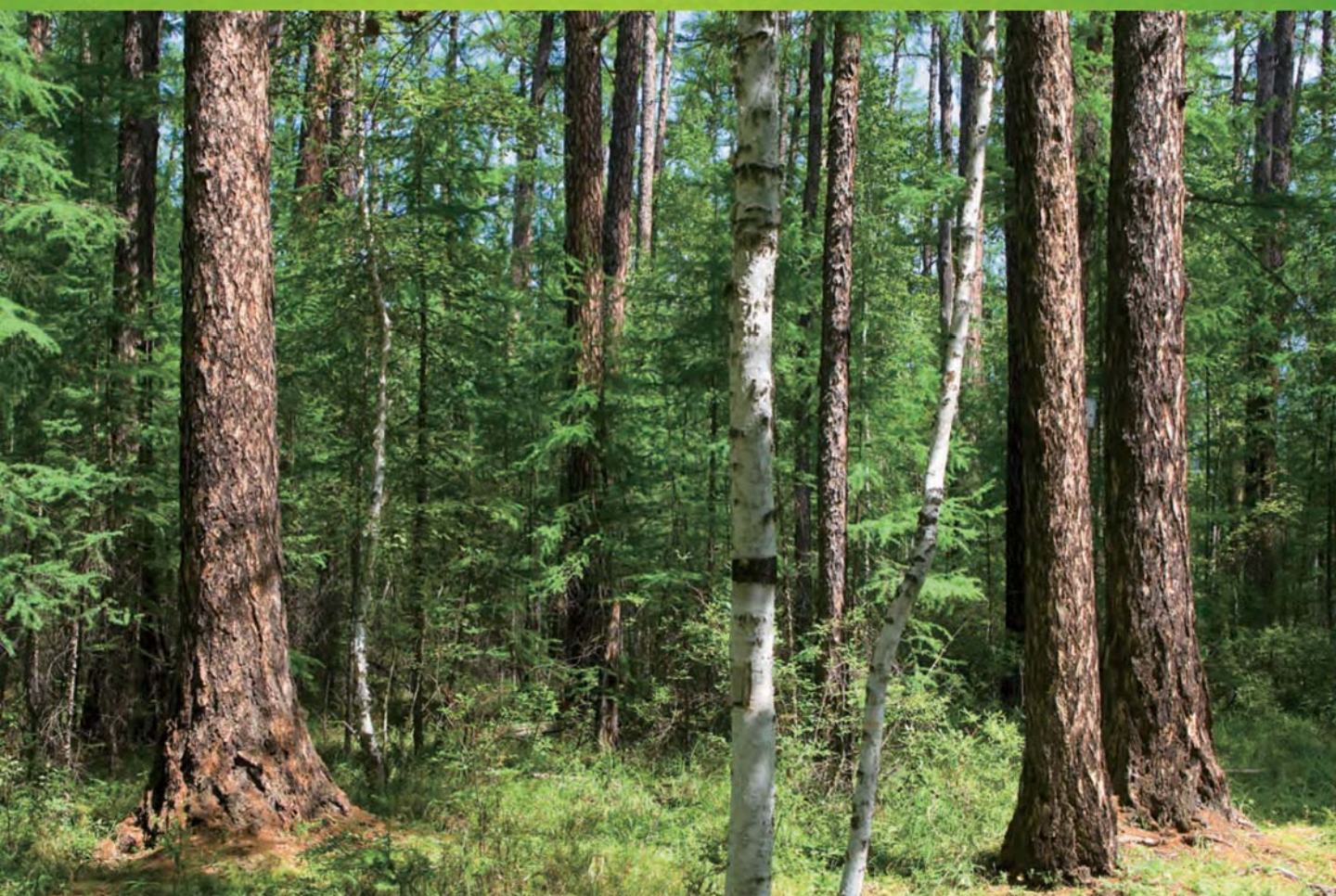


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第23期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201207291073

夏继刚,牛翠娟,孙麓垠.PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应.生态学报,2013,33(23):7408-7416.

Xia J G, Niu C J, Sun L Y. Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7408-7416.

PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应

夏继刚^{1,2}, 牛翠娟^{1,*}, 孙麓垠¹

(1. 生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875;

2. 重庆师范大学进化生理与行为学实验室, 重庆市动物生物学重点实验室, 重庆 401331)

摘要:全氟辛烷磺酸 (Perfluorooctane sulfonate, PFOS) 是一种广泛存在于水生生态系统的新型持久性有机污染物 (Persistent Organic Pollutants, POPs), 其对鱼类健康的影响以及水生生态系统安全的潜在威胁是当前人们高度关注的水环境问题。为探究 PFOS 对斑马鱼 (*Danio rerio*) 胚胎及仔鱼的生态毒理效应, 研究了不同浓度 (0, 0.1, 1, 10 mg/L) PFOS 暴露对斑马鱼胚胎孵化率、仔鱼畸形率与死亡率、仔鱼心率、仔鱼运动行为以及生长的影响。结果表明: PFOS 暴露对斑马鱼胚胎孵化率、孵出仔鱼死亡率与畸形率的影响显著 ($P < 0.05$), 10 mg/L PFOS 暴露导致胚胎孵化率下降, 孵化延迟, 仔鱼死亡率与畸形率升高; PFOS 暴露 4 dpf (day post-fertilization, dpf) 或 8 dpf 对斑马鱼仔鱼心率影响显著 ($P < 0.05$), 心率随 PFOS 暴露浓度升高而增加; PFOS 暴露 6 dpf 或 9 dpf 对斑马鱼仔鱼的运动行为影响显著 ($P < 0.05$), 10 mg/L PFOS 暴露 6 dpf 导致运动斑马鱼仔鱼比例和仔鱼最大持续运动距离增加 ($P < 0.05$), PFOS 暴露 9 dpf, 单位时间内仔鱼的运动距离、停顿频率、平均每次运动距离随 PFOS 暴露浓度升高而减少 ($P < 0.05$), 最大持续运动距离随 PFOS 暴露浓度升高而增加 ($P < 0.05$), 呈剂量依赖的毒理学效应; PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼体长和吻宽下降 ($P < 0.05$) 或有下降的趋势, 并对吻宽/体长、吻宽/头长影响显著 ($P < 0.05$)。以上研究结果提示: PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼具有显著的发育与行为毒性, 仔鱼心率、运动行为、吻宽/体长以及吻宽/头长等是评估水体 PFOS 污染敏感而有效的生物标志物。

