

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20141012001

余芬芳, 唐天乐, 白娟娟, 等. 不同再生水消毒方式对斑马鱼胚胎毒性的影响及其危害分级[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 313-319

Yu F F, Tang T L, Bai J J, et al. Toxicities and hazard classification of reclaimed water after disinfection of different approaches by zebrafish embryo-
os bioassay [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(2): 313-319 (in Chinese)

不同再生水消毒方式对斑马鱼胚胎毒性的影响及其危害分级

余芬芳^{1,2}, 唐天乐^{2,3}, 白娟娟^{1,2}, 熊张东^{1,2}, 唐文浩^{1,2,*}

1. 海南大学环境与植物保护学院,海口 570228
2. 海南大学海口市环境毒理学重点实验室,海口 570228
3. 海南医学院热带医学与检验医学院,海口 571101

收稿日期:2014-10-12 录用日期:2014-11-24

摘要:以斑马鱼胚胎毒性测试研究海南某污水处理厂出水经氯胺、二氧化氯、次氯酸钠、臭氧和紫外几种消毒处理后对斑马鱼胚胎的毒性。利用胚胎毒性和层次分析法构建危害分级方法及其指标体系,评价消毒危害。研究表明:消毒处理前的二沉池出水未产生胚胎发育毒性效应,但经次氯酸钠、氯胺、臭氧、二氧化氯对再生水消毒处理可使斑马鱼胚胎出现卵黄囊异常、心跳减缓、色素沉积减少、孵出延缓和卷尾等毒理反应;不同消毒方式处理的再生水可致斑马鱼胚胎死亡率增加,胚胎毒性依次为:二氧化氯 < 紫外 < 紫外 + 次氯酸钠 = 二沉池出水(不消毒) < 氯胺 = 紫外 + 氯胺 < 臭氧 < 次氯酸钠;不同消毒方式的危害分级为:二氧化氯和紫外消毒构成轻微危害,危害等级为 I 级,紫外 + 次氯酸钠、紫外 + 氯胺、氯胺消毒构成中度危害,危害等级为 II 级,次氯酸钠危害较强,其危害等级为 III 级;化学消毒剂与紫外线组合消毒可降低再生水消毒的危害。

关键词: 再生水;消毒方式;斑马鱼胚胎;胚胎毒性;危害分级

文章编号: 1673-5897(2015)2-313-07 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

Toxicities and Hazard Classification of Reclaimed Water after Disinfection of Different Approaches by Zebrafish Embryos Bioassay

Yu Fenfang^{1,2}, Tang Tianle^{2,3}, Bai Juanjuan^{1,2}, Xiong Zhangdong^{1,2}, Tang Wenhao^{1,2,*}

1. College of Environment and Plant Protection, Hainan University, Haikou 570228, China

2. Haikou Key Laboratory of Environment Toxicology, Hainan University, Haikou 570228, China

3. School of Tropical Medicine and Medical Laboratory, Hainan Medical University, Haikou 571101, China

Received 12 October 2014 accepted 24 November 2014

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the embryos toxicity and hazard induced by the effluent from the sewage treatment plants of Hainan Province which disinfected by different approaches including chloramines, chlorine dioxide, sodium hypochlorite, ozone, and ultraviolet (UV). Zebrafish was chosen as the model animal and was exposed to the disinfected water sample in the embryonic toxicity test. To evaluate the hazard, a hazard classification method was established based on the embryos toxicity and the AHP (Analytic Hierarchy Process) model. The results indicated that: the effluent without disinfection didn't exhibit develop-

基金项目:中西部高校项目(ZXBJH-XK004;XBJH-XK005;MWECSP-RT08)

作者简介:余芬芳(1989-),女,硕士,主要研究方向为生态毒理学,E-mail: yff1989@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: twh1229@163.com

mental toxic effects on embryos, but all the disinfected water samples exhibited toxic effects on embryos including yolk sac abnormalities, heart rate decrease, pigmentation reduction, delay hatching and capuchin. Exposure in disinfected water samples increased the mortality rate of zebrafish embryos. The embryo toxicity showed as follows: chlorine dioxide < UV < UV + sodium hypochlorite = effluent (unsterile) < chloramine = UV + chloramine < ozone < sodium hypochlorite. The hazard classification of different disinfection approaches was: chlorine dioxide and UV constituted light hazards (Class I); UV + sodium hypochlorite, UV + chloramine, chloramine constituted moderate hazard (Class II); sodium hypochlorite constituted relatively strong hazard (Class III). The combination of chemical disinfectants and UV disinfection can reduce the hazard in reclaimed water disinfection.

