

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20141022001

王妙, 陈辉辉, 查金苗, 等. 全氟辛烷磺酸盐(PFOS)替代品对 4 种本土水生生物的生态毒性[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2): 230-235

Wang M, Chen H H, Zha J M, et al. Ecotoxicity of alternatives of typical perfluorooctane sulfonate (PFOS) to four native aquatic organisms [J]. A-sian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(2): 230-235 (in Chinese)

全氟辛烷磺酸盐 (PFOS) 替代品对 4 种本土水生生物的生态毒性

王妙, 陈辉辉, 查金苗^{*}, 王子健

中国科学院生态环境研究中心 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

收稿日期: 2014-10-22 录用日期: 2014-12-02

摘要: 本文选择了紫背浮萍、四尾栅藻、蚤状溞和稀有鮕鲫 4 种本土水生生物, 开展了阳离子表面活性剂、织物三防整理剂、C₄三防整理剂和 C₆三防整理剂 4 种全氟辛烷磺酸盐(PFOS)替代品的安全性评估, 为筛选理想 PFOS 化学替代品提供科学依据。急性毒性结果发现阳离子表面活性剂对 4 种水生生物均未显示出急性毒性; 织物三防整理剂、C₄三防整理剂和 C₆三防整理剂对蚤状溞的 LC₅₀值分别为 17.97、64.61 和 85.58 mg·L⁻¹, 显示出低的急性毒性。另外, 织物三防整理剂对四尾栅藻的半数抑制浓度(EC₅₀)值为 88.32 mg·L⁻¹, 而对稀有鮕鲫半致死浓度(LC₅₀)值为 14.79 mg·L⁻¹, 均存在急性毒性。短期生长抑制试验结果发现阳离子表面活性剂、织物三防整理剂、C₄三防整理剂和 C₆三防整理剂对稀有鮕鲫生长抑制最低可见效应浓度(LOEC)值分别为 20、1.5、100 和 50 mg·L⁻¹, 表明 4 种 PFOS 替代品均显示低慢性毒性。急慢性综合分析可知 C₄和 C₆三防整理剂相对较安全, 可能成为理想的 PFOS 替代品。

关键词: PFOS 替代品; 本土水生生物; 急性毒性; 慢性毒性

文章编号: 1673-5897(2015)2-230-06 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

Ecotoxicity of Alternatives of Typical Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) to Four Native Aquatic Organisms

Wang Miao, Chen Huihui, Zha Jinmiao^{*}, Wang Zijian

State Key Laboratory of Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Received 22 October 2014 **accepted** 2 December 2014

Abstract: To provide a scientific basis for selecting safe and efficient substitutes, ecotoxicity of four PFOS alternatives (surfactant, textile finishing agent, C₄ finishing agent and C₆ finishing agent) to four native aquatic organisms (*Soiroadela polyrhiza*, *Scenedesmus quadricanda*, *Daphnia pulex* and *Gobiocypris rarus*) was assessed. The results showed that surfactant had no acute toxic to these four native aquatic organisms. LC₅₀ of textile finishing agent, C₄ finishing agent and C₆ finishing agent on *Daphnia pulex* in acute toxicity test were 17.97, 64.61 and 85.58 mg·L⁻¹, respectively. EC₅₀ of textile finishing agent on *Daphnia pulex* was 88.32 mg·L⁻¹, whereas LC₅₀ on *Gobiocypris rarus* was 14.79 mg·L⁻¹. In short-term growth inhibition test, LOEC of surfactant,

基金项目: 国家 863 化学品重大项目课题“化学品毒性高通量生物测试与评价技术”(2012AA06A302); 国家水体污染控制与治理科技重大专项“化学园区综合废水淮河流域(蚌埠段-洪泽湖上游)工业和城市污水毒害污染物综合控制研究与示范”(2014ZX07204-008-03)

作者简介: 王妙(1988-), 女, 硕士, 研究方向为水生态毒理学, E-mail: wangmiao8809@126.com;

^{*} 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zhajinmiao@gmail.com

textile finishing agent, C₄ finishing agent and C₆ finishing agent on *Gobiocypris rarus* were 20, 1.5, 100 and 50 mg·L⁻¹, respectively. These results indicated that the four alternatives have low chronic toxicity to *Gobiocypris rarus*. Above all, C₄ and C₆ finishing agent could be able to serve as potential PFOS alternatives.

