

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.21.011

珠三角工业废水与受纳水体的遗传毒性与雌激素效应

赵 旭, 陈希超, 党 焱, 胡国成, 任明忠, 刘 芸
(生态环境部华南环境科学研究所 国家环境保护环境污染健康风险评估重点
实验室, 广东 广州 510655)

摘 要: 采用 SOS/umu 方法与双杂交酵母体系检测了珠三角某地区 1 家污水处理厂进出水样品、7 个工业企业废水和排水样品以及 6 个受纳水体样品共 15 个样品的遗传毒性与雌激素效应。结果表明,该区域污水厂进出水、工业企业废水和排水以及受纳水体均表现出显著遗传毒性效应,且受纳水体的雌激素效应高于污水厂出水及工业企业排水。对于污水厂进出水及工业企业排水,在低浓度(1.57 ~ 12.5 mL/孔)暴露条件下,遗传毒性 R 值在 3.03 ~ 4.18 之间;受纳水体未表现出显著细胞毒性,低浓度(1.57 ~ 12.5 mL/孔)暴露条件下,其遗传毒性 R 值在 1.67 ~ 5.13 之间;污水厂进出水、工业企业废水和排水样品中只有染织厂废水和排水以及电路厂排水具有弱雌激素效应,诱导活性在 0.026 ~ 0.041 之间;6 个受纳水体样品中则有 4 个样品具有显著雌激素效应,诱导活性在 0.048 ~ 0.105 之间。受纳水体仍存在大量具有遗传毒性与雌激素效应污染物,其遗传毒性水平基本与工业废水持平,雌激素效应则高于工业废水。

关键词: 工业废水; 受纳水体; 遗传毒性; 雌激素效应; 珠三角地区

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2021)21 - 0069 - 06

Genotoxicity and Estrogenic Effects of Industrial Wastewater and Receiving Water in the Pearl River Delta

ZHAO Xu, CHEN Xi-chao, DANG Yao, HU Guo-cheng, REN Ming-zhong, LIU Yun
(State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment,
South China Institute of Environmental Sciences <MEE>, Guangzhou 510655, China)

Abstract: The genotoxicity and estrogenic effects of fifteen water samples from the influent and effluent of a sewage treatment plant, the raw wastewater and drainage of seven industrial enterprises and six receiving water in a region of the Pearl River Delta were detected by using SOS/umu test and a recombinant yeast system. In this region, the influent and effluent of the sewage treatment plant, the industrial wastewater and drainage and the receiving water all showed significant genotoxic effects, and the estrogenic effect of the receiving water was higher than that of the effluent from the sewage treatment plant and the drainage from the industrial enterprises. The genotoxic R values ranged from 3.03 to 4.18 at low exposure concentrations (1.57 mL/well to 12.5 mL/well) for the influent and effluent of the sewage treatment plant as well as the industrial drainage. No significant cytotoxicity was showed in the receiving waters, and the genotoxic R value was between 1.67 and 5.13 at low exposure concentrations (1.57 mL/

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1805504、2018YFC1801505); 生态环境部华南环境科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(PM - zx097 - 202002 - 074)

通信作者: 刘芸 E-mail: liuyun@scies.org

well to 12.5 mL/well). Among water samples from the influent and effluent of the sewage treatment plant, industrial wastewater and drainage, only the raw wastewater and drainage from the printing and dyeing factory and the drainage from electric circuit factory had weak estrogenic effects, and the induced activity ranged from 0.026 to 0.041. Four of the six water samples from the receiving waters showed significant estrogenic effects, and the induced activity ranged from 0.048 to 0.105. There were still a large number of pollutants with genotoxicity and estrogenic effects in the receiving waters. The genotoxic level was basically equal to that of the industrial wastewater, while the estrogenic effect was higher than that of the industrial wastewater.

