

PFOS 暴露对锦鲤自发运动与潜在游泳能力的影响

夏继刚 曹振东 付世建 彭姜岚 梁高杰 何告龙 杜雨欣

(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)

SPONTANEOUS ACTIVITY AND POTENTIAL SWIMMING ABILITY IN JUVENILE GOLDFISH, *CARASSIUS AURATUS*, IN RESPONSE TO PFOS TOXICITY

XIA Ji-Gang, CAO Zhen-Dong, FU Shi-Jian, PENG Jiang-Lan, LIANG Gao-Jie, HE GAO-Long and DU Yu-Xin
(Laboratory of Evolutionary Physiology and Behavior, Chongqing Key Laboratory of Animal Biology, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

关键词: PFOS; 锦鲤; 自发运动; 快速启动; 临界游泳速度

Key words: PFOS; Goldfish; Spontaneous activity; Fast-start performance; Critical swimming speed

中图分类号: X174 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2013)06-1158-06

全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS)是全氟化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)家族中具有代表性的一种新型持久性有机污染物(Persistent Organic Pollutants, POPs), 现已被发现广泛存在于各种环境介质、动植物体与人体中^[1, 2]。其中, 水生生态系统的 PFOS 污染较为严重, 某些地区地表水 PFOS 浓度达 67 $\mu\text{g/L}$, 总的 PFCs 高达 17 mg/L , 不仅如此, PFOS 甚至在自来水中也能检测到^[3-6]。PFOS 化学性质稳定, 不易挥发, 由于在环境中难以降解, 具有环境持久性(Persistent)、易在生物体内产生蓄积(Bioaccumulative)并具有潜在毒性(Toxic)等特性, PFOS 又被认为是重要的 PBT(Persistent- Bioaccumulative- Toxic)类环境污染物^[6, 7]。如今, PFOS 对鱼类等水生生物健康的影响以及水生生态系统安全的潜在威胁已成为人们高度关注的水环境问题。

大量研究表明, PFOS 具有致癌性与基因毒性、繁殖与发育毒性、免疫与神经毒性^[8-12]等。然而, 至今未见 PFOS 对鱼类运动能力影响的研究报道。对于绝大多数鱼类而言, 游泳运动作为其重要的生存活动方式, 是其完成多种行为功能及生态学过程的基础, 是与其健康和适合度密切相关的重要生态学指标^[13-15]。PFOS 污染导致鱼类运动能力的改变, 将潜在的影响其多种行为表现,

例如, 取食以及逃避捕食者、求偶展示、洄游、寻找最适生境等^[13, 16]。由于 PFOS 可以引发肝脏毒性、增加氧化损伤、干扰糖代谢以及鳃功能^[17-19], 因而可能对鱼类的活动水平与运动潜能产生负面效应。研究 PFOS 污染背景下鱼类的运动表现, 不仅有助于深入理解 PFOS 暴露对鱼类生理功能的整体效应及其潜在的生态学后果, 也将有助于洞察污染背景下鱼类的生态适应对策。

锦鲤(*Carassius auratus*)作为一种常见的杂食性鲤科鱼类, 已被广泛用于各种生物学与环境毒理学研究^[20-23]。本文综合研究了 PFOS 亚慢性暴露对锦鲤幼鱼自发运动表现(Spontaneous activity)、快速启动游泳能力(Fast-start performance)以及临界游泳速度(Critical swimming speed, U_{crit})的影响, 为评估 PFOS 对鱼类运动的生态毒理效应提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验动物与试剂

锦鲤(*Carassius auratus*)幼鱼购于重庆市当地鱼市, 于实验室条件下驯养适应 2 周。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(18.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$, 溶解氧 >6 mg/L , 光周期 15L : 9D, 饲养密度 $\rho < 0.5$ g/L 。每日投喂 2 次冰冻红虫,

收稿日期: 2012-11-26; 修订日期: 2013-06-17

基金项目: 重庆市自然科学基金(No.cstc2011jjA20006); 重庆市教科科研项目(No.KJ110606)资助

作者简介: 夏继刚(1980—), 男, 博士, 副教授; 从事鱼类生理生态与污染生态学研究。E-mail: jigangxia@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 付世建(1973—), 男, 博士, 教授; 从事鱼类生理生态学研究。E-mail: shijianfu9@hotmail.com

