

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017031702

张佳骥, 薛晓燕, 黄楚珊, 等. 珠江三角洲同沙水库全氟辛酸和全氟辛烷磺酸污染现状调查[J]. 环境化学, 2017, 36(12): 2600-2608.

ZHANG Jiaji, XUE Xiaoyan, HUANG Chushan, et al. Survey of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in surface water from Tongsha Reservoir of Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(12): 2600-2608.

珠江三角洲同沙水库全氟辛酸和 全氟辛烷磺酸污染现状调查*

张佳骥^{1,2,3,4} 薛晓燕^{1,4} 黄楚珊^{2,3} 陈绵彪^{2,3} 张丽娟^{2,3}
任明忠^{2,3} 胡国成^{2,3**} 刘 珊^{1,4}

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 西安, 710064; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 环境健康研究中心, 广州, 510535;
3. 国家环境保护环境污染健康风险评估重点实验室, 广州, 510535;
4. 长安大学, 旱区地下水与生态效应教育部重点实验室, 西安, 710064)

摘 要 利用高效液相色谱与质谱联用技术(HPLC-MS/MS)对珠江三角洲同沙水库 19 个表层水样中 PFOA 和 PFOS 含量水平进行了分析,阐述了两种化合物在同沙水库中的污染现状.同沙水库表层水体中 PFOA 和 PFOS 浓度范围分别为 2.15—26.70 ng·L⁻¹和 nd—44.85 ng·L⁻¹,其中库区中两种化合物的平均浓度要略高于入库支流.入库支流中 PFOA 和 PFOS 相对百分含量与库区相比,波动幅度较大,说明入库支流受到工业活动影响更明显.水库中一些点位 PFOA 和 PFOS 含量较为突出,其原因可能与周围的各种工业活动以及所处的特殊地理位置等因素有关.与国内外其他地区水体相比,同沙水库中 PFOA 和 PFOS 含量水平在国内处于较高水平,而在国际上处于相对较低的水平.

关键词 全氟辛酸, 全氟辛烷磺酸, 污染现状, 同沙水库, 珠江三角洲.

Survey of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in surface water from Tongsha Reservoir of Pearl River Delta, South China

ZHANG Jiaji^{1,2,3,4} XUE Xiaoyan^{1,4} HUANG Chushan^{2,3} CHEN Mianbiao^{2,3}
ZHANG Lijuan^{2,3} REN Mingzhong^{2,3} HU Guocheng^{2,3**} LIU Shan^{1,4}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710064, China;
2. Center for Environmental Health Research, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou, 510535, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, Guangzhou, 510535, China; 4. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, 710064, China)

Abstract: As a class of emerging environmental persistent organic pollutants, perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) have received much attention on their distributions in environment. Nineteen surface water samples were collected from Tongsha Reservoir of Pearl River Delta, South China in the present study. Concentrations of PFOA and PFOS were determined by high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) system. The

2017 年 3 月 17 日收稿 (Received: March 17, 2017).

* 国家环境保护公益性行业科研专项(201309049, 201009026) 和水体污染控制与治理重点专项子课题(2015ZX07206-06)资助.

Supported by the National Environmental Protection Public Welfare Industry Targeted Research Fund (201309049, 201009026) and the National Water Pollution Control and Treatment Science and Technology Major Project (2015ZX07206-06).

** 通讯联系人, Tel: 18902269816, E-mail: huguocheng@scies.org

Corresponding author, Tel: 18902269816, E-mail: huguocheng@scies.org

concentrations of PFOA and PFOS ranged from 2.15—26.70 ng · L⁻¹ and nd—44.85 ng · L⁻¹, respectively. The average concentrations of the PFOA and PFOS in the central area of Tongsha Reservoir were higher than those observed in its tributary. The relative abundance of PFOA and PFOS fluctuated significantly in Tongsha Reservoir's tributary. The results indicated that more industrial and agricultural activities had found in its tributary. The concentrations of PFOA and PFOS in TS3 and TS7 surface water samples were higher than those of other samples from Tongsha Reservoir. This might be due to their special locations, the various manufacturing and industrial activities. The concentrations of PFOA and PFOS in Tongsha Reservoir were higher than those of other regions in China, and lower than those of the regions in the world.

Keywords: perfluorooctanoic acid, perfluorooctane sulfonate, contamination status, Tongsha Reservoir, Pearl River Delta.