Key words: industrial wastewater; receiving water; genotoxicity; estrogenic effect; the Pearl River Delta

目前我国对工业废水的检测主要使用仪器检测等化学分析手段,但由于不同来源的排水中污染物繁多多变,对工业废水进行生物毒性检测可补充化学检测对目标物质选择上的不足,能有效避免因排水造成的潜在生态破坏。美国环保署以藻、蚤和鱼作为受试生物对污水厂出水进行全水毒性评价;国际标准化组织将 SOS/umu 实验确认为检测水环境遗传毒性的标准方法,德国等发达国家也将其列为水环境遗传毒性的检测方法;基因重组酵母系统实验是水质雌激素效应测评最常用的方法^[1]。生物毒性检测方法具有所需时间短、灵敏度高、准确性强等优点,已被广泛地应用于各个环境研究领域^[2-6]。

目前对工业废水毒性的研究已有较多报道,如查金苗等^[7]应用青鳉分析某印钞厂各工艺段废水及排水;张秀君等^[8]使用发光菌对废水进行了检测;刘芸等^[9]利用重组酵母检测工业废水及受纳水体的内分泌干扰效应。但上述研究多采用一种方法进行检测。相对于单一毒性指标的检测方法,应用成组生物毒性测试手段对水体进行不同的毒性效应分析,能够对目标水体进行完整的毒性表征,排除单一指标的假阴性结果。

珠三角地区的水资源丰富,工业较为发达,工业废水对环境产生的污染风险已引起极大关注。本研究应用双杂交酵母检测体系与 SOS/umu 测试技术,对该地区的 1 家污水处理厂、1 家染织厂、3 家电子工厂废水的有机物提取液进行潜在的生物毒性筛选和评价,旨在为该区域生态风险评价提供数据支撑,服务于环境监管,保障水质安全。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

所用仪器主要为:多功能酶标仪、超净工作台、

CO₂ 培养箱、旋转蒸发仪、氮吹仪。所用试剂主要为:2-硝基苯 β -D-吡喃半乳糖苷(ONPG)、4-硝基喹啉-1-氧化物(4-NQO)、17 β -雌二醇(E2),购自美国 Sigma 公司;碳酸钠(Na₂CO₃)、二氯甲烷、正己烷、甲醇、三氯甲烷、二甲亚砜(DMSO),均为分析纯,购自北京化学试剂公司。

1.2 样品采集与前处理

采集惠州地区 1 家污水处理厂进出水样品、1 家染织厂处理前废水样品与处理后排水样品各 1 个、3 家电子行业工厂处理前废水样品 3 个与处理后排水样品 2 个(后续统一称之为行业原水和排水),以及 6 个受纳水体样品(zl-01、zl-02、zl-03、zl-04、zl-05、zl-06),共计 15 个样品。样品采集瓶采用棕色带塞细口玻璃瓶,样品瓶经重铬酸钾洗液润洗浸泡过夜,然后用自来水、蒸馏水洗净后倒置晾干,待用。水样采集后立即运回实验室,经 0.7 μ m 玻璃纤维滤膜过滤,用 HLB 固相萃取小柱富集(HLB 小柱使用前依次加入二氯甲烷、甲醇、超纯水进行活化)。富集完成后,依次用 5 mL 正己烷、10 mL 二氯甲烷、5 mL 甲醇(保持 5 min)洗脱,旋蒸浓缩,用柔和高纯氮气吹蒸并置换溶剂为 DMSO,样品按照 1 000 倍浓缩后于 -20 $^{\circ}$ C 下保存备用,使用时按梯度稀释,换算成原水体积/孔。

1.3 生物检测方法

1.3.1 SOS/umu 实验

选用 *Salmonella typhimurium* TA1535/PSK1002 菌株,该菌株由日本大阪公共卫生协会提供,具体细菌活化及实验过程参考文献[10]。于暴露水样培养的菌液在 595 nm 波长下测定吸光度值,再向反应菌液中加入 Z-Buffer 溶液和三氯甲烷,振荡摇匀,再于上述溶液中加入 ONPG 缓冲溶液,于 30 $^{\circ}$ C 振荡

