

典型城市黑臭河道水体生物毒性研究

陈瑞瑞¹, 蔡晓妍¹, 杨波^{1,2}, 施华宏², 黄民生¹, 何德富^{1,*}

1. 华东师范大学 环境科学与技术系 上海 200062
2. 河口海岸学国家重点实验室 上海 200062

摘要: 以黑臭为特征的城市内河污染近来受到关注 检测和分析污染河流水质的生物毒性对水质标识和生态评价十分必要。本研究逐月检测了温州市九山外河(JS River) 和山下河(SX River) 两条典型黑臭河道水样对斑马鱼、发光细菌和热带爪蟾胚胎的毒性效应。结果显示 黑臭河道水体对斑马鱼、发光细菌(青海弧菌 *Vibrio Qinghaiensis* Q67) 和爪蟾胚胎均具有毒性效应。以斑马鱼死亡率和发光细菌相对抑光率表征的水质综合毒性较一致, 且以发光细菌更为敏感。爪蟾胚胎致畸实验主要通过存活率和畸形率来表征水体的毒性。3类生物监测均显示 SX 水体毒性明显高于 JS 整体毒性, 这与两条河黑臭程度相一致。通过发光细菌检测水体综合毒性的分析, 显示 SX 和 JS 水体毒性在5月-8月的夏季较高, 冬春季节较低, 表明黑臭河道水质毒性季节性变化与水体温度(T) 和溶解氧(DO) 值关系密切。本研究结果可为污染水体生物毒性检测和黑臭水体综合评价及后续治理提供依据。

关键词: 生物毒性; 斑马鱼; 青海弧菌; 热带爪蟾; 黑臭河道; 水质

文章编号: 1673-5897(2012) 2-201-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Study on Biotoxicity of Typical Urban Black-odor River Water

Chen Ruirui¹, Cai Xiaoyan¹, Yang Bo^{1,2}, Shi Huahong², Huang Minsheng¹, He Defu^{1,*}

1. Environmental Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062, China
2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China

Received 28 November 2011 **accepted** 12 January 2012

Abstract: The pollution of urban black-odor rivers receives attention recently. Survey and analysis on biological toxicity of black-odor river water are necessary to identify and evaluate the water quality. In present study, biological toxicity of water in two typical black-odor rivers in Wenzhou city Jiushanwai River (JS) and Shanxia River (SX) to *Brachydanio rerio Luminescent bacteria* test and *Xenopus tropicalis* embryos were monthly detected. Results indicated that water from the two rivers was toxic to the three organisms. Toxicological effects of black-odor river water measured using mortality of zebrafish was in good agreement with measured using the relative inhibitory light rate of *Luminescent bacteria*. Comparatively, *Luminescent bacteria* were more sensitive to black-odor river water than zebrafish. In *Xenopus tropicalis* embryos test, toxicological effects of black-odor water were characterized by embryos survival rate and teratogenic rate. All of the three species tests showed that toxicity of SX water was higher than that of JS water, which was consistent with the black-odor degree of the rivers. Statistical analysis results of *Luminescent bacteria* toxicity test showed that the comprehensive toxicity of SX and JS was higher in summer from May to August than that in winter and spring. The seasonal changes of water toxicity of the black-odor rivers was

收稿日期: 2011-11-28 录用日期: 2012-01-28

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2009ZX07317-006)

作者简介: 陈瑞瑞(1985-), 女, 硕士, 研究方向: 环境毒理学; E-mail: marilyn0402@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: dfhe@des.ecnu.edu.cn

closely related to temperature and dissolved oxygen values (DO) of water. The present study can provide the evidence for the bio-toxicological test of contaminative water to evaluate and treat black-odor river water.

Keywords: biotoxicity; *Brachydanio rerio*; *Vibrio Qinghaiensis*; *Xenopus tropicalis* black-odor rivers; water quality

近年来,随着城市化进程的加快,城市水污染现象加剧,尤其是在人口密集的区域,出现了严重的河道黑臭现象,严重制约了社会的可持续发展^[1-2]。据统计,我国80%以上的城市河道受到了污染^[3-5],其中大部分已演变为黑臭河道,成为我国城市目前亟待解决的水环境问题^[6]。黑臭河道的特征表现为水体有异味,水生生物生存适应性降低,只有少量耐污种存在,生态系统结构和功能严重退化甚至丧失^[7]。为了探讨城市黑臭河道水质标识和综合评价方法,除常规理化指标外,对污染河流进行生物毒性检测和分析尤为必要。

温州市温瑞塘河是温州人民的“母亲河”,处于温州市人口最多,经济最为发达的地区,具有防洪、排涝、航运、灌溉和景观等多种功能,对温州经济社会发展和人民生活发挥着重要作用^[8]。随着温州国民经济和城乡建设的迅速发展,温瑞塘河水环境受到污染,河水水质除小部分河段为国家地表水Ⅳ类标准外,其余大部分为Ⅴ类,甚至劣Ⅴ类标准^[9-12]。

九山外河(JS)和山下河(SX)位于温州市中心,是温瑞塘河重要的两条支流,其中九山外河河道长1 800 m,平均宽度25.6 m,山下河河道长2 034 m,平均宽度9.8 m。九山外河水质较山下河污染相对严重,两条河流均具有典型的城市黑臭河道特征。因此,为了解九山外河和山下河黑臭程度,除常规理化指标的检测之外,还进行了生物毒性检测。

