

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0594

张亚辉,曹莹,覃璐玫,等.2014.PFOS 对太湖水体中典型鱼和食鱼鸟的次生毒性风险[J].环境科学学报,34(10):2718-2723

Zhang Y H, Cao Y, Qin L M, et al. 2014.Secondary poisoning risk of PFOS for typical fish and fish-eating bird in Taihu Lake[J].Acta Scientiae Circumstantiae,34(10):2718-2723

PFOS 对太湖水体中典型鱼和食鱼鸟的次生毒性风险

张亚辉¹,曹莹¹,覃璐玫^{1,2},杨霓云¹,刘征涛^{1,*}

1. 中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室,北京 100012

2. 桂林理工大学环境科学与工程学院,桂林 541004

收稿日期:2013-12-06

修回日期:2014-01-20

录用日期:2014-01-21

摘要:全氟辛烷磺酰(PFOS)是我国环境中广泛存在的一种全氟类污染物,对生态环境存在潜在威胁.本文采用 PFOS 对我国食物链中鸟类与哺乳动物的毒性数据,根据欧盟现有化学物质风险评价技术指导文件,对 PFOS 的食物链的预测无效应浓度(PNEC_{经口})进行推导,并初步对我国太湖水生食物链进行次生毒性风险评价.结果表明,PFOS 的次生毒性 PNEC_{经口}为 0.04 mg·kg⁻¹.PFOS 太湖水体 9 种鱼和 1 种食鱼鸟的次生毒性风险商均小于 1.根据本文收集的数据,PFOS 对太湖水生食物链的次生毒性风险较小.该研究为我国 PFOS 的次生毒性风险评价提供科学依据.

关键词:全氟辛烷磺酸(PFOS);次生毒性;预测无效应浓度(PNEC_{经口})

文章编号:0253-2468(2014)10-2718-06

中图分类号:X826

文献标识码:A

Secondary poisoning risk of PFOS for typical fish and fish-eating bird in Taihu Lake

ZHANG Yahui¹, CAO Ying¹, QIN Lumei^{1,2}, YANG Niyun¹, LIU Zhengtao^{1,*}

1. State Key Laboratory for Environmental Criteria and Risk Assessment, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effects and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012

2. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004

Received 6 December 2013;

received in revised form 20 January 2014;

accepted 21 January 2014

Abstract: Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) is one of perfluorinated pollutants. It is widely present in the environment in China and might pose a potential threat to ecosystem. According to the EU technical guidance document on risk assessment for existing substances, the predicted no-effect concentration (PNEC_{oral}) value of PFOS of secondary poisoning in food chains was derived with the toxicity data of the native species of birds and mammals in China. The risks of secondary poisoning for freshwater food chain in Taihu Lake were preliminarily assessed. The results demonstrated that the PNEC_{oral} value of secondary poisoning for PFOS was 0.04 mg·kg⁻¹. The risk quotients of PFOS to nine fishes and one kind of fish-eating bird were all lower than the unity. According to the collected data in this article, the risk of secondary poisoning of PFOS for the freshwater food chain in Taihu Lake was small. The results would provide scientific foundation for risk assessment of secondary poisoning for PFOS in the environment of China.

Keywords: PFOS; secondary poisoning; PNEC_{oral}

1 引言(Introduction)

具有生物富集和生物蓄积作用的亲脂性化学物质,通过长期暴露对食物链中较高营养级别的生物产生的直接或间接毒性效应,称为次生毒性

(ECB, 2003).由于通过食物链传递的食物摄入如饮食和经口暴露途径,对较高营养级别生物产生的次生毒性效应很难以急性毒性表现出来,因此评估主要考虑对较高营养级别生物产生的长期毒性效应.次生毒性的浓度-效应的评估结果一般以预测无

基金项目:环境保护部公益性行业专项项目(No.201009026);国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2012ZX07501-003)

Supported by the Special Scientific Project of Public Welfare Sponsored by Ministry of Environmental Protection (No.201009026) and the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No.2012ZX07501-003)

作者简介:张亚辉(1979—),女,E-mail: zhangyahui@craes.org.cn; * **通讯作者(责任作者)**,E-mail: liuzt@craes.org.cn

Biography: ZHANG Yahui(1979—),female, E-mail: zhangyahui@craes.org.cn; * **Corresponding author**,E-mail: liuzt@craes.org.cn

效应浓度($PNEC_{\text{经口}}$)表示.对于某一化学物质暴露于水环境中,其生物浓缩因子 $BCF \geq 100$ 或生物放大因子 $BMF > 1$,通过水(—水生生物)-鱼-食鱼鸟类或哺乳动物的传递途径对食物链产生富集或蓄积效应,则需要对该物质通过食物链的暴露进行次生毒性评估(Vlaardingen *et al.*, 2007).一般通过对水生生物食物链中鱼和食鱼的高端捕食者的预测环境浓度(PEC)与次生毒性 $PENC_{\text{经口}}$ 的比值,评估鱼类和捕食者的次生毒性风险.