反应 60 min,结束后加入 Na_2CO_3 溶液终止反应,吸取上清液放入 96 孔酶标板中,分别于 415 nm 和 540 nm 波长下测定吸光度值。

1.3.2 双杂交酵母实验

重组人雌激素受体基因片段(hER)及共激活因子 GRIP1 的双杂交酵母为实验室自主合成。双杂交酵母(hER + GRIP1)是基于激素受体作用理论构建而成的^[11],其较单杂交酵母更加接近哺乳动物内分泌系统的真实作用情况。样品测试方法参考文献[10],选择指数生长期的酵母,调节酵母菌株培养液在 600 nm 波长处的吸光度值为 0.75,样品暴露培养液培养酵母 2 h 后测定 600 nm 波长处吸光度值,再向菌液中加入 Z-Buffer 溶液和三氯甲烷,振荡破碎酵母细胞后,再加入 ONPG 反应液启动酶反应,反应结束后加入 Na_2CO_3 溶液终止反应,吸取上清液于酶标板中,测定 420 nm 波长下吸光度值。

1.4 数据分析

1.4.1 SOS/umu 实验结果

SOS/umu 实验中 β -半乳糖苷酶诱导活性(IU)计算公式如下:

$$\text{IU} = 1\,000 \times (A_{415} - 1.75 \times A_{540}) / (t \times v \times A_{595}) \quad (1)$$

式中: t 为加入 ONPG 后的反应时间; v 为反应菌液在显色过程中的稀释倍率; A_{595} 、 A_{415} 、 A_{540} 分别为 595、415、540 nm 波长处的吸光度值。

实验结果以 R 表示:

$$R = \text{IU}_{\text{样品}} / \text{IU}_{\text{DMSO}} \quad (2)$$

式中: $\text{IU}_{\text{样品}}$ 为环境样品诱导 β -半乳糖苷酶的活性; IU_{DMSO} 为对照组 DMSO 诱导 β -半乳糖苷酶的活性。

当 $R \geq 2.00$ 时,表示 β -半乳糖苷酶活性被显著诱导,结果呈阳性,由此可以认为该样品具有遗传毒性。

由于具有遗传毒性的物质种类繁多,无法对样品中各种诱导遗传毒性效应的物质进行定性定量分析,因此采用阳性物质 4-NQO 的等当量毒性来评价饮用水的致癌风险,即样品的 β -半乳糖苷酶诱导活性在 4-NQO 剂量效应曲线中对应的浓度值。朱舟等^[12]研究测得 4-NQO 致癌强度(q)为 0.369 $\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg}$ 。按照成年人体质量为 65 kg,每日饮水按 1.6 L 计算,则水样基于 umu 遗传毒性效应的致癌风险 P 为:

$$P = [(\text{TEQ}_{4-\text{NQO}} \times 0.001 \times 1.6) / 65] \times 0.369 \quad (3)$$

式中: $\text{TEQ}_{4-\text{NQO}}$ 为环境样品中 4-NQO 的等当量浓度, $\mu\text{g}/\text{L}$ 。

1.4.2 双杂交酵母实验结果

以终浓度为 $1 \times 10^{-10} \text{ mol}/\text{L}$ 的 E2 为阳性对照,各化合物的类雌激素效应应用诱导 β -半乳糖苷酶活性程度来表征:

$$\text{诱导率} = \text{IU}(\text{s}) / \text{IU}(\text{p}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\text{IU}(\text{s})$ 为样品暴露诱导双杂交酵母产生的 β -半乳糖苷酶活性; $\text{IU}(\text{p})$ 为 E2 诱导双杂交酵母产生的 β -半乳糖苷酶活性。

在此次测试中 E2 稳定诱导双杂交酵母产生的 β -半乳糖苷酶活性为 0.24,当样品诱导酶活性值大于 0.024(诱导率大于 10%)时,认为具有弱雌激素效应;酶活性值大于 0.048(诱导率大于 20%)时,认为具有显著雌激素效应。