鱼类急性毒性实验、藻类生长抑制实验、水蚤类毒性实验及鼠类毒性实验是较为传统的生物毒性测试方法^[13]。近年来,发光细菌法作为一种新型的快速毒性检测方法受到关注^[14]。热带爪蟾作为水生模式生物近年来常用于研究化学物质在生物体内的转移、解毒和作用机制^[15],并用于评价环境化学物质对生物的影响及毒性作用^[16],但是热带爪蟾胚胎对黑臭河道水体的毒性敏感程度的研究较少。本研究选取斑马鱼、发光细菌和热带爪蟾胚胎作为受体,检测九山外河和山下河水体对斑马鱼、发光细菌和热带爪蟾胚胎的毒性效应,分析两条典型城市黑臭河道水体生物毒性的季节性及其局域性变化规律,探讨黑臭河水体毒性检测有效方法,并为水质综合评价及后续治理提供依据。

1 材料和方法(Materials and methods)

1.1 材料

斑马鱼(*Brachydanio rerio*)购自温州市将军桥花鸟市场,每次实验选取体长(2 ± 1) cm的斑马鱼500尾用于实验。淡水发光细菌青海弧菌Q67菌株(*Vibrio Qinghai Q67*),由华东师范大学生命科学学院朱文杰教授提供。热带爪蟾(*Xenopus tropicalis*)由实验室自养,取NF10~11阶段且发育正常的胚胎用于实验。

1.2 水样的采集

结合污水监测点布设的原则^[17],九山外河布设了10个河水采样点,而山下河布设了5个采样点。采样时间是从2010年11月到2011年10月,每个月定时采水样1次。水样采集好后密封于矿泉水瓶中,4℃下保存^[18]。图1为九山外河和山下河采样点分布示意图。九山外河河水采样点分别为:清明桥(用JS1表示)、清明桥排污口(JS2)、房管桥(JS3)、农机桥(JS4)、少年宫桥(JS5)、游泳桥(JS6)、兽医桥(JS7)、水利局桥(JS8)、桑拿桥(JS9)和河通桥(JS10)。山下河河水采样点分别为:横渡桥(SX1)、光明小学桥(SX2)、宏德桥(SX3)、山下桥西(SX4)和山下桥东(SX5)。

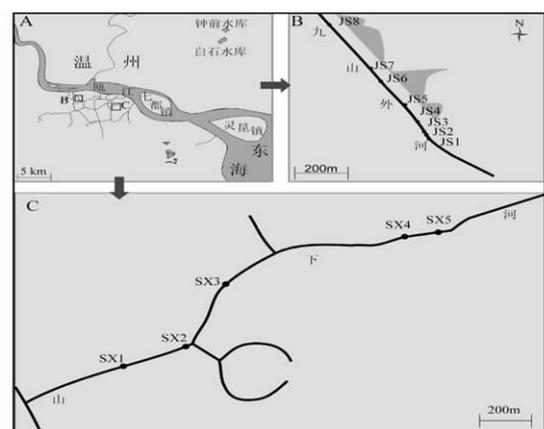


图1 温州市九山外河和山下河水体采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in Jiushanwai River (JS) and Shanxia River (SX) in Wenzhou city

1.3 实验方法

1.3.1 斑马鱼急性毒性实验

实验前斑马鱼至少驯养7 d,死亡率小于5%可

用于实验^[17]。实验前 24 h 停止喂食, 实验期间不喂食。采用静态方法进行, 设浓度分别为 150、180、200、250 和 280 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 5 个 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 阳性对照组和 1 个空白对照组, 对照组均使用曝气 3 天的自来水^[19]。然后在 48 h 检查受试鱼的状况, 观察并记录死鱼数目^[20]。并在实验前后测定 pH 值、溶解氧和温度。

1.3.2 发光细菌急性毒性实验

青海弧菌冻干粉于 4℃ 下复苏 10 min, 加入 4℃ 5 mL 0.8% 的 NaCl 溶液混匀, 制成细菌悬液^[21]。先取 3 mL 的水样加入测试管中, 然后在各测试管中加入 50 μL 菌液混匀, 15 min 后用生物发光测定仪 (9901 LUMINOMETER 型号) 测定混合液的发光强度。每个样品设 4 个平行管, 每个样品管再配一个对照管 (0.8% 的 NaCl 溶液)。以每个样品对照管的检测值为空白, 按“抑光率 $I(\%) = (IT_{\text{空白}} - IT_{\text{样品}}) / IT_{\text{空白}} \times 100\%$ ”公式计算。阳性对照使用标准毒物苯酚, 设置苯酚浓度为 20、40、80、100、120、160、200、250 和 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[22]。

1.3.3 热带爪蟾胚胎致畸实验

挑选实验室养殖的性成熟热带爪蟾 15 对, 采用人工注射绒毛膜促性腺激素 (HCG) 的方法诱导产卵^[23]。每对爪蟾各注射 2 次 HCG (初次注射 20 单位, 36 h 后注射 100 单位), 待蛙抱对产卵结束后收集胚胎, 从产卵较好的 3 对蛙的胚胎中, 挑选出达到 NF10~11 阶段且发育正常的胚胎进行实验^[24]。对照组和各实验组均设 4 个平行组, 对照组使用曝过气的自来水。各取 5 mL 的水样分别加 10 只正常胚胎在 25℃ 多功能培养箱内进行暴露实验 24 h 对照组和各实验组重新换溶液, 记录孵化个数, 并将未孵化的胚胎挑出。统计 48 h 内胚胎死亡率和致畸率, 并对畸形胚胎进行显微拍照。