Keywords: PFOS alternatives; native aquatic organisms; acute toxicity; chronic toxicity

全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulfonate, PFOS)是一类重要的全氟表面活性剂,具有优良的疏水、疏油特性,在工业生产和生活消费领域中广泛应用^[1-2]。目前水环境中PFOS的浓度数量级为ng·L⁻¹,其中我国海河流域中浓度达到1.11~7.65 ng·L⁻¹^[3],而美国加利福尼亚州河流中达到30~127 ng·L⁻¹^[4]。PFOS具有肝脏毒性,使肝脏减小,影响能量代谢^[5];引起脏器官内的过氧化物增加,造成氧化损伤,直接或间接的损害遗传物质,引发肿瘤^[6-7];破坏血清中皮质酮和瘦素水平的平衡,影响去甲肾上腺素的浓度,干扰动物的神经内分泌系统^[8];诱使胚胎中毒,幼龄动物畸形,延迟幼龄动物的生长发育^[9-10]等系列危害,因此根据世界卫生组织化合物急性毒性分类标准,PFOS属于中等毒性物质。另外PFOS具有极强持久性、生物富集性、生态毒性以及远距离迁移等特征,因此被列入禁止持久性有机污染物(POPs)名单中,在斯德哥尔摩公约国中禁止生产和使用,因此各种PFOS替代品相继开发与生产。

基于PFOS用途广泛,因此其替代品需要种类繁多,然而大多数PFOS替代品仍然是含氟化合物。PFOS对于水生生物毒性在以前研究已经有所报道,其中对于鱼类LC₅₀为4.2~81.18 mg·L⁻¹^[11-13],藻类EC₅₀值为81.60~305 mg·L⁻¹^[11, 14-15],溞类LC₅₀值为4.17~78.09 mg·L⁻¹^[11, 13, 16],上述报道表明PFOS对水生生物存在相对较大急性毒性。然而对于PFOS替代品对于水生生物毒性研究还十分有限,特别是对于我国本土水生生物影响基本上未曾涉及。因此本文选择了4种我国本土水生生物种,包括紫背浮萍、四尾栅藻、蚤状溞和稀有鮎鲫。4种本土水生生物分别代表了不同水生营养级(水生植物、浮游植物、浮游动物以及鱼类),基本上涵盖了水生态系统大部分营养级,获得数据将能有效保护我国水生态系统。本文选择了4种PFOS替代品,开展了PFOS化学替代品对我国本土水生生物生态毒性影响,不仅保护我国水生态系统完整性,同时为PFOS化学替代品筛选提供科学依据。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 供试药剂

PFOS替代化学品:全氟丁基有机铵盐阳离子表

面活性剂、用调聚法合成的织物三防整理剂、电解氟化法合成的C₄及C₆织物三防整理剂。PFOS替代品均为液体,按照体积质量分别配制100 g·L⁻¹的母液。

1.2 实验生物

紫背浮萍(*Soirodela polyrhiza*),采自湖北武汉市南湖,在实验室驯养后进行长期养殖。驯养期间培养条件:温度(24±2)℃,光照6 500~10 000 LUX,培养液参考经济合作与发展组织(OECD)标准,配制的标准培养基(SIS),待浮萍生物大量扩增后进行实验。

四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*),取自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库,在实验室驯养后进行长期养殖。驯养期间培养条件:温度(25±2)℃,光照6 500~10 000 LUX,培养液为参考OECD标准配制的人工培养基,待生物大量扩增后进行实验。

蚤状溞(*Daphnia pulex*)采自湖北省武汉市南湖,带回实验室内进行驯养后,进行长期养殖。养殖用水为参考OECD标准配制的标准稀释水。新配制的标准稀释水pH为7.8±0.2,硬度为250 mg·L⁻¹左右(以CaCO₃计)。养殖期间,水温控制在(20±2)℃,光周期为16 h:8 h(光:暗),每天定时定量投喂试验纯培养的小球藻。