实验结果采用 Excel 软件进行统计和绘图。

2 结果与讨论

2.1 SOS/umu 遗传毒性检测结果

利用 SOS/umu 方法对水样进行不同暴露剂量下的遗传毒性效应分析,行业原水和排水以及受纳水体遗传毒性结果分别如图 1、2 所示。由图 1 可以看出,所测原水均在低浓度表现出显著遗传毒性效应,但效应强度随着暴露剂量的增加而降低。分析原因可能是,行业原水中普遍存在重金属等急性毒性物质,在高浓度时会对细胞生长产生毒性作用,王纯等^[13]研究结果表明印染废水中急性毒性约为 90 $\mu\text{g}/\text{L}$ (HgCl_2 毒性当量浓度)。因此可以推测,应该是原水中某些具有细胞毒性的污染物在高浓度下破坏了菌株的正常生产,导致高浓度原水中的 β -半乳糖苷酶表达量降低。

排水水样均表现出显著遗传毒性作用,每个样品效应值在浓度范围(1.57 ~ 100 $\text{mL}/\text{孔}$)内的 R 值为 2.42 ~ 4.18,均大于 2.00。比较低浓度(1.57 ~ 12.5 $\text{mL}/\text{孔}$)暴露条件下原水和排水的 R 值发现,污水厂、钟表厂排水与原水效应值的差值在 -0.79 ~ 0.40 范围内,高浓度(25 ~ 100 $\text{mL}/\text{孔}$)下排水的遗传毒性效应较原水显著提升了 0.03 ~ 3.76,可见污水处理工艺能够较好地去除原水中的细胞毒性物质,但对其中具有遗传毒性作用的物质无明显去除效果。Fang 等^[14]的研究也表明,纺织印染厂废水、

电镀厂废水、造纸厂废水、化工厂废水和污水处理厂进水等,在经过处理以后达标排放的水仍具有显著遗传毒性。

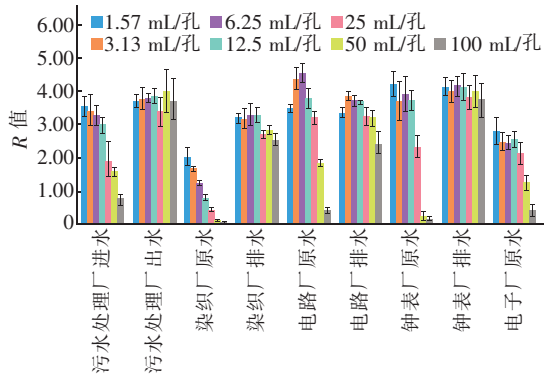


图 1 行业原水及排水的遗传毒性测试结果

Fig. 1 Genotoxicity of industry wastewater and treated

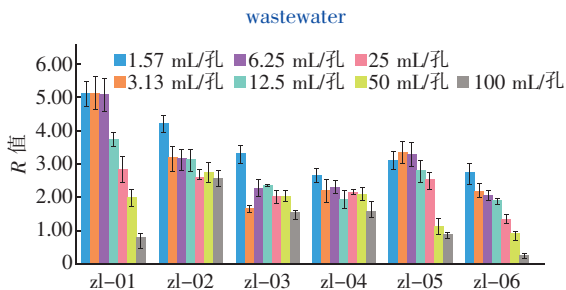


图 2 受纳水体遗传毒性测试结果

Fig. 2 Genotoxicity of receiving water

由图 2 可以看出,6 个受纳水体样品均表现出显著遗传毒性效应,与工业废水几乎一致, β -半乳糖苷酶诱导活性随着暴露剂量的升高而降低,推测该地区受纳水体中同样存在细胞毒性效应物质抑制受试菌株的生长,这部分污染物可能来源于未达标排放的废水。统计无细胞毒性效应暴露浓度下遗传毒性效应数据,即 3.13 mL/孔暴露浓度以下该地区受纳水体遗传毒性 R 值在 1.67 ~ 5.13 之间。对已有研究数据分析发现,潘丽波^[15]检测某行政区域内地表水遗传毒性 R 值在 2.17 ~ 4.24 之间,不同地区水体遗传毒性水平与本研究结论基本一致。

研究区域内行业排水最终进入受纳水体,而受纳水体均汇入水源型河流,因此有必要对其可能的致癌风险进行评估。根据 6.25 mL/孔计算,行业原水和排水样品的 4-NQO 当量浓度平均值为 9.06 $\mu\text{g/L}$,其中电路厂原水的 4-NQO 当量浓度最高,达到 25.67 $\mu\text{g/L}$,受纳水体样品的 4-NQO 当量浓度平均值为 10.63 $\mu\text{g/L}$,其中最高为 52.14 $\mu\text{g/L}$,