全氟辛烷磺酸(PFOS)是广泛用于工业和日常生活领域的一种全氟化合物(Giesy and Kannan, 2002).各种PFOS产品的大量使用,使其存在于各种环境介质(Sepulvado *et al.*, 2011; So *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2011; Zhao *et al.*, 2012; 金一和等, 2004)和生物体内(Taniyasu *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2012).由于PFOS具有持久性、长距离迁移、生物富集等特性(Lau *et al.*, 2007; Prevedouros *et al.*, 2006),2009年斯德哥尔摩公约把PFOS及其盐列为新增POPs物质之一. PFOS对水生生物(曹莹等, 2012)如大型植物(Desjardins *et al.*, 2001)、绿藻(Boudreau *et al.*, 2003)、甲壳动物(Li, 2009)、软体动物(Li, 2009)、两栖动物(苏红巧等, 2012)、环节动物(Stevens and Coryell, 2007)、昆虫(MacDonald *et al.*, 2004)和鱼类(Ji *et al.*, 2008)产生急性和慢性毒性作用.基于慢性毒性最敏感物种心斑绿鳉(*Enallagma cyathigerum*)120d幼体成活率无观测效应浓度(NOEC)值 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,计算水体中预测无效应浓度 $PNEC_{\text{水}}$ 为 $1 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (张亚辉等, 2013).据报道,蓝鳃太阳鱼对PFOS的BCF为2796(3M Company, 2010),虹鳟鱼的BCF为1100(Martin *et al.*, 2003),鲤鱼的BCF值范围为818~2180(Moermond *et al.*, 2010).PFOS对美国大湖区的淡水鱼类(Furdui *et al.*, 2007; Houde *et al.*, 2008; Kannan *et al.*, 2005)的生物富集因子(BAF)的范围为2500~95000,对淡水龟(*Trachemys scripta elegans*和*Chinemys reevesii*)的BAF(基于血清浓度)达到11000(Morikawa *et al.*, 2006).另外,PFOS在水生高等捕食生物体中的含量显著高于低营养级生物(Kannan *et al.*, 2002),具有显著的生物放大效应.通过对美国纽约水体中秋沙鸭及其主要食物中PFOS的含量进行监测,得到PFOS的BMF值为8.9(Sinclair *et al.*, 2006).采用营养级放大因子(TMf)评估PFOS对加拿大安大略湖中鱼类和哺乳动物构

成的淡水生物链达到5.9(Martin *et al.*, 2004).在海洋生物食物链的TMf范围为1.8~11(Houde *et al.*, 2006; Kelly *et al.*, 2009; Tomy *et al.*, 2009).由此可见,PFOS会通过水生食物链的传递导致生物蓄积作用,对水中高等捕食生物造成次生毒性作用(ECB, 2003).

英国对水生食物链和陆生食物链中PFOS的次生毒性造成的环境风险进行了评估(Brooke *et al.*, 2004);荷兰RIVM(Moermond *et al.*, 2010)基于次生毒性推导了最大允许浓度($MPC_{\text{sp, water}}$).国内,刘超等(2008)对镀铬企业周边PFOS的生态风险进行了初步评价.目前,我国还未对PFOS的次生毒性进行评估.本研究采用欧盟现有化学物质风险评价技术指导文件(TGD)(ECB, 2003)推导次生毒性的预测无观测效应浓度($PNEC_{\text{经口}}$)的方法,对我国PFOS的次生毒性 $PNEC_{\text{经口}}$ 值进行计算,以期为我国进行PFOS的次生毒性的风险评价提供基础.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 鸟类和哺乳动物毒性数据筛选

PFOS及其盐对鸟类和哺乳动物的毒性数据来自国内外已发表文献和报告,毒性数据原则上均选择我国已有的生物种,舍弃非中国物种如北方鹤鹑.毒性数据评估参照欧洲化学管理局(ECB)现有化学物质的数据评估方法(ECB, 2003).