2 结果 (Results)

2.1 JS 和 SX 水体对斑马鱼的急性毒性

斑马鱼急性毒性实验设 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 阳性对照组, 通过观察阳性对照组斑马鱼死亡率, 可以得到 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度与斑马鱼死亡率呈正线性相关 (图 2)。按照通用的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度毒性分级标准^[25], 浓度低于 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的对应水样为基本无毒, 对应于 180~200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的水样为低到中毒, 而高于 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的对应水样为重毒到高毒。通过本系统检测结果分析 (图 2), 180 和 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 的对应水样导致斑马鱼的

死亡率分别为 24.75% 和 36.16%, 因而可以通过这些参数来进一步分析和评价污染河流水体的毒性。

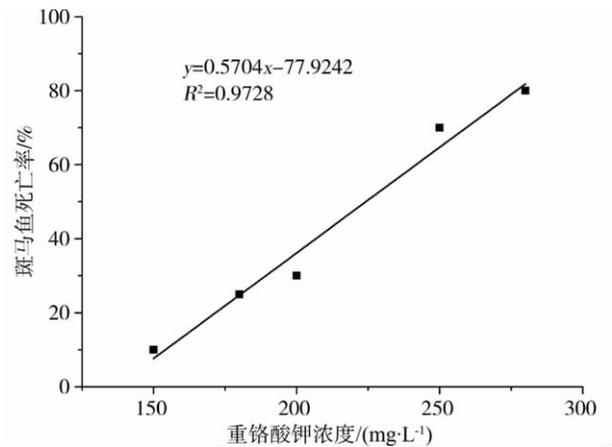


图 2 斑马鱼死亡率和重铬酸钾浓度线性图

Fig. 2 Linear relation between mortality of *Brachydanio rerio* and the concentration of potassium dichromate

从 2010 年 11 月到 2011 年 10 月以每月 1 次的频率分别采集九山外河和山下河的各样点水样。表 1 显示了各水样斑马鱼急性毒性实验结果。从时间跨度看, 以 2010 年 11 月到 2011 年 5 月的冬春两季水样导致斑马鱼的死亡率较低, 而 6 到 9 月的夏季水样致斑马鱼死亡率较高。从 2010 年 11 月到 2011 年 4 月, 九山外河和山下河各水样致斑马鱼死亡率均低于 180 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 对应的斑马鱼死亡率, 表明该时段各样点水样基本无毒。而 2011 年 6 月到 9 月山下河 5 个水样和九山外河 JS2 水样致斑马鱼死亡率均超过 80%, 表明这 6 个点水样达到重毒甚至高毒水平。从两条河流比较看, SX 河对斑马鱼的毒性普遍高于 JS 河, 尤以 6 月到 9 月的夏季时间段表现明显。除 JS2 水样对斑马鱼的毒性偏高外, 九山外河其他采用点水样各月次均为低毒或无毒水平。

2.2 JS 和 SX 水体对发光细菌的急性毒性

实验以淡水细菌青海弧菌的相对抑光率作为毒性评价指标。以苯酚作为毒性参照物, 实验显示苯酚浓度与青海弧菌的相对抑光率有较好的线性关系 (图 3), 得出线性系数关系为 $y = 23.096 + 0.255x$ ($R^2 = 0.96903$)。通过参照物苯酚对青海弧菌的剂量效应关系, 可以评价和判断 JS 和 SX 水体对发光细菌的急性毒性强弱。

表1 九山外河和山下河水体致斑马鱼死亡率(%)

Table 1 Mortality of *Brachydanio rerio* exposed to water samples from JS and SX rivers

采样点	2010年		2011年								
	11月	12月	1月	2月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
JS1	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
JS2	0	0	0	15	10	100	100	95	100	80	100
JS3	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	20
JS4	0	0	0	0	5	0	0	10	0	0	10
JS5	0	0	5	0	0	0	0	0	5	5	25
JS6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JS7	0	10	10	0	0	0	0	0	15	10	5
JS8	0	0	0	25	0	0	0	0	0	5	0
JS9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JS10	0	0	0	0	0	0	50	0	60	0	5
SX1	0	0	0	40	0	0	100	100	100	100	40
SX2	0	0	0	35	5	90	100	95	100	100	0
SX3	10	0	0	0	0	0	100	100	100	100	20
SX4	0	0	0	0	0	20	100	95	100	100	0
SX5	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100
空白	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0

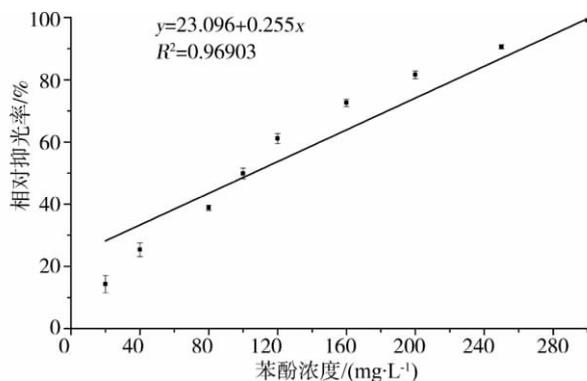


图3 青海弧菌相对抑光率与暴露的苯酚浓度线性图(数据为均值±标准差, n=4)

ig. 3 Linear relationship between relative inhibitory light rate of *Vibrio Qinghaiensis* Q67 and the concentrations of phenol

