

汪磊 张彰 张宪忠 等. 2011. 污水处理厂中全氟化合物的污染研究[J]. 环境科学学报, 31(7): 1363-1368

Wang L, Zhang Z, Zhang X Z, et al. 2011. Removal of perfluorinated compounds by wastewater treatment plants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(7): 1363-1368

污水处理厂中全氟化合物的污染研究

汪磊^{1,*}, 张彰¹, 张宪忠¹, 孙淑娟², 孙红文¹

1. 环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学), 天津 300071

2. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

收稿日期: 2010-10-12

修回日期: 2010-11-17

录用日期: 2010-12-06

摘要: 为研究全氟化合物在污水厂中的去除效率和环境行为, 对泰安市 2 座污水处理厂进出水中不同链长的全氟磺酸和全氟羧酸的存在与分布进行了采样调查, 并分析了全氟辛烷磺酸(PFOS)和全氟辛烷羧酸(PFOA)在采用曝气-A²O 工艺的污水处理厂各单位中的浓度变化情况。研究发现, 上述污水厂进出水中全氟化合物的污染程度较轻, 其中, PFOA、PFOS 和全氟癸烷羧酸(PFDA)是代表性污染物。曝气工艺对于污水中全氟化合物的去除具有一定作用, 而厌氧/好氧过程对于全氟化合物的去除作用均不明显。回流污泥可能使部分全氟化合物在厌氧池内再次释放到水相中。紫外消毒过程后水中 PFOA 和 PFOS 的浓度均有所提高, 这可能是光氧化过程导致了污水中前体物质向全氟化合物的转化。

关键词: 污水处理厂; 工艺单元; 全氟化合物; PFOA; PFOS

文章编号: 0253-2468(2011)07-1363-06

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

Removal of perfluorinated compounds by wastewater treatment plants

WANG Lei^{1,*}, ZHANG Zhang¹, ZHANG Xianzhong¹, SUN Shujuan², SUN Hongwen¹

1. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria (Nankai University), Ministry of Education, Tianjin 300071

2. College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018

Received 12 October 2010;

received in revised form 17 November 2010;

accepted 6 December 2010

Abstract: To study the removal efficiency and environmental behavior of perfluorinated compounds in wastewater treatment plants (WWTPs), the existence and distribution of perfluorinated sulfonic acids and perfluorinated acids in the influent and effluent of two WWTPs in a city of Northern China were investigated. Moreover, changes of PFOS and PFOA concentration in different treatment units of a WWTP, which employs an aeration-A²O treatment method, were also analyzed. A relatively low degree of perfluorinated compound pollution was found, with PFOA, PFOS and PFDA being the dominant components. The aeration process could contribute to the elimination of perfluorinated compounds, while little elimination effect occurred in anaerobic or aerobic tanks. Returned sludge might release part of perfluorinated compounds back into the water phase in the aerobic tank. Concentrations of PFOS and PFOA increased after a UV disinfection process, which indicated a potential transformation from the precursors into perfluorinated compounds induced by photo-oxidation reactions.

Keywords: waste water treatment plant; technique unit; perfluorinated compounds (PFCs); PFOA; PFOS

1 引言(Introduction)

全氟化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)是一类应用广泛的有机化合物。由于 C—F 键的极高化学键能, PFCs 类物质往往具有极高的稳定性, 可在环境中长期存在, 并向生物有机体富集及随食物链传递(Kannan *et al.*, 2005)。在水环境中存在

的最主要 PFCs 为全氟羧酸类和全氟磺酸类, 全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid, PFOA, C₇F₁₅COO⁻)和全氟辛磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS, C₈F₁₅SO₃⁻)分别是其代表性物质。鉴于这 2 种化合物的生态风险, 发达国家政府和国际组织已分别提出将其作为优先控制的污染物。2005 年, 联合国环保署将 PFOS 和 PFOA 列入“关于持久性有机污染物(POPs)

基金项目: 国家自然科学基金(No. 20877043, 20807024); 教育部博士点新教师基金(No. 200800551051)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20877043, 20807024) and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (No. 200800551051)

作者简介: 汪磊(1979—), 男, 副教授(博士), E-mail: wang2007@nankai.edu.cn; * 通讯作者(责任作者)

Biography: WANG Lei (1979—), male, assistant professor (Ph. D.), E-mail: wang2007@nankai.edu.cn; * **Corresponding author**