远高于其余样品。根据目前发展中国家一般采用致癌风险值不高于 10^{-5} 作为饮用水的安全标准,发达国家多采用致癌风险值不高于 10^{-6} 甚至更小,从这个标准来看,该地区不管是行业原水和排水还是受纳水体水样都存在一定的致癌性,致癌风险最高分别达到 2.33×10^{-4} 和 4.74×10^{-4} ,虽然行业原水和排水以及受纳水体地表水不作为直接饮用水水源,但会对汇入的水源型河流的水质安全产生较大的致癌风险。因此,该地区应重视行业废水处理和排放废水水质的监管,避免水质安全隐患,以保证水源水质安全。

表 1 行业原水和排水以及受纳水体 TEQ 毒性当量和致癌风险

Tab. 1 TEQ and carcinogenic risk of industry wastewater, drainage and receiving water

| 项 目 | | TEQ 当量/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) | 致癌风险 |
|-----------------|---------|--|-----------------------|
| 行业 原水和 排水 | 污水处理厂进水 | 4.64 | 4.22×10^{-5} |
| | 污水处理厂出水 | 9.39 | 8.53×10^{-5} |
| | 染织厂原水 | 4.70 | 4.27×10^{-5} |
| | 染织厂排水 | 0.31 | 2.78×10^{-6} |
| | 电路厂原水 | 25.67 | 2.33×10^{-4} |
| | 电路厂排水 | 8.83 | 8.02×10^{-5} |
| | 钟表厂原水 | 11.18 | 1.02×10^{-4} |
| | 钟表厂排水 | 15.31 | 1.39×10^{-4} |
| | 电子厂原水 | 1.55 | 1.41×10^{-5} |
| | 电子厂排水 | 4.64 | 4.22×10^{-5} |
| 受纳 水体 | zl-01 | 52.14 | 4.74×10^{-4} |
| | zl-02 | 3.85 | 3.50×10^{-5} |
| | zl-03 | 1.18 | 1.07×10^{-5} |
| | zl-04 | 1.23 | 1.12×10^{-5} |
| | zl-05 | 4.51 | 4.09×10^{-5} |
| | zl-06 | 0.87 | 7.87×10^{-6} |

2.2 雌激素效应检测结果

利用双杂交酵母检测水样雌激素效应,不同行业原水和排水以及受纳水体测试结果分别见图 3、4。行业原水和排水水样的雌激素效应结果显示,只有染织厂原水和排水以及电路厂排水具有弱雌激素效应,其中仅染织厂原水有较高的 β -半乳糖苷酶诱导活性,为 0.041;污水处理厂进出水、钟表厂原水和排水以及电子厂原水、电路厂原水未表现出雌激素效应,说明行业原水和排水中较少存在雌激素类污染物。受纳水体中 zl-01、zl-03、zl-05、zl-06 水样的 β -半乳糖苷酶诱导活性分别为 0.105、0.048、0.058 和 0.081,具有显著雌激素效应,可见

该地区污水处理厂进出水或典型工业废水及排水并非地表水体中雌激素干扰物的主要来源。大量研究表明,城镇生活污水是地表水体中雌激素类污染物的主要来源,且水体的雌激素效应程度也极易受到畜禽、水产养殖业等排放污水的影响^[16-17]。城镇生活污水中一些雌激素类药品,养殖业中较多激素类物质或药物用于促进或改善畜禽生长,从而导致城镇生活污水和养殖废水中存在大量激素类效应物质。通过调查发现,该区域农业种植业面积很少,支流涌涌水体紧邻居民生活区,而且存在一些中小型畜禽养殖场,结合检测结果判断样品中的类雌激素污染物极大可能来源于未经处理的生活污水、畜禽养殖废水等。