Keywords: reclaimed water; disinfection approaches; zebrafish embryos; embryotoxicity; hazard classification

城市再生水回用需要进行消毒处理。再生水消毒过程中伴随着消毒剂与再生水中的一些溶解性有机物发生化学反应,产生各种消毒副产物(DBPs),对人群健康和生态环境构成潜在的威胁^[1-2]。以往对于消毒带来危害研究主要通过化学分析法测定三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)等典型 DBPs 的浓度或生成潜能来对各种消毒方式进行危害比较,在进行 DBPs 化合物的毒性分析时,其毒性数据也是基于单个化合物的动物毒性实验获得的^[6]。而再生水中消毒副产物种类繁多,目前并不能一一检测,本研究考虑到化学检测的不足,运用生物检测的方法来综合反映再生水消毒副产物的生物毒性效应及其差异。斑马鱼作为模式生物已广泛应用于毒性测试,并且有较好的毒性预测能力,因此,开展斑马鱼胚胎毒性的城市再生水消毒方式比较具有一定的现实意义。

本研究以斑马鱼胚胎为实验材料,研究海南某污水处理厂出水经氯胺、二氧化氯、次氯酸钠、臭氧和紫外线几种消毒处理后对斑马鱼胚胎的毒性差异,并根据斑马鱼胚胎的毒理学反应构建危害分级方法,对再生水消毒的进行危害评价,贴近生产实际,可为城市再生水的消毒方式选择提供有利指导。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 实验仪器与试剂

主要仪器有:BX51 电动显微镜、DP71(日本 Olympus 公司);HW-XS-5g 臭氧发生器(广州市环伟环保科技有限公司)。

主要试剂有聚合氯化铝(化学纯),二氧化氯(分析纯),次氯酸钠(分析纯),氯胺(分析纯)。

1.2 试验生物

实验所用斑马鱼为 AB 系蓝色斑马鱼,试验前在实验室驯养 1 个月以上。在交配产卵的前 1 天,

选择健康且性成熟的斑马鱼,按雌雄比 1:2 放入水温保持在(26.0 ± 1) °C 的曝气水中混合饲养,光照/黑暗周期比 14 h:10 h,自然交配产卵^[7]。产卵结束后,利用虹吸管将鱼卵中的杂质小心吸出,并用超纯水清洗,在电动显微镜下挑选分裂正常的受精卵进行暴露实验。

1.3 试验材料

测试水样采自海南某污水处理厂的二沉池和紫外消毒出水,水样经聚合氯化铝混凝、沉淀、过滤后,用氯胺、二氧化氯、次氯酸钠和臭氧消毒,分别得到氯胺、二氧化氯、次氯酸钠、臭氧、紫外、紫外 + 氯胺和紫外 + 次氯酸钠消毒的水样。除二沉池出水和紫外消毒出水外,其余消毒组水样中粪大肠杆菌均达到《再生水水质标准》(SL 368-2006)中非饮用水 ≤ 200 个·L⁻¹ 的标准。各消毒剂浓度(以有效氯计)和对应消毒组的粪大肠杆菌数量如表 1。空白对照为 HR 营养液,配置方法如下:氯化钠:38.7 mmol·L⁻¹;氯化钾:1.0 mmol·L⁻¹;氯化钙:2.4 mmol·L⁻¹;HEPES 缓冲液:1.7 mmol·L⁻¹,调节 pH 至 7.2,经高温消毒后使用。水样置于 4 °C 冰箱保存,使用前取出,使其温度上升至室温后使用。