的斯德哥尔摩公约”的 POPs 污染物候选名单。

PFCs 污染物普遍存在于包括北极冰盖在内的全球水环境中(Young *et al.*, 2007; Mcmurdo *et al.*, 2008), 而污水处理厂被认为是水环境中此类污染物的重要来源和归趋。在对日本 5 座不同来源污水处理厂二级出水中 PFCs 的调查中发现, PFOS 含量为 $42 \sim 635 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, PFHpA 含量为 $4.7 \sim 32.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, PFOA 含量为 $18 \sim 25 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (Murakami *et al.*, 2008)。西班牙的研究人员也对加泰罗尼亚地区两所工业来源城市污水处理厂三级出水中全氟羧酸类物质进行了调查, 均检出了较高含量的 PFOA ($< 0.34 \sim 4.32 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 与全氟癸烷羧酸 (PFDA) ($< 0.5 \sim 8.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) (Alzaga *et al.*, 2004)。在对美国纽约州 6 座不同来源污水处理厂的调查发现, 出水中 PFOA 含量在 $58 \sim 1050 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, PFOS 含量在 $3 \sim 68 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 该调查还对不同来源污水处理厂出水中的污染物含量进行了比较, 并且对其中两所处理厂的进水、初级处理出水 and 最终出水中的污染物含量进行了调查, 以研究污水处理对污染物的影响 (Sinclair *et al.*, 2006)。另一个针对美国城市污水处理厂的调查则对进水、初级处理出水、滴滤池出水、二级处理出水、活性污泥处理出水 and 最终出水中 PFCs 污染物的含量进行了测定, 并对每一环节后污染物含量的变化原因做了探讨 (Schultz *et al.*, 2006)。最近, 也有研究者对香港和台湾地区污水处理厂进出水中全氟化合物的存在情况进行了报道 (Ma *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2010)。然而, 对于我国大陆地区污水处理厂中 PFCs 污染情况的调查研究工作还较为缺乏。另外, 采用不同水处理工艺的污水处理厂, PFCs 在其中的浓度变化情况也往往不同。因此, 本研究选择

山东省泰安市的 2 座污水处理厂 (分别命名为 A、B) 为调查对象, 通过对污水厂进出水的采样调查, 分析了磺酸类和羧酸类全氟化合物的存在与成分分布情况, 并对 A 处理厂不同污水处理工艺单元中典型全氟化合物 PFOS 和 PFOA 的浓度变化情况进行了追踪调查, 以期认识全氟化合物在常见污水处理工艺中的去除效率和环境行为提供参考。

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 主要试剂与仪器

仪器: Waters 2695 Separations Module 高效液相色谱仪, Quattro Micro API 三重四极杆串联质谱仪 (Waters Corporation, Milfor, MS, USA), Oasis WAX SPE 柱 ($6 \text{ mL} / 150 \text{ mg}$, Waters Corporation, Milfor, MS, USA), Envi carbon 柱 (荷兰 JT Baker 公司)。

试剂: 全氟丁烷磺酸 (perfluorobutane sulfonate, PFBS, 纯度 98%)、全氟己烷磺酸 (perfluorohexane sulfonate, PFHxS, 纯度 98%) 和全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulfonates, PFOS, 纯度 99%) 均购自 Sigma-Aldrich Chemical (St Louis, MO, USA); 内标物 $^{13}\text{C}_4$ -PFOS 钠盐 (sodium perfluoro-1-[1, 2, 3, 4- $^{13}\text{C}_4$] octanesulfonate, $^{13}\text{C}_4$ -PFOS, 纯度 $> 98\%$) 购自 Wellington Laboratories, Guelph, Ontario, Canada; 实验使用的流动相及乙酸、醋酸铵均为色谱纯。

2.2 样品采集与前处理

本文选择山东省泰安市的 2 座污水处理厂为调查对象, A 处理厂日处理污水 5 万 t, 污水来源主要为生活和商业污水, 该厂采用二段式处理工艺, 一段为曝气沉砂池, 水力停留时间约 $0.50 \sim 0.75 \text{ h}$, 二段采用 A^2O 工艺 (图 1), 厌氧、缺氧和好氧反应器中的水力停留时间分别约为 1、2 和 4 h; B 处理厂采