随着化学工业的迅速发展,越来越多的化合物满足着人们的生产生活需要.全氟化合物(perfluorocompound, PFCs)是一类人工合成的化合物,其中全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)和全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)是目前最受关注的两种典型的全氟化合物.由于其结构中含有高能量的 C-F 化学键,使其具有较强的热、化学稳定性以及疏水疏脂的特性,因此被广泛应用于灭火剂、农用化学品、表面活性剂、清洗剂、化妆品、纺织品、毛毯制造、室内装潢、皮革制品、航空业、电镀等诸多工业生产和生活用品中.由于 PFOA 和 PFOS 具有环境持久性、生物累积性以及毒性等负面特征^[1-2],其带来的环境问题受到了人们的广泛关注.研究显示,随着 PFOA 和 PFOS 的大量生产、使用以及废物处置等,使其广泛存在于各种环境介质中^[3-6],并通过在生物体中的累积沿食物链不断放大,最终可能对生态系统和人类健康造成潜在危害^[7-10].目前我国已经陆续展开了关于 PFOA 和 PFOS 污染特征的研究,并在各种环境介质中发现多种 PFCs 同时存在^[11-13].水环境作为该类化合物的主要分布和迁移介质之一,逐渐成为人们研究 PFOA 和 PFOS 污染特征的主要对象.

珠江三角洲是我国经济发达的地区之一,人口密度大,城镇化进程快,同时也是我国四大工业基地之一.随着经济社会的发展,珠江三角洲日益突出的环境污染问题,尤其是持久性有机污染物(POPs)污染问题受到了广泛关注.本文以珠江三角洲地区的同沙水库为研究对象,分析同沙水库水体中 PFOA 和 PFOS 的含量水平,研究 PFOA 和 PFOS 的空间分布规律并阐明其污染现状,为水库环境管理提供依据.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

珠江三角洲地区是我国重要的经济中心区域,也是世界产业转移的首选区域之一,初步形成了电子信息、家电等企业群和产业群.该地区地势平坦,高温多雨,以南亚热带季风气候为主.同沙水库为该地区的水库型备用水源,属于珠江流域东江支流水系.水库位于东莞市区东南 8 km,寒溪水支流黄沙河中游,由黄公山、虎形山等山峰环抱.水库流域面积约为 100 km²,总库容 6520 万 m³,人口密度达到每平方公里 4000 人.流域内工业高度密集,以家具、印刷、电子三大产业为支柱,形成五金、塑胶、皮革、制鞋、化工等并存的多元化工业群体.库区上游的生活污水、地表径流及处理后的工业废水基本全部汇入水库.

1.2 样品采集

本研究在同沙水库库区及其入库支流布设采样点 19 个,其中库区中设采样点 6 个,入库支流设采样点 13 个,采样点分布见图 1.在每个采样点用聚丙烯瓶(取样前用甲醇和超纯水淋洗)采集表层水样 1 L,同时测定水质常规指标,采样现场记录见表 1.采集好的水样密封后,放置在保温盒内保存,带回实验室后于 -20 ℃ 冷藏保存.

1.3 主要试剂及仪器

试剂:PFOA、PFOS 标准品及内标化合物(¹³C₄-PFOS 和¹³C₄-PFOA)均购于美国威灵顿公司,纯度>98%;Waters Oasis® -WAX(6 cc, 150 mg)净化柱购于美国 Waters 公司;尼龙膜为 Sarorius stedim.

Germany SARTOLON POLYAMID;色谱纯甲醇购于美国 Fisher 公司;15 mL 离心管购于康宁公司;醋酸铵、氨水等溶剂均为色谱级.其他试剂均为分析纯,所用试剂均用 Milli-Q 水配制.