从2010年11月到2011年10月逐月检测九山外河和山下河各点采集的水样对发光细菌的毒性效应,使用细菌的相对抑光率表征河水毒性的强弱(图4A、B)。等值线图表示从2010年10月到2011年4月九山外河各采样点水样致发光细菌相对抑光率低于40%值,说明发光细菌测得水体毒性较低,而九山外河河水在2011年5-9月致发光细菌相对抑光率都高于40%值(图4A),尤以5-7月相对抑光率普遍高于80%,表明这段时间内水质毒性较高。在九山外河10个采水点中,以JS2水样致发光细菌相对抑光率普遍高于其他9个采样点,表

明JS2水样毒性最高,这与斑马鱼毒性检测结果一致。同时段山下河水体致发光细菌相对抑光率(图4B)与九山外河趋势一致,以2010年10月到2011年3月的冬春季节水质毒性较低,而2011年6-9月的夏季水样使致发光细菌相对抑光率普遍高于80%,表明此时间段水质毒性较高。

监测结果显示九山外河常年水温变化为(22.34±6.59)℃,pH值为7.49±0.39,DO(溶解氧)值为(2.36±1.75)mg·L⁻¹。山下河常年水温变化为(21.54±7.02)℃,pH值为7.40±0.24,DO值为(1.72±1.48)mg·L⁻¹。从各月份变化来看(图4C、D),各月份pH值变化不明显,而以7-9月的河水水温最高,而同期的DO则明显较低,尤以黑臭较为严重的SX为明显。分析JS和SX河水毒性对应的发光细菌相对抑光率与T、pH和DO的相关性(图4-C、D),显示相对抑光率I与河水水温T呈现正相关,而与DO值呈现负相关,尤以黑臭较为严重的SX较为明显(图4D)。

2.3 JS和SX水体对热带爪蟾胚胎的急性毒性

本文观察了JS和SX各样点水样对热带爪蟾胚胎的毒性效应,主要通过胚胎存活率和畸形率等指标来表征水体的毒性强弱。图5显示了2010年11月与2011年3月、5月和9月JS和SX各水样胚胎致畸实验的存活率和畸形率结果。