通过食物链的摄入途径如饮食或经口暴露的鸟类和哺乳动物的毒性数据用于次生毒性评估.次生毒性效应评估需要长期毒性数据如死亡率、繁殖或生长的NOEC值.如果无法获得鸟类或哺乳动物的毒性数据,则不能进行次生毒性评估.一般来说,急性致死剂量如 LD_{50} 值不能用来外推慢性毒性,但是如果仅能获得鸟类急性毒性数据(参照OECD 205 鸟类饮食毒性试验标准),可用于外推鸟类的慢性毒性.对于哺乳动物,主要考虑啮齿类动物的毒性试验,如28 d经口毒性试验,90 d亚慢性经口毒性试验.鸟类和哺乳类动物的慢性毒性主要为繁殖毒性.

鸟类和哺乳动物的毒性数据以食物中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)或者剂量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)的NOEC值表示,如果毒性数据为无观测不良效应水平(NOAE),需要将NOAE通过公式(1)和公式(2)转化为NOEC,其中物种转换系数见表1.

$$NOEC_{\text{鸟}} = NOAE_{\text{鸟}} \times \text{CONV}_{\text{鸟}} \quad (1)$$

$$\text{NOEC}_{\text{哺乳动物,食物,慢性}} = \text{NOAEL}_{\text{哺乳动物,食物,慢性}} \times \text{CONV}_{\text{哺乳动物}} \quad (2)$$

式中: $\text{NOEC}_{\text{鸟}}$ 和 $\text{NOEC}_{\text{哺乳动物,食物,慢性}}$ 分别为鸟类和哺乳动物的 NOEC 值 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\text{NOAEL}_{\text{鸟}}$ 和 $\text{NOAEL}_{\text{哺乳动物,食物,慢性}}$ 分别为鸟类和哺乳动物 NOAEL 值 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); $\text{CONV}_{\text{鸟}}$ 和 $\text{CONV}_{\text{哺乳动物}}$ 分别为鸟类和哺乳动物从 NOAEL 转化为 NOEC 的转换系数 ($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{kg}^{-1}$).

表 1 哺乳动物和鸟类从 NOAEL 到 NOEC 的转换系数 (ECB, 2003)

Table 1 Conversion factors from NOAEL to NOEC for several mammalian and one bird species (ECB, 2003)

物种	转换系数 (bw/dfi) /($\text{g} \cdot \text{d} \cdot \text{g}^{-1}$)
家犬 (<i>Canis domesticus</i>)	40
猕猴 (<i>Macaca</i> sp.)	20
田鼠 (<i>Microtus</i> spp.)	8.3
小鼠 (<i>Mus musculus</i>)	8.3
家兔 (<i>Oryctolagus cuniculus</i>)	33.3
大鼠 (<i>Rattus norvegicus</i>) (> 6 weeks)	20
大鼠 (<i>Rattus norvegicus</i>) (\leq 6 weeks)	10
家鸡 (<i>Gallus domesticus</i>)	8

注: bw 为体重, dfi 为日食物摄入量.

2.2 PNEC_{经口} 计算方法

PNEC_{经口} 由毒性数据除以评估系数得到:

$$\text{PNEC}_{\text{经口}} = \text{TOX}_{\text{经口}} / \text{AF}_{\text{经口}} \quad (3)$$

式中, $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 为鸟类或哺乳动物次生毒性 PNEC ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $\text{AF}_{\text{经口}}$ 为外推 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 的评估系数; $\text{TOX}_{\text{经口}}$ 为 $\text{LC}_{50, \text{鸟}}$ 或 $\text{NOEC}_{\text{鸟}}$ 或 $\text{NOEC}_{\text{哺乳动物,食物,慢性}}$ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

表 2 鸟类和哺乳动物毒性数据的外推评估系数 (ECB, 2003)

Table 2 Assessment factors for extrapolation of mammalian and bird toxicity data (ECB, 2003)

TOX _{经口}	试验周期	AF _{经口}
$\text{LC}_{50, \text{鸟}}$	限定日 (5 d) 食量毒性试验	3000
$\text{NOEC}_{\text{鸟}}$	慢性试验	30
$\text{NOEC}_{\text{哺乳动物,食物}}$	28 d 毒性试验	300
	90 d 毒性试验	90
	慢性试验	30

通过 NOAEL 转换的 NOEC 与直接采用 NOEC 计算 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$, 具有相同的优先权, 其中采用鸟类急性饮食毒性 LC_{50} 推导 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 时, 评估系数 $\text{AF}_{\text{经口}}$ 最高为 3000; 采用慢性毒性如生殖毒性效应时, 则

$\text{AF}_{\text{经口}}$ 最低为 30. 如果获得了鸟和哺乳动物的 NOEC 值, 采用计算出的 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 最低值用于次生毒性评估.

