

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20120910001

郭莉, 刘薇, 金一和. 印染废水处理过程及排放水对草履虫遗传毒性评价[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6): 903-908

Guo L, Liu W, Jin Y H. Evaluation on genetic toxicity of dyeing wastewater during treatment process and effluent on *Paramecium caudatum* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2013, 8(6): 903-908 (in Chinese)

印染废水处理过程及排放水对草履虫遗传毒性评价

郭莉, 刘薇*, 金一和

大连理工大学环境学院 工业生态与环境工程教育部重点实验室 大连 116024

摘要: 草履虫作为指示生物评估印染废水处理过程及排放水的毒性效应。急性毒性结果显示, 原水、厌氧工段印染废水、好氧工段印染废水对草履虫的半数致死浓度(24h-LC₅₀)分别为 54%、41%、98%; 遗传毒性结果显示, 印染废水原水、经处理的排放水在 6.25%、12.25% 稀释梯度下对草履虫造成的 DNA 损伤较对照组呈显著升高($p < 0.01$), 而排放水对草履虫的 DNA 损伤较原水无显著性差异; 草履虫增殖速率结果显示, 印染废水排放水 50% 稀释梯度下对草履虫增殖速率有抑制作用。暴露于印染废水排放水中 10% 的草履虫其游动行为发生改变。以上结果表明, 印染废水在经过处理后, 理化指标均达到国家印染废水行业排放标准, 但排放水仍对草履虫产生急性毒性, 且遗传毒性较原水没有显著降低。水生生物毒性测试能有效补充理化指标评价, 为印染废水行业全面达标排放提供依据。

关键词: 印染废水; 草履虫; 遗传毒性

文章编号: 1673-5897(2013)6-903-06 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Evaluation on Genetic Toxicity of Dyeing Wastewater during Treatment Process and Effluent on *Paramecium caudatum*

Guo Li, Liu Wei*, Jin Yihe

Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (MOE), School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China.

Received 10 September 2012 **accepted** 29 October 2012

Abstract: The effect of toxicity of dyeing effluent was evaluated by *Paramecium caudatum*. The results of acute toxicity showed that 24h-LC₅₀ of tank and effluent's water samples were 54%, 41%, 98%, respectively. The results of genetic toxicity showed that influent at concentration of 6.25% and effluent at concentration of 12.25% caused *Paramecium caudatum*'s DNA damage significantly higher than that of the control group ($p < 0.01$). However, compared with influent, the DNA damages of effluent were no significantly different. The results of growth rate showed that effluent at concentration of 50% inhibited *Paramecium caudatum*'s growth. 10 percent of *Paramecium caudatum*'s swimming behavior changed after exposure to effluent. Although treated dyeing effluent's physico-chemical indicators were in line with national dyeing wastewater discharge standards, the effluent still induced acute toxicity to *Paramecium caudatum*, and

收稿日期: 2012-09-10 录用日期: 2012-10-29

基金项目: 国家重大科技专项(No.2012ZX07202-002)

作者简介: 郭莉(1988-), 女, 硕士, 研究方向: 毒理学; E-mail: gldlut@163.com;

* 通讯作者(Corresponding author) E-mail: liu_wei@dlut.edu.cn

genetic toxicity was not significantly reduced. Biological toxicity test can be an effective complement to evaluate the physico-chemical indicators, and provide the basis for dyeing wastewater industry's comprehensive discharge standards.

Keywords: dyeing effluent; *Paramecium caudatum*; genetic toxicity

印染纺织业是我国重要的轻工业之一,全国每年产生印染废水量约为 1.6×10^9 t^[1]。一般印染废水都具有水量大、成分复杂等特点^[2-3],是恶化我国重要水系水质、造成流域生态风险的重点污染源之一。印染废水中含有大量有毒有害污染物,高浓度的有机污染物是造成水生生物毒性的一个重要因素^[4],苯乙烯^[5]、双酚 A^[6]、二氯苯氨^[7]和苯酚^[8],均会对水生生物造成一定毒害,而国内纺织印染生产工艺中,很多有毒有害物质并没有进行彻底处理^[9]。