除JS10采样点5月和9月份水样导致爪蟾胚胎存活率低于50%外($p < 0.01$,与对照组比较),九山外河其他各月次水样致胚胎存活率都高于80%

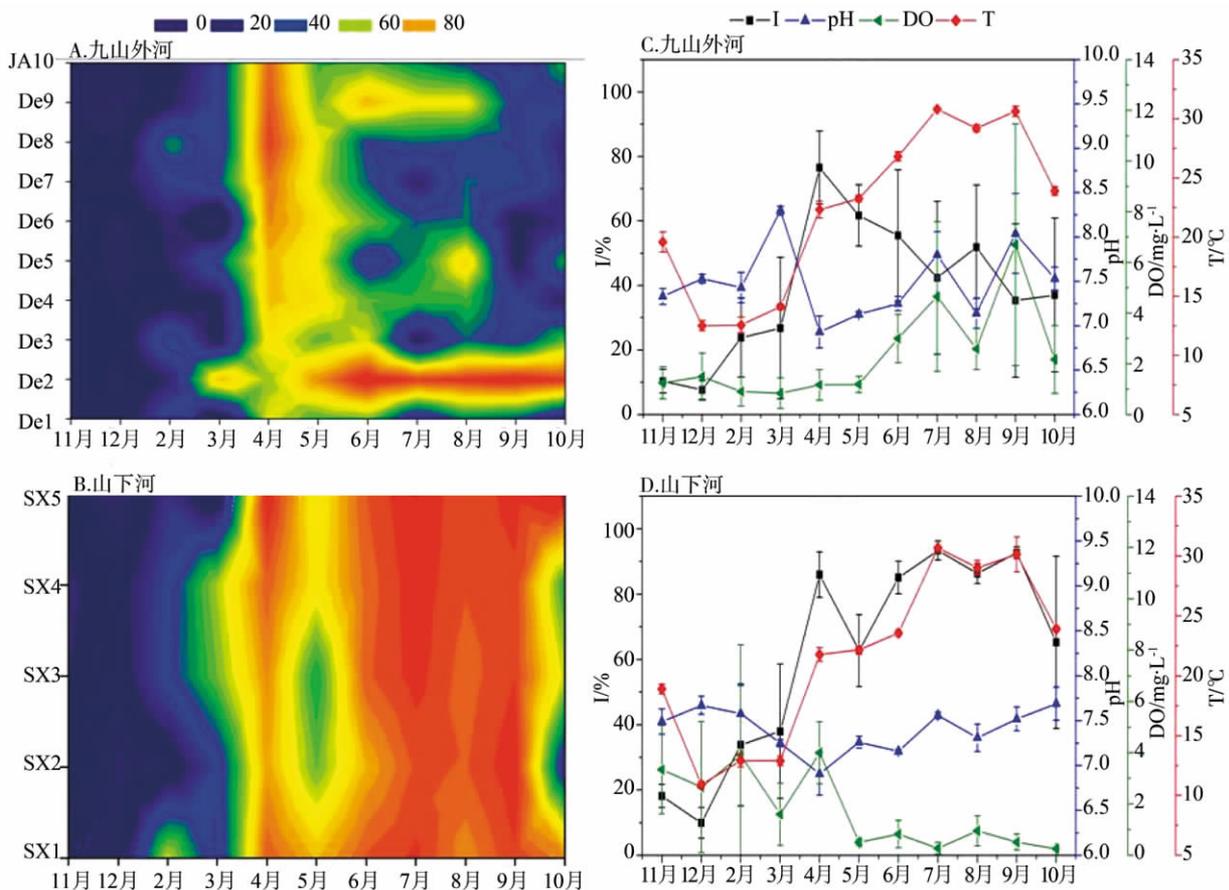


图 4 温州九山外河和山下河对发光细菌的毒性效应

A 和 B 分别显示九山外河和山下河各采样点水样致发光细菌的相对抑光率(均值, n=4); C 和 D 分别为九山外河(各采样点数据均值 ± 标准差, n=10)和山下河(各采样点数据均值 ± 标准差, n=5)各月份水样致发光细菌相对抑光率与水体 pH 值、温度(T)和溶解氧(DO)

Fig. 4 Effects of water from JS and SX rivers on *Luminous bacteria*

A and B show the relative inhibitory rate of *Luminous bacteria* exposed to water samples from two rivers, respectively.

C and D show relative inhibitory light rate of *Luminous bacteria*, pH, temperature (T), dissolved oxygen(DO) of two rivers in every month.

(图 5A)。山下河各月次水样致爪蟾胚胎存活率差异大,其中 5 月、9 月和 11 月各水样胚胎存活率都高于 80%,而 3 月份各水样均低于 80% ($p < 0.01$, 图 5B)。相对于胚胎的存活率,胚胎致畸率在各月次不同水样间差异更为明显。结果显示九山外河 3 月和 5 月各采样点水体致胚胎畸型率均极显著高于空白对照水样 ($p < 0.01$, 与对照组比较),而 9 月和 11 月除 JS10 较高外,其余采样点水质的致畸率均低于 10% ($p > 0.05$, 与对照组比较,图 5C)。山下河各样点水体对爪蟾胚胎有较强的致畸性(图 5D) 统计分析显示除 9 月 SX1 和 SX2 水样外,其余月份各采样点水体的致畸率较对照水样均具有显著性差异 ($p < 0.01$, 与对照组比较)。

爪蟾胚胎的致畸现象反映黑臭水体中污染物对胚胎器官发育毒性。本文观察到九山外河和山下河

黑臭水体能导致胚胎头部、腹部和尾巴畸形。图 6 显示部分水体导致眼睛变小、背部弯曲、脊索变形、泄殖腔扩张和突出、腹鳍变宽以及色素减少等典型胚胎发育畸形现象。

3 讨论 (Discussion)

城市内河黑臭现象较为普遍,其生物毒性及安全性受到关注。本文综合运用斑马鱼、发光细菌和爪蟾胚胎来检查并分析温州 JS 和 SX 两条典型黑臭河道中水的生物毒性。运用水生动物斑马鱼能够在一定程度上反映水体的综合污染状况及污染物的联合毒性。这种方法已经作为水质毒性检测常规方法使用,其实验时间较短且简便易行。本文运用斑马鱼毒性检测能准确表征阳性对照毒物 $K_2Cr_2O_7$ 的量效关系, $K_2Cr_2O_7$ 的暴露浓度和斑马鱼的死亡率线