3 结果与讨论 (Results and discussion)

PFOS 对哺乳动物和鸟类的毒性数据见表 3. PFOS 对哺乳动物的毒性数据均为慢性与亚慢性毒性值, 包括大鼠、小鼠、兔子和猴的 NOEC 或 NOAEL 值, 其中大鼠的毒性数据最多, 包括不同毒性终点的 13 个 NOAEL 数据, 1 个 NOEC 数据; 小鼠的毒性数据为不同毒性终点的 5 个 NOAEL 数据; 兔子的毒性数据均为 2 个 NOAEL 数据; 猴的毒性数据包括食蟹猴的 1 个 NOAEL 数据与猕猴的 2 个 NOAEL 数据. 鸟类的毒性数据仅有绿头鸭的 1 个 NOAEL 值. 不同生物的 NOAEL 值, 采用表 1 中的转换系数转换为 NOEC 值. 如表 3 所示, 采用不同转化系数获得的 NOEC 值 24 个. 所有 NOEC 值中, 最大值为 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (大鼠 90 d 亚慢性毒性试验); 最小值为 $>1.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (大鼠 14 W 饮食毒性试验). 根据表 2 中采用的外推评估系数, 哺乳动物中 3 个大鼠慢性毒性数据和 1 个食蟹猴毒性数据, 以及鸟类中绿头鸭的 NOEC 值, 采用评估系数为 30, 其它数据均采用评估系数 90, 最后得到 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 最大值为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 按照 ECB 方法的规定, 采用 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 最低值用于次生毒性 PNEC 计算, 最终得到 PFOS 的 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

英国环境署对 PFOS 的次生毒性进行了评估 (Brooke, 2004), 采用大鼠致癌率 NOAEL 值 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 没有采用转换系数, 直接应用评估系数 30, 获得 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 为 $0.0167 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由于该值没有将 NOAEL 值转化为 NOEC 值后计算 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$, 造成数值偏低, 报告中也指出可能对 PFOS 的水生食物链的次生毒性风险评价造成“过保护”作用. 荷兰 RIVM (Moermond *et al.*, 2010) 采用了兔子毒性 (Case, 2001), 基于次生毒性推导了 PFOS 的水质基准值——最大允许浓度 $\text{MPC}_{\text{oral, water}}$ 为 $0.037 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 该值相当于 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$, 与本文中 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 相差不大.

对于水环境中水-水生生物-鱼-食鱼鸟类或哺乳动物食物链的次生毒性评估. 通过对水生生物食物链中鱼和食鱼的高端捕食者 (鸟类、哺乳动物) PEC 与次生毒性 $\text{PNEC}_{\text{经口}}$ 的比值, 表征水体中鱼类和捕食者的次生毒性风险. 由于我国缺乏 PFOS 的

暴露场景中 PEC 的估计,本文通过直接采用 PFOS 的暴露浓度 c_i 与 PNEC 比较,初步对太湖水体中 PFOS 的次生毒性风险进行了初步的评估.表 4 列出了太湖中 9 种淡水鱼和 1 种捕鱼鸟类(白鹭)生物体中 PFOS 含量(Xu *et al.*, 2013),鱼体内 PFOS 的含量范围为 4.13 ~ 18.62 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 11.08 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$,鸟类白鹭体中 PFOS 含量最高,达到 20.96 $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$.将生物体的浓度与 PNEC_{经口} 相比较计算风险商(RQ)如表 4 所示,各种生物的风险商较小,均小于 1,其中白鹭的风险商最高为 0.52,比各种鱼类都高;9 种鱼的风险商均未超过 0.5,其中黄颡鱼的风险商最高为 0.47,鳊鱼最低为 0.10.由此可见,PFOS 对太湖中 9 种鱼和 1 种鸟类产生的次生毒性风险可

以接受.