1.4 实验方法

1.4.1 测试方法

毒理实验方法参照 OECD 推荐方法^[3]。用移液枪取 1 mL 配置好的消毒水样放入 48 孔细胞培养板,挑选发育正常的斑马鱼胚胎放入细胞培养板,每孔放 1 枚胚胎,盖上盖子,避免挥发,每板的 16 个孔为一个平行,每个水样做 3 个平行。染毒后放入 25.5 °C 的培养箱中培养。采用换水式即 24 h 更换受试物溶液对斑马鱼胚胎进行暴露处理,直至幼鱼孵化。用带有摄像头的电动显微镜对斑马鱼胚胎进行观测。暴露时间及观测指标如表 2。

表 1 消毒剂浓度和粪大肠杆菌数量

Table 1 Disinfectant concentration and fecal coliform

水样 Water samples	消毒剂 Disinfectants	消毒剂浓度 (mg·L ⁻¹) Disinfectants concentration	粪大肠杆菌 (个·L ⁻¹) Fecal coliform
		(mg·L ⁻¹) (individual·L ⁻¹)	
二沉池出水 Effluent	无 None	/	1.4 × 10 ⁴
	氯胺 Chloramine	2.5	40
	二氧化氯	2	0
	Chlorine dioxide		
	次氯酸钠	0.3	20
	Sodium hypochlorite		
	臭氧 Ozone	20	198
紫外消毒出水 Effluent disinfected by UV	无 None	/	460
	氯胺 Chloramine	1	98
	次氯酸钠	0.2	18
	Sodium hypochlorite		

表 2 暴露时间和对应的观测指标、毒理学终点

Table 2 The exposure time and the observed indicators and the toxicological endpoints

暴露时间 /hpf (hour post fertilization) Exposure time /hpf (hour post fertilization)	观测指标 Observation indexes	毒理学终点 Toxicological endpoints
8	卵凝结	8 h 死亡率
	Coagulated spawn	8 h mortality rate
24	卵凝结	24 h 死亡率
	Coagulated spawn	24 h mortality rate
48	卵凝结、无心跳、黑色素产生、心跳	48 h 死亡率; 色素沉积减少; 心跳减缓
	Coagulated spawn, no heartbeat, pigmentation, heartbeat	48 h motility rate; reduction of pigmentation; decrease of heartbeat
72	无心跳、孵化、卵黄囊不延伸、尾部弯曲	72 h 死亡率; 孵化延缓; 卵黄囊异常; 卷尾
	No heartbeat, hatch, not extended yolk sac, hapuchin	72 h motility rate; delayed hatch; abnormality of yolk sac; hapuchin

各指标统计方法如下:

死亡率、色素沉积减少、孵出率、卵黄囊异常(卵黄囊不延伸)、卷尾的统计分别为出现对应指标的斑

马鱼胚胎数除以总基数,最终结果取 3 组平均数;

心跳统计:将斑马鱼胚胎置于在电动显微镜下观察,用计数器给每条鱼计数心室搏动,持续 15 s,乘以 4 即可获得每分钟的心跳,对照组心跳 ± 5 次/min 为正常心跳范围。心跳减缓率 = (对照组平均心跳 - 实验组平均心跳)/对照组平均心跳;

孵出延缓:孵出延缓率 = (对照组孵出率 - 实验组孵出率)/对照组孵出率。

1.4.2 评价方法

采用危害分级方法对各消毒方式的毒性进行综合评价。目前国内外危害评价方法大多基于特定几种污染物质的数量和浓度,对于复合污染体系的危害评价并不适用。本研究根据斑马鱼胚胎的毒理学反应创建了危害分级评价方法,该方法不需要对污染物的种类和浓度进行检测,对于未知浓度的污染物在复合污染环境下的危害评价同样适用。