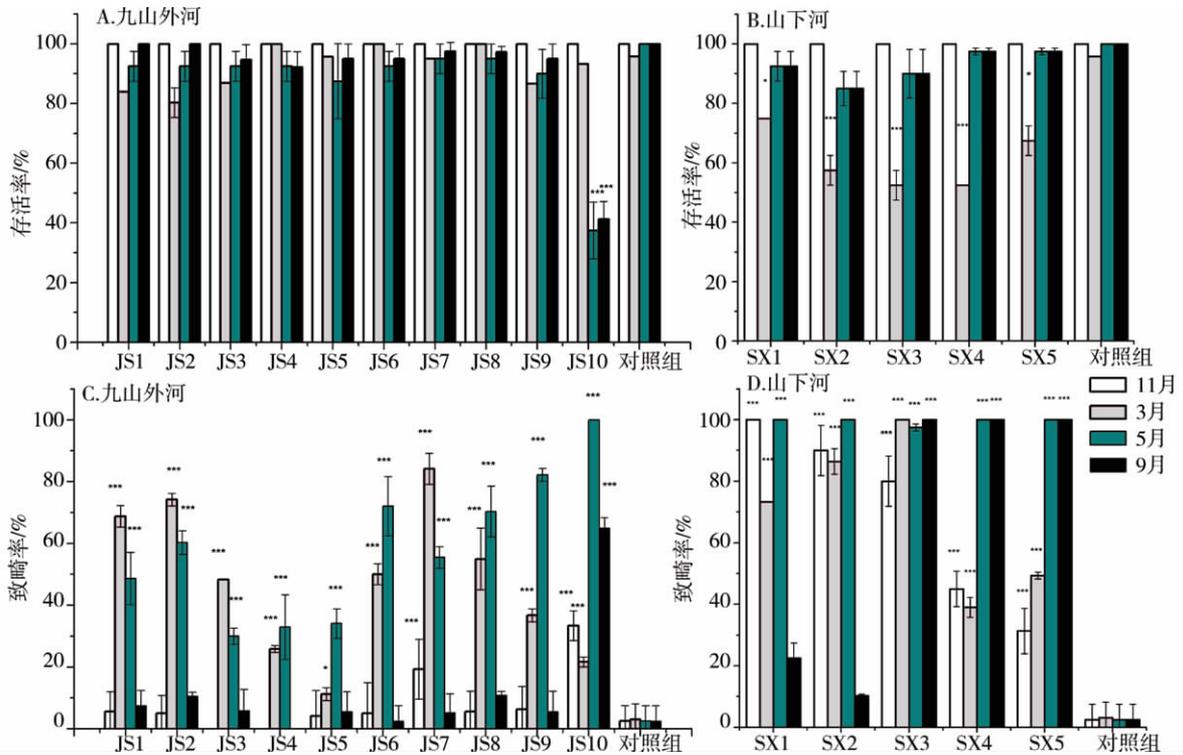


图5 温州九山外河和山下河水样对热带爪蟾胚胎的毒性效应

A 和 C 显示九山外河水样导致热带爪蟾胚胎存活率和致畸率; B 和 D 显示山下河水样检测出爪蟾胚胎存活率和致畸率。

与同时段对照组比较, * p < 0.01; *** p < 0.001。数据为均值 ± 标准差。

Fig. 5 Effects of water samples from JS and SX rivers on development of *Xenopus tropicalis* embryos

A and C show survival rate and aberration rate of *Xenopus tropicalis* embryos exposed to water samples from JS river.

B and D show fatality rate and aberration rate of *Xenopus tropicalis* embryos exposed to SX water samples.

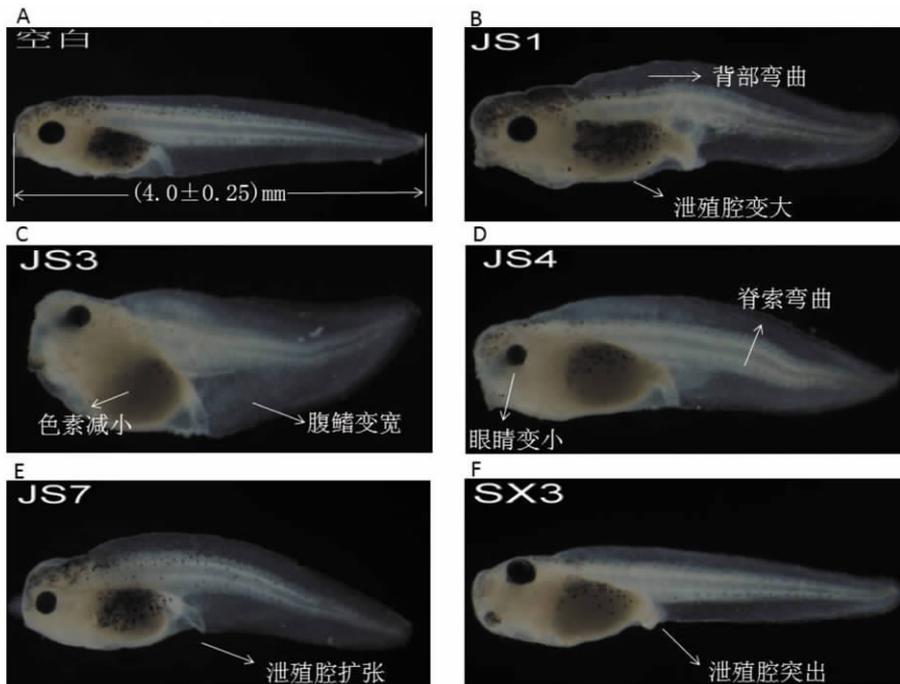


图6 温州九山外河和山下河水体致热带爪蟾胚胎的典型畸形效应

Fig. 6 Typical teratogenic effects of water samples (May, 2011) from JS and SX rivers on *Xenopus tropicalis* embryos

性关系良好,表明斑马鱼毒性检测系统性能稳定。作为 1 种新型急性毒性检测方法,发光细菌检测法运用代表细菌代谢水平的光亮度来反映其受到水体毒性物质作用的强弱。本文使用青海弧菌 Q67 菌株能准确定量苯酚的毒性,显示其测定急性毒性灵敏的优点,其结果与相关文献一致^[26]。另外,发光细菌毒性检测方法重复性好,快速且成本低廉,表明其作为水质毒性检测具有优越性。热带爪蟾胚胎致畸实验通常用来检测化合物发育毒性,其通过存活率、畸形率和生长抑制率等指标来表征化合物的毒性强弱^[27-28]。由于城市黑臭河水含有多种重金属和有机污染物,本文首次选择热带爪蟾胚胎作为河流水体毒性检测载体,在方法上具有一定创新性。爪蟾胚胎个体小,结构简单,对水质毒性检测具有一定灵敏性,同时能观察到水体污染物对胚胎特定毒作用效应。