英国环保署采用淡水鱼类的 PEC 对食物链的次生毒性风险进行了评估(Brooke, 2004),结果发现,在 PFOS 的 9 种暴露场景中,PFOS 对淡水食物链中鱼类产生的风险商均大于 1,尤其含有 PFOS 的灭火器泡沫形成和使用过程中排放进入地表水体 PFOS 产生的次生毒性风险商高达 13400.本文中通过对 PFOS 对太湖水生食物链,包括 9 种鱼类和 1 种鸟类,产生的次生毒性风险进行了初步评价,结果显示 PFOS 对太湖水体生物的次生毒性风险可以接受,但是由于缺乏 PFOS 的暴露场景中 PEC 浓度估计,我国 PFOS 对水生食物链产生的次生毒性风险尚待进一步研究.

表 3 PFOS 对哺乳动物与鸟类的毒性数据

Table 3 Toxicity data of mammalian and birds of PFOS

受试生物	暴露时间 ^a	暴露途径	毒性指标	毒性数据/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	转换系数	NOEC/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	评估系数	PNEC ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考文献	
大鼠	GD 6-15	灌胃	母体毒性,发育毒性	NOAEL	5	20	100	90	1.11	Gortner, 1980
大鼠	GD 6-15	灌胃	母体毒性,发育毒性	NOAEL	1	20	20	90	0.22	Wetzel, 1983
大鼠	GD 2-21	灌胃	母体体重增加	NOAEL	1	20	10	90	0.22	Thibodeaux <i>et al.</i> , 2003
大鼠	GD 2-21	灌胃	胎儿体重	NOAEL	5	10	50	90	0.56	Thibodeaux, 2003
大鼠	GD 2-21	灌胃	胎儿畸形	NOAEL	3~5	10	30~50	90	0.3~0.6	Thibodeaux, 2003
大鼠	GD 2-21	灌胃	胎儿畸形	NOAEL	1	10	10	90	0.11	Thibodeaux, 2003
大鼠	GD 2-21	灌胃	胎儿畸形	NOAEL	5	10	50	90	0.56	Thibodeaux, 2003
大鼠	GD 2-21	灌胃	存活,生长,发育	NOAEL	1	10	10	90	0.11	Lau <i>et al.</i> , 2003
大鼠	6 w 前交配	灌胃	妊娠时间,小鼠成活率	NOAEL	0.37	20	7.4	90	0.08	Luebker <i>et al.</i> , 2005
大鼠	90 d	饮食	体重,食物消耗率	NOAEL	2	90	180	90	2.00	Goldenthal <i>et al.</i> , 1978a
大鼠	14 w	饮食	体重	NOEC	>1.5	-	-	-	-	Seacat <i>et al.</i> , 2003
大鼠	104 w	饮食	致癌率	NOAEL	0.5	30	15	30	0.50	Thomford, 2002
大鼠	两代试验	灌胃	存活率,一代体重	NOAEL	0.4	20	8	30	0.27	Christian <i>et al.</i> , 1999
大鼠	两代试验	灌胃	二代出生体重	NOAEL	0.1	20	2	30	0.07	Christian, 1999
小鼠	GD1-18	灌胃	母体体重增加	NOAEL	15	8.3	124.5	90	1.38	Thibodeaux, 2003
小鼠	GD1-18	灌胃	胎儿体重	NOAEL	5	8.3	41.5	90	0.46	Thibodeaux, 2003
小鼠	GD1-18	灌胃	胎儿畸形率	NOAEL	1~15	8.3	8.3~124.5	90	0.09~1.38	Thibodeaux, 2003
小鼠	GD1-18	灌胃	胸骨缺陷	NOAEL	1	8.3	8.3	90	0.09	Thibodeaux, 2003
小鼠	GD1-18	灌胃	顎裂	NOAEL	10	8.3	83	90	0.92	Thibodeaux, 2003
兔子	GD6-20	灌胃	出生体重,骨化	NOAEL	1	33.3	33.3	90	0.37	Case <i>et al.</i> , 2001
兔子	GD6-20	灌胃	母体体重增加	NOAEL	0.1	33.3	3.33	90	0.04	Case, 2001
食蟹猴	183 d	插管	体重,致死率	NOAEL	0.15	20	3	30	0.10	Seacat <i>et al.</i> , 2002
猕猴	90 d	灌胃	存活率	NOAEL	1.5	20	30	90	0.33	Goldenthal <i>et al.</i> , 1978b
猕猴	90 d	灌胃	严重胃肠道反应,颤抖	NOAEL	0.5	20	10	90	0.11	Goldenthal <i>et al.</i> , 1978b
绿头鸭	21 w	饮食	体重,繁殖率	NOAEL	1.49	6.7	10	30	0.33	Newsted <i>et al.</i> , 2007

注: ^aGD 为孕期.