稀有鮎鲫(*Gobiocypris rarus*)在中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室已经进行长期的养殖。养殖期间,水温控制在(25±2)℃,光周期为16 h:8 h(光:暗),每天定时定量投喂饲料,试验开始24 h前停止喂食,试验过程中不喂食。

1.3 试验方法

1.3.1 急性毒性试验方法

紫背浮萍急性毒性实验参照OECD 221浮萍生长抑制试验标准方法。首先将紫背浮萍暴露于100 mg·L⁻¹的受试物溶液中进行限度实验,结果显示4种替代品的致死率均在50%以下,不在进行下一步试验。

四尾栅藻增殖实验参照OECD 201标准方法。首先将四尾栅藻暴露于100 mg·L⁻¹的受试物溶液中进行限度实验试验,结果显示只有织物三防整理剂的致死率在50%以上,进行下一步试验,试验浓度设为10.00、20.00、40.00、80.00和160.00 mg·L⁻¹,周期为72 h,每天检测四尾栅藻的细胞浓度,确定72 h

四尾栅藻生长抑制率为 50% 时受试物浓度,即半数抑制浓度(EC_{50}),用 72 h- EC_{50} 表示。

蚤状蚤急性毒性实验参照 OECD 202 标准试验方法,限度试验结果显示,织物三防整理剂、 C_4 和 C_6 三防整理剂对蚤状蚤的致死率在 50% 以上,进行下一步试验。正式实验中织物三防整理剂的实验浓度设为 15.00、17.84、21.21、25.21 和 30.00 $mg \cdot L^{-1}$; C_4 三防整理剂的实验浓度为 50.00、55.00、60.50、66.55 和 73.21 $mg \cdot L^{-1}$; C_6 三防整理剂的实验浓度为 70.00、77.00、84.70、93.17 和 102.50 $mg \cdot L^{-1}$ 。试验周期为 48 h,在 24 h 和 48 h 时记录蚤状蚤的死亡数,计算死亡率,确定 50% 试验鱼死亡时的受试样品浓度,用 48 h- LC_{50} 表示。

稀有鮕鲫急性毒性实验参照 OECD 203 标准试验方法。首先将稀有鮕鲫暴露于 100 $mg \cdot L^{-1}$ 的受试物溶液中进行限度实验,结果显示只有织物三防整理剂对稀有鮕鲫的致死率在 50% 以上,进行下一步试验,设置 10.43、12.40、14.75、17.53 和 20.86 $mg \cdot L^{-1}$ 浓度梯度,试验周期为 96 h,在 24 h、48 h、72 h 和 96 h 时记录鱼的死亡率,分别确定 50% 试验鱼死亡时的受试样品浓度,用 24 h- LC_{50} 、48 h- LC_{50} 、72 h- LC_{50} 和 96 h- LC_{50} 表示。

1.3.2 短期生长抑制试验方法

选择体长和年龄相似、孵化后 1 个月的幼鱼称重后在受试物亚致死浓度范围内暴露在流水试验条

件。根据受试物对稀有鮕鲫急性毒性试验结果,设置短期生长试验浓度。其中离子表面活性剂的实验浓度为 20、10、5.0 和 2.5 $mg \cdot L^{-1}$; 织物三防整理剂对稀有鮕鲫短期生长试验浓度为 1.5、0.75、0.375 和 0.1875 $mg \cdot L^{-1}$; C_4 和 C_6 三防整理剂对稀有鮕鲫短期生长试验浓度为 100.00、50.00、25.00、12.50 和 6.25 $mg \cdot L^{-1}$ 。每个实验设 1 个空白组,每个浓度设 3 个平行,暴露 28 d。具体实验方法根据 OECD 215 鱼类生长实验标准方法进行。

1.3.3 统计分析

急性毒性试验后,记录死亡数,用 SPSS 16.0 求出 EC_{50} 和 LC_{50} 。28 d 暴露实验结束后,测量试验鱼体重,计算各个暴露组平均体重,使用 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析,差异水平为 $P < 0.05$,求 NOEC 和 LOEC 值。

2 结果 (Results)