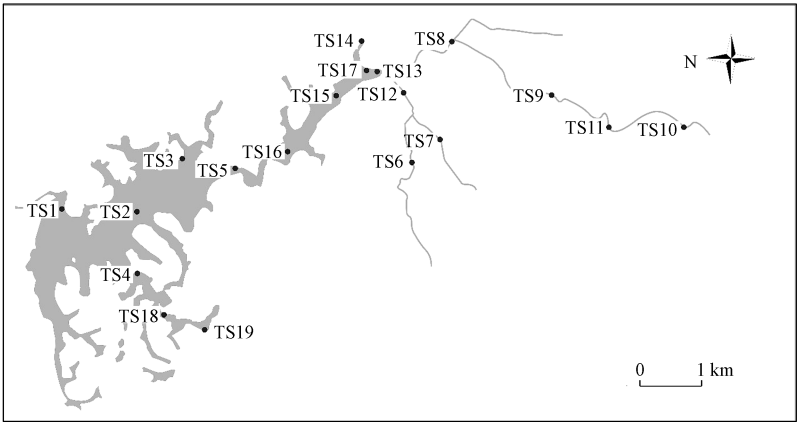


图 1 同沙水库采样点分布图

Fig.1 Location of surface water sampling sites in Tongsha Reservoir

表 1 同沙水库现场采样记录

Table 1 Record of Sampling in surface water from Tongsha Reservoir

编号 Number	pH	溶解氧 Dissolved oxygen/ (mg·L ⁻¹)	电导率 Electric conductivity/ (us·cm ⁻¹)	水温 Temperature/℃	透明度 Transparency/cm	备注 Remarks
TS1	7.88	8.96	328	16.3	40	清澈透明
TS 2	7.87	8.90	329	17.0	90	清澈透明、少量气泡
TS 3	7.85	8.68	254	17.5	30	水浊、悬浮物
TS 4	7.35	4.58	390	17.9	40	水浊、泥量大、有气泡
TS 5	8.47	10.84	358	17.5	40—50	较清澈、透明度较高
TS 6	8.03	2.27	560	16.4	20—30	水浊、无油膜、漂浮物
TS 7	7.46	3.90	858	17.7	20—30	水浊、有垃圾、岸有青苔
TS 8	7.92	2.88	591	19.1	10	黑色油膜、透明度低、两岸垃圾多、臭味
TS 9	7.80	4.36	454	18.2	20—30	水面布满油膜、水体浑浊发黑、垃圾较少
TS 10	7.59	3.32	293	18.9	10—20	水面油膜多、青苔多、岸边有垃圾
TS 11	7.83	2.63	298	17.4	30—40	旁边有塑胶厂、水面微浊、有生活垃圾
TS 12	8.19	0.82	817	16.0	10—20	水体污浊、有生活垃圾
TS 13	7.55	3.35	511	16.7	20—30	水体污浊、多垃圾
TS 14	7.82	0.94	663	18.3	10—20	水体布满油膜、褐色漂浮膜、垃圾较多
TS 15	7.88	5.21	507	18.3	70	有臭味、少量气泡
TS 16	8.59	11.00	422	17.7	60	靠近生活区、较清澈
TS 17	6.72	8.54	475	17.5	20—30	有垃圾、油膜
TS 18	7.35	8.42	414	17.3	80	无油膜、漂浮物
TS 19	7.18	7.50	418	19.3	80	有白色泡沫、靠近污水厂

仪器:Supelco 固相萃取装置;台式高速冷冻离心机(Thermo Fisher);氮吹仪(型号 HGC-12A);Milli-Q 水处理系统(Biocel Milli-Q);真空泵(津腾 GM-0.33A);快速混匀器(VORTEX-2 GENIE);超声清洗器(型号 UC-300A1);Agilent 1260 系列快速液相色谱(美国,Agilent-AB SCIEX)4000 Qtrap 串联三重四极杆质谱(美国,AB SCIEX)联用仪.

1.4 样品前处理

水样采用 0.45 μm 尼龙膜过滤,过滤后取 500 mL 水样于聚丙烯瓶中,并加入 2 ng 内标(¹³C₄-PFOS 和¹³C₄-PFOA),静置 30 min.每次用 60 mL 塑料注射器将 30 mL 水样加入到 WAX 萃取柱(使用前依次用

4 mL 0.5% V/V 氨的甲醇溶液、4 mL 甲醇和 4 mL 超纯水淋洗活化),并将流速控制在每秒 1—2 滴,在 WAX 萃取柱填料即将露出液面时再重新加入水样.水样净化后,先用 4 mL pH 4 的醋酸铵溶液冲洗,再用超纯水冲洗数次,在负压下抽干柱中的水,再依次用 4 mL 甲醇、4 mL 0.5% 氨的甲醇溶液洗脱并收集.洗脱液在高纯氮气下挥发,用甲醇定容至 1.0 mL,转移至离心管中以 10000 r·min⁻¹ 的转速离心 10—20 min,最后将离心好的样品转移至样品瓶中,待分析.

1.5 仪器分析

以液相色谱-三种四极杆质谱联用仪(LC-MS/MS)定性、定量分析水体中 PFOA 和 PFOS,液相色谱仪为 Agilent 1260 系列,三重四极杆质谱仪为 API4000 三重四极杆串联质谱系统(美国 AB).色谱柱为 C₁₈(美国 Waters 公司)柱,流动相 A 为甲醇,流动相 B 为 25 mmol·L⁻¹ 醋酸铵溶液,流速为 500 μL·min⁻¹.进样体积为 1.0 μL.采用二元梯度洗脱的方式,洗脱程序为:0—4 min,70% A—0A,4—7.1 min,0A—70% A;7.1—10 min,70% A—70% A.

质谱条件:采用电喷雾离子化源(ESI),负离子模式;气帘气 0.24 MPa;碰撞气 0.021 MPa,离子喷雾电压-2000 V,温度 375 ℃,质谱选择离子对信息如表 2 所示.