表 4 太湖水生食物链中 PFOS 的含量(Xu, 2013) 及次生毒性风险

Table 4 Levels of PFOS(Xu, 2013) and its risk of secondary poisoning of the freshwater food chain in Taihu lake

生物种类	英文名称	数量	组织	PFOS 含量及 95% 置信区间 / (ng·g ⁻¹)	风险商 RQ _i
翘嘴红鲌	<i>Erythroculter ilishaefor</i>	8	整体	11.63(3.2~21.3)	0.29
鳊鱼	<i>Aristichthys nobilis</i>	4	肌肉	4.13(2.8~16.7)	0.10
间下鱊鱼	<i>Hyporhamphus intermedius</i>	6	肌肉	13.54(5.9~23.8)	0.34
白鲈	<i>Hemiculter leucisculus</i>	7	整体	8.88(5.4~15.5)	0.22
白鲢	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	10	整体	7.17(5.4~28.5)	0.18
湖鲚	<i>Coilia ectenes</i>	22	整体	11.93(4.5~42.9)	0.30
锦鲤	<i>Cyprinus carpio</i>	7	肌肉	12.06(4.4~14.5)	0.30
大银鱼	<i>Protosalnax hyalocranius</i>	6	整体	11.74(5.6~22.3)	0.29
黄颡鱼	<i>Pelteobagrus fulvidraco</i>	4	肌肉	18.62(3.19~21.2)	0.47
白鹭	Egrets	2	肌肉	20.96(12.6~47.5)	0.52

5 结论(Conclusions)

1) 采用 PFOS 对我国本土捕鱼鸟类与哺乳动物毒性数据, 获得 PFOS 次生毒性的预测无效应浓度 (PNEC_{经口}) 为 0.04 mg·kg⁻¹, 该数值为我国 PFOS 对食物链产生次生毒性风险评价提供科学依据。

2) 初步对 PFOS 在太湖水生食物链中 9 种鱼和白鹭产生的次生毒性风险进行评价, 风险商均小于 1, 9 种鱼的风险商均未超过 0.5, 捕食鸟类白鹭的风险商最高为 0.52, 根据本文收集的数据, PFOS 对太湖水生食物链的次生毒性风险较小。

责任作者简介: 刘征涛 (1965—), 男, 环境化学博士, 研究员, 主要研究方向为环境污染生态学及环境毒理学, 发表学术论文 100 余篇。

参考文献(References):

3M Company. 2010. Technical review and reassessment of the uk environmental risk evaluation report for perfluorooctanesulfonate (PFOS) [R]. Minnesota: Minnesota Pollution Control Agency

Boudreau T M, Sibley P, Mabury S, *et al.* 2003. 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, 44(3): 307-313

Brooke D, Footitt A, Nwaogu T. 2004. Environmental risk evaluation report; Perfluorooctanesulphonate (PFOS) [R]. United Kingdom: Environment Agency

曹莹, 张亚辉, 雷昌文, 等. 2012. 环境中全氟化合物污染状况及生态毒性评估[J]. 环境与健康杂志, 29(6): 561-567

Case M T, York R G, Christian M S. 2001. Rat and rabbit oral developmental toxicology studies with two perfluorinated compounds [J]. International Journal of Toxicology, 20(2): 101-109

Christian M S, Hoberman A M, York R G. 1999. Oral (gavage) cross-fostering study of PFOS in rats [R]. Argus research laboratories,

Inc. Report no. 418-014; T-6295. 13. In EFSA, 2008

Desjardins D, Sutherland C A, Van Hoven R L, *et al.* 2001. PFOS; A 7-d toxicity test with duckweed (Lemna gibba G3) [R]. Project: 454-111. Wildlife International, Ltd