参考 Nagel^[5]对斑马鱼胚胎的毒理学指标分类,可将实验中观测到的指标分为致死指标(I 型指标)和非致死指标(II 型指标)两类(表 3),危害指数 P 则为 I 型指标(所有 I 型指标均统计为死亡率)和 II 型指标加权相加值,可用以下公式表示:

$$P = \sum f_i \cdot D_i + \sum_n f_{lin} \cdot D_{lin}$$

f_i —I 型指标即死亡率的权重

D_i —死亡率

n —II 型指标的个数

f_{lin} —各 II 型指标的权重

D_{lin} —各 II 型指标的发生率

用层次分析法构建各消毒方式的危害评价指标体系和确定指标权重^[10]。该指标体系由目标层、准则层和方案层构成,将各种消毒方式的危害指数定为目标层,斑马鱼胚胎的致死指标、非致死指标设为准则层,各单项指标设为方案层。根据专家讨论分析,对所列指标两两比较重要程度而逐层进行判断评分,构造判断矩阵,然后利用方根法求得最大特征根对应的特征向量,得到单项指标对总目标的重要性权值。各种消毒方式的危害评价指标权重如表 3。

根据危害指数的范围将污染物的危害等级划分如表 4。

1.4.3 统计分析方法

采用 SAS 9.1.3 统计分析软件,在 $\alpha = 0.05$ 的置信水平对不同再生水消毒方式暴露下斑马鱼胚胎累积死亡率的变化情况进行 ANOVO 完全随机试验(均衡)分析。

表 3 危害评价指标体系的建立及权重的确定

Table 3 The establishment and weight of hazard assessment indicator system

	因子	致死指标	非致死指标	组合权重
	Factors	Lethal index (0.5987)	Non-lethal index (0.4013)	Combining weights
致死指标(I 型指标)	死亡率	1.0000		0.5987
Lethal index	Mortality rate			
	卵黄囊异常		0.3132	0.1257
	Abnormality of yolk sac			
非致死指标(II 型指标)	色素沉积减少		0.3132	0.1257
Non-lethal index	Reduction of pigmentation			
	孵出延缓 Delayed hatch		0.1525	0.0612
	卷尾 Hapuchin		0.1106	0.0444
	心跳减缓 Decrease of heartbeat		0.1106	0.0444

表 4 危害等级划分

Table 4 Hazard classification

危害指数	≤0.1	(0.1,0.2]	(0.2,0.3]	> 0.3
Hazard index				
危害等级	I	II	III	IV
Hazard class				
危害程度	轻微	中度	较强	强
Hazard degree	Light	Moderate	Relatively strong	Strong

2 结果 (Results)

2.1 不同消毒方式对斑马鱼胚胎的致死毒性

不同消毒方式的再生水暴露对斑马鱼胚胎死亡

率影响的统计结果(表 5)。由表可见,紫外线消毒和二氧化氯消毒降低了二沉池出水的毒性,而次氯酸钠、臭氧和氯胺消毒均增大了二沉池出水的毒性,使斑马鱼胚胎的死亡率增加。次氯酸钠的毒性高于其他消毒剂,但次氯酸钠 + 紫外组合消毒使斑马鱼胚胎死亡率降低,次氯酸钠与紫外复合使用后生物毒性显著降低,表现出拮抗作用。氯胺与紫外复合使用后胚胎累积死亡率相同。不同消毒方式处理的再生水暴露引起斑马鱼胚胎最终死亡率增加的趋势是:二氧化氯 < 紫外 < 紫外 + 次氯酸钠 = 二沉池出水(不消毒) < 氯胺 = 紫外 + 氯胺 < 臭氧 < 次氯酸钠。

表 5 不同再生水消毒方式暴露对斑马鱼胚胎死亡率的比较

Table 5 The zebrafish embryo mortality in different water sample by different disinfection method