投喂 15min 后, 吸去残饵。驯化结束后, 选取大小相近、健康活泼的锦鲤[(6.21 ± 0.23) g, (5.82 ± 0.07) cm, $n = 36$]开展实验。

PFOS(纯度>99%)购自 Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd. (Tokyo, Japan), 其余化学品购自 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)。将 PFOS 以二甲基亚砜(Dimethyl sulfoxide, DMSO)为助溶剂, 配置成 0.8 g/mL 的 PFOS 母液, 4℃避光保存, 待用。

1.2 暴露

采用半静态暴露装置, 暴露容器为若干方形玻璃缸(42 cm×22 cm×42 cm, 长×宽×高, 实际水量为 22 L)。基于预实验研究, 本实验共设 3 个 PFOS 浓度梯度组, 分别为对照组(0)、0.5 mg/L、2 mg/L PFOS 暴露组, 均为非致死浓度。各组 DMSO 浓度不超过 0.004% (v/v)。每个浓度梯度处理随机放入驯化适应后的锦鲤幼鱼 12 尾。暴露期间, 每天更换含有相应浓度 PFOS 的水溶液 50%, 所更换的新水体均在换水前新配置, PFOS 浓度与实验设置浓度保持一致, 持续暴露 20d。除水体含有 PFOS 污染物外, 其余饲养状况及水质条件与驯化期间相同。

1.3 运动表现

对锦鲤运动表现的检测包括自发运动、快速启动以及临界游泳速度三个部分。测试前将动物禁食 24h。实验结束后, 将动物用 MS-222 (Tricaine methanesulfonate)麻醉, 测量体长、体重。随后, 将实验鱼解剖并在显微镜下检测鱼体内外寄生虫感染情况, 以确保锦鲤运动表现的差异是由于 PFOS 污染而非寄生虫感染所致。

(1) 自发运动: 自发运动测试在一个无干扰的行为观测室中进行。自发运动评估装置主要为一个大的玻璃缸(72 cm×12 cm×42 cm, 长×宽×高, 实际水量为 31 L)。实验缸的长的一边被划有 7 条细竖线, 将实验缸等分为 8 个部分。实验缸前方 1.5 m 处架有一台摄像机(SONY DCR-SR200E, Japan)。将单尾锦鲤轻轻放入实验缸, 并给予 10min 的适应期以使其适应实验环境, 之后用摄像机连续拍摄记录 5min。录像资料随后在电脑上进行分析。每个浓度梯度处理分别随机选取 10 尾锦鲤用于自发运动测定($n = 10$)。本研究以 5min 内锦鲤的运动距离(游过的竖线数)、静止时间比例、底栖时间比例等为指标评价其自发运动水平。为减少人为误差, 录像资料由专人负责记录分析。

(2) 快速启动: 鱼类快速启动能力测定系统主要包括: 一个方形实验缸(40 cm×40 cm×15 cm, 长×宽×高), 实验缸底部的透明有机玻璃板上刻有 1 cm×1 cm 的网格线; 一台高速摄像机(500 帧/s, BASLER A504K, Germany), 置于实验缸的正上方 70 cm 处; 一个位于水槽正下方 30 cm 处的 LED 矩阵光源, 以及一个 LED 电脉冲指示灯等。自发运动拍摄结束后, 将直径 1 mm 的白色小塑料球固定在实验鱼背部中央皮肤表层, 作为实验鱼的质心标记。将锦

鲤轻轻转入鱼类快速启动能力测定系统, 每次观测只放入一尾锦鲤, 并给予 10min 的适应期以使其适应新的实验环境。实验样本量为 $n = 10$ 。实验缸中水深 10 cm, 水温(18.0±0.5)℃, 溶解氧> 6 mg/L。实验鱼的快速启动游泳行为由电脉冲刺激所激发(刺激场强: 0.75 v/cm, 刺激时长: 50ms)。在发送电脉冲刺激的同时, 高速摄影机(500 帧/s)开始拍摄记录实验鱼的整个逃逸过程, 拍摄历时 2s。之后, 采用图像处理软件(nEO iMAGING 和 ACDsee 12)对拍摄的图像进行处理, 采用软件(TpsUnil 和 TpsDig)测量质心位移, 并计算出实验鱼的反应时滞(Latency time, T)、最大线速度(Maximum linear velocity, V_{max})、最大加速度(Maximum linear acceleration, A_{max})以及刺激起始 120ms 内的质心移动位移(Escape distance during the first 120ms after the stimulus, D_{120ms})等参数。