2.1 急性毒性实验结果

将 4 种 PFOS 替代品分别对紫背浮萍、四尾栅藻、蚤状蚤以及稀有鮕鲫进行急性毒性实验。实验结果如表 1 所示。其中阳离子表面活性剂对 4 种水生物均未显示出毒性。织物三防整理剂对紫背浮萍未显示出急性毒性,对其它 3 种受试生物均表现出低毒性:对四尾栅藻的 72 h- LC_{50} 值为 88.32 $mg \cdot L^{-1}$,95% 置信区间为 52.12 ~ 171.50 $mg \cdot L^{-1}$;对蚤状蚤

表 1 4 种 PFOS 替代品对紫背浮萍、四尾栅藻、蚤状蚤以及稀有鮕鲫的急性毒性实验结果
Table 1 Acute toxicity of four PFOS alternatives to *Soirodela polyrhiza*, *Scenedesmus quadricanda*, *Daphnia pulex* and *Gobiocypris rarus*

生物名称 Organism	化学品名称 Chemical name	离子表面活性剂 Surfactant	织物三防整理剂 Textile finishing agent	C_4 织物三防整理剂 C_4 finishing agent	C_6 织物三防整理剂 C_6 finishing agent
紫背浮萍	7 d- $EC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$	> 100	> 100	> 100	> 100
<i>Soirodela polyrhiza</i>	95% 置信区间/ $(mg \cdot L^{-1})$	—	—	—	—
四尾栅藻	72 h- $EC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$	> 100	88.32	> 100	> 100
<i>Scenedesmus quadricanda</i>	95% 置信区间/ $(mg \cdot L^{-1})$	—	52.12 ~ 171.50	—	—
蚤状蚤	48 h- $LC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$	> 100	17.97	64.61	85.58
<i>Daphnia pulex</i>	95% 置信区间/ $(mg \cdot L^{-1})$	—	13.67 ~ 20.85	62.35 ~ 67.42	83.36 ~ 87.94
稀有鮕鲫	96 h- $LC_{50}/(mg \cdot L^{-1})$	> 100	14.79	> 100	> 100
<i>Gobiocypris rarus</i>	95% 置信区间/ $(mg \cdot L^{-1})$	—	13.98 ~ 15.66	—	—

的 48 h-LC₅₀ 值为 17.97 mg·L⁻¹, 95% 置信区间为 13.67 ~ 20.85 mg·L⁻¹; 对稀有鮕鲫的 96 h-LC₅₀ 为 14.79 mg·L⁻¹, 95% 置信区间为 13.98 ~ 15.66 mg·L⁻¹。C₄ 和 C₆ 织物三防整理剂对紫背浮萍、四尾栅藻以及稀有鮕鲫均未检测到毒性, 但对蚤状溞显示出低毒效应, 48 h-LC₅₀ 值分别为 64.81 mg·L⁻¹ 和 85.58 mg·L⁻¹, 95% 置信区间分别为 62.35 ~ 67.45 mg·L⁻¹ 和 83.36 ~ 87.94 mg·L⁻¹。

2.2 稀有鮕鲫 28 d 短期生长实验结果

暴露 28 d 后, 称量所有暴露组鱼的体重, 如图 1 所示。从图中可以看出随着替代品的浓度升高, 鱼的体重相应降低。说明高浓度的替代品对稀有鮕鲫的生长有影响。此外, 根据最终体重求出 4 种受试物对稀有鮕鲫 28 d 生长的 LOEC 值和 NOEC 值, 比较 4 种替代品的毒性。其中阳离子表面活性剂对稀有鮕鲫短期生长的 LOEC 值为 20 mg·L⁻¹, NOEC 值

为 10 mg·L⁻¹。织物三防整理剂对稀有鮕鲫短期生长的 LOEC 值为 1.5 mg·L⁻¹, NOEC 值为 0.75 mg·L⁻¹; C₄ 三防整理剂对稀有鮕鲫 28 d 短期生长的 LOEC 值为 100.00 mg·L⁻¹, NOEC 值为 50.00 mg·L⁻¹; C₆ 三防整理剂对稀有鮕鲫 28 d 短期生长的 LOEC 值为 50.00 mg·L⁻¹, NOEC 值为 25.00 mg·L⁻¹。

3 讨论 (Discussion)