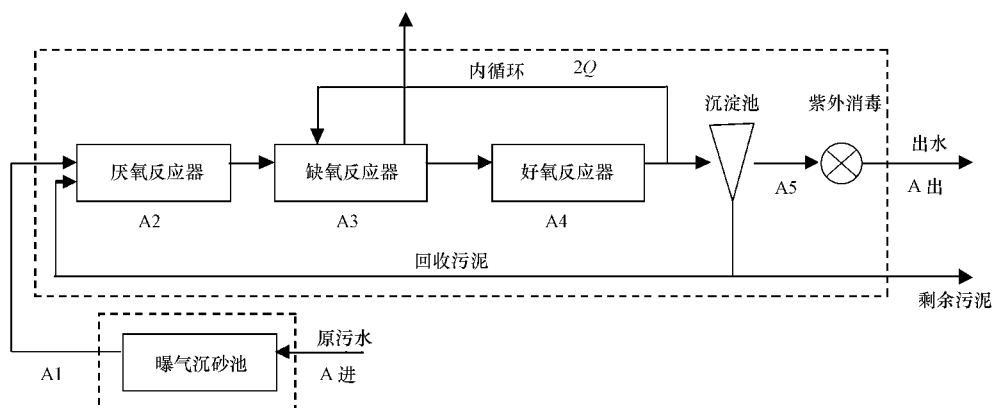


图 1 A 处理厂工艺流程及采样点布设示意图

Fig. 1 Flow chart and sampling locations of the wastewater treatment plant A

用氧化沟工艺,日处理污水 8 万 t,水力停留时间约为 12 h,其污水来源主要为工业废水。在假设污水水团在污水处理厂中按单一方向匀速流动,且在采样日内进水流量基本维持恒定的基础上,采用分时段多次采样混合的方式对处理厂 A 和 B 进行水样采集。采样情况见表 1。水样采集合并后避光保存,并在 24 h 内进行离心($3000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,10 min)和微滤($0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜)处理,以分离水相和悬浮颗粒物相。将过滤水样定量通过固相萃取柱进行富集,方法与回收率详见文献(张宪忠等,2009)。采用 HPLC-MS/MS 分析浓缩液中 PFCs 的成分与浓度。

悬浮颗粒物样品冻干称重后,经甲醇提取、净化,采用 HPLC-MS/MS 进行分析。颗粒物样品前处理的详细过程与回收率详见文献(章涛等,2010)。由于污水厂出水中悬浮颗粒物含量过低,因此,部分采样点(A5、A 出、B 出)未获得足够的悬浮颗粒物样品用于分析。

表 1 污水处理厂水样采集情况

Table 1 Water sampling design in the two wastewater treatment plants

采样点	采样次数	采样时刻	总采样量/mL
A 进	2	0 h,1 h	1000
A1	2	0.5 h,1.5 h	1000
A2	2	1.5 h,2.5 h	1000
A3	2	3.5 h,4.5 h	1000
A4	2	7.5 h,8.5 h	1000
A5	2	8 h,9 h	1000
A 出	2	8 h,9 h	1000
B 进	3	0 h,1 h,2 h	900
B 出	3	12 h,13 h,14 h	900

注: 每个采样点每次均平行采集 2 份水样;对于悬浮颗粒物样品,由于含量较低,因而将平行水样离心所得颗粒物合并使用。

2.3 液相色谱-质谱测定条件

目标物的分离采用 X-Terra MS C18 色谱柱($150\text{ mm}\times 2.1\text{ mm}$, $5\text{ }\mu\text{m}$,Waters Corporation,

Milfor,MS,USA)。流动相 a 为含 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵的甲醇,b 为 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵水溶液。目标物分子的离子化采用电喷雾离子源在负离子模式下进行(ESI-)。色谱及质谱的详细参数参见文献(张宪忠等 2009)。

3 结果(Results)

3.1 不同污水来源的处理厂中 PFCs 的污染水平及成分分布

在本研究所调查的 2 座污水处理厂的进水中,均检出了 3 种羧酸类(PFOA、PFDA、PFDoDA)与 2 种磺酸类(PFOS、PFBS)的 PFCs 污染物。污水厂 A 进水中羧酸和磺酸类 PFCs 的总浓度分别为 3.92 和 $0.62\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2),其中,PFOA、PFDA 和 PFDoDA 在进水中的浓度分别为 2.47 、 1.15 和 $0.30\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOS 和 PFBS 在进水中的浓度分别为 0.57 和 $0.05\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2)。而对于污水厂 B,其进水中羧酸和磺酸类 PFCs 的总浓度分别为 4.90 和 $2.53\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2),其中,PFOA、PFDA 和 PFDoDA 在进水中的浓度分别为 3.30 、 1.32 和 $0.28\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOS 和 PFBS 在进水中的浓度分别为 1.72 和 $0.81\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2)。PFOA 和 PFDA 是羧酸类 PFCs 的主要成分,此外,PFOS 在 B 厂进水中也有较高的浓度检出。