九山外河和山下河水体对斑马鱼和发光细菌均表现一定的毒性效应,两类生物表征的毒性强弱有类似性和可比性,表明黑臭河流水体对斑马鱼和发光细菌的毒性效应趋向性一致。比较两条黑臭河水的总体毒性,则发现山下河水的生物毒性强于九山外河。尤其在 2011 年 6 月到 9 月夏季时间段,山下河 5 个水样致斑马鱼死亡率均超过 90%,同时致青海弧菌相对抑光率较高,均高于 80%,二者均反映该时间段山下河水处于重毒到高毒水平。而同期九山外河水显示的毒性较轻,但不是十分稳定,这与九山外河通过疏浚和调水缓解了黑臭状态相一致。由于 JS2 采样点靠近一重要工业排污口,因此较其他采样点来说,该点水样对斑马鱼和青海弧菌有较强的毒性效应,斑马鱼死亡率与发光细菌抑光率均高于 80%,也反映斑马鱼和青海弧菌对工业废水毒性检测的敏感性和一致性。

九山外河和山下河水体对热带爪蟾胚胎也表现出一定的毒性效应,具体表现为胚胎的死亡和不同程度的致畸。比较死亡率和畸形率两指标,则发现畸形率指标反映水的毒性方面较死亡率敏感。分析 JS 和 SX 水体致胚胎畸形率,2011 年 3 月、5 月和 9 月的检测数据显示山下河的毒性明显高于九山外河,这与运用斑马鱼和发光细菌检测的结果基本一致。已有的文献显示热带爪蟾胚胎畸形分为体型和体色两大类,体型上主要是头部、腹部和尾部畸形,其中最为常见的眼睛畸形、腹部水肿和尾部弯曲^[29],体色的变化主要是色素沉着现象,不同的污染物致爪蟾胚胎畸形现象有差异^[30],某些特定污染物能导致特定部位或器官产生畸形^[31]。本文结果显示黑臭河道水体能引起爪蟾胚胎致畸现象,主要畸形部位有眼睛、背部、腹鳍和泄殖腔,这表明黑臭

水体对这些部位产生明显的发育毒性效应。

本文检测并分析温州 JS 和 SX 两条典型城市黑臭河水的生物毒性效应,结果显示黑臭河道水体对斑马鱼、发光细菌和爪蟾胚胎均具有毒性效应。运用斑马鱼和发光细菌检测的水质综合毒性效应趋于一致,且发光细菌更为敏感。JS 和 SX 水体能导致热带爪蟾胚胎出现死亡和畸形现象,表明黑臭河水对动物胚胎的发育具有毒性。黑臭河水对 3 类生物的差异性毒效应,反映了生物类别对黑臭河水毒性表征的敏感性不同,因此运用多种生物来综合测试水体毒性是必要的。另外,分析表明 SX 水体毒性明显高于 JS 整体毒性,与两条河黑臭程度一致。发光细菌检测显示黑臭河水毒性在夏季较高,冬春季较低,这说明黑臭河道水质毒性季节性变化与水体温度和 DO 值关系密切。

通讯作者简介:何德富(1969—),男,博士,副教授,主要从事毒理学、环境化学污染与健康方面的研究,发表论文 20 余篇。

参考文献:

- [1] 程江,吴婀娜,车越,等. 平原河网地区水体黑臭预测评价关键指标研究[J]. 中国给水排水,2006,22(9): 18-22
Cheng J, Wu E N, Che Y, et al. Study on key indicators for judging black and odorous water in area of plain river system [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(9): 18-22 (in Chinese)
- [2] 金鹏飞,张列宇,熊瑛,等. 上海外浜黑臭河道治理与生态修复工程[J]. 给水排水,2008,34(z2): 62-65
Jin P F, Zhang L Y, Xiong Y, et al. The black and odorous water training and ecology restoration project of Shanghai beach [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(z2): 62-65 (in Chinese)
- [3] 钱嫦萍,王东启,陈振楼,等. 生物修复技术在黑臭河道治理中的应用[J]. 水处理技术,2009,35(4): 13-17
Qian C P, Wang D Q, Chen Z I, et al. Progress of bioremediation for controlling blackening and stink of rivers [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(4): 13-17 (in Chinese)
- [4] 黄民生,徐亚同,戚仁海. 苏州河污染支流——绥宁河生物修复试验研究[J]. 上海环境科学,2003,22(6): 384-389
Huang M S, Xu Y T, Qi R H. In situ bioremediation of seriously polluted Sui-ning creek [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2003, 22(6): 384-389 (in Chinese)
- [5] 黄燕,黄民生,徐亚同,等. 上海城市河道治理工程简介[J]. 环境工程,2007,25(2): 85-88
Huang Y, Huang M S, Xu Y T, et al. Brief introduction to urban river pollution purification and ecological restoration in Shanghai [J]. Environmental Engineering, 2007, 25(2):

