴振明, 俞伟波, 等. 水体富营养化的形成、危害和防治[J]. 环境科学与技术, 1999(2): 12-16.
- [26] 高小辉, 杨峰峰, 何圣兵, 等. 水质的生物毒性检测方法[J]. 净水技术, 2012, 31(4): 49-54.
- [27] 鲁增辉, 王志坚, 石蕊. 氨氮对稀有鮎鲫胚胎和幼鱼的急性毒性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 47-52.
- [28] 葛建龙, 孟乾, 陈四清, 等. 氨氮对海月水母螅状体和碟状体的急性及慢性毒性作用[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(4): 809-814.
- [29] 王玉婷, 于红霞, 张效伟, 等. 基于毒性效应的间隙水致毒物质鉴别技术进展[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(3): 11-25.