本研究全面评价了 4 种 PFOS 替代品对我国本土水生生物生态毒性。从急性毒性实验结果来看, 其中阳离子表面活性剂对 4 种水生物均未显示出毒性。织物三防整理剂对浮萍未显示出毒性, 对其它 3 种受试生物均表现出低毒毒性, C₄ 和 C₆ 2 种织物三防整理剂对浮萍、四尾栅藻以及稀有鮕鲫均未检测到毒性, 但对蚤状溞显示出低毒效应。在 28 d 短

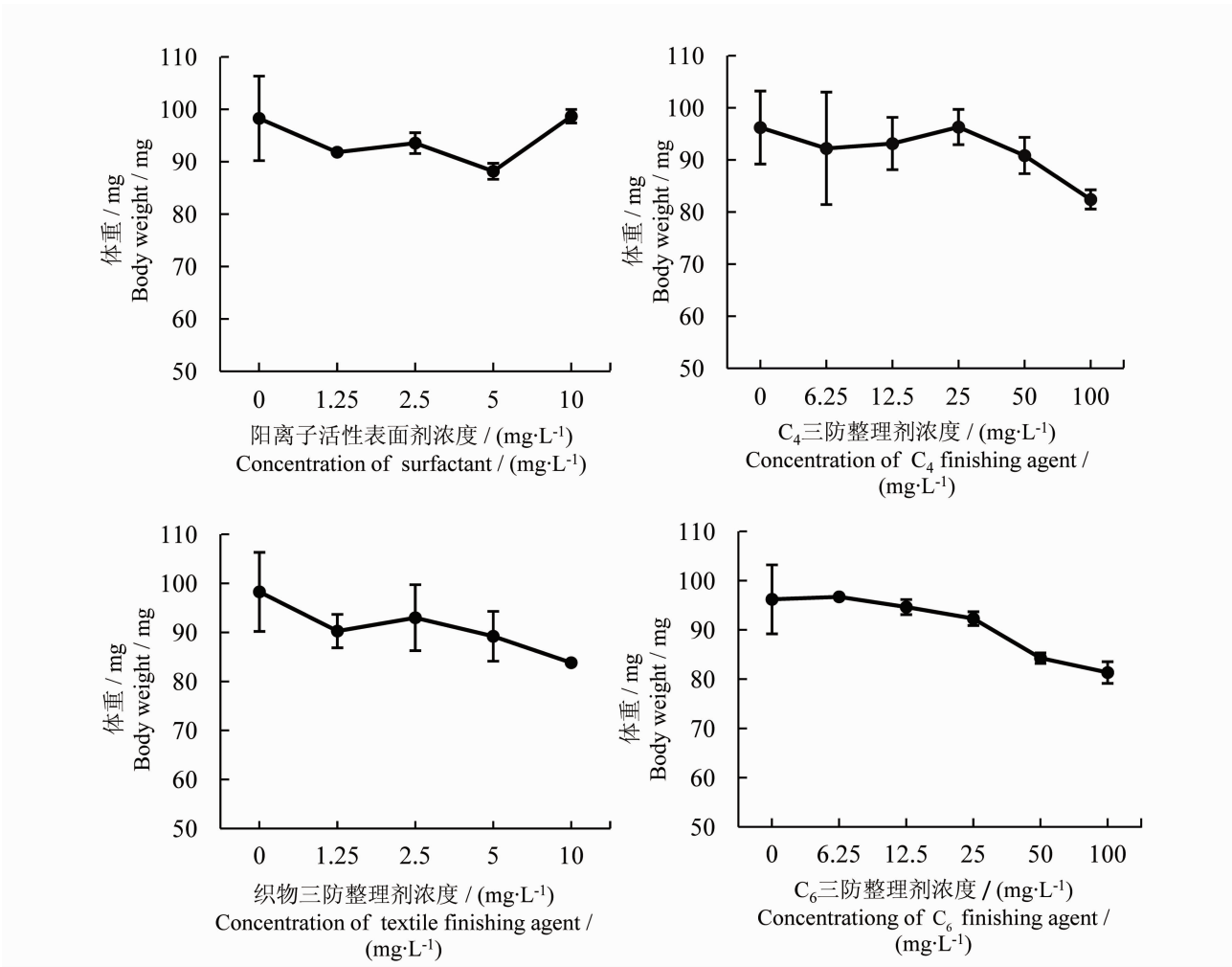


图 1 4 种 PFOS 替代品中暴露 28 d 对稀有鮕鲫生长的影响
Fig. 1 Growth of rare minnow following four PFOS alternatives exposure for 28 days