关键词: PFOS; 斑马鱼; 仔鱼; 运动表现; 生长

Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio*

XIA Jigang^{1,2}, NIU Cuijuan^{1,*}, SUN Luyin¹

1 Ministry of Education Key Laboratory of Biodiversity Science and Ecological Engineering, College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract: Perfluorinated compounds (PFCs) are a family of fluorine-containing chemicals with unique properties to make materials stain, oil, and water resistant, and are widely used in diverse applications. As one of the most used anthropogenic PFCs, perfluorooctane sulfonate (PFOS) has been received much attention in recent years. It is a new kind of persistent organic pollutants (POPs), which have been found to be accumulated and biomagnified ubiquitously through food chain all over the world. PFOS poses serious risks to the health of many aquatic organisms and the safety of aquatic ecosystem. The potential toxicity of PFOS is of increasingly ecological concern. In the present study, the ecotoxicological effects of PFOS exposure on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio* were examined to evaluate the possible hazard of this pollutant to

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目 (40632009); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2011jjA20006); 重庆市教委科学技术研究资助项目 (KJ110606)

收稿日期: 2012-07-29; **修订日期:** 2012-12-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cjniu@bnu.edu.cn

development and behavior of fish and to pursue a potential biomarker of PFOS contamination. Embryos of zebrafish were exposed to 0, 0.1, 1 and 10 mg/L PFOS in 4 hour-post-fertilization (hpf). Mortality, deformation rate, heart rate, locomotor performance and growth of zebrafish larvae, and hatching rate of zebrafish embryos were investigated. Proportion of motile individual, motion distance, pause frequency, average distance of each movement and maximum distance of continuous locomotion were used to quantify the locomotor performance of zebrafish larvae. PFOS exposure showed remarkable effects on hatching rate, mortality and deformation rate of zebrafish ($P < 0.05$). Hatching delayed and cumulative hatching rate decreased significantly after the embryos were exposed to 10 mg/L PFOS ($P < 0.05$). The cumulative mortality and deformation rate of zebrafish larvae at 6 day-post-fertilization (dpf) upon exposure to 10 mg/L PFOS increased significantly ($P < 0.05$). Heart rate of zebrafish larvae at 4 dpf and 8 dpf was significantly affected by PFOS exposure ($P < 0.05$) and increased with enhanced PFOS concentration. PFOS exposure imposed marked influence on locomotor performance of zebrafish larvae at 6 dpf and 9 dpf ($P < 0.05$). Maximum distance of continuous locomotion and proportion of motile zebrafish larvae at 6 dpf increased significantly after exposed to 10 mg/L PFOS ($P < 0.05$). PFOS affected the locomotor performance of zebrafish larvae at 9 dpf in a dose-dependent way. Motion distance, pause frequency, and average distance of each movement decreased with the increase of PFOS concentration, whereas maximum distance of continuous locomotion increased with enhanced concentration of PFOS. Additionally, significant decrease or a decreasing trend in growth (body length) and mouth width at 6 dpf and 9 dpf was observed in PFOS exposure groups. Mouth width: body length ratio and mouth width: head length ratio of zebrafish larvae were dramatically affected by PFOS exposure ($P < 0.05$). The overall results indicated that PFOS imposed clearly developmental and behavioral toxicity on zebrafish embryos and larva. The heart rate, locomotor performance, mouth width: body length ratio and mouth width: head length ratio of zebrafish larvae might be used as an integrative biomarker or indicator of aquatic environmental PFOS contamination.

Key Words: PFOS; zebrafish; larva; locomotor performance; growth

全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS)是全氟类有机化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)的代表物质之一。由于具有疏水、疏油、耐高温等特性,PFOS 被广泛应用于纺织、皮革、地毯、防护涂料、表面活性剂、泡沫灭火剂、印染、金属电镀、食品包装等行业以及化妆品、农药和医药品等产品的生产中^[1]。PFOS 化学性质稳定,不易挥发,在环境中难降解,易在生物体内蓄积且具毒性,为著名的持久性生物累积毒性(PBT, Persistent-Bioaccumulative-Toxic)类污染物质^[2-4]。2009 年 5 月,PFOS 作为一种新型持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs)被正式增列入《斯德哥尔摩公约》。如今,PFOS 等 POPs 污染物已在全世界范围内的各类环境介质、生物体和人体内陆续被检出,对 POPs 生态毒理学效应的研究成为当前生态学与环境科学的前沿和热点问题之一^[5-9]。

水生生态系统普遍存在着不同程度的 PFOS 污染,某些地区地表水 PFOS 浓度高达 67 $\mu\text{g/L}$,总的 PFCs 甚至高达 17 mg/L ^[10],我国长江、嘉陵江以及三峡库区江水均存在着不同程度的全氟化合物污染^[11],在长江野生鱼体内还普遍检测出了 PFOS,长江武汉段鲤鱼(*Cyprinus carpio*)肝脏 PFOS 含量高达 41.6 $\mu\text{g/kg}$ ^[12]。PFOS 不但在自然水体中广泛存在,在自来水中也能检测到,广州、深圳自来水中的 PFOS 含量已分别达到 10.3 ng/L 和 14.8 ng/L ^[13]。PFOS 具有环境内分泌干扰作用^[14-15],可以导致斑马鱼(*Danio rerio*)肝脏卵黄蛋白原(vitellogenin, VTG)表达量显著升高^[16];PFOS 暴露还可以损伤细胞膜,导致胚胎分裂中的细胞发生自溶^[17];致使细胞线粒体能量代谢障碍、抑制细胞间隙连接通讯^[18];引发免疫与神经毒性^[19-20]等。PFOS 对仔鱼生态毒理效应的研究相对较少。

斑马鱼是一种小型热带淡水鱼,在生态毒理学研究与风险评价中,如今已被作为模式生物广泛用于各类生物学研究和各种化学品的毒性测试,是水体污染检测与评估的理想指示生物^[21]。本文研究了 PFOS 暴露对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应,为评估 PFOS 的发育与行为毒性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物