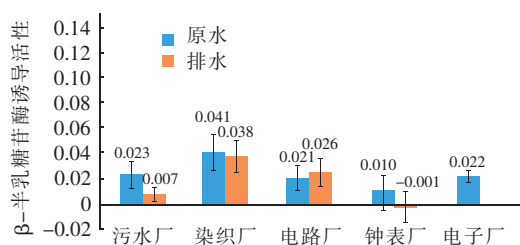


图3 行业原水和排水的雌激素效应测试结果

Fig.3 Estrogen effect of industrial wastewater and drainage

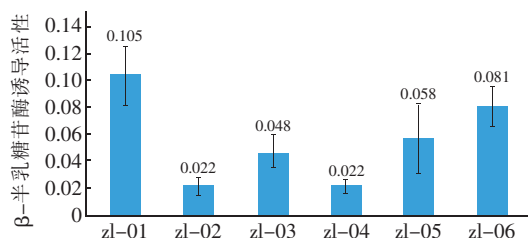


图4 受纳水体雌激素效应测试结果

Fig.4 Estrogen effect of receiving water

综合数据表明,该地区受纳水体存在类雌激素物质污染风险,且该地区受纳水体均汇于水源型河流,因此亟需对该地区排入受纳水体的水质进行管控,加强污水处理设施建设,以去除进水中大量类雌激素效应物质,保障受纳水体水质安全。

3 结论

① 研究区域内工业废水和排水以及受纳水体中普遍存在遗传毒性效应物质,且遗传毒性污染物的毒性效应几乎一致,致癌风险值已经高于饮用水的安全标准,具有一定致癌性,迫切需要引起当地管理部门重视。

② 该地区受纳水体的雌激素效应高于工业废水和排水,说明工业废水排放并非该地区水体中雌

激素干扰物的主要来源,其他来源污染物(如未经处理的生活污水、畜禽养殖废水)是该地区地表水体中雌激素类物质的主要来源之一。

③ 现有污水处理工艺对细胞毒性与雌激素干扰物等物质的去除效果较好,对遗传毒性效应物质的去除效果一般,应加强对具有遗传毒性物质的监管与控制。

参考文献:

- [1] 丛佳,张肖,赵乐军,等. 成组生物毒性测试法在水质生物安全性评价中的应用[J]. 天津理工大学学报, 2018,34(6):59-64.
CONG Jia,ZHANG Xiao,ZHAO Lejun, *et al.* Biological safety evaluation of water quality based on the biological toxicity test battery[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2018,34(6):59-64 (in Chinese).
- [2] 豆捷雄,石莹,宋瑞霞,等. SOS/umu 实验在自来水厂水样有机提取物遗传毒性及其致癌风险评估中的应用[J]. 环境与健康杂志, 2017,34(3):248-251.
DOU Jiexiong, SHI Ying, SONG Ruixia, *et al.* Genetic toxicity and carcinogen risk assessment of organic extracts of water from a waterwork by using SOS/umu test[J]. Journal of Environment and Health, 2017, 34(3):248-251 (in Chinese).
- [3] ZEGURA B, HEATH E, CERNOSA A, *et al.* Combination of *in vitro* bioassays for the determination of cytotoxic and genotoxic potential of wastewater, surfacewater and drinking water samples [J]. Chemosphere, 2009, 75(11):1453-1460.
- [4] 张建超,马福俊,胡建英. 利用 SOS/umu 测试方法鉴定沙颍河水中的遗传毒性物质[J]. 生态毒理学报, 2013,8(3):344-349.
ZHANG Jianchao, MA Fujun, HU Jianying. SOS/umu test for detection of genotoxins in water of Shaying River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013,8(3):344-349 (in Chinese).
- [5] YAN Y, JIANG W W, LI N, *et al.* Assessing of genotoxicity of 16 centralized source-waters in China by means of the SOS/umu assay and the micronucleus test: initial identification of the potential genotoxicants by use of a GC/MS method and the QSAR Toolbox 3.0 [J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2014, 763:36-43.
- [6] 曹新垠,王思敏,庞艳,等. 基于 SOS/umu 生物测试评价不同炭龄活性炭对遗传毒性物质的去除效果