国外,尤其是发达国家印染废水处理较好。例如德国,注重清洁生产、水资源回收和毒性减排,而且技术成熟,一些印染厂甚至能达到“零排放”^[10];而国内,不仅处理效果不理想,而且目前我国印染废水的排放标准(GB4287-1992)^[11]中,主要评价指标有五日生化需氧量(biochemical oxygen demand after 5 days, BOD₅)、化学需氧量(chemical oxygen demand, COD_{Cr})、色度、pH 值等理化指标,缺乏反映废水毒性强度和性质的生物学监测指标。印染废水中污染物种类繁多,在废水处理过程中可能转化为毒性更强的二次污染物。而现行的评价指标和评价方法,不能表征排放水的生态风险,甚至排放水理化指标即使符合印染行业废水排放标准,也不能保证其生态安全性。因此,除了对印染排放废水进行理化指标的监测之外,有必要探讨其生物毒性及处理过程中毒性变化规律,作为排水水质控制的必要补充^[12],也是开发和建立废水毒性减排技术的科学依据。

本文以地面水中广泛存在的草履虫作为指示生物,监测印染废水入水、不同工段处理后出水对草履虫的一般毒性和遗传毒性,旨在建立简便易行的废水生物毒性评价指标和评价方法,以保证废水的生态安全性。

1 材料和方法(Materials and methods)

1.1 主要试剂与仪器

1.1.1 主要试剂

正常融点琼脂糖(NMA, 1.2%)、低熔点琼脂糖(LMA, 1.0%)。氢氧化钠(NaOH)、磷酸缓冲盐溶液(PBS)、乙二胺四乙酸二钠(Na₂EDTA)、三羟甲基氨基甲烷(Tris):北京索莱宝科技有限公司。聚乙二醇辛基苯基醚(Triton X-100)、二甲基亚砷(DMSO):美国 Sigma 公司。Gelred 染液:美国 Biotium 公司。

细胞裂解液:将 $2.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl、 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na₂EDTA、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Tris 溶解后,用 NaOH 调节 pH = 10,置于 4℃ 下备用。临用前按体积比加入 10% DMSO、1% Triton X-100。

电泳液: $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na₂EDTA, $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 等体积混合, pH = 13, 4℃ 下保存。溶剂均为分析纯。

1.1.2 仪器

Nikon YS100 光学显微镜(Nikon 公司,日本); DK-600S 型三用恒温水箱; DT5 - 5 低速台式自动平衡离心机(北京时代时利离心机有限公司); DYY-6C 型电泳仪(北京六一仪器厂); TGL-16B 高速冷冻台式离心机(上海安亭科学仪器厂); Olympus IX71 倒置式荧光显微镜(Olympus 公司,日本)。

1.2 印染废水来源

辽宁省海城市,印染行业是当地的五大支柱产业之一。本实验印染废水来源于该市某污水处理厂,采自 2011 年 10 月。该污水处理厂主要收集了附近 34 家印染厂的废水。污水处理厂采用厌氧/好氧(A/O)污水处理技术,日处理量 4 万吨。废水处理工艺各反应段出水的水质指标见表 1。采集水样为 24 h 混合样品,密封后送往实验室,放置到 4℃ 中保存。水样理化指标均符合国家印染废水排放标准。

表 1 污水处理厂各反应段出水的水质指标

Table 1 Quality index of wastewater from sewage treatment process

污水来源 Wastewater source	pH	色度/倍 Color/fold	盐度/‰ Salinity/‰	化学需氧量	悬浮物
				/(mg·L ⁻¹) COD	/(mg·L ⁻¹) SS
入水 Influent	7.5	15	2	378	70.95
厌氧池 Anaerobic tank	9.1	30	3	586	83.85
好氧池 Aerobic tank	7.7	16	4	359	74.18
出水 Effluent	7.5	9	3	61	61.28

1.3 草履虫培养方法

草履虫(*Paramecium caudatum*)由日本筑波大学生命和环境科学学院惠赠。称取 5 g 干稻草,洗净

后剪成 1 cm 长的稻草段放入 500 mL 锥形瓶中, 加入 300 mL 水, 加热煮沸 15 min 进行灭菌。配制酵母液 20 mL 倒入锥形瓶中, 即为草履虫培养液。接种草履虫母液后在室温下(20 ~ 25 °C)进行培养。