(3) 临界游泳速度: 采用鱼类游泳代谢仪测定临界游泳速度(U_{crit})。该设备的结构与工作原理见 Li, *et al.*^[24]和 Pang, *et al.*^[25]。在测定时, 将单尾实验鱼放入游泳管中适应 1h 以使其适应流水环境。测试水温为(18.0±0.5)℃。之后, 将水流从 24 cm/s 开始, 每隔 20min 提升一次流速(流速增量为 3 cm/s), 直至实验鱼到达力竭状态。力竭状态的判定标准是实验鱼停留在游泳管末端筛板 20s 以上^[26]。 U_{crit} 的计算方法如下:

$$U_{crit} = U + (t/T)\Delta U,$$

公式中 U_{crit} 为临界游泳速度, U 为完成设定时间(20min)游泳所游过的最大速度, ΔU 为速度增量(3 cm/s), T 是在各速度梯度下设定的持续游泳历时(20min), t 指出现力竭状态的速度下的实际游泳时间。

每个浓度梯度组分别选取 8 尾锦鲤用于 U_{crit} 测定($n = 8$)。为减少实验鱼体长对临界游泳速度测定可能带来的影响, 将临界游泳速度(U_{crit})除以体长(Body length, BL)得到相对临界游泳速度(Relative critical swimming speed, rU_{crit}):

$$rU_{crit} = U_{crit}/BL$$

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(LSD)多重比较检验差异显著性; 如果数据不符合正态分布或者检验的方差不齐, 则采用 Kruskal-Wallis 检验差异显著性。各组数据均以平均值±标准误表示, 显著性水平设在 $P < 0.05$ 。

2 结果

2.1 自发运动

PFOS 暴露对锦鲤的自发运动水平影响显著, 导致单位时间内锦鲤的运动距离显著减少(ANOVA; $F = 4.28$, $P = 0.024$)、静止时间(Kruskal-Wallis; $\chi^2 = 7.10$, $P = 0.029$)以及底栖时间(Kruskal-Wallis; $\chi^2 = 6.35$, $P = 0.042$)显著增

加(图 1)。其中, 0.5 mg/L PFOS 暴露对锦鲤的自发运动无显著影响($P > 0.05$), 2 mg/L PFOS 暴露导致单位时间内锦鲤的运动距离、静止时间以及底栖时间分别为对照组的 40.03%、267%、269% ($P < 0.05$)。