累积死亡率	8 h	24 h	48 h	72 h
Cumulative mortality				
空白 Blank	0.000 C	0.042 D	0.042 F	0.042 F
二沉池(未消毒)	0.000 C	0.167 B	0.167 BC	0.167 CD
The effluent (unsterile)				
次氯酸钠	0.042 A	0.250 A	0.271 A	0.292 A
Sodium hypochlorite				
二氧化氯	0.000 C	0.083 CD	0.083 E	0.083 E
Chlorine dioxide				
氯胺 Chloramine	0.021 B	0.021 D	0.167 BC	0.188 BC
臭氧 Ozone	0.000 C	0.188 B	0.188 B	0.208 B
紫外 UV	0.021 B	0.104 C	0.146 C	0.146 D
紫外 + 次氯酸钠	0.000 C	0.104 C	0.125 D	0.167 CD
UV + sodium hypochlorite				
紫外 + 氯胺	0.021 B	0.167 B	0.188 B	0.188 BC
UV + chloramine				

注:若两组数据含有相同字母,则表示差异不显著,否则差异显著。

Note:If the two sets of data contain the same alphabet, then the difference was not significant, otherwise the difference was significant.

2.2 不同再生水消毒方式对斑马鱼胚胎的发育毒性

各种消毒方式对斑马鱼胚胎的发育毒性统计如图 1。由图可见,消毒水样暴露对斑马鱼胚胎的发育产生明显影响,主要表现为心跳减缓、色素沉积减少、卵黄囊异常、孵出延缓、卷尾等多种发育异常(图 2)。对照组正常斑马鱼胚胎 48h 平均心跳为 120 次/min,次氯酸钠和氯胺消毒组斑马鱼胚胎心率低于正常范围,其余消毒组心跳均在正常范围内;每一种消毒方式均使斑马鱼胚胎出现了卵黄囊异常、色素沉积减少、卷尾等毒性,其中,紫外消毒和二氧化氯消毒的毒性较其他消毒方式小;紫外线消毒和各种化学消毒剂单独消毒均使斑马鱼胚胎发育延缓,主要

表现为 72 h 孵出率减小,但紫外线与化学消毒剂组合使用后,对斑马鱼胚胎的发育阻滞作用消失。

2.3 不同再生水消毒方式的危害分级

表 6 是不同消毒方式对斑马鱼胚胎的危害分级结果。由表可知,二沉池出水、紫外消毒、二氧化氯消毒水样的危害等级属于 I 级,危害轻微;其次是臭氧和氯胺,危害等级属于 II 级,构成中度危害;次氯酸钠的危害指数最大,危害等级为 III 级,危害较强。不同再生水消毒方式对斑马鱼胚胎的毒性影响及危害顺序依次是:次氯酸钠 > 氯胺 > 紫外 + 氯胺 > 紫外 + 次氯酸钠 > 紫外 > 二氧化氯。