性成熟斑马鱼购于北京中蔬大森林花鸟鱼市场,于实验室条件下驯养适应 1 个月,饲养方法参照 Westerfield^[22]。饲养及实验条件如下:实验用水为充分曝气脱氯并经过活性炭过滤的自来水,水温(24 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,pH 值(7.6 ± 0.6),溶解氧 >4 mg/L,总硬度 220—250 mg/L,光暗周期 14 L:10 D,饲养密度 $\rho < 1$ g/L。每日投喂 2 次冰冻红虫(北京绿环观赏鱼用品公司),投喂 15 min 后,吸去残饵。在实验前一晚,将雄鱼(0.41 ± 0.003)g、雌鱼(0.49 ± 0.004)g 按雌雄比 1:1 配对,过夜;次日光照开启 2h 后移出亲鱼,收集受精卵,清洗除去残余物,并暴露于不同浓度的 PFOS 溶液。

1.2 试剂

全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS $\geq 98\%$)购自(Sigma-Aldrich, Germany)。实验共设 4 个 PFOS 浓度梯度:对照(0),0.1 mg/L,1 mg/L,10 mg/L。将 PFOS 以二甲基亚砜(Dimethyl sulfoxide, DMSO)为助溶剂,配置成 0.5 g/mL 的 PFOS 母液,4 $^{\circ}\text{C}$ 避光保存,待用。

1.3 暴露试验

挑选发育正常、大小相近的受精卵开展实验,将受精卵于受精后 4h 内(囊胚期)暴露于不同浓度的 PFOS 污染液中。胚胎暴露在 24 孔细胞培养板中进行,每孔放入 3 枚受精卵,并加入 3 mL 相应浓度的 PFOS 暴露液,每 12h 更换新配制的相同浓度的 PFOS 暴露液 1 次,对照组 DMSO 体积浓度为 0.002%,染毒期间水温保持在(24 ± 1) $^{\circ}\text{C}$,光暗周期 14 L:10 D。

以每孔处理为 1 个样本($n = 48$),分别于受精后的第 72 小时(72 hpf, hour post-fertilization)、84 小时(84 hpf)、96 小时(96 hpf)、108 小时(108 hpf)、120 小时(120 hpf)、144 小时(144 hpf)统计孵化率、孵出仔鱼畸形率(包括脊柱弯曲、心包囊肿、尾部畸形)及死亡率等;于受精后的第 4 天(4 dpf, day post-fertilization)、第 8 天(8 dpf)将斑马鱼仔鱼于 0.02% MS-222(tricaine methanesulfonate)中麻醉,解剖镜下观察记录斑马鱼仔鱼心率;于受精后的第 6 天(6 dpf, day-post-fertilization)、第 9 天(9 dpf)采用蔡氏显微成像系统(Carl Zeiss AxioVision)对斑马鱼仔鱼进行拍照,并用图像处理软件 AxioVision Rel. 4.6.3 测量仔鱼体长、头长、头宽、吻宽等形态学参数。

斑马鱼仔鱼行为测试在培养皿中完成,培养皿直径为 9 cm,内盛有水或相应浓度的 PFOS 暴露液 30 mL,暴露液浓度与暴露期间浓度一致,水温(24 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 。在培养皿下铺有一层含有若干等大正方形小方格的纸(图 1),每个方格边长约 4.74 mm。试验时,将斑马鱼仔鱼轻轻用吸管吸出,置入培养皿中,并适应 5 min,之后用摄像机(SONY DCR-SR200E, JAPAN)拍摄记录斑马鱼仔鱼的运动行为,连续拍摄 5 min,录像资料随后在电脑上进行分析,采集各行为指标的发生频次。本研究以 5 min 内运动仔鱼比例、仔鱼的运动距离(游过的方格数)、停顿频率、最大持续运动距离、平均每次运动距离等指标评价其运动表现。分别于暴露第 6 天、第 9 天开展行为学实验,每尾斑马鱼仔鱼仅用于一次实验操作。为减少人为误差,录像资料由专人负责记录分析。

1.4 数据处理

应用软件 SPSS for Windows 16.0(SPSS Inc., USA)对数据进行统计分析。首先对实验数据进行正态性和方差齐性检验,采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差数法(LSD)检验差异显著性;若数据不符合正态

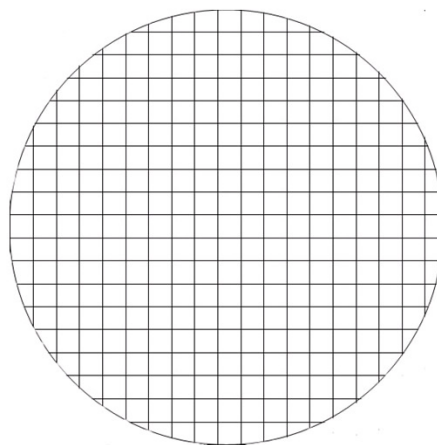


图 1 行为测试装置示意图

Fig.1 Diagram of the grid pattern laid on the underside of a standard petri dish used as the behavioral testing arena

分布或方差不齐,则采用 Kruskal-Wallis 检验差异显著性。 χ^2 -检验对“运动斑马鱼仔鱼比例”进行统计分析。各组数据均用平均值 $\pm$ 标准误表示,显著性水平设为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 胚胎孵化率

PFOS 暴露对斑马鱼 108 hpf 的胚胎孵化率影响显著($\chi^2 = 20.1$; $P = 0.017$), 10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼 108 hpf 胚胎孵化率显著下降($P = 0.002$) (图 2); PFOS 暴露对斑马鱼胚胎 120 hpf 的孵化率影响显著($\chi^2 = 20.8$; $P = 0.013$), 10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼 120 hpf 胚胎孵化率显著下降($P = 0.04$) (图 2)。120 hpf 之后,各处理组均不再有新的斑马鱼仔鱼成功孵出。10 mg/L PFOS 暴露组 120 hpf 的孵化率较 108 hpf 的孵化率显著升高($P = 0.03$),其余各组 120 hpf 的孵化率与其 108 hpf 的孵化率相比无显著性差异($P > 0.05$),表明 10 mg/L PFOS 暴露致使斑马鱼胚胎孵化延迟。

2.2 仔鱼畸形率、死亡率

PFOS 暴露 6 dpf 对斑马鱼孵出仔鱼死亡率与畸形率的影响见图 3。PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼死亡率影响显著($\chi^2 = 93.6$, $P < 0.001$), 10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼死亡率显著升高($P < 0.001$),其余各组与对照组相比无显著性差异($P > 0.05$)。PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼畸形率影响显著($\chi^2 = 97.6$, $P < 0.001$), 10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼畸形率显著升高($P < 0.001$),其余各组与对照组相比无显著性差异($P > 0.05$)。