期生长暴露实验中,织物三防整理剂对稀有鮕鲫短期生长的 LOEC 值为 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NOEC 值为 $0.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,产生毒性效应的浓度远低于其他 3 种替代品,表明其毒性大于其他替代品。

虽然对 4 种本土水生物的毒性试验都显示出 4 种替代品的毒性很低,但生态毒性仍需与 PFOS 毒性进行比较。Boudreau 等^[14]对 PFOS 的研究结果表明 PFOS 对浮萍(*Lemna gibba*)的 7 d-EC₅₀ 值为 $59.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而本试验中 4 种替代品对紫背浮萍没有检测到毒性。Yang 等^[11]研究了 PFOS 对鲫鱼、麦穗鱼、大型蚤、四尾栅藻等水生生物的急性毒性,对应的 96 h-LC₅₀ 值分别为 81.18、67.74、78.09 和 $89.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。美国 EPA 中 PFOS 对虹鳟的 4 d-LC₅₀ 值为 $4.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,对大型蚤的 2 d-LC₅₀ 值为 $67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[13]。相对于这些数据,本试验中阳离子表面活性剂对 4 种水生物均未显示出毒性,似乎说明其毒性较低。但在对非洲爪蟾胚胎致畸实验和黑斑蛙蝌蚪胚胎发育实验中,阳离子表面活性剂的毒性作用高于 PFOS^[17],在白羽鹤鹑的急性饲喂毒性实验中阳离子表面活性剂显示出中等毒性^[18],与本实验的结果不一致。导致这种结果的原因可能是种间差异特别是水生生物与陆生生物之间差异。织物三防整理剂对稀有鮕鲫、蚤状蚤和四尾栅藻显示出急性毒性,LC₅₀ 值分别为 14.79、17.97 和 $88.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,小于文献中 PFOS 对相应物种的 LC₅₀ 值。在稀有鮕鲫 28 d 短期生长实验中得到了同样的结果,这些数据说明织物三防整理剂的毒性可能大于 PFOS。对土壤跳虫的生态毒性实验^[19]和蝌蚪的急性毒性实验也验证了这一结果^[20]。且在白羽鹤鹑的长期饲喂实验^[18]中织物三防整理剂表现出一定的生殖毒性,造成白羽鹤鹑的孵化率降低,胚胎死亡率及未受精率升高。这些结果说明织物三防整理剂具有一定的毒性,做为 PFOS 的替代品应慎重考虑。相对于前 2 种替代品,电解氟化法合成的 C₄ 和 C₆ 2 种三防整理剂对紫背浮萍、四尾栅藻以及稀有鮕鲫均未检测到毒性,仅对蚤状蚤显示出低毒效应。而且土壤跳虫的生态毒性实验^[19]和蝌蚪的急性毒性实验^[20]结果也显示 C₄、C₆ 织物三防整理剂毒性作用低于 PFOS,说明其具有更高的安全性。

综合急性毒性试验和稀有鮕鲫短期生长实验结果和已有资料,织物三防整理剂毒性较大,不适合于作为 PFOS 的替代品,而电解法合成的 C₄、C₆ 织物三防整理剂毒性较低,具有较高的生物安全性,更适于

作为的 PFOS 替代品。

通讯作者简介:查金苗(1975-),男,博士,研究员,主要研究兴趣包括水生模型生物体系的构建和发展、水环境生物毒性测试方法、环境内分泌干扰物的筛选技术研究、环境污染物对水生生物分子毒理机制和水生态系统完整性评估方法等,在国内外学术刊物上发表高水平论文 70 余篇,SCI 论文 40 余篇。

参考文献(References):