1.4 草履虫净化富集方法

取草履虫培养液, 用 200 目尼龙网过滤两次, 离心(800 rpm 3 min), 移去上清液, 离心管底部即可获得较纯净的草履虫, 混合一定量沉淀液再经离心, 移去上清液, 即可获得密度较高的草履虫培养液。根据混合沉淀液的量即可控制草履虫密度。

1.5 草履虫生长曲线

将新培养的草履虫溶液在室温下进行繁殖, 连续 6 d 每天量取 200 μL 草履虫溶液在显微镜下对草履虫的个数进行计数, 连续测量一周。以培养时间为横坐标, 1 mL 草履虫培养液中所含的草履虫个数为纵坐标作图, 绘得草履虫生长曲线(growth curve)。

1.6 草履虫染毒

选择生长状态处于稳定期的草履虫作为受试生物进行急性毒性试验。染毒如下: 印染废水原水、厌氧工段出水、好氧工段出水和排放水按几何级数稀释成浓度分别为 6.25%、12.25%、25.00%、50.00%、100.00%, 各量取 2 mL。草履虫经过净化富集处理后, 向水样中加入 5 μL 高密度(0.2×10^3 个·mL⁻¹)的草履虫在室温下(20 ~ 25 °C)进行染毒, 急性毒性染毒时间为 24 h; 选择生长状态处于对数期的草履虫作为受试生物进行种群增殖速率试验。染毒后 24 h、36 h、48 h 进行观察计数。设置蒸馏水为阴性对照组。

草履虫的种群增长速率计算公式:

$$Y = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t} \quad (1)$$

其中, N_t 为 t (h)草履虫的种群密度, N_0 为草履虫的起始种群密度, t 为培养持续时间;

N_0 = 起始个体数/培养液总体积, N_t = t (h)个体数/培养液总体积

实验条件: $N_0 = 0.1 \times 10^3$ 个·mL⁻¹, 培养液(排放水)体积为 2 mL。

1.7 彗星试验方法

①破表膜: 受试物中加入 1 mL 1.25 mol·L⁻¹蔗糖溶液, 在 0 °C 下放置 5 min, 离心(800 rpm 5 min 0 °C), 量取 100 μL 沉淀液, 加入 1 mL 细胞膜裂解液(1.0% Triton-X 100, 0.25 mol·L⁻¹蔗糖溶液), 室温下放置 15 min, 离心(1 500 rpm 3 min 0 °C), 量取 60 μL; ②制备

胶板: 取 150 μL 正常熔点琼脂糖溶液加到玻片上, 固化 15 min 作为第 1 层胶。取 60 μL 细胞悬浮液与 200 μL 低熔点琼脂糖溶液混合并量取 100 μL 混合液滴到玻片上, 固化 15 min 作为第 2 层胶; ③细胞裂解: 载玻片放入细胞裂解液中(2.5 mol·L⁻¹ NaCl, 10 mmol·L⁻¹, 10 mmol·L⁻¹ Tris, 10% DMSO, 1% Triton X-100, pH=10) 4 °C 下避光裂解 2.5 h; ④DNA 解旋: 载玻片置于盛有配制碱性电泳缓冲液(300 mmol·L⁻¹ NaOH, 1.0 mmol·L⁻¹ Na₂EDTA, pH=13) 0 °C 避光放置 20 min; 需特别注意的是: 电泳液严格控制为 pH=13 的条件下, Kawamoto 等^[13]研究发现在 pH=12.1 时不引起拖尾现象; ⑤电泳: 避光电泳 20 min。电泳仪条件为: 20 V 200 mA; ⑥中和: 电泳结束后取出玻片, 用 400 mmol·L⁻¹ Tris-HCl(pH=7.5)缓冲液进行中和 2 次, 各 10 min; ⑦染色: 量取 100 μL gelred 染液进行染色, 立即在荧光显微镜下用 100 倍的放大倍数观察并拍照。彗星试验前, 用台盼蓝染色法确定细胞存活率大于 95%。

尾矩(tail moment, TM)是尾部 DNA 含量和彗尾长度的乘积, 是衡量 DNA 损伤最基本的参数, 本研究以尾矩为指标反映暴露于废水水样的草履虫 DNA 损伤程度。

2 结果与分析(Results and analysis)