- [J]. 给水排水, 2018, 44(2): 44-47.
- CAO Xinkai, WANG Simin, PANG Yan, *et al.* Assessment of removal efficiency of genotoxicity in drinking water by activated carbon with different ages using SOS/umu bioassay [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2): 44-47 (in Chinese).
- [7] 查金苗, 王子健. 利用日本青鳉早期发育阶段暴露评估排水的急、慢性毒性和内分泌干扰效应[J]. 环境科学学报, 2005, 25(12): 1682-1686.
- ZHA Jinmiao, WANG Zijian. Assessment acute and chronic toxicity and endocrine disruption effects of whole effluent based on early stage development of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1682-1686 (in Chinese).
- [8] 张秀君, 韩桂春. 发光细菌法监测废水综合毒性[J]. 中国环境监测, 1999, 15(4): 39-41.
- ZHANG Xiujun, HAN Guichun. Using the method of photobacteria to monitor wastewater comprehensive toxicity[J]. Environmental Monitoring in China, 1999, 15(4): 39-41 (in Chinese).
- [9] 刘芸, 彭晓武, 郭庶, 等. 东江下游污染源和纳污水体的雌激素效应水平[J]. 中国环境监测, 2011, 27(5): 56-59.
- LIU Yun, PENG Xiaowu, GUO Shu, *et al.* Levels of estrogenic effect in waters and wastewaters in downstream Dongjiang River [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(5): 56-59 (in Chinese).
- [10] 刘芸, 李娜, 马梅, 等. 酚类化合物雌激素效应的比较研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 873-878.
- LIU Yun, LI Na, MA Mei, *et al.* Comparative study of phenolic compounds estrogenic and anti-estrogenic activities [J]. China Environmental Science, 2009, 29(8): 873-878 (in Chinese).
- [11] 李剑, 马梅, 饶凯峰, 等. 酵母双杂交技术构建重组人雌激素受体基因酵母[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 21-26.
- LI Jian, MA Mei, RAO Kaifeng, *et al.* Construction the recombinant human estrogen receptor (hER) gene yeast using two-hybrid yeast technique [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(1): 21-26 (in Chinese).
- [12] 朱舟, 顾炜旻, 安伟, 等. 基于 umu 遗传毒性效应的饮用水致癌风险评价的尝试[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(4): 363-369.
- ZHU Zhou, GU Weimin, AN Wei, *et al.* Carcinogen risk assessment of drinking water based on genotoxic activities using SOS/umu test [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(4): 363-369 (in Chinese).
- [13] 王纯, 王文龙, 刘鑫, 等. 印染废水处理过程中有机污染物及急性毒性变化规律研究[J]. 环境科学学报, 2019, 39(10): 3434-3441.
- WANG Chun, WANG Wenlong, LIU Xin, *et al.* Study on the removal of organic pollutants and acute toxicity variation in the process of dyeing wastewater treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(10): 3434-3441 (in Chinese).
- [14] FANG Y X, YING G G, ZHAO J L, *et al.* Assessment of hormonal activities and genotoxicity of industrial effluents using *in vitro* bioassays combined with chemical analysis [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2012, 31(6): 1273-1282.
- [15] 潘丽波. 某地区水环境遗传毒性监测和风险评估[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2013: 38-52.
- PAN Libo. The Genotoxicity Monitoring and Risk Assessment of Water Environment in a Region [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2013: 38-52 (in Chinese).
- [16] 张照韩. 城市水体中雌激素的去除机制及复合污染物研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 3-28.
- ZHANG Zhaohan. Removal Mechanisms and Combined Pollution Effect of Estrogens in Urban Water Body [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 3-28 (in Chinese).
- [17] 陈晓雯, 赵建亮, 刘有胜, 等. 长江中下游环境激素效应的污染物特征及生态风险[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(3): 191-203.
- CHEN Xiaowen, ZHAO Jianliang, LIU Yousheng, *et al.* Occurrence and ecological risks of hormonal activities in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(3): 191-203 (in Chinese).

作者简介: 赵旭(1992-), 女, 湖北潜江人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为生态毒性测试与化学品风险评估。

E-mail: zhaoxu@scies.org

收稿日期: 2020-11-05

修回日期: 2021-03-18

(编辑: 任莹莹)