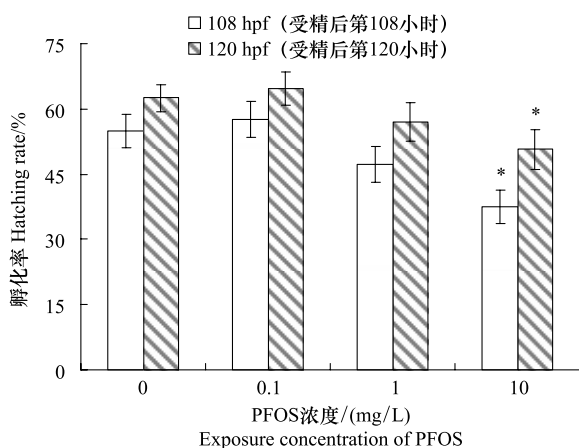


图 2 PFOS 暴露对斑马鱼胚胎孵化率的影响

Fig.2 Hatching rate of zebrafish embryos at 108 hpf and 120 hpf upon exposure to different concentrations of PFOS

*: 与对照组相比有显著性差异 ($P < 0.05$); 数值以平均值 $\pm$ 标准误表示 ($n = 48$); hpf: 受精后的小时数

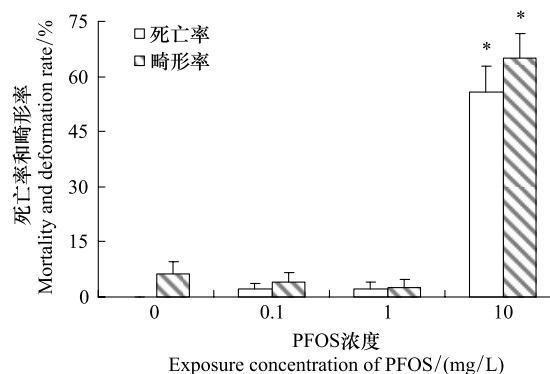


图 3 PFOS 暴露 6 dpf 对斑马鱼死亡率与畸形率的影响

Fig.3 Mortality and deformation rate of zebrafish larvae at 6 dpf upon exposure to different concentrations of PFOS

*: 与对照组相比有显著性差异 ($P < 0.05$). 数值以平均值 $\pm$ 标准误表示 ($n = 48$)

2.3 仔鱼心率

PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼心率的影响见图 4。PFOS 暴露 4 dpf 对斑马鱼仔鱼心率影响显著 ($F = 27.1$, $P < 0.001$), 暴露导致斑马鱼仔鱼心率增加。PFOS 暴露 8 dpf 对斑马鱼仔鱼心率影响显著 ($\chi^2 = 22.8$, $P < 0.001$), PFOS 暴露 8 dpf 后, 10 mg/L PFOS 暴露组斑马鱼仔鱼死亡率接近 100%, 一定浓度范围内, 斑马鱼仔鱼心率随 PFOS 暴露的升高而增加。

2.4 仔鱼运动行为

2.4.1 PFOS 暴露 6 dpf 对斑马鱼仔鱼运动表现的影响

PFOS 暴露对运动斑马鱼仔鱼比例影响显著($\chi^2 = 9.05$; $P = 0.029$), 10 mg/L PFOS 暴露导致运动仔鱼比例显著增加($P = 0.026$) (图 5)。PFOS 暴露 6 dpf 对斑马鱼仔鱼的最大持续运动距离影响显著 ($F = 3.40$; $P = 0.025$), 10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼单位时间内的最大持续运动距离显著增加($P = 0.028$) (图 5B)。

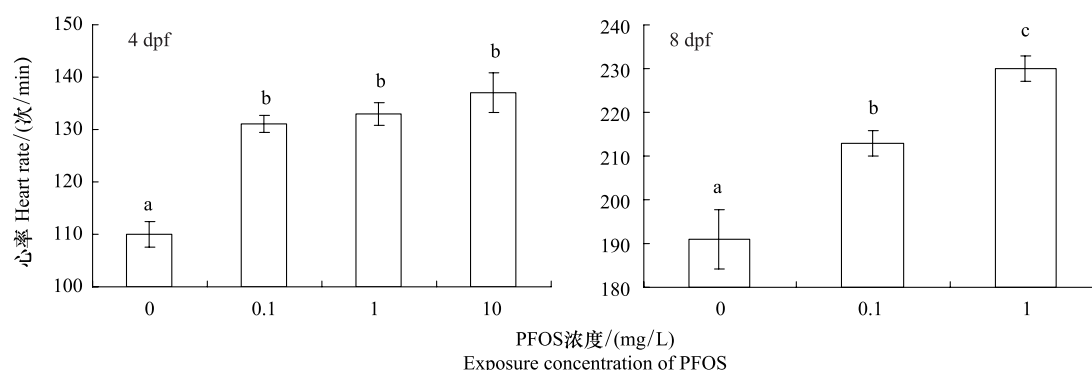


图4 PFOS 暴露 4 dpf 和 8 dpf 对斑马鱼仔鱼心率的影响

Fig.4 Heart rate of zebrafish larvae at 4 dpf and 8 dpf upon exposure to different concentrations of PFOS

上标字母不同表示组间有显著性差异 ($P < 0.05$) ; 数值以平均值 $\pm$ 标准误表示; 4dpf 图: 0 和 0.1 mg/L PFOS 暴露组 $n = 20$, 1 mg/L 和 10 mg/L PFOS 暴露组 $n = 10$; 10dpf 图: $n = 20$; dpf: 受精后天数

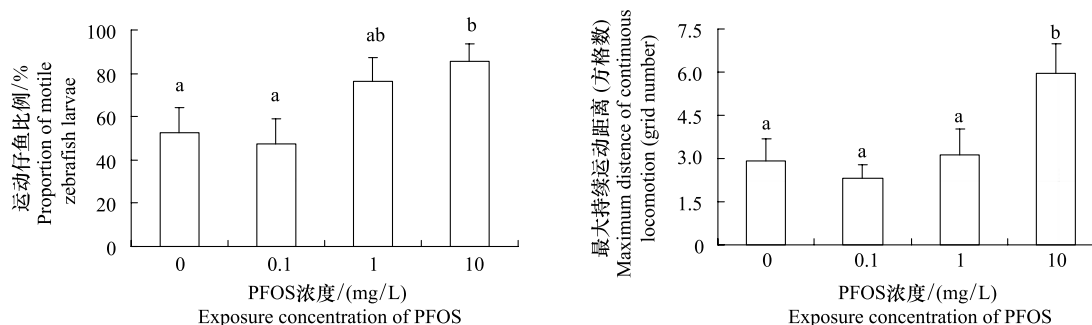


图5 PFOS 暴露 6dpf 对运动斑马鱼仔鱼比例和最大持续运动距离的影响

Fig.5 Proportion of motile individual and Maximum distance of continuous locomotion in zebrafish larvae at 6 dpf upon exposure to different concentrations of PFOS