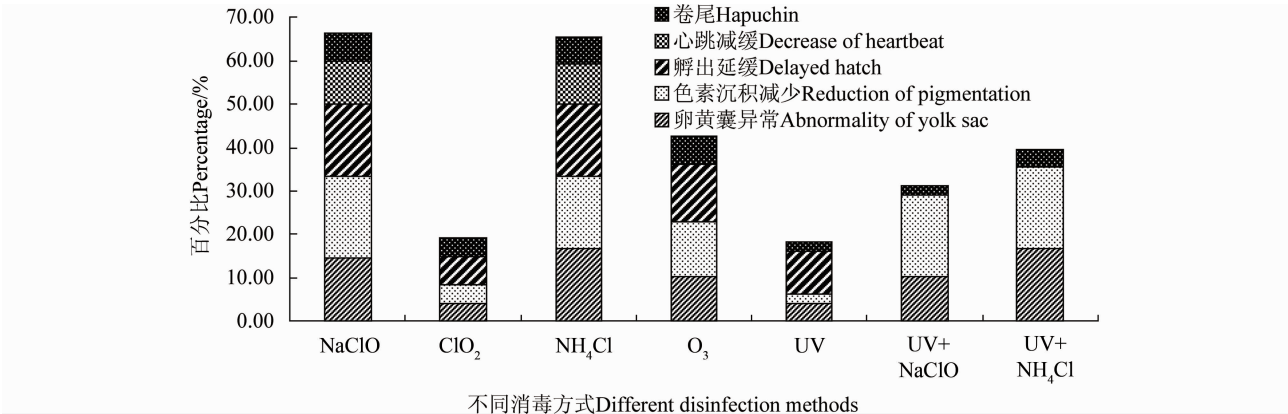


图 1 不同消毒方式引起的胚胎发育毒性

Fig. 1 Developmental toxicities caused by different disinfection approaches

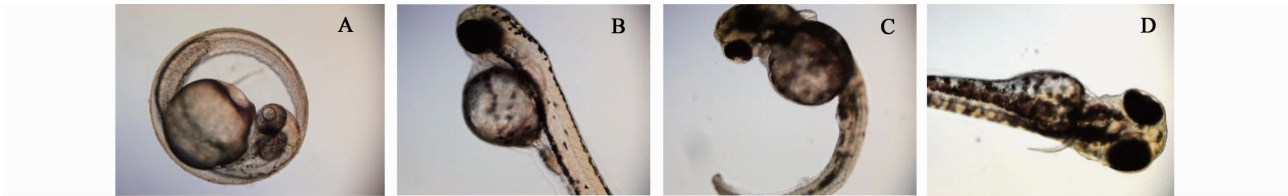


图 2 显微镜下观察到的斑马鱼胚胎发育异常现象

注:A,色素沉积减少;B,卵黄囊异常;C,卷尾;D,正常鱼仔。

Fig. 2 Abnormal development of embryos in different water sample exposure groups

Note: A, pigmentation reduction; B, yolk sac abnormalities; C, capuchin; D, normal fish.

表 6 不同消毒方式的危害分级

Table 6 Hazard classification of different disinfection methods

	空白 Blank	二沉池 Effluent	NaClO	ClO ₂	NH ₄ Cl	O ₃	UV	UV + NaClO	UV + NH ₄ Cl
危害指数 Hazard index	0.02	0.10	0.23	0.07	0.17	0.16	0.10	0.14	0.16
危害等级 Hazard class	I	I	III	I	II	II	I	II	II
危害程度 Hazard degree	轻微 Light	轻微 Light	较强 Relatively strong	轻微 Light	中度 Moderate	中度 Moderate	轻微 Light	中度 Moderate	中度 Moderate

3 讨论 (Discussion)

本实验结果表明,每一种消毒方式对斑马鱼胚胎发育都有一定的毒性,毒性主要表现为斑马鱼胚胎的死亡率增加,心跳减缓,色素沉积减少,卵黄囊异常,孵出延缓,卷尾等。对各种消毒方式进行危害评价,比较得出,次氯酸钠消毒危害最大,其次是氯胺、臭氧,二氧化氯和紫外线消毒危害最小。造成这种差异的原因可能是不同消毒剂在消毒过程中产生的 DBPs 毒性不同造成的。次氯酸钠在消毒过程中产生的 DBPs 是主要是三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs),THMs 已被确认为致癌物,同时大量的体内和体外实验研究表明 THMs 具有明显的致突变作用或遗传毒性,HAAs 具有致癌性和致突变性,对 DBPs 总致癌风险贡献率达到 90% 以上^[6],所以次氯酸钠在消毒过程中产生的危害大;氯胺消毒可以大大降低 THMs 和 HAAs 等 DBPs 的生成量,但有研究发现,氯胺消毒可能产生具有更大潜在危害的含氮消毒副产物(N-DBPs),再生水中水质极为复杂,N-DBPs 的生成潜能会增大,所以氯胺可能并不适用于再生水的消毒;当污水中有机物浓度较高时,臭氧在消毒过程中会生成一些含氧化合物,如醛、羧酸、酮、酚等 DBPs,当有溴离子存在时,还会生成溴酸盐,溴酸根离子(BrO_3^-)具有遗传毒性和致癌性,被世界卫生组织列为 2B 类可疑致癌物^[4],因此臭氧消毒也存在一定的危害;二氧化氯是一种氧化剂而不是氯化剂,它与污染物不发生取代反应,所以在消毒过程中几乎不产生 THMs 等有机 DBPs,消毒危害小;紫外线消毒是一种物理消毒方式,不产生有毒有害副产物,消毒危害小。