表 2 质谱选择离子对信息
Table 2 Information of the selected ion monitoring

化合物 Compounds	母离子 Q1 Mass	子离子 Q3 Mass	化合物 Compounds	母离子 Q1 Mass	子离子 Q3 Mass
PFOA	412.9	368.9	PFOS	499	79.9
¹³ C4-PFOA	416.8	372	¹³ C4-PFOS	502.9	79.9

1.6 质量控制

为避免出现交叉污染,本实验中所用材料均为聚丙烯材质,色谱管路全部为 PEEK 塑料管路或不锈钢管路.每批样品(10 个)中,设置方法空白保证检测结果的准确性.同时设置空白加标、基质加标,保证方法及处理过程的回收率.所有玻璃器皿用自来水洗净后,进行超声清洗,然后依次用自来水、蒸馏水清洗,105 ℃ 烘干,所有玻璃器皿在使用前用甲醇冲洗.用内标法进行定量分析,PFOA 的基质加标回收率为 102.6%—109.4%,相对标准偏差为 2.59%;PFOS 的基质加标回收率为 94.8%—113.4%,相对标准偏差为 7.92%,符合实验室质量控制相对标准偏差小于 15% 的要求.PFOA 和 PFOS 定量分析的标准曲线(0.01—5.00 μg·L⁻¹)线性相关系数大于 0.99,如图 2 所示.用溶剂空白和标准样品保证仪器稳定性,溶剂空白中 PFOA 和 PFOS 的含量水平如表 3 所示.

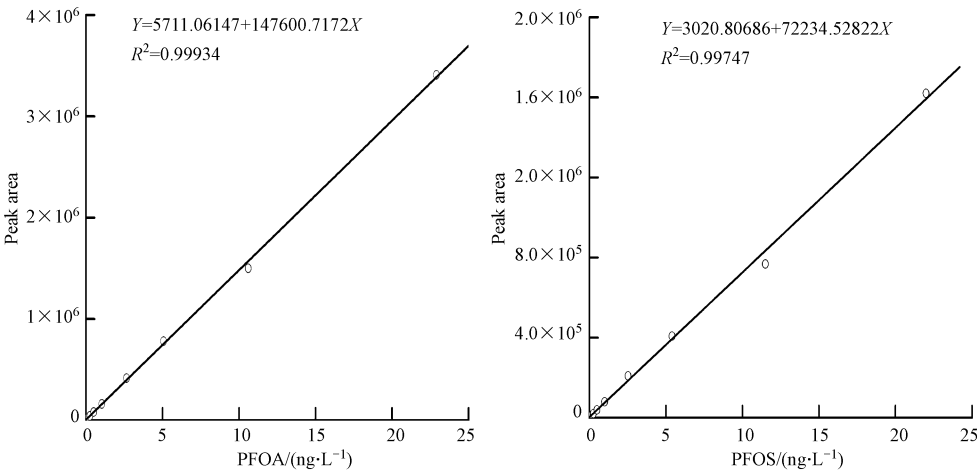


图 2 PFOA 和 PFOS 标准曲线
Fig.2 Standard curve of PFOA and PFOS

1.7 数据处理

本文中 PFCs 含量水平为 PFOA 和 PFOS 两种污染物含量水平之和,单位为 ng·L⁻¹.分析测试结果未

经回收率校正.利用 SPSS11.0 软件进行独立样本 T 检验,比较同沙水库不同区域中 PFOA 和 PFOS 的含量差异水平($P>0.05$).

表 3 溶剂空白中 PFOA 和 PFOS 的含量水平
Table 3 Concentrations of PFOA and PFOS in solvent blank

编号 Number	PFOA 峰面积 PFOA peak area	PFOA/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	PFOS 峰面积 PFOS peak area	PFOS/ ($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)
空白样品 1	0	nd	0	nd
空白样品 2	0	nd	0	nd

注: nd,表示未检出.nd,not detected.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 PFOA 和 PFOS 污染现状

同沙水库库区及其入库支流表层水样中 PFOA 和 PFOS 监测结果如表 4 所示.在所有样品中,除了样品 TS6 未检测出 PFOS 外,其余样品中均不同程度检测出 PFOA 和 PFOS.从表 4 中可以看出,同沙水库表层水体 PFCs 总量范围为 $4.31\text{--}52.80\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,其中 PFOA 和 PFOS 的浓度范围分别为 $2.15\text{--}26.70\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\text{nd}\text{--}44.85\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,库区 PFOA 和 PFOS 平均浓度分别为 $19.68\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $17.57\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,高于入库流水体中 PFOA 和 PFOS 的平均浓度,这与上游的生活污水、地表径流及处理后的工业废水排入有关,PFOA 和 PFOS 随水流入库区,不断在库区累积.在库区水体中,PFOS 总体浓度水平低于 PFOA;而在入库流水体中,PFOS 总体浓度水平高于 PFOA.PFOS 含量水平最大值出现在 TS7 采样点,而最低值出现在 TS11 采样点;PFOA 含量水平最大值出现在 TS3 采样点,最低值也出现在 TS11 采样点.此外,PFOA 和 PFOS 含量水平较高的点还有 TS1、TS12、TS16 等.