2.1 草履虫的生长曲线

草履虫生长曲线(图 1)为 S-型生长曲线, 第 1 天, 草履虫生长处于静止期; 第 2 ~ 5 天, 草履虫生长处于对数期, 选取此时期的草履虫用于增殖速率试验。从第 5 天起生长处于稳定期, 选取此时期草履虫用于急性毒性试验和彗星试验。

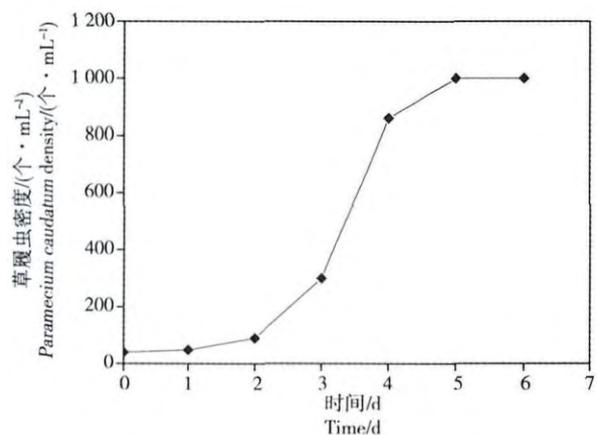


图 1 草履虫的生长曲线

Fig. 1 Growth curve of Paramecium caudatum

2.2 印染废水不同处理工段水样对草履虫的急性毒性

原水、厌氧工段出水和排放水水样对草履虫的半数致死浓度 LC_{50} 值分别为 54%、41%、98%。原水致草履虫全部死亡; 厌氧工段出水, 急性毒性升高, 可能与印染废水中化学物质在此工段转化成毒性更高的污染物有关; 好氧工段出水还不足以引起草履虫半数死亡, 水质在好氧工段处理后得到很大改善; 而排放水的急性毒性较好氧工段水样又有所升高(表 2)。

表 2 各处理工段印染废水对草履虫的急性毒性 (致死率/%)

Table 2 Acute toxicity of dyeing wastewater from each treatment process on *Paramecium caudatum* (lethality/%)

污水来源	废水浓度/%				
Wastewater source	Wastewater concentration/%				
	6.25	12.25	25.00	50.00	100.00
入水	0	4	30	40	100
Influent					
厌氧池	3	21	36	86	100
Anaerobic tank					
好氧池	0	5	22	29	39
Aerobic tank					
出水	0	0	0	13	56
Effluent					

2.3 印染废水不同处理工段水样对草履虫种群增殖速率的影响

在 24 h 草履虫增殖速率与浓度之间的回归方程为 $y = -0.003x + 0.0439$ ($R^2 = 0.9058$, $p < 0.05$), 表明草履虫增殖速率与印染废水排放浓度间具有显著的剂量-效应关系。如图 2 所示, 随着暴露时间延长, 低浓度组(6.25%、12.25%)草履虫增殖速率有上升趋势; 25.00% 浓度组草履虫增殖速率缓慢; 而高浓度组(50%、100%)草履虫增殖速率呈下降趋势。印染废水排放水对草履虫种群增殖速率影响的结果表明: 低浓度范围, 随着暴露时间延长, 排放水对草履虫增殖速率无抑制作用; 高浓度范围, 印染废水排放水对草履虫的增殖有抑制作用。

2.4 印染废水遗传毒性结果

废水水样、阳性对照(重铬酸钾 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)、阴性对照的彗星图像($\times 100$)见图 3。随着暴露稀释梯度的升高, 印染废水处理厂原水、排放水对草履虫造成的 DNA 损伤程度增加(图 4)。对照组细胞尾矩为(3.71 ± 1.12)。污水处理厂的原水含有大量的染料废水, 暴露在原水 6.25% 稀释梯度下对草履虫造成的 DNA 损伤的的尾矩为(8.76 ± 2.34), 较对照组显著增大($p < 0.05$), 而原水稀释浓度低于 12.