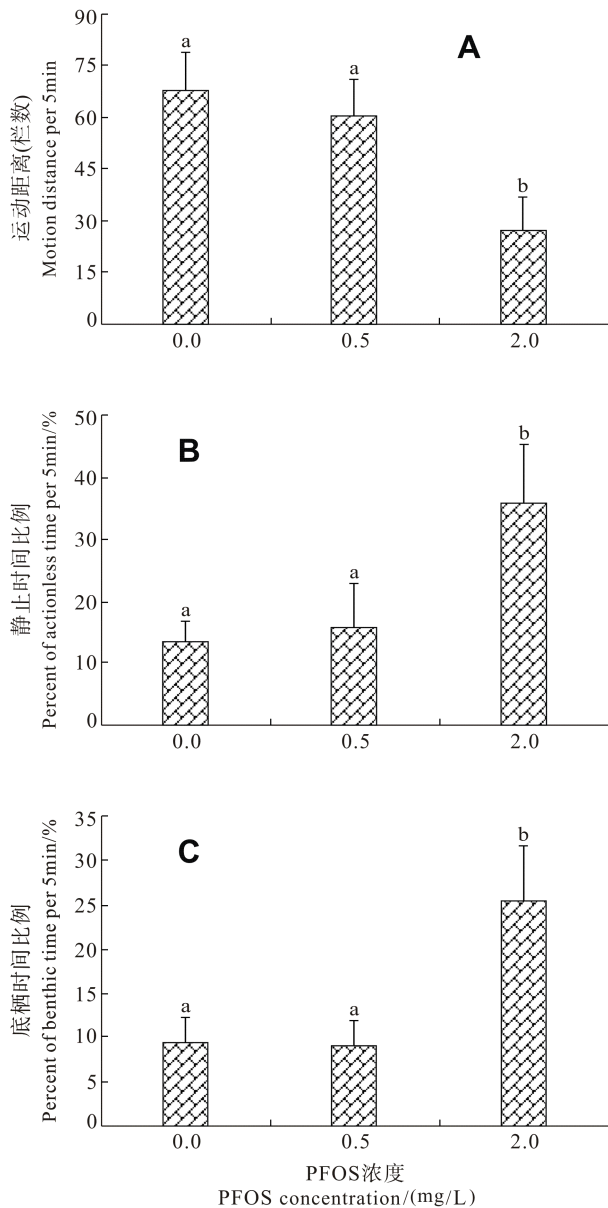


图 1 PFOS 暴露对锦鲤自发运动的影响

Fig. 1 Spontaneous activity in goldfish (*Carassius auratus*) upon exposure to different concentrations of PFOS

上标字母不同表示数值间有显著性差异($P < 0.05$). 数值以平均值 $\pm$ 标准误表示($n = 10$)

Values with different superscript letters denote statistically significant differences ($P < 0.05$) among groups; Values are presented as mean $\pm$ SEM ($n=10$)

2.2 快速启动

PFOS 暴露对锦鲤的反应时滞(T)(ANOVA; $F = 0.40$, $P = 0.67$)、最大线速度($V_{\max}$)(ANOVA; $F = 0.084$, $P = 0.92$)、最大加速度($A_{\max}$)(Kruskal-Wallis; $\chi^2 = 2.11$, $P = 0.35$)

以及质心移动位移(D_{120ms})(ANOVA; $F = 0.235$, $P = 0.79$)等快速启动能力相关的参数均无显著影响(表 1)。

2.3 临界游泳速度

PFOS 暴露对锦鲤的临界游泳速度(U_{crit})(ANOVA; $F = 0.487$, $P = 0.621$)以及相对临界游泳速度(rU_{crit})(ANOVA; $F = 0.885$, $P = 0.428$)均无显著影响(图 2)。

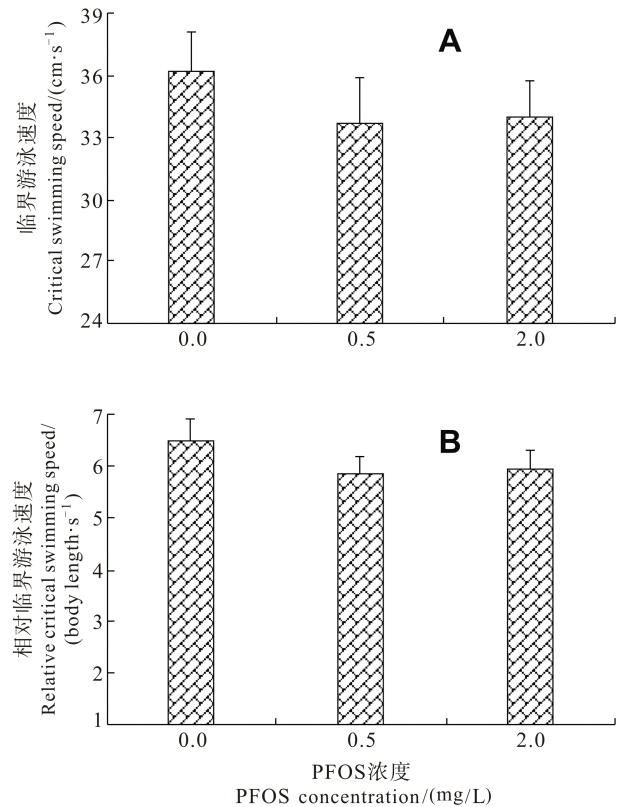


图 2 PFOS 暴露对锦鲤临界游泳速度(A)与相对临界游泳速度(B)的影响

Fig. 2 U_{crit} (A) and rU_{crit} (B) in goldfish (*Carassius auratus*) upon exposure to different concentrations of PFOS