上标字母不同表示组间有显著性差异 ($P < 0.05$) ; 数值以平均值 $\pm$ 标准误表示; 0、0.1 mg/L、1 mg/L、10 mg/L PFOS 暴露组测试样本量依次为 $n = 19$ 、 $n = 21$ 、 $n = 17$ 、 $n = 21$

2.4.2 PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼运动表现的影响

PFOS 暴露 9 dpf 后, 10 mg/L PFOS 处理组斑马鱼仔鱼死亡率达到 100%。PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼运动行为的影响见图 6。PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼运动距离的影响显著 ($F = 33.3, P < 0.001$), 斑马鱼仔鱼运动距离随 PFOS 暴露浓度升高而减少 ($F = 31.7, P < 0.001$)。PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼停顿频率的影响显著 ($F = 33.3, P < 0.001$), 停顿频率随 PFOS 暴露浓度升高而下降。PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼平均每次运动距离的影响显著 ($\chi^2 = 8.55, P = 0.014$), 1 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼平均每次运动距离显著减少 ($P = 0.001$)。PFOS 暴露 9 dpf 对斑马鱼仔鱼最大持续运动距离的影响显著 ($\chi^2 = 6.78, P = 0.034$), 最大持续运动距离随 PFOS 暴露浓度升高而增加 (图 6)。

2.5 仔鱼生长

PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼生长的影响见表 1。PFOS 暴露 6 dpf 对斑马鱼仔鱼体长 ($F = 18.8, P < 0.001$)、头长 ($F = 9.02, P < 0.001$)、吻宽/体长 ($F = 4.61, P = 0.006$)、吻宽/头长 ($F = 7.79, P < 0.001$) 等影响显著, 对头宽、吻宽等无显著影响 ($P > 0.05$) (表 1)。PFOS 暴露 9 dpf 后, 10 mg/L PFOS 浓度处理组斑马鱼仔鱼死亡率达到 100%。PFOS 暴露 9 dpf 有导致斑马鱼仔鱼体长、头长下降的趋势, 然而未达到显著水平 ($P > 0.05$); PFOS 暴露 9 dpf 对头宽 ($\chi^2 = 9.81, P = 0.007$)、吻宽 ($F = 13.5, P < 0.001$)、吻宽/体长 ($F = 10.6, P < 0.001$)、吻宽/头长 ($F = 4.86, P = 0.012$) 等均影响显著 (表 1)。其中, 斑马鱼仔鱼吻宽/体长、吻宽/头长随 PFOS 暴

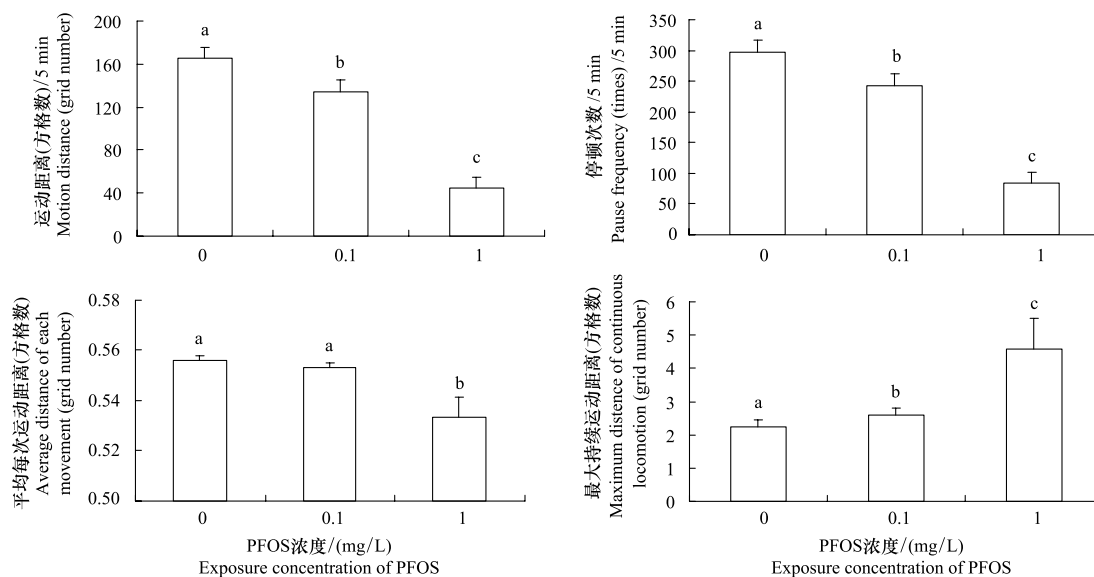


图 6 PFOS 暴露 9dpf 对斑马鱼仔鱼运动行为的影响

Fig.6 Locomotor behavior of zebrafish larvae at 9 dpf upon exposure to different concentrations of PFOS

运动行为参数:运动距离/5 min,停顿次数/5 min,平均每次运动距离,最大持续运动距离;上标字母不同代表组间有显著性差异 ($P < 0.05$);数值以平均值±标准误表示;0、0.1、1 mg/L PFOS 暴露组测试样本量依次为 $n = 16$ 、 $n = 20$ 、 $n = 14$

露浓度的升高,呈现出先下降后升高的趋势;例如,PFOS 暴露 6 dpf,0.1 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼吻宽/体长显著下降 ($P = 0.027$),1 mg/L 和 10 mg/L PFOS 暴露组与对照组相比无显著性差异 ($P > 0.05$);PFOS 暴露 9 dpf,0.1 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼吻宽/体长显著下降 ($P < 0.001$),而 1 mg/L PFOS 暴露组与对照组相比无显著性差异 ($P > 0.05$) (表 1)。

表 1 PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼生长的影响

Table 1 Growth of zebrafish larvae at 6 dpf and 9 dpf upon exposure to different concentrations of PFOS