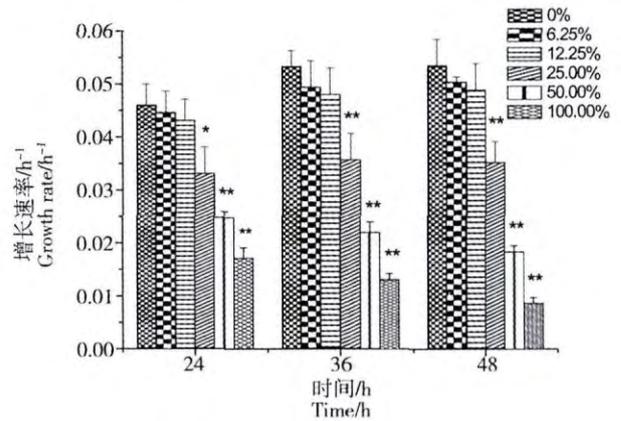


图 2 印染废水排放水对草履虫增殖速率的影响

注: * , ** 分别表示与对照组相比 $p < 0.05$, $p < 0.01$

Fig. 2 Effects of dyeing effluent on growth rate of *Paramecium caudatum*.

Note: * , ** indicates significant difference compared with control group at $p < 0.05$, $p < 0.01$

25% 对草履虫细胞造成 DNA 损伤的尾矩为(22.59 ± 3.58), 较对照组呈极显著性差异($p < 0.01$); 而出水 6.25%、12.25% 稀释梯度下对草履虫造成的 DNA 损伤尾矩分别为(14.05 ± 3.00)、(22.08 ± 2.59) 较对照组呈极显著性差异($p < 0.01$)。排放水与原水相比, 其对草履虫造成的 DNA 损伤并没有显著降低。由此得出结论: 污水经处理后, 排放水的遗传毒性与原水相比并没有显著降低, 表明污水处理工艺并未有效去除印染废水的遗传毒性。

2.5 草履虫游动行为的变化

暴露于印染废水排放水的草履虫, 在显微镜下观察($\times 100$)其游动行为的变化, 草履虫游动行为较正常草履虫明显减慢, 并且部分草履虫在原地点快速旋转, 游动行为异常的草履虫占草履虫总数 10%。阳性对照为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 染毒后游动明显减慢, 但未观察到在原地点快速旋转现象。阴性对照组草履虫与暴露于水样草履虫游动行为的路线见图 5。

3 讨论 (Discussion)

草履虫存在于养鱼池、河沟、池塘等多种环境介质中, 具有较易采集、培养、结构典型、繁殖快、观察方便等优点。由于草履虫属于单细胞原生生物, 因此较斑马鱼、小鼠等生物标志物, 省去制备单细胞悬浮液步骤, 实验流程得到简化, 减少由此引起的实验误差并且缩减了实验所需时间。另外, 由于死亡的草履虫会沉于底部, 因此能很好的分离活细胞和死细胞, 增加彗星试验的准确率。同时, 为今后国内外遗传毒性研究方面, 选取恰当生物标志物提供更优化的选择。

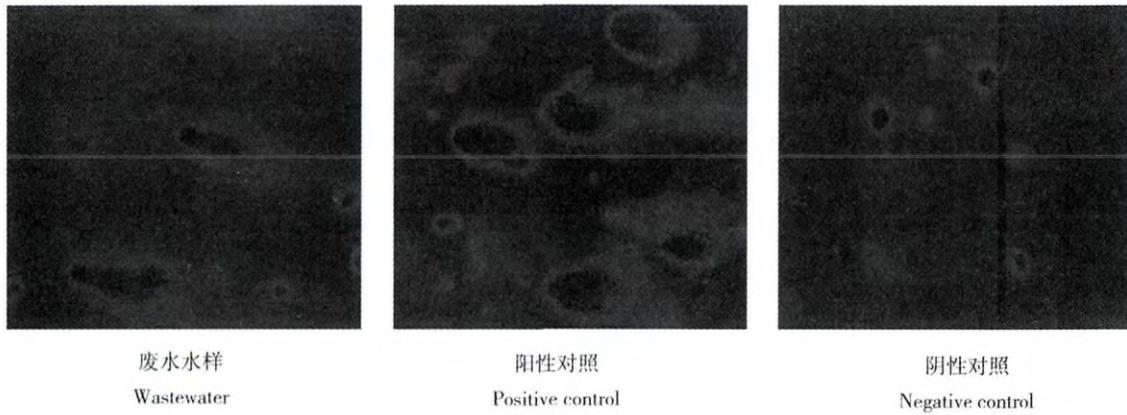


图 3 废水水样、阳性对照、阴性对照的草履虫细胞彗星图像

Fig. 3 *Paramecium caudatum* cell images of wastewater samples, positive control and negative control