数值以平均值 $\pm$ 标准误表示($n = 8$)

Values are presented as mean $\pm$ SEM ($n = 8$)

3 讨论

PFOS 引发的环境污染问题已引起世界范围内人们的普遍关注^[27, 28]。本文研究了 PFOS 亚慢性暴露对锦鲤适合度相关的几种运动表现的影响。运动表现是环境污染物质对动物在分子、生化、生理水平上产生效应的综合体现, 反应了动物整体的生理状态与生理功能, 故而可为环境污染物质的毒理学效应提供重要的生态指示^[13, 29, 30]。

自发运动是不依赖于外部刺激下的动物的日常活动水平, 与动物的摄食、求偶展示、集群以及社群等级地位的确定等密切相关^[30]。已有研究发现, 动物的运动表现是评估环境污染物质生态毒理效应敏感而有效的生物标志物。例如, 豆娘(*Enallagma cyathigerum*)幼虫的活动水平受 PFOS 暴露影响显著, 1 个月和 4 个月 PFOS 暴露对其

表 1 PFOS 暴露对锦鲤快速启动游泳能力相关参数的影响

Tab. 1 The fast-start performance in goldfish (*Carassius auratus*) exposed to different PFOS concentrations for 20d

PFOS 浓度 PFOS concentration	T (ms)	$V_{\max}$ (m/s)	$A_{\max}$ (m/s ²)	$D_{120\text{ms}}$ (mm)
0	8.80 ± 1.34	0.95 ± 0.55	98.4 ± 6.55	52.80 ± 4.39
0.5 mg/L	10.2 ± 1.75	0.94 ± 0.78	114.2 ± 9.85	49.06 ± 5.50
2 mg/L	10.8 ± 1.74	0.91 ± 0.89	120.3 ± 13.55	48.16 ± 5.25

注: 数值以平均值 $\pm$ 标准误差表示($n = 10$)。 T : 反应时滞; $V_{\max}$: 最大线速度; $A_{\max}$: 最大加速度; $D_{120\text{ms}}$: 质心移动位移

Note: Data are presented as mean value $\pm$ SEM ($n = 10$). T : latency time; $V_{\max}$: maximum linear velocity; $A_{\max}$: maximum linear acceleration; $D_{120\text{ms}}$: escape distance during the first 120 ms after the stimulus

活动水平影响的无可见效应浓度(No observed effect concentrations, NOECs)分别为 0.1 mg/L 和 0.01 mg/L^[31]。类似地, Lee, *et al.*^[32]发现, 超过 1.0 mg/L 的 PFOS 暴露 16 周导致蜗牛(*Semisulcospira gottschei*)活动水平显著降低; Jensen, *et al.*^[33]发现, 杀虫剂乐果(Dimethoate)暴露抑制步行虫(*Pterostichus cupreus*)的活动水平, 导致其运动时间、平均运动速度、运动路径长度等减少, 同时停顿频率以及转向次数增加。毒物暴露导致运动水平的下降可能主要归因于动物内源性能量代谢水平的改变^[34]。多环芳烃菲(Phenanthrene, PHE)暴露引起的乌颊鱼(*Sparus aurata*)活动水平的降低与其引发的肝脏超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性的增加存在正相关的趋势^[35], 表明乌颊鱼活动水平的降低很可能与 PHE 暴露引起的氧化应激反应有关。Correia, *et al.*认为动物主要采取运动对策还是解毒对策可能存在着一个在能量分配上的权衡(Trade-off), 动物活动水平的降低主要是因为其需要花费一部分能量用于肝胆系统对毒物的降解^[35]。在本研究中, PFOS 暴露显著抑制锦鲤的自发运动水平并导致锦鲤底栖时间增加, 2 mg/L PFOS 暴露导致单位时间内锦鲤的运动距离下降 60%, 静止时间和底栖时间分别增加 167%和 169%, 结果与上述研究报道相一致。