European Chemical Bureau. 2003. Technical guidance document on risk assessment in support of commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances, commission regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances, and directive 98/8/EC of the European parliament and of the council concerning the placing of biocidal products on the market [R]. Office for Official Publications of the European Communities; Luxembourg

Furdui V I, Stock N L, Ellis D A, *et al.* 2007. Spatial distribution of perfluoroalkyl contaminants in lake trout from the great lakes [J]. Environmental Science & Technology, 41(5): 1554-1559

Giesy J P, Kannan K. 2002. Perfluorochemical surfactants in the environment [J]. Environmental Science & Technology, 36(7): 146A-152A

Goldenthal E I, Jessup D C, Geil R G, *et al.* 1978a. Ninety-day subacute rat toxicity study [R]. Report no. 137-085. International Research and Development Corporation

Goldenthal E I, Jessup D C, Geil R G, *et al.* 1978b. Ninety-day subacute rhesus monkey toxicity study [R]. Report no. 137-092. International Research and Development Corporation

Gortner E G. 1980. Oral teratology study of fc-95 in rats [R]. Report no. 0680tr0008. Safety Evaluation Laboratory and Riker Laboratories. Inc. ?

Houde M, Bujas T A, Small J, *et al.* 2006. Biomagnification of perfluoroalkyl compounds in the bottlenose dolphin (tursiops truncatus) food web [J]. Environmental Science & Technology, 40(13): 4138-4144

Houde M, Czub G, Small J M, *et al.* 2008. Fractionation and bioaccumulation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) isomers in a lake ontario food web [J]. Environmental Science & Technology, 42(24): 9397-9403

Ji K, Kim Y, Oh S, *et al.* 2008. Toxicity of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid on freshwater macroinvertebrates (*Daphnia magna* and *Moina macrocopa*) and fish (*oryzias latipes*) [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 27(10): 2159-2168