		PFOS 浓度			
		0	0.1 mg/L	1 mg/L	10 mg/L
6 dpf	样本量 n	15	20	17	9
	体长/mm	3.634±0.026 ab	3.737±0.041 a	3.601±0.033 b	3.261±0.071 c
	头长/μm	602.47±8.35 ab	677.67±13.46 c	599.39±10.78 a	609.60±18.45 b
	头宽/μm	473.50±10.24	452.38±7.69	462.79±9.55	442.66±20.21
	吻宽/μm	133.13±3.56	127.62±2.00	131.79±2.37	125.35±1.80
	吻宽/体长/%	3.67±0.10 ab	3.42±0.06 c	3.66±0.07 a	3.86±0.11 b
	吻宽/头长/%	21.46±0.50 a	18.98±0.49 b	22.08±0.52 a	20.69±0.58 a
9 dpf	样本量 n	22	24	9	—
	体长/mm	4.046±0.017	4.0182±0.032	3.949±0.039	—
	头长/μm	750.47±13.22	739.31±10.89	707.01±28.36	—
	头宽/μm	519.85±7.60 a	480.32±8.13 b	528.30±35.37 a	—
	吻宽/μm	188.89±4.23 a	161.75±3.56 b	169.97±4.34 b	—
	吻宽/体长/%	4.67±0.10 a	4.03±0.10 b	4.31±0.13 ab	—
	吻宽/头长/%	25.38±0.80 a	22.08±0.73 b	24.35±1.16 ab	—

无相同上标字母代表组间有显著性差异 ($P < 0.05$);数值以平均值±标准误表示

3 讨论

PFOS 广泛存在于水生生态系统,其污染如今已经成为全球性的环境问题^[1, 9, 23]。有研究表明,PFOS 对

浮游动物群落和大型水生植物浮萍 (*Lemna gibba*) 的无可见效应浓度 (No-observed-effect concentration, NOEC) 分别为 3 mg/L 和 0.2 mg/L^[24]。Van Gossum 等^[25]的研究表明,PFOS 暴露 1 个月和 4 个月对豆娘 (*Enallagma cyathigerum*) 幼虫活动水平的 NOEC 分别为 0.1 mg/L 与 0.01 mg/L。本研究中,PFOS 暴露对斑马鱼仔鱼心率、运动表现、吻宽/体长、吻宽/头长等的最低可见效应浓度 (Lowest-obvious-effective concentration, LOEC) 为 0.1 mg/L,表明斑马鱼仔鱼心率、运动行为、吻宽/体长、吻宽/头长等对 PFOS 较为敏感,是评估水体 PFOS 污染敏感而有效的生物标志物。0.1 mg/L 已接近某些地区水体 PFOS 的污染水平^[10],加之 PFOS 的难降解性及其在生物体的易蓄积性^[3, 8],PFOS 对野生动物和人类健康的潜在威胁不容忽视。

PFOS 具有发育毒性。PFOS 暴露可以损伤细胞膜,增加细胞膜的流动性与通透性^[26]。叶露等发现高浓度 (>240 mg/L) PFOS 暴露导致斑马鱼胚胎分裂中的细胞发生自溶而卵凝结死亡,抑制胚胎原肠胚的形成^[17]。Bots 等的研究表明,PFOS 暴露导致豆娘孵化率降低、幼虫发育迟缓、死亡率升高,并降低变态成功率;幼虫对 PFOS 的敏感性较卵高出 1000 倍,其 NOEC 分别为 0.01 mg/L 与 10 mg/L^[27]。Shi 等的研究表明,PFOS 暴露可以导致斑马鱼胚胎细胞凋亡和发育畸形增多,p53 和 *Bax* 等细胞凋亡相关的基因表达量显著升高^[28]。本研究中,PFOS 暴露对斑马鱼胚胎孵化率影响显著,10 mg/L PFOS 暴露导致斑马鱼胚胎孵化延迟,孵化率下降、为对照组的 81%,PFOS 暴露 6 dpf 还导致斑马鱼仔鱼累积畸形率和死亡率升高,研究结果与 Bots 等^[27]和 Shi 等^[28]相一致。此外,4 dpf 和 8 dpf 斑马鱼仔鱼心率随 PFOS 暴露浓度的升高而增加,呈剂量依赖的毒理学效应。心率的增加可能与 PFOS 暴露引发的应激反应有关,也可能是 PFOS 暴露导致的斑马鱼仔鱼发育障碍、心脏畸形、心率不齐所致^[28],PFOS 暴露还有可能通过改变细胞膜表面势能影响细胞膜上的 Ca^{2+} 通道,从而对心肌细胞产生毒性^[29]。

PFOS 具有行为毒性。行为是动物响应外界环境变化的整体终端反应,是环境污染物对动物在分子、生化、生理水平上产生效应的综合体现,故而可为 POPs 的毒理学效应提供重要的生态指示^[30-32]。运动表现与动物的健康和适合度密切相关,是评估 POPs 污染重要的生物标志物^[31,33]。多环芳烃菲 (phenanthrene) 暴露显著影响乌颊鱼 (*Sparus aurata*) 的活动水平,0.05 mg/L 和 0.1 mg/L 菲暴露可以分别导致乌颊鱼不运动个体的比例达到 23.2% 与 38.6%,Correia 等认为乌颊鱼主要采取运动对策还是解毒对策存在一个能量分配上的权衡 (trade-off),其活动水平的降低是因为需要花费更多的能量用于对毒物的降解^[34]。Van Gossum 等研究表明,PFOS 暴露显著抑制豆娘幼虫的活动水平,并导致其有效取食能力以及逃避被捕食风险的能力降低^[25]。此外,杀虫剂乐果 (dimethoate) 暴露可以导致步行虫 (*Pterostichus cupreus*) 运动时间、平均运动速度、运动路径长度等表观活动水平的指标降低,同时导致其停顿频率以及转向次数等增加^[35]。本研究中,PFOS 暴露显著影响斑马鱼仔鱼的运动表现,导致 6 dpf 和 9 dpf 仔鱼的最大运动持续距离增加,特别是 10 mg/L PFOS 暴露组斑马鱼仔鱼出现明显的行为异常,运动的个体首先是长时间的停顿,然后表现出突发性的、神经质的、迅速的转圈游动等异常的运动行为,这可能是由于 PFOS 暴露干扰了仔鱼中枢神经系统发育、破坏了胆碱能系统功能所致^[36];PFOS 暴露 9 dpf 导致斑马鱼仔鱼的总体活动水平降低,表现为单位时间内的运动距离、停顿频率、平均每次运动距离等均随 PFOS 暴露浓度的升高而减少,呈剂量依赖的毒理学效应,研究结果与 Van Gossum 等^[25]和 Correia 等^[34]相一致。目前,PFOS 影响鱼类运动行为的确切机制尚不明确。近期的研究表明,PFOS 影响新生小鼠脑神经元生长和突触发生相关的重要蛋白的表达,导致海马 CaMKII、GAP-43 以及突触素水平增加^[19],并且影响大鼠海马钙依赖的信号分子的基因表达 (例如 NR2B、CaM、CaMKII α 以及 CREB 等),从而可能导致动物运动缺陷^[37-38]。