快速启动游泳是鱼类以无氧代谢为主的一种高能耗暴发游泳运动, 其持续时间通常小于 1s, 却对鱼类成功捕获猎物以及逃避敌害等具有决定性意义^[36, 37]。临界游泳速度也称为最大可持续游泳速度, 是一种主要以有氧代谢提供能量、持续时间较长的运动方式, 是评估鱼类有氧运动能力的重要指标^[15, 38], 在鱼类的索饵、洄游以及扩展分布区等生理生态活动中发挥重要作用。目前, POPs 暴露对鱼类快速启动游泳能力和临界游泳速度的影响尚未见研究报道。已有的相关研究表明, 某些毒物暴露将潜在影响动物逃避风险源的能力。例如, 三丁基双氧化锡[Bis(tributyltin)oxide, TBTO]暴露 4d 导致三刺鱼(*Gasterosteus aculeatus* L.)对捕食者(模型)的反应程度减弱、反应时滞增加, 从而可能增加其被捕食的风险^[39]。杀虫剂五氯苯酚(Pentachlorophenol, PCP)和硫丹(Endosulfan, EDS)暴露可分别导致萼花臂尾轮虫(*Brachionus calyciflorus*)和豆娘幼虫逃避风险源的能力降低^[40, 41]。有学者认为, 乙酰胆碱酯酶(AChE)作为胆碱能系统神经传递的关

键酶, 在动物的逃逸行为中起重要作用, 动物逃逸能力的降低可能与毒物抑制 AChE 活性有关^[42]。与上述研究结果不尽相同, 在本研究中, PFOS 暴露并不影响锦鲤的快速启动游泳(逃逸)能力与临界游泳速度, 说明遭遇 PFOS 暴露后, 锦鲤仍然保持了较高的运动潜能。鱼类的快速启动游泳能力和临界游泳速度均与肝糖原、肌糖原的含量以及糖代谢水平有重要联系, 临界游泳速度的大小还依赖于鱼类心鳃系统的生理功能状态^[24, 25, 43]。有研究表明, 全氟壬酸(PFNA)暴露可以诱导动物血糖水平升高并增加肝糖原合成^[44]。推测 PFOS 亚慢性暴露可能没有影响到锦鲤运动系统供能, 故而对快速启动游泳能力和临界游泳速度无显著影响。然而, 也有研究发现, PFOS 暴露能够导致杜父鱼(*Cottus gobio*)线粒体柠檬酸合成酶(CS)活性升高、细胞色素 *c* 氧化酶(CCO)活性降低, 并影响鳃部能量代谢相关的蛋白的表达^[19], 抑制许氏平鲈(*Sebastes schlegelii*)鳃 $\text{Na}^+ - \text{K}^+$ ATP 酶活性并降低血糖水平^[18]。全氟化合物长期暴露对鱼类能量代谢与解毒机制及能量依赖型运动行为特征的影响有待于进一步研究。

综上, 本文全面调查了 PFOS 暴露对锦鲤自发运动、快速启动游泳能力以及临界游泳速度的影响。尽管 PFOS 暴露显著抑制锦鲤的自发运动水平并增加其底栖行为, 然而 PFOS 暴露不仅对以无氧代谢为主的快速启动能力的相关参数包括反应时滞(T)、最大线速度($V_{\max}$)、最大加速度($A_{\max}$)以及质心移动位移($D_{120\text{ms}}$)等无显著影响, 对表观有氧运动能力的临界游泳速度(U_{crit})也无显著影响, 表明在遭遇 PFOS 污染胁迫时, 锦鲤可能一方面通过降低日常活动水平以减少能量消耗, 另一方面又保持较高的运动潜能, 以逃避污染环境。

参考文献:

- [1] Suja F, Pramanik B K, Zain S M. Contamination, bioaccumulation and toxic effects of perfluorinated chemicals (PFCs) in the water environment: a review paper [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(6): 1533—1544
- [2] Gebbink W A, Letcher R J, Burgess N M, *et al.* Perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates and precursors in relation to dietary source tracers in the eggs of four species of gulls (*Larids*) from breeding sites spanning Atlantic to Pacific