表 4 同沙水库 PFOA 和 PFOS 含量水平
Table 4 Concentrations of PFOA and PFOS in Tongsha Reservoir

采样区域 Sampling area	编号 Number	PFOS/($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	PFOA/($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)	PFCs/($\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)
同沙水库库区($n=6$)	TS1	19.95	25.75	45.70
	TS2	10.40	9.20	19.60
	TS3	22.25	26.70	48.95
	TS4	12.15	12.95	25.10
	TS5	20.65	23.35	44.00
	TS16	20.00	20.10	40.10
同沙水库入库支流($n=13$)	TS6	nd	12.75	12.75
	TS7	44.85	7.95	52.80
	TS8	7.70	16.65	24.35
	TS9	6.85	11.20	18.05
	TS10	5.95	5.05	11.00
	TS11	2.16	2.15	4.31
	TS12	23.60	9.35	32.95
	TS13	16.00	9.00	25.00
	TS14	5.55	2.44	7.99
	TS15	15.40	16.15	31.55
	TS17	7.95	11.10	19.05
	TS18	11.55	11.90	23.45
	TS19	10.40	11.35	21.75

注: nd,表示未检出.nd,not detected.

研究显示,中国水环境中的 PFOA 和 PFOS 主要来自于含有两类化合物的工业废水与生活污水^[3].

同沙水库入库支流周边的工业园区类型不同,主要涉及印染、化工及电子工业等.大量的生活污水和经处理的工业污水进入水体,使得处于电子设备、包装材料、皮革制品等工业企业附近的 TS7、TS12、TS16 等采样点处的 PFCs 含量较高.距离工业区较远的 TS3、TS5 采样点 PFCs 含量较高,与周边生活污水排入以及两点所处的特殊的水动力环境有关,使得上游水体中 PFCs 不断在此积累.TS11 采样点处于农田附近,其上游主要以排入生活污水为主,水体中纳入的 PFCs 含量较少,途中由于河水稀释作用等因素,使得 TS11 采样点处的 PFCs 含量水平很低.这一结果与浑河—大辽河水系和东湖的研究结果基本一致^[14-15].

同沙水库库区和入库支流中 PFOA 和 PFOS 的相对百分含量如图 3 所示.库区水体样品中,PFOA 和 PFOS 相对百分含量范围分别为 46.94%—56.35%和 43.65%—53.06%,平均值分别为 52.10%和47.90%;入库支流水体样品中,PFOA 和 PFOS 相对百分含量范围分别为 15.06%—68.38%和 31.62%—84.94%,平均值分别为 45.71%和 54.29%.从 PFOA 和 PFOS 的组成模式可以看出,入库支流水体中 PFOA 和 PFOS 的相对百分含量范围波动较大,而库区水体比较稳定,PFOA 和 PFOS 相对百分含量波动不大,说明入库支流受人类活动影响较大.

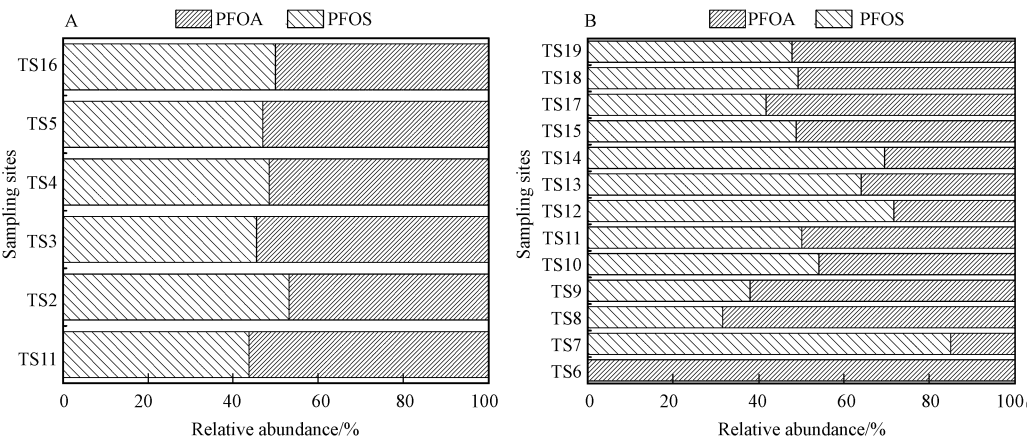


图 3 同沙水库库区(A)、入库支流(B)水体中 PFOS 和 PFOA 组成模式

Fig.3 Compositional patterns of PFCs in the surface water from Tongsha Reservoir (A) and its tributary (B)