金一和, 刘晓, 秦红梅, 等. 2004. 我国部分地区自来水和不同水体中的 PFOS 污染 [J]. 中国环境科学, 24(2): 166-169

- Kannan K, Newsted J, Halbrook R S, *et al.* 2002. Perfluorooctane sulfonate and related fluorinated hydrocarbons in mink and river otters from the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 36(12): 2566-2571
- Kannan K, Tao L, Sinclair E, *et al.* 2005. Perfluorinated compounds in aquatic organisms at various trophic levels in a great lakes food Chain [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 48(4): 559-566
- Kelly B C, Ikonou M G, Blair J D, *et al.* 2009. Perfluoroalkyl contaminants in an arctic marine food web; Trophic magnification and wildlife exposure [J]. *Environmental Science & Technology*, 43(11): 4037-4043
- Lau C, Thibodeaux J R, Hanson R G, *et al.* 2003. Exposure to perfluorooctane sulfonate during pregnancy in rat and mouse. II: Postnatal evaluation[J]. *Toxicological Sciences*, 74(2): 382-392
- Lau C, Anitole K, Hodes C, *et al.* 2007. Perfluoroalkyl acids: A review of monitoring and toxicological findings[J]. *Toxicological Sciences*, 99(2): 366-394
- Li M H. 2009. Toxicity of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid to plants and aquatic invertebrates [J]. *Environmental Toxicology*, 24(1): 95-101
- 刘超, 胡建信, 刘建国, 等. 2008. 镀铬企业周边全氟辛烷磺酰基化合物环境风险评价[J]. *中国环境科学*, 28(10): 950-954
- Luebker D J, York R G, Hansen K J, *et al.* 2005. Neonatal mortality from in utero exposure to perfluorooctanesulfonate (PFOS) in sprague-dawley rats; Dose - response, and biochemical and pharmacokinetic parameters[J]. *Toxicology*, 215(1/2): 149-169
- MacDonald M M, Warne A L, Stock N L, *et al.* 2004. Toxicity of perfluorooctane sulfonic acid and perfluorooctanoic acid to chironomus tentans [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(9): 2116-2123
- Martin J W, Mabury S A, Solomon K R, *et al.* 2003. Bioconcentration and tissue distribution of perfluorinated acids in rainbow trout (*oncorhynchus mykiss*) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 22(1): 196-204
- Martin J W, Whittle D M, Muir D C, *et al.* 2004. Perfluoroalkyl contaminants in a food web from lake ontario [J]. *Environmental Science & Technology*, 38(20): 5379-5385
- Moermond C, Verbruggen E, Smit C. 2010. Environmental risk limits for PFOS [R]. Rivm Report. 601714013/2010. A proposal for water quality standards in accordance with the water framework directive
- Morikawa A, Kamei N, Harada K, *et al.* 2006. The bioconcentration factor of perfluorooctane sulfonate is significantly larger than that of perfluorooctanoate in wild turtles (*trachemys scripta elegans* and *chinemys reevesii*): An ai river ecological study in Japan [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 65(1): 14-21
- Newsted J L, Coady K K, Beach S A, *et al.* 2007. Effects of perfluorooctane sulfonate on mallard and northern bobwhite quail exposed chronically via the diet [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 23(1): 1-9
- Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, *et al.* 2006. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(1): 32-44
- Seacat A M, Thomford P J, Hansen K J, *et al.* 2002. Subchronic toxicity studies on perfluorooctanesulfonate potassium salt in cynomolgus monkeys[J]. *Toxicological Sciences*, 68(1): 249-264
- Seacat A M, Thomford P J, Hansen K J, *et al.* 2003. Sub-chronic dietary toxicity of potassium perfluorooctanesulfonate in rats[J]. *Toxicology*, 183(1/3): 117-131
- Sepulvado J G, Blaine A C, Hundal L S, *et al.* 2011. Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids [J]. *Environmental Science & Technology*, 45(19): 8106-8112
- Sinclair E, Mayack D T, Roblee K, *et al.* 2006. Occurrence of perfluoroalkyl surfactants in water, fish, and birds from New York state[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 50(3): 398-410
- So M, Miyake Y, Yeung W, *et al.* 2007. Perfluorinated compounds in the Pearl River and Yangtze River of China[J]. *Chemosphere*, 68(11): 2085-2095
- Stevens J B, Coryell A. 2007. Surface water quality criterion for perfluorooctane sulfonic acid [R]. Minnesota Pollution Control Agency St. Paul, Minnesota. STS Project 200604796
- 苏红巧, 任东凯, 曹闪, 等. 2012. 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*, 7(5): 521-524
- Taniyasu S, Kannan K, Horii Y, *et al.* 2003. A survey of perfluorooctane sulfonate and related perfluorinated organic compounds in water, fish, birds, and humans from Japan [J]. *Environmental Science & Technology*, 37(12): 2634-2639
- Thibodeaux J R, Hanson R G, Rogers J M, *et al.* 2003. Exposure to perfluorooctane sulfonate during pregnancy in rat and mouse. I: Maternal and prenatal evaluations [J]. *Toxicological Sciences*, 74(2): 369-381
- Thomford P. 2002. 104-week dietary chronic toxicity and carcinogenicity study with perfluorooctane sulfonic acid potassium salt (PFOS; t-6295) in rats [R]. Covance Laboratories, Inc. Report no. 6329-183
- Tomy G T, Pleskach K, Ferguson S H, *et al.* 2009. Trophodynamics of some pfc's and bfr's in a western Canadian arctic marine food web [J]. *Environmental Science & Technology*, 43(11): 4076-4081
- Vlaardingen P L A V, Verbruggen E M J. 2007. Guidance for the derivation of environmental risk limits within the framework of international and national environmental quality standards for substances in the Netherlands [R]. Bilthoven, the Netherlands: Rivm report no. 601782001/2007
- Wetzel L T. 1983. Rat teratology study, T- 3351, Final Report [R]. Report no. 154- 160. Hazleton Laboratories America, Inc
- Xu J, Guo C S, Zhang Y, *et al.* 2014. Bioaccumulation and trophic transfer of perfluorinated compounds in a eutrophic freshwater food web [J]. *Environmental Pollution*, 184: 254- 261
- Yang L P, Zhu L Y, Liu Z T. 2011. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 83(6): 806- 814
- Yang L P, Tian S Y, Zhu L Y, *et al.* 2012. Bioaccumulation and distribution of perfluoroalkyl acids in seafood products from Bohai Bay, China [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31(9): 1972- 1979
- 张亚辉, 曹莹, 周腾耀, 等. 2013. 我国环境中 PFOS 的预测无效应浓度 [J]. *中国环境科学*, 33(9): 1392- 1398
- Zhao L X, Zhu L Y, Yang L P, *et al.* 2012. Distribution and desorption of perfluorinated compounds in fractionated sediments [J]. *Chemosphere*, 88(11): 1390- 1397