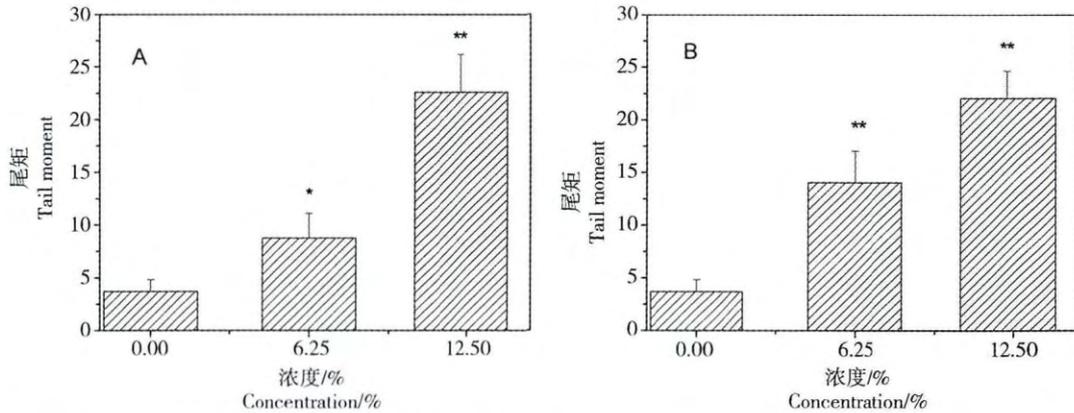


图 4 印染废水处理厂入水、出水在不同浓度稀释下对草履虫造成的 DNA 损伤。(A) 入水, (B) 出水

注: * , ** 分别表示与对照组相比 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 。

Fig. 4 DNA damage caused by exposure of *Paramecium caudatum* to various concentrations of wastewater samples from dyeing sewage treatment plant. (A) Influent (B) Effluent.

Note: * , ** indicates significant difference compared with control group at $p < 0.05$, $p < 0.01$.

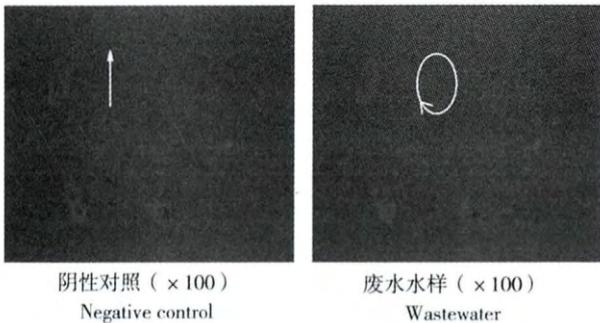


图 5 阴性对照组草履虫与暴露于水样草履虫游动行为的路线

Fig. 5 Swimming routes of *Paramecium caudatum* in negative control group and exposed to water samples

印染废水具有有毒有机污染物浓度高、碱性大等特点,属于难处理的工业废水之一。近年来由于化学纤维织物的发展,仿真丝的兴起和印染后整理技术的进步,使 PVA 浆料、人造丝碱解物、新型助剂等难生化降解有机物大量进入印染废水,增加了废水处理的难度^[14]。本文研究的污水处理厂采用传统的 A/O 工艺,难以有效降解废水中有机物。急性毒性结果表明,厌氧工段水样导致草履虫致死率显著升高,在此处理工段,废水中的污染物可能转化为毒性更大的中间产物。而印染废水在经过该污水处理厂后,理化指标达到国家印染废水排放标准,但排放水仍对草履虫产生致死率大于 50% 的急性毒性,并且遗传毒性结果表明,排放水与原水相比,其对草

履虫 DNA 损伤效应并没有显著降低,说明该污水处理厂的处理技术不能有效去除水中有毒物质,应该采用生化和物化耦合的方法对印染废水做进一步处理。同时进一步表明,水生生物毒性测试能有效补充理化指标评价,为印染废水行业全面达标排放提供依据。

Nishikawa 等^[15]研究表明,暴露于全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)的草履虫发生向后游动的异常行为。本实验草履虫暴露于印染废水排放水后,草履虫游动行为发生改变,由沿口沟方向向前移动变为原地快速旋转或游动明显迟缓,定性表明印染废水排放水对草履虫产生毒性效应,具体机理需做深入研究。

致谢:谨以此文纪念金一和教授,以此表达对金教授的深深怀念之情!