2.2 PFOA 和 PFOS 含量与其他地区比较

同沙水库水体中 PFOA 和 PFOS 的浓度范围分别为 2.15—26.70 ng·L⁻¹和 nd—44.85 ng·L⁻¹,平均浓度分别为 12.90 ng·L⁻¹和 14.63 ng·L⁻¹.两化合物的在不同地区的含量水平可以反映出当地的经济发展和环境污染情况.国内外水体中两种化合物的含量见表 5.从表 5 中可以看出,与国内地表水相比,同沙水库中 PFOA 含量除了低于钱塘江、东湖、太湖、长三角地表水以及江苏淮河流域外,均高于其他水体;PFOS 含量除了低于天津海河和东湖外,均高于其他水体.说明同沙水库中 PFOA 和 PFOS 含量在国内处于较高水平,当地涉及两种化合物的企业较为密集.与世界上一些水体相比,两化合物含量除高于意大利 Lake Maggiore、日本 Lake Biwa、加拿大 Highland Creek 和美国 Great Lakes 外,均低于其他水体,说明同沙水库中 PFOA 和 PFOS 含量在世界上处于中等偏低水平.

表 5 同沙水库表层水体 PFOA 和 PFOS 含量与国内外其他地区比较

Table 5 Comparison of PFOA and PFOS concentrations in water samples from Tongsha Reservoir with other region around the world

采样点 Sampling area	PFOA/(ng·L ⁻¹)	PFOS/(ng·L ⁻¹)	参考文献 References
同沙水库	2.15—26.70(12.90)	nd—44.85(14.63)	本研究
东湖	15.8—158(55.0)	9.06—132(60.4)	[14]
浑河	1.52—6.32	nd—0.91	[15]
大辽河	5.81—7.12	1.54—1.65	[15]
细河	6.71—18.1	0.810—13.0	[15]

续表5

采样点 Sampling area	PFOA/(ng·L ⁻¹)	PFOS/(ng·L ⁻¹)	参考文献 References
东江流域	0.01—1.25(0.25)	0.01—2.93(0.97)	[16]
珠江河口	0.24—16	0.02—12	[17]
北京地下水	<MQLs—20.3(7.9)	<MQLs—7.4(2.5)	[18]
天津海河	(3.7)	4.2—42(15)	[19]
鄱阳湖	0.30—1.89	nd—0.71(0.35)	[20]
长三角地表水	2.0—260	nd—14	[21]
江苏淮河流域	(18)	(4.7)	[22]
钱塘江	65.9—102.4	nd—0.798	[23]
松花江	0.02—2.68(1.21)	0.06—8.04(0.17)	[24]
黄河河口	2.04—3.36	0.86—1.31	[25]
沈阳地区水环境	nd—2.83(1.11)	nd—5.71(2.13)	[26]
太湖	20.81—43.19	7.23—44.34	[27]
波兰地表水	<0.5—18	<0.5—150	[28]
巴伦西亚 L'Albufera 自然公园	0.99—120(49.5)	0.94—58.1(14.2)	[29]
印度泰米尔纳德邦地表水	4—93	3—29	[30]
日本 Lake Biwa	8.7—26	0.8—5.3	[31]
日本 Yodo River	4.20—2600	0.40—123	[32]
意大利 Lake Maggiore	1.8—2.9(2.4±0.4)	7.2—8.6(7.8±0.6)	[33]
加拿大 Highland Creek	2.2—7.9	2.1—6.5	[34]
美国 Great Lakes	4.4—22	2.6—17	[35]

注：nd,表示未检出;<MQLs 表示低于方法定量限。nd,not detected;<MQLs,lower than the method quantity limits.

3 结论(Conclusion)

(1)同沙水库表层水体均检出了 PFOA 和 POFS,总量范围为 4.31—52.80 ng·L⁻¹,其中 PFOA 和 PFOS 浓度范围分别为 2.15—26.70 ng·L⁻¹和nd—44.85 ng·L⁻¹,表明同沙水库表层水体受到了不同程度的污染,其中库区污染较为严重,入库支流污染较轻.

(2)入库支流与库区相比,PFOA 和 PFOS 相对百分含量范围波动较大,表明入库流水体受到人类活动影响较大,水体中 PFCs 来自多种污染源;库区水体中 PFCs 则是污染源的输入与不断累积的结果.