- Canada [J]. *Environment International*, 2011, **37**(7): 1175—1182
- [3] Moody C A, Martin J W, Kwan W C, *et al.* Monitoring perfluorinated surfactants in biota and surface water samples following an accidental release of fire-fighting foam into Etobicoke Creek [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 545—551
- [4] 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 [J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(10): 1167—1174
- [5] Ahrens L, Xie Z, Ebinghaus R. Distribution of perfluoroalkyl compounds in seawater from Northern Europe, Atlantic Ocean, and Southern Ocean [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(8): 1011—1016
- [6] Rumsby P C, McLaughlin C L, Hall T. Perfluorooctane sulphonate and perfluorooctanoic acid in drinking and environmental waters [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, **367**(1904): 4119—4136
- [7] van Asselt E D, Rietra R, Römkens P, *et al.* Perfluorooctane sulphonate (PFOS) throughout the food production chain [J]. *Food Chemistry*, 2011, **128**(1): 1—6
- [8] Jacquet N, Maire M A, Landkocz Y, *et al.* Carcinogenic potency of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on Syrian hamster embryo (SHE) cells [J]. *Archives of Toxicology*, 2012, **86**(2): 305—314
- [9] Han J, Fang Z. Estrogenic effects, reproductive impairment and developmental toxicity in ovoviparous swordtail fish (*Xiphophorus helleri*) exposed to perfluorooctane sulfonate (PFOS) [J]. *Aquatic toxicology*, 2010, **99**(2): 281—290
- [10] Shi X, Du Y, Lam P K, *et al.* Developmental toxicity and alteration of gene expression in zebrafish embryos exposed to PFOS [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2008, **230**(1): 23—32
- [11] Butenhoff J L, Ehresman D J, Chang S C, *et al.* Gestational and lactational exposure to potassium perfluorooctane-sulfonate (K^+ PFOS) in rats: Developmental neurotoxicity [J]. *Reproductive Toxicology*, 2009, **27**(3—4): 319—330
- [12] Qazi M R, Nelson B D, Depierre J W, *et al.* 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 [J]? *Toxicology*, 2010, **267**(1—3): 132—139
- [13] Little E E, Archeski R D, Flerov B A, *et al.* Behavioral indicators of sublethal toxicity in rainbow trout [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1990, **19**(3): 380—385
- [14] Blake R W. Fish functional design and swimming performance [J]. *Journal of Fish Biology*, 2004, **65**(5): 1193—1222
- [15] Fu S J, Peng Z G, Cao Z D, *et al.* Habitat-specific locomotor variation among Chinese hook snout carp (*Opsariichthys bidens*) along a river [J]. *PLOS One*, 2012, **7**(7): e40791
- [16] Domenici P, Kapoor B G. Fish locomotion: An Eco-ethological Perspective [M]. Science Publishers, British Isles. 2010
- [17] Oakes K D, Sibley P K, Martin J W, *et al.* Short-term exposures of fish to perfluorooctane sulfonate: Acute effects on fatty acyl-CoA oxidase activity, oxidative stress, and circulating sex steroids [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, **24**(5): 1172—1181
- [18] Jeon J, Lim H K, Kannan K, *et al.* Effect of perfluorooctanesulfonate on osmoregulation in marine fish, *Sebastes schlegeli*, under different salinities [J]. *Chemosphere*, 2010, **81**(2): 228—234
- [19] Dorts J, Kestemont P, Marchand P A, *et al.* Ecotoxicoproteomics in gills of the sentinel fish species, *Cottus gobio*, exposed to perfluorooctane sulfonate (PFOS) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2011, **103**(1—2): 1—8
- [20] Saglio P, Trijasse S. Behavioral responses to atrazine and diuron in goldfish [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, **35**(3): 484—491
- [21] Bjerselius R, Lundstedt-Enkel K, Olsén H, *et al.* Male goldfish reproductive behavior and physiology are severely affected by exogenous exposure to 17β -estradiol [J]. *Aquatic Toxicology*, 2001, **53**(2): 139—152
- [22] Ford T, Beitinger T L. Temperature tolerance in the goldfish, *Carassius auratus* [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2005, **30**(2): 147—152
- [23] Tzaneva V, Gilmour K M, Perry S F. Respiratory responses to hypoxia or hypercapnia in goldfish (*Carassius auratus*) experiencing gill remodelling [J]. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 2011, **175**(1): 112—120
- [24] Li X M, Cao Z D, Fu S J. The effect of exercise training on the metabolic interaction between feeding and locomotion in the juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. *Journal of Experimental Zoology*, 2010, **313A** (9): 557—563
- [25] Pang X, Cao Z D, Peng J L, *et al.* The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 2010, **155A** (2): 253—258
- [26] Lee C G, Farrell A P, Lotto A, *et al.* The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2003, **206**(18): 3239—3251
- [27] Armitage J M, Schenker U, Scheringer M, *et al.* Modeling the global fate and transport of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and precursor compounds in relation to temporal trends in wildlife exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9274—9280