- 85 - 88 (in Chinese)
- [6] 武涛,刘彬彬. 上海市黑臭河道治理技术应用研究[J]. 工业安全与环保,2010,36(3): 27 - 29
Wu T, Liu B B. Application and research of Shanghai black - odor river treatment technologies [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(3): 27 - 29 (in Chinese)
- [7] 钱嫦萍,陈振楼,王东启. 城市河流黑臭的原因分析及生态危害[J]. 城市环境,2002,16(3): 21 - 23
Qian C P, Chen Z L, Wang D Q. Analyzing reason and ecological compromise of blackening and stink of city rivers [J]. City Environment, 2002, 16(3): 21 - 23 (in Chinese)
- [8] 吴树敬. 温瑞塘河水域污染现状及整治对策[J]. 渔业经济研究,2006,1,39 - 41
- [9] 余建寅. 运用生态净化沼气技术治理温瑞塘河水污染[J]. 中国沼气,2007,25(3): 36 - 37
Yu J Y. The eco - environment improved by biogas engineering technology around the Wenruitang river in Wenzhou city [J]. China Biogas, 2007, 25(3): 36 - 37 (in Chinese)
- [10] 浙江省水资源监控中心温州分中心. 温瑞塘河水质评价报告[R]. 温州,2006
- [11] 吴树敬. 温瑞塘河水域污染现状及整治对策[J]. 渔业经济研究,2006,(1): 39 - 41
- [12] 徐晓东,徐为民. 瓯江翻水站2005年调水方案及成本分析[J]. 浙江水利科技,2006,144(2): 26 - 28
Water transfer scheme and cost analysis for Oujiang pumping station in 2005 [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2006, 144(2): 26 - 28 (in Chinese)
- [13] 何芬,李子龙,晏恒,等. 水质毒性检测方法的对比研究[J]. 环境科学及管理,2008,33(11): 128 - 130
He F, Li Z L, Yan H, et al. Research and application of method in water quality toxicity examination [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(11): 128 - 130 (in Chinese)
- [14] 刘毅. 用发光细菌法监测大凌河水底泥的可行性研究[J]. 辽宁城乡环境科技,2004,24(1): 18 - 19
- [15] Cardellini P, Ometto L. Teratogenic and toxic effects of alcohol ethoxylate and alcohol ethoxy sulfate surfactants on *Xenopus laevis* embryos and tadpoles [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 48(2): 170 - 177
- [16] Bevan C L, Porter D M, Prasad A, et al. Environmental estrogens alter early development in *Xenopus laevis* [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, 111(4): 488 - 496
- [17] 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,2002
- [18] 中华人民共和国国家环境保护标准 HJ 493 - 2009 水质采样 - 样品的保存和管理技术规定[S]. 国家环境保护总局,2009
- [19] 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准中华人民共和国国家标准 GB/ T13266 - 13261 - 91 水质物质对蚤类(大型蚤)和淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法[S]. 国家环境保护局,1991
- [20] 孙晓怡,王雅梅,金福杰,等. 用鱼类检测工业废水毒性的研究[J]. 辽宁城乡环境科技,2001,21(6): 28 - 31
- [21] 瞿璟琰,卢湘岳,刘赞,等. 双层管用于发光细菌检测水样毒性时的色度修正[J]. 环境检测管理与技术,2006,18(6): 18 - 20
Qu J D, Lu X Y, Liu Y, et al. Color correction for luminescent bacteria toxicity test with co - concentric double - deck test tubes in toxicity detection of colored water samples [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2006, 18(6): 18 - 20 (in Chinese)
- [22] 刘赞,洪蓉,朱文杰,等. 苏州河底泥及河水生物毒性的研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版,2004,(1): 93 - 98
Liu Y, Hong R, Zhu W J, et al. Study of the toxicity of sediment and water of Suzhou creek [J]. China Normal University: Natural Science Edition, 2004, (1): 93 - 98 (in Chinese)
- [23] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard guide for conducting the frog embryo teratogenesis assay - *Xenopus* (FETAX), E1439-91 [M]. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards, 1998, 826 - 836
- [24] BEIRAS R. Comparison of methods to obtain a liquid phase in marine sediment toxicity bioassays with *parace-nrotus lividus* sea urchin embryos [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, 42(1): 23 - 28
- [25] 李丽君,刘振乾,徐国栋,等. 工业废水的鱼类急性毒性效应研究[J]. 生态科学,2006,25(1): 43 - 47
Li L J, Liu Z Q, Xu G D, et al. Study on acute - toxicity of six kind industrial wastewaters to zebrafish [J]. Ecologic Science, 2006, 25(1): 43 - 47 (in Chinese)
- [26] 方战强,陈中豪,胡勇有,等. 发光细菌法在水质监测中的应用[J]. 重庆环境科学,2003,25(2): 56 - 58
Fang Z Q, Chen Z H, Hu Y Y, et al. Application of photobacterium phosphoreum toxicity test method for water quality monitoring [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, 25(2): 56 - 58 (in Chinese)
- [27] Longoa M, Zanoccella S P D, et al. Investigations of the effects of the antimalarial drug dihydroartemisinin (DHA) using the frog embryo teratogenesis assay - *Xenopus* (FETAX) [J]. Reproductive Toxicology, 2008, 25(4): 433 - 441
- [28] Bacchetti R, Mantecchia P, Andrioletti M, et al. Axial - skeletal defects caused by carbaryl in *Xenopus laevis* embryos [J]. Science of the Total Environment, 2008, 392(1): 110 - 118
- [29] 钱丽娟. 运用热带爪蟾胚胎检测污染物的发育毒性[D]. 上海: 华东师范大学,2010: 60 - 61
- [30] Kelly C J, Tumsaroj N, Laoie C A. Assessing wastewater metal toxicity with bacterial bioluminescence in a bench - scale wastewater treatment system [J]. Water Research, 2004, 38(2): 423 - 431
- [31] Pintar A, Besson M, Gallezot P, et al. Toxicity to *Daphnia magna* and *Vibrio fischeri* of Kraft bleach plant effluents treated by catalytic wet-air oxidation [J]. Water Research, 2004, 38(2): 289 - 300