(3)同沙水库表层水体中 PFOA 和 PFOS 含量在世界范围内还处于较低水平,但与国内水体相比,处于较高水平,其可能带来的潜在风险需引起有关部门关注.

参考文献(References)

[1] 孙丽莎,陆光华,叶秋霞,等. 全氟化合物的分布、累积及生态毒理学效应[J]. 四川环境, 2012, 31(2) :119-123.
SUN L S, LU G H, YE Q X, et al. Distribution and accumulation of PFCs and ecotoxicological effects[J]. Sichuan Environment, 2012, 31(2) : 119-123(in Chinese).

[2] STAHL T, MATTERN D, BRUNN H. Toxicology of perfluorinated compounds[J]. Environmental Sciences Europe, 2011, 23(38) : 1-52.

[3] LIU Z Y, LU Y L, WANG P, et al. Pollution pathways and release estimation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in central and eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 580:1247-1256.

[4] MORIWAKI H, TAKATAH Y, ARAKAWA R, et al. Concentrations of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in vacuum cleaner dust collected in Japanese homes[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2003, 5(5) : 753-757.

[5] 李法松,何娜,谭雪波,等. 全氟化合物在天津大黄堡湿地多介质分布研究[J]. 环境化学, 2011, 30(3) :638-644.
LI F S, HE N, QIN X B, et al. The distribution of perfluorinated compounds in multiple environmental media from Dahuangpu wetland natural conservation, Tianjin, China[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(3) :638-644(in Chinese).

[6] 黄楚珊,张丽娟,胡国成,等. 全氟辛烷磺酸盐和全氟辛酸在水环境及水生生物体内积累的研究进展[J]. 环境科技, 2014, 27(5) :66-71.

- HUANG C S, ZHANG L J, HU G C, et al. Research progress of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid accumulation in the aquatic environment and aquatic organisms[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 27(5):66-71(in Chinese).
- [7] POST G B, COHN P D, COOPER K R. Perfluorooctanoic acid (PFOA), an emerging drinking water contaminant: A critical review of recent literature[J]. *Environmental Research*, 2012, 116:93-117.
- [8] LOI E I, YEUNG L W, TANIYASU S, et al. Trophic magnification of poly-and perfluorinated compounds in a subtropical food web[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45(13):5506-5513.
- [9] KULKARNI S S, BYUNG M K, YUN C H. Prenatal exposure to perfluorinated compounds affects thyroid hormone levels in newborn girls [J]. *Environmental International*, 2016, 94:607-613.
- [10] 刘嘉颖. 我国居民典型全氟有机化合物人体暴露水平与暴露途径研究[D]. 北京:中国疾病预防控制中心, 2009.
- LIU J Y. Methodology and exposure assessment of perfluorinated organic compounds[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2009(in Chinese).
- [11] 胡国成, 郑海, 张丽娟, 等. 珠江三角洲土壤中全氟化合物污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(S1):37-42.
- HU G C, ZHENG H, ZHANG L J, et al. Contamination characteristics of perfluorinated compounds in soil from Pearl River Delta, South China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(S1):37-42(in Chinese).
- [12] 陈舒. 中国东部地区典型全氟化合物污染地理分布特征及来源辨析[D]. 北京:中国地质科学院, 2016.
- CHEN S. Distribution and source analysis of typical perfluorinated compounds in the eastern China and the Grand Canal[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2016(in Chinese).
- [13] 刘薇, 金一和, 全雯, 等. 沈阳市降雪中 PFOS 和 PFOA 污染现状调查[J]. *环境科学*, 2007, 28(9):2068-2073.
- LIU W, JIN Y H, JIN Q, et al. Investigation of PFOS and PFOA pollution in snow in Shenyang, China[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9):2068-2073(in Chinese).
- [14] 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 等. 东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸空间分布特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(8):2586-2591.
- CHEN J, WANG L L, ZHU H D, et al. Spatial distribution of perfluorooctanoic acids and perfluorinate sulphonates in surface water of East Lake[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(8):2586-2591(in Chinese).
- [15] 巩秀贤, 李斌, 刘玉英, 等. 浑河-大辽河水系水体与沉积物中典型全氟化合物的污染水平及生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(7):2177-2184.
- GONG X X, LI B, LIU Y Y, et al. Pollution levels and ecological risk assessment of typical perfluorinated compounds in riverine water and sediments of Hun River and Daliao River Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(7):2177-2184(in Chinese).
- [16] 郑海, 胡国成, 许振成, 等. 东江流域表层沉积物中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸含量水平[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(4):778-782.
- ZHENG H, HU G C, XU Z C, et al. Contamination characteristics of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in surface sediments from Dongjiang River, South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):778-782(in Chinese).
- [17] SO M K, TANIYASU S, YAMASHITA N, et al. Perfluorinated compounds in coastal waters of Hong Kong, South China, and Korea[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(15):4056-4063.
- [18] 高杰, 李文超, 李广贺, 等. 北京部分地区地下水中全氟化合物的污染水平初探[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(2):355-363.
- GAO J, LI W C, LI G H, et al. Preliminary investigation on perfluorinated compounds in groundwater in some areas of Beijing, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(2):355-363(in Chinese).
- [19] LI F S, SUN H W, HAO Z N, et al. Perfluorinated compounds in Haihe river and Dagu Drainage Canal in Tianjin, China[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(2):265-271.
- [20] 张大文, 张莉, 魏益华, 等. 鄱阳湖表层水中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸污染现状调查[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(7):885-890.
- ZHANG D W, ZHANG L, WEI Y H, et al. Investigation of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) pollution in surface water of Poyang Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(7):885-890(in Chinese).
- [21] SO M K, MIYAKE Y, YEUNG W Y, et al. Perfluorinated compounds in the Pearl River and Yangtze River of China[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(11):2085-2095.
- [22] YU N Y, SHI W, ZHANG B, et al. Occurrence of perfluoroalkyl acids including perfluorooctane sulfonate isomers in Huai River Basin and Taihu Lake in Jiangsu Province, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(2):710-717.
- [23] YING H, JIAN X, QING J, et al. The Concentration Levels of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in Qiantang River Waters of China[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 3248(955):2106-2109.
- [24] 刘冰, 金一和, 于其麟, 等. 松花江水系江水中全氟辛烷磺酸和全氟辛酸污染现状调查[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(3):480-486.
- LIU B, JIN Y H, YU Q L, et al. Investigation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) pollution in the surface water of the Songhua River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3):480-486(in Chinese).
- [25] 路国慧, 沈亚婷, 何俊, 等. 高效液相色谱-串联质谱法测定黄河河口段水中全氟化合物的初步研究[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(1):147-153.