通讯作者简介:刘薇(1980—),女,博士,副教授,主要研究方向为环境毒理学和生态毒理学。

参考文献:

- [1] 梁慧锋. 印染废水处理技术的研究现状[N]. 企业导报, 2010: 293 - 294
- [2] Chen C M, Shih M L, Lee S Z, et al. Increased toxicity of textile effluents by achlorination process using sodium hypochlorite [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 43(2): 1 - 8
- [3] Asamudo N U, Daba A S, Ezeronye O U. Bioremediation of textile effluent using *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2005, 4(13): 1548 - 1553
- [4] 原居林, 胡大雁, 杨卫明, 等. 印染废水对 3 种水生生物的毒性作用[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28 (2): 209 - 212
Ju Y L, Hu D Y, Yang W M, et al. Toxicity of printing-dyeing wastewater to aquatic organisms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(2): 209 - 212 (in Chinese)
- [5] 沈新强, 袁骥. 苯乙烯对水生生物的急性毒性效应研究[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(4): 33 - 35
Shen X Q, Yuan Q. Study on acute toxicity effect of styrene on aquatic organism [J]. *Marine Environmental Science*, 2006 25(4): 33 - 35
- [6] 刘红玲, 刘晓华, 王晓栋, 等. 双酚 A 和四溴双酚 A 对大型溞和斑马鱼的毒性[J]. *环境科学*, 2007, 28(8): 1784 - 1787
Liu H L, Liu X H, Wang X Y, et al. Toxicity of BPA and TBBPA to *Daphnia magna* and zebrafish *Brachydanio rerio* [J]. *Environmental Science*, 2007, 28 (8): 1784 - 1787 (in Chinese)
- [7] 李伟民, 尹大强, 刘新会, 等. 二氯苯胺的毒性及对鲫鱼血清抗氧化酶的影响[J]. *中国环境科学*, 2002, 22 (21): 97 - 100
Li W M, Yin D Q, Liu X H, et al. Toxicity of dichloroanilines and their effects on antioxidant enzymes in *Carassius auratus* serum [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22 (21): 97 - 100 (in Chinese)
- [8] 钱力, 陈华妮. 取代苯胺和苯酚对鲤鱼毒性的 3D-QSAR 研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38 (24): 1352 - 1354
Qian L, Chen H N. 3D-QSAR Research on toxicity of substituted aniline and phenol to carp [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(24): 1352 - 1354 (in Chinese)
- [9] 李炳金, 易绍金, 邓楚洲, 等. 印染废水处理技术研究[J]. *长江大学学报*, 2009, 9(3): 144 - 147
- [10] 国内外印染废水处理情况及技术参考材料[J]. *给水排水动态*, 2006, (6): 23
- [11] 国家环境保护局. 中华人民共和国国家标准 GB4287-92: 纺织染整工业水污染物排放标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992
- [12] 马梅, 王毅, 王子健. 城市污水生物处理过程中有毒有机污染物浓度及毒性变化的规律[J]. *工业水处理*, 1999, 19(6): 9 - 12
Ma M, Wang Y, Wang Z J. Variation in the composition, concentration and toxicity of organic pollutants in municipal sewage wastewater treatment process [J]. *Industrial Water Treatment*, 1999, 19(6): 9 - 12 (in Chinese)
- [13] Kawamoto K, Oashi T, Oami K, et al. Perfluorooctanoic acid (PFOA) but not perfluorooctane sulfonate (PFOS) showed DNA damage in comet assay on *Paramecium caudatum* [J]. *The Journal of Toxicological Sciences*, 2010, 35 (6): 835 - 841
- [14] 喻学敏, 张龙, 刘伟京, 等. 印染废水处理过程中污染物及毒性分析[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(6): 26 - 33
Yu X M, Zhang L, Liu W J, et al. Analysis of pollutant and toxicity of textile wastewater in treatment process [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(6): 26 - 33 (in Chinese)
- [15] Kawamoto K, Nishikawa Y, Oami K, et al. Effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on swimming behavior and membrane potential of *Paramecium acudatum* [J]. *The Journal of Toxicological Sciences*, 2008, 33: 155 - 161