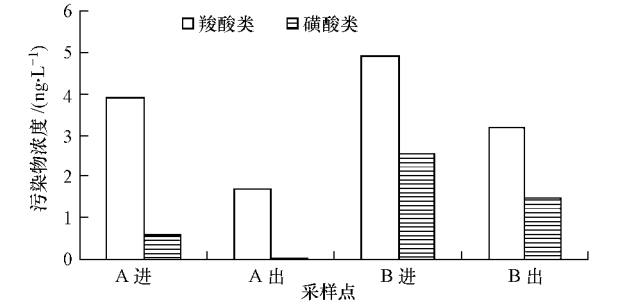


图 2 污水处理厂 A 和 B 进出水中羧酸类和磺酸类 PFCs 的浓度

Fig.2 Concentrations of PFCs in the influent and effluent of wastewater treatment plants A and B

表 2 污水厂进出水中典型 PFCs 的浓度

Table 2 Concentrations of typical PFCs in the influent and effluent of wastewater treatment plants A and B

ng·L⁻¹

水样	PFOA	PFDA	PFDoDA	PFBS	PFOS
A 进	2.47 ± 0.28	1.15 ± 0.12	0.30 ± 0.13	0.05 ± 0.28	0.57 ± 0.38
A 出	0.87 ± 0.18	0.79 ± 0.03	0.08 ± 0.04	< LOD	0.18 ± 0.02
B 进	3.30 ± 0.57	1.32 ± 0.10	0.28 ± 0.22	0.81 ± 0.50	1.72 ± 0.77
B 出	2.24 ± 0.42	0.92 ± 0.04	< LOD	0.19 ± 0.18	1.28 ± 0.04

注: < LOD 表示低于检出限。

在采用 A^2O 工艺的 A 厂出水中, PFCs 浓度有所降低. 对于磷酸类而言, 其在 A 厂出水中的去除率高达约 71%, 出水中 PFOS 浓度仅为 $0.18 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, PFBS 浓度低于检出限 ($< \text{LOD}$); 而 A 厂出水中 3 种羧酸类 PFCs 的总去除率也可达 55% 以上, PFOA、PFDA 和 PFDoDA 的出水浓度分别为 0.87 、 0.79 和 $0.08 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 2). 相比之下, 采用氧化沟工艺的 B 厂出水中, 磷酸和羧酸类 PFCs 的去除率均较低, 分别为 42% 和 35%.

3.2 PFOS 与 PFOA 在 A 处理厂各工艺单元污水中的存在情况

在对 A 厂各工艺单元污水中 PFOS 和 PFOA 浓度的追踪采样调查中发现, 各工艺单元中 PFOA 水相浓度基本均高于 PFOS, 二者在各工艺单元间的浓度变化趋势基本一致 (图 3). 经过曝气-沉淀工艺后, 污水中的 PFOS 与 PFOA 浓度均有所降低, 其中, PFOA 浓度由进水的 $2.47 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $1.08 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 PFOS 浓度也由 $0.57 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $0.17 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 此后, 厌氧和缺氧反应器中, PFOA 和 PFOS 的水相浓度均有缓慢升高, 在缺氧反应器 (A3) 中, PFOA 的浓度达到 $2.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 PFOS 的浓度升高至 $1.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 在好氧反应器中 (A4), PFOA 和 PFOS 的水相浓度均明显降低, 分别为 0.57 和 $0.80 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 在经过二沉池后, PFOS 的水相浓度降低到检出限以下, 而经过紫外消毒处理后, 出水中 PFOA 和 PFOS 的浓度则均又呈现出一定的上升趋势, 其出水浓度分别达到 0.87 和 $0.18 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$.