- [1] Lindstrom A B, Strynar M J, Libelo E L. Polyfluorinated compounds: Past, present, and future [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(19): 7954 – 7961
- [2] Paul A G, Jones K C, Sweetman A J. A first global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(2): 386 – 392
- [3] Pan Y Y, Shi Y L, Wang J M, et al. Pilot investigation of perfluorinated compounds in river water, sediment, soil and fish in Tianjin, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 87: 152 – 157
- [4] Nakayama S, Strynar M J, Helfant L, et al. Perfluorinated compounds in the cape fear drainage basin in North Carolina [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41: 5271 – 5276
- [5] Hagenaaars A, Knapena D, Meyer I J, et al. Toxicity evaluation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in the liver of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Aquatic Toxicology, 2008, 88(3): 155 – 163
- [6] Liu C H, Gin K, Chang W. Multi-biomarker responses in green mussels exposed to PFCs: Effects at molecular, cellular, and physiological levels [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21: 2785 – 2794
- [7] Shipley J M, Hurst C H, Tanaka S S, et al. Trans-activation of PPAR α and induction of PPAR α target genes by perfluorooctane-based chemicals [J]. Toxicological Sciences, 2004, 80(1): 151 – 160
- [8] Mariussen E. Neurotoxic effects of perfluoroalkylated compounds: Mechanisms of action and environmental relevance [J]. Archives of Toxicology, 2012, 86: 1349 – 1367
- [9] Huang H H, Huang C J, Wang L J, et al. Toxicity, uptake kinetics and behavior assessment in zebrafish embryos following exposure to perfluorooctane sulphonate (PFOS) [J]. Aquatic Toxicology, 2010, 98: 139 – 147
- [10] Wang M Y, Chen J F, Lin K F, et al. Chronic zebrafish

- PFOS exposure alters sex ratio and maternal related effects in F1 offspring [J]. *Environmental Technology and Chemistry*, 2011, 30(9): 2073 – 2080
- [11] Yang S W, Xu F F, Wu F C, et al. Development of PFOS and PFOA criteria for the protection of freshwater aquatic life in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 87: 677 – 683
- [12] Hagenaaers A, Vergauwen L, De C W, et al. Structure-activity relationship assessment of four perfluorinated chemicals using a prolonged zebrafish early life stage test [J]. *Chemosphere*, 2011, 82: 764 – 772
- [13] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Pesticide Ecotoxicity Database [S]. Washington DC: Environmental Fate and Effects Division, 2000
- [14] Boudreau T M, Sibley P K, Mabury S A, et al. Laboratory evaluation of the toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on *Selenastrum capricornutum*, *Chlorella vulgaris*, *Lemna gibba*, *Daphnia magna*, and *Daphnia pulex* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 44: 307 – 313
- [15] Desjardins D, Sutherland C A, Van H R, et al. PFOS: A 96-hr toxicity test with the freshwater alga (*Anabaena fols-aquae*) [R]. Wildlife International Ltd, 2001
- [16] Li M H. Toxicity of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid to plants and aquatic invertebrates [J]. *Environmental Toxicology*, 2009, 24: 95 – 101
- [17] 任东凯, 苏红巧, 刘芑岩, 等. 全氟辛烷磺酸盐(PFOS)及其替代品对两栖类胚胎的发育毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 561 – 564
- Ren D K, Su H Q, Liu P Y, et al. Developmental toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its substitutes to amphibian embryos [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 561 – 564 (in Chinese)
- [18] 王瀛寰, 王会利, 张艳峰, 等. 全氟辛烷磺酸盐(PFOS)替代品对中国白羽鹌鹑的毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 537 – 541
- Wang Y H, Wang H L, Zhang Y F, et al. Toxicity of alternatives of perfluorooctane sulfonate (PFOS) to Chinese recessive white feather quail [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 537 – 541 (in Chinese)
- [19] 张偲, 张轩, 徐玉新, 等. 典型全氟辛烷磺酸盐(PFOS)替代品对土壤跳虫的生态毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 501 – 507
- Zhang C, Zhang X, Xu Y X, et al. Ecotoxicity of alternatives of typical perfluorooctane sulfonate (PFOS) to springtails [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 501 – 507 (in Chinese)
- [20] 苏红巧, 任东凯, 曹闪, 等. 全氟辛烷磺酸盐(PFOS)及其替代品对两栖类蝌蚪的急性毒性[J]. *生态毒理学报*, 2012, 7(5): 521 – 524
- Su H Q, Ren D K, Cao S, et al. Acute toxicity of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and its substitutes to amphibian tadpoles [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(5): 521 – 524 (in Chinese) ◆