PFOS 暴露抑制仔鱼生长。PFOS 暴露可能通过“下丘脑-垂体-甲状腺轴 (hypothalamus-pituitary-thyroid axis)”干扰甲状腺机能,并最终影响到肝脏胰岛素样生长因子 IGF-I 的合成,进而影响动物生长^[39-40]。PFOS 暴露对早期甲状腺发育相关的基因影响显著,能够导致 *hhex* 表达量升高,而对 *pax8* 的影响呈现“倒 U 型”非单调剂量-效应^[28,41]。本研究中,PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼体长下降或有下降的趋势,研究结果与 Du 等^[16]和 Shi 等^[28]相一致。PFOS 暴露还导致斑马鱼仔鱼吻宽显著减小或有减小的趋势,对仔鱼吻宽/体长、吻宽/

头长的影响显著。6—9 dpf 是斑马鱼仔鱼从内源营养到混合营养的食性转化阶段,是仔鱼死亡敏感期,吻宽和吻宽/体长的大小可以间接反映出斑马鱼仔鱼的摄食能力,PFOS 暴露导致吻宽和吻宽/体长减小,将可能导致斑马鱼仔鱼摄食能力与存活率降低。

综上所述,PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼具有显著的发育与行为毒性。PFOS 暴露导致斑马鱼胚胎孵化率下降、孵化延迟、心率增加、仔鱼死亡率与畸形率升高、并抑制仔鱼生长;仔鱼的运动表现受 PFOS 影响显著,暴露引起仔鱼的异常行为增多、活动水平下降;此外,PFOS 暴露导致斑马鱼仔鱼吻宽和吻宽/体长减小,将潜在的影响其摄食能力进而影响生存适合度。

References:

- [1] Zhang S, Lerner D N. Review of physical and chemical properties of *Perfluorooctanyl sulfonate* (PFOS) with respect to its potential contamination on the environment. *Advanced Materials Research*, 2012, 518-523; 2183-2191.
- [2] Beach S A, Newsted J L, Coady K, Giesy J P. Ecotoxicological evaluation of perfluorooctane sulfonate (PFOS). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 186: 133-174.
- [3] Gobas F A, de Wolf W, Burkhard L P, Verbruggen E, Plotzke K. Revisiting bioaccumulation criteria for POPs and PBT assessments. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2009, 5(4): 624-637.
- [4] van Asselt E D, Rietra R, Römkens P, van der Fels-Klerx H J. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) throughout the food production chain. *Food Chemistry*, 2011, 128(1): 1-6.
- [5] Mhadhbi L, Rial D, Pérez S, Beiras R. Ecological risk assessment of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) in marine environment using *Isochrysis galbana*, *Paracentrotus lividus*, *Siriella armata* and *Psetta maxima*. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, 14(5): 1375-1382.
- [6] Steenland K, Tinker S, Shankar A, Ducatman A. Association of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) with uric acid among adults with elevated community exposure to PFOA. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(2): 229-233.
- [7] Lin A Y C, Panchangam S C, Ciou P S. High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems. *Chemosphere*, 2010, 80(10): 1167-1174.
- [8] Yang L P, Tian S Y, Zhu L Y, Zhang Y H. Bioaccumulation and distribution of perfluoroalkyl acids in seafood products from Bohai Bay, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(9): 1972-1979.
- [9] Armitage J M, Schenker U, Scheringer M, Martin J W, Macleod M, Cousins I T. Modeling the global fate and transport of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and precursor compounds in relation to temporal trends in wildlife exposure. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(24): 9274-9280.
- [10] Moody C A, Martin J W, Kwan W C, Muir D C, Mabury S A. Monitoring perfluorinated surfactants in biota and surface water samples following an accidental release of fire-fighting foam into Etobicoke Creek. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(4): 545-551.
- [11] Jin Y H, Ding M, Zhai C, Wang L, Dong G H, Shu W Q, Zhang Y H, Saitou N, Sasaki K. An investigation of the PFOS and PFOA pollution in Three Gorges Reservoir areas of the Yangtze River and surface water of Wuhan areas. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3): 486-489.
- [12] Brigden K, Santillo D, Allsopp M. Perfluorinated Chemicals, Alkylphenols and Metals in Fish from the Upper, Middle and Lower Sections of the Yangtze River, China. *Greenpeace Research Laboratories Technical Note*, 2010.
- [13] Jin Y H, Liu W, Sato I, Nakayama S F, Sasaki K, Saito N, Tsuda S. PFOS and PFOA in environmental and tap water in China. *Chemosphere*, 2009, 77(5): 605-611.
- [14] Han J, Fang Z Q. Estrogenic effects, reproductive impairment and developmental toxicity in ovoviparous swordtail fish (*Xiphophorus helleri*) exposed to perfluorooctane sulfonate (PFOS). *Aquatic Toxicology*, 2010, 99(2): 281-290.
- [15] Lau C, Anitole K, Hodes C, Lai D, Pfahles-Hutchens A, Seed J. Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings. *Toxicological Sciences*, 2007, 99(2): 366-394.
- [16] Du Y B, Shi X J, Liu C S, Yu K, Zhou B S. Chronic effects of water-borne PFOS exposure on growth, survival and hepatotoxicity in zebrafish: a partial life-cycle test. *Chemosphere*, 2009, 74(5): 723-729.
- [17] Ye L, Wu L L, Jiang Y X, Zhang C J, Chen L. Toxicological study of PFOS/PFOA to zebrafish (*Danio rerio*) Embryos. *Environmental Science*, 2009, 30(6): 1727-1732.
- [18] Hu W Y, Jones P D, Upham B L, Trosko J E, Lau C, Giesy J P. Inhibition of gap junctional intercellular communication by perfluorinated compounds in rat liver and dolphin kidney epithelial cell lines in vitro and Sprague Dawley rats in vivo. *Toxicological Sciences*, 2002, 68(2): 429-436.
- [19] Johansson N, Eriksson P, Viberg H. Neonatal exposure to PFOS and PFOA in mice results in changes in proteins which are important for neuronal growth and synaptogenesis in the developing brain. *Toxicological Sciences*, 2008, 108(2): 412-418.
- [20] Qazi M R, Nelson B D, Depierre J W, Abedi-Valugerdi M. 28-Day dietary exposure of mice to a low total dose (7 mg/kg) of