- LU G H, SHEN Y T, HE J, et al. Preliminary study on perfluorinated compounds in waters from the Yellow River Estuary Area by utilizing liquid chromatography-mass spectrometry/mass spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1):147-153(in Chinese).
- [26] 杨永亮, 路国慧, 杨伟贤, 等. 沈阳地区水环境和生物样品中全氟化合物的污染分布特征[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2097-2107.
- YANG Y L, LU G H, YANG W X, et al. Levels and distribution of perfluorinated compounds in water and biological samples from the Shenyang area, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10):2097-2107(in Chinese).
- [27] ZHU P F, LING X, LIU W W, et al. Simple and fast determination of perfluorinated compounds in Taihu Lake by SPE-UHPLC-MS/MS [J]. *Journal of Chromatography B*, 2016, 1031:61-67.
- [28] ROSTKOWSKI P, STANIYASU S, YAMASHITA N, et al. Survey of perfluorinated compounds (PFCs) in surface waters of Poland[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2009, 44(14):1518-1527.
- [29] PICO Y, BLASCO C, FARRÉ M, et al. Occurrence of perfluorinated compounds in water and sediment of L'Albufera Natural Park (València, Spain) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(4):946-957.
- [30] GANESAN S, NAMASIVAYAM V. Assessment of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in surface water Tamil Nadu, India [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1):612-618.
- [31] TSUDA T, INOUE A, IGAWA T, et al. Survey on PFOS and PFOA Concentrations in Water of Lake Biwa and Rivers around Lake Biwa and Estimation of their Loading Amounts into Lake Biwa from the Rivers[J]. *Journal of Environmental Chemistry*, 2011, 20(3):259-263.
- [32] NGUYEN P H L, SHIGEO F, SHUHEI T, et al. Contamination of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in surface water of the Yodo River basin (Japan)[J]. *Desalination*, 2008, 226(1-3):338-347.
- [33] LOOS R, WOLLGAST J, HUBER T, et al. Polar herbicides, pharmaceutical products, perfluorooctanesulfonate (PFOS), perfluorooctanoate (PFOA), and nonylphenol and its carboxylates and ethoxylates in surface and tap waters around Lake Maggiore in Northern Italy[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2007, 387(4):1469-1478.
- [34] MEYER T, SILVA A O D, SPENCER C, et al. Fate of perfluorinated carboxylates and sulfonates during snowmelt within an urban watershed[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19):8133-8199.
- [35] KANNAN K, TAO L, SINCLAIR E, et al. Perfluorinated compounds in aquatic organisms at various trophic levels in a Great Lakes food chain[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2005, 48(4):559-566.