紫外线与次氯酸钠组合消毒可降低再生水消毒的危害。这可能是由于紫外-次氯酸钠组合消毒减少了再生水消毒的加氯量,同时减少消毒副产物生成量,降低了环境危害。杨川等^[8]研究表明,与单一氯消毒相比,紫外-氯组合消毒可有效减少再生水中三氯甲烷的生成量,在大肠杆菌完全灭活条件下,单一氯消毒的三氯甲烷生成量是紫外-氯组合消毒生成量的 12 倍左右。紫外-次氯酸钠既可以弥补氯消毒无法杀灭隐孢子虫、贾第鞭毛虫等原声动物的劣势,又可以弥补紫外线无持续消毒效果的缺陷。紫外线与氯胺组合消毒与单一氯胺消毒的危害稍有降低,但效果并不显著。而兰旭^[9]研究表明,紫外-氯胺联合消毒过程中产生一种协同作用,杀菌效果好,在保证出水余氯达标的情况下也可降低氯消毒的剂

量,最大限度地降低消毒副产物的生成。造成这种差别的原因可能是再生水水质较为复杂,消毒剂的消毒机理与饮用水等清洁水源的消毒有所不同,饮用水中的消毒机理研究不能直接指导再生水消毒,关于紫外-氯胺在再生水中消毒机理有待进一步深入研究。

通讯作者简介:唐文浩(1956—),男,学士,教授,主要从事环境科学与生态学研究。

参考文献(References):

- [1] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: A review and road map for research [J]. Mutation Research, 2007, 636(1/3): 178 – 242
- [2] World Health Organization. International program on chemical safety disinfectants and disinfectant by-products. Environmental Health Criteria 216. [S]. Geneva: World Health Organization, 2000
- [3] Braunbeck T, Lammer E. Background document on fish embryo toxicity assays [R]. Dessau, Germany: OECD, 2006
- [4] Yamgguchi T, Wei M, Hagihara N, et al. Lack of mutagenic and toxic effects of low dose potassium bromate on kidneys in the big blue rat [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2008, 29(1): 1 – 11
- [5] Nagel R, Dar T. The embryo test with the zebrafish (*Danio rerio*)—A general model in ecotoxicology and toxicology [J]. Altex, 2002, 19(suppl 1): 38 – 48
- [6] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性 [J]. 环境化学, 2011, 30(1): 20 – 33
Zhao Y L, Li X F. Drinking water disinfection byproducts: Chemical characteristics and toxicity [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(1): 20 – 33 (in Chinese)
- [7] 周艳, 徐建, 冯艳红, 等. 污染场地河道底泥浸出液对斑马鱼胚胎的毒性效应 [J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6): 963 – 971
Zhou Y, Xu J, Feng Y H, et al. The toxic effects of leachate of river sediment in a contaminated site on zebrafish (*Brachydanio rerio*) embryos [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(6): 963 – 971 (in Chinese)
- [8] 杨川, 王晓羽, 王丹, 等. 再生水紫外-氯组合消毒与单一氯消毒比较分析 [J]. 供水技术, 2011, 5(1): 19 – 22
Yang C, Wang X Y, Wang D, et al. Comparative analysis of ultraviolet-chlorine combination disinfection and

chlorine disinfection in reclaimed water [J]. Water Technology, 2011, 5(1): 19 – 22 (in Chinese)

[9] 兰旭. 南水北调配套水厂深度处理和消毒工艺的选择 [J]. 给水排水工程, 2014, 32(2): 106 – 108

Lan X. The selection of advanced treatment and disinfection process of the North Water Transfer Matching Waterworks [J]. Water Supply and Drainage Engineering, 2014, 32(2): 106 – 108 (in Chinese)

[10] 刘琼峰, 李明德, 段建南, 等. 长沙城郊农田土壤重金属 Pb、Cd 的生态风险评价研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1564 – 1570

Liu Q F, Li M D, Duan J N, et al. Ecological risk assessment of heavy metals Pb, Cd in farmland soils of Changsha suburbs [J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2013, 32(8): 1564 – 1570 (in Chinese)

◆