- [28] Zhang S, Lerner D N. Review of physical and chemical properties of perfluorooctanyl sulphonate (PFOS) with respect to its potential contamination on the environment [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **518—523**: 2183—2191
- [29] Scott G R, Sloman K A. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity [J]. *Aquatic Toxicology*, 2004, **68**(4): 369—392
- [30] 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*) [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(9): 1435—1440
- [31] Van Gossum H, Bots J, Snijkers T, *et al.* Behaviour of damselfly larvae (*Enallagma cyathigerum*) (Insecta, Odonata) after long-term exposure to PFOS [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(4): 1332—1336
- [32] Lee J W, Park J J, Jin Y G, *et al.* Effect of chronic exposure of PFOS (Perfluorooctane Sulfonate) on survival, activity, growth, and organ structure of the melania snail, *Semislucospira gottschei* (Gastropoda: Pleuroceridae) [J]. *Journal of Environmental Toxicology*, 2007, **22**(2): 119—128
- [33] 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 [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(8): 1727—1732
- [34] Sorensen F F, Weeks J M, Baatrup E. Altered locomotory behaviour in woodlice (*Oniscus asellus* L.) collected at a polluted site [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(4): 685—690
- [35] Correia A D, Goncalves R, Scholze M, *et al.* Biochemical and behavioral responses in gilthead seabream (*Sparus aurata*) to phenanthrene [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **347**(1—2): 109—122
- [36] Wakeling J M, Johnston I A. Muscle power output limits fast-start performance in fish [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, **201**(Pt 10): 1505—1526
- [37] Lyon J P, Ryan T J, Scroggie M P. Effects of temperature on the fast-start swimming performance of an Australian freshwater fish [J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 2008, **17**(1): 184—188
- [38] Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, *et al.* The effects of dissolved oxygen levels on resting oxygen consumption and swimming performance in juvenile darkbarbel catfish *Peltebagrus vachelli* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(2): 255—261 [庞旭, 袁兴中, 曹振东, 等. 溶氧水平对瓦氏黄颡鱼幼鱼静止耗氧率和临界游泳运动能力的影响. 水生生物学报, 2012, **36**(2): 255—261]
- [39] Wibe A E, Nordtug T, Jenssen B M. Effects of bis (tributyltin)oxide on antipredator behavior in threespine stickleback *Gasterosteus aculeatus* L. [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(3): 475—481
- [40] Preston B L, Cecchine G, Snell T W. Effects of pentachlorophenol on predator avoidance behavior of the rotifer *Brachionus calyciflorus* [J]. *Aquatic Toxicology*, 1998, **44**(3): 201—212
- [41] Janssens L, Stoks R. How does a pesticide pulse increase vulnerability to predation? Combined effects on behavioral antipredator traits and escape swimming [J]. *Aquatic Toxicology*, 2012, **110—111**: 91—98
- [42] Trekels H, Van de Meutter F, Stoks R. Species-specific patterns of swimming escape performance and cholinesterase activity in a guild of aquatic insects exposed to endosulfan [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **163**(4): 127—133
- [43] Schulte P M, Moyes C D, Hochachka P W. Integrating metabolic pathways in post-exercise recovery of white muscle [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1992, **166**: 181—195
- [44] Fang X, Gao G, Xue H, *et al.* Exposure of perfluorononanoic acid suppresses the hepatic insulin signal pathway and increases serum glucose in rats [J]. *Toxicology*, 2012, **294**(2—3): 109—115