- perfluorooctanesulfonate (PFOS) alters neither the cellular compositions of the thymus and spleen nor humoral immune responses: does the route of administration play a pivotal role in PFOS-induced immunotoxicity? *Toxicology*, 2010, 267(1/3): 132-139.
- [21] Hill A J, Teraoka H, Heideman W, Peterson R E. Zebrafish as a model vertebrate for investigating chemical toxicity. *Toxicological Sciences*, 2005, 86(1): 6-19.
- [22] Westerfield M. The Zebrafish Book: A Guide for the Laboratory Use of Zebrafish (*Danio rerio*). Eugene: University of Oregon Press, 1995: 9-25.
- [23] Zhao Z, Xie Z Y, Möller A, Sturm R, Tang J H, Zhang G, Ebinghaus R. Distribution and long-range transport of polyfluoroalkyl substances in the Arctic, Atlantic Ocean and Antarctic coast. *Environmental Pollution*, 2012, 170: 71-77.
- [24] Boudreau T M, Wilson C J, Cheong W J, Sibley P K, Mabury S A, Muir D C, Solomon K R. Response of the zooplankton community and environmental fate of perfluorooctane sulfonic acid in aquatic microcosms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, 22(11): 2739-2745.
- [25] Van Gossum H, Bots J, Snijders T, Meyer J, Van Wassenbergh S, De Coen W, De Bruyn L. Behaviour of damselfly larvae (*Enallagma cyathigerum*) (Insecta, Odonata) after long-term exposure to PFOS. *Environmental Pollution*, 2009, 157(4): 1332-1336.
- [26] Hu W Y, Jones P D, DeCoen W, King L, Fraker P, Newsted J, Giesy J P. Alterations in cellmembrane properties caused by perfluorinated compounds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 2003, 135(1): 77-88.
- [27] Bots J, De Bruyn L, Snijders T, Meyer J, Van Wassenbergh S, De Coen W, De Bruyn L. Exposure to perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) adversely affects the life-cycle of the damselfly *Enallagma cyathigerum*. *Environmental Pollution*, 2010, 158(3): 901-905.
- [28] Shi X J, Du Y B, Lam P K S, Wu R S S, Zhou B S. Developmental toxicity and alteration of gene expression in zebrafish embryos exposed to PFOS. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2008, 230(1): 23-32.
- [29] Harada K, Xu F, Ono K, Iijima T, Koizumi A. Effects of PFOS and PFOA on L-type Ca^{2+} currents in guinea-pig ventricular myocytes. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2005, 329(2): 487-494.
- [30] Weis J S, Smith G, Zhou T, Santiago-Bass C, Weis P. Effects of contaminants on behavior: Biochemical mechanisms and ecological consequences. *Bioscience*, 2001, 51(3): 209-217.
- [31] Scott G R, Sloman K A. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity. *Aquatic Toxicology*, 2004, 68(4): 369-392.
- [32] Xia J G, Niu C J, Pei X J. Effects of chronic exposure to nonylphenol on locomotor activity and social behavior in zebrafish (*Danio rerio*). *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(9): 1435-1440.
- [33] Seebacher F, Walter I. Differences in locomotor performance between individuals: importance of parvalbumin, calcium handling and metabolism. *The Journal of Experimental Biology*, 2012, 215(Pt4): 663-670.
- [34] Correia A D, Goncalves R, Scholze M, Ferreira M, Henriques M A R. Biochemical and behavioral responses in gilthead seabream (*Sparus aurata*) to phenanthrene. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 347(1/2): 109-122.
- [35] Jensen C S, Garsdal L, Baatrup E. Acetylcholinesterase inhibition and altered locomotor behavior in the carabid beetle *Pterostichus cupreus*. A linkage between biomarkers at two levels of biological complexity. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16(8): 1727-1732.
- [36] Johansson N, Fredriksson A, Eriksson P. Neonatal exposure to perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) causes neurobehavioural defects in adult mice. *NeuroToxicology*, 2008, 29(1): 160-169.
- [37] Liu X, Liu W, Jin Y, Yu W, Wang F, Liu L. Effect of gestational and lactational exposure to perfluorooctanesulfonate on calcium-dependent signaling molecules gene expression in rats' hippocampus. *Archives of Toxicology*, 2010, 84(1): 71-79.
- [38] Onishchenko N, Fischer C, Wan Ibrahim W N, Negri S, Spulber S, Cottica D, Ceccatelli S. Prenatal exposure to PFOS or PFOA alters motor function in mice in a sex-related manner. *Neurotoxicity Research*, 2011, 19(3): 452-461.
- [39] Shi X J, Liu C S, Wu G Q, Zhou B S. Waterborne exposure to PFOS causes disruption of the hypothalamus-pituitary-thyroid axis in zebrafish larvae. *Chemosphere*, 2009, 77(7): 1010-1018.
- [40] Arsénault J T M, Fairchild W L, MacLatchy D L, Burrige L, Haya K, Brown S B. Effects of water-borne 4-nonylphenol and 17 beta-estradiol exposures during parr-smolt transformation on growth and plasma IGF-I of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquatic Toxicology*, 2004, 66(3): 255-265.
- [41] Willingham E. Endocrine-disrupting compounds and mixtures: unexpected dose-response. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 46(2): 265-269.

参考文献:

- [11] 金一和, 丁梅, 翟成, 王烈, 董光辉, 舒为群, 张颖花, 齐藤宪光, 佐佐木和明. 长江三峡库区江水和武汉地区地面水中 PFOS 和 PFOA 污染现状调查. *生态环境*, 2006, 15(3): 486-489.
- [17] 叶露, 吴玲玲, 蒋雨希, 张超杰, 陈玲. PFOS/PFOA 对斑马鱼 (*Danio rerio*) 胚胎致毒效应研究. *环境科学*, 2009, 30(6): 1727-1732.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zbrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王德利

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元