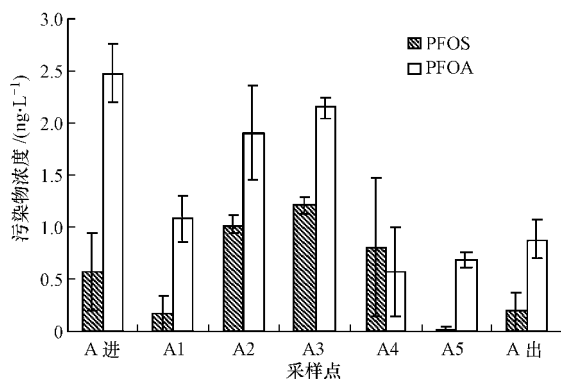


图 3 污水处理厂 A 各工艺单元中 PFOS 和 PFOA 水相浓度变化情况

Fig. 3 Dissolved concentration of PFOS and PFOA in different wastewater treatment units of plant A

3.3 PFOS 与 PFOA 在 A 处理厂各工艺单元悬浮颗粒物中的存在情况

对 A 厂各工艺单元悬浮颗粒物中 PFOS 和

PFOA 含量的调查发现, 与水相浓度相反, 污泥中 PFOS 的含量普遍高于 PFOA (图 4). 在进水的悬浮颗粒物中, PFOS 和 PFOA 的含量分别为 8.70 和 $5.75 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 经过曝气沉淀工艺后, 颗粒物中二者含量降为 $3.53 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (PFOS) 和 $2.61 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ (PFOA). 在厌氧反应器中 (A2), 悬浮颗粒物上的 PFOS 含量达到最大 ($22.59 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$), 此时 PFOA 的含量也变为 $5.61 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 而在缺氧和好氧反应器中, 颗粒物上 PFOS 和 PFOA 的含量又出现显著下降, PFOS 含量约为 $6 \sim 7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 而 PFOA 含量约为 $2 \sim 3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.

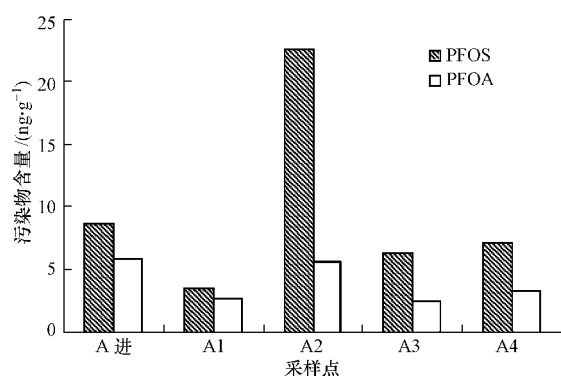


图 4 污水处理厂 A 各工艺单元悬浮颗粒相中 PFOS 和 PFOA 的含量变化情况

Fig. 4 Concentration of PFOS and PFOA in suspended particle matters in different wastewater treatment units of plant A

4 讨论 (Discussion)

在 2 座污水处理厂的进水中, A、B 两厂所检出羧酸类 PFCs 的总浓度分别约为 $4.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷酸类 PFCs 的总浓度分别约为 0.6 、 $2.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据 Bossi 等 (2008) 对丹麦污水处理厂中 PFCs 水平的研究报道, 与 A 厂污水规模和污水来源相近的污水处理厂进水中羧酸类 PFCs 总浓度达到 $15.0 \sim 19.7 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, 磷酸类 PFCs 总浓度为 $3.4 \sim 11.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$. 另一项对德国污水处理厂 PFCs 的调查中, 也报道了类似的污水处理厂进水中 PFOS 浓度达到 $25 \sim 85 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$, PFOA 浓度达到 $4.1 \sim 40.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (Becker *et al.*, 2008). 在对韩国污水处理厂研究中, 处理厂进水中羧酸类与磷酸类 PFCs 总浓度范围分别为 $21.5 \sim 25.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.7 \sim 100.9 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ (Guo *et al.*, 2010). 相比于上述研究所报道的污水处理厂进水中 PFCs 污染情况, 泰安市这 2 座污水处理厂的进水 PFCs 污染程度较轻. 对比 2 座污水处理厂的进水 PFCs 污染情况, 以工业废水为主要水源的 B 厂, 其进水中

PFCs 特别是磺酸类的浓度均明显高于以生活污水为主要水源的 A 厂,这一结果也与 Yu 等(2009)报道的日本 2 座不同来源污水处理厂中 PFCs 的浓度差异情况一致。

通过对 PFOS 和 PFOA 在 A 处理厂各工艺单元间的水相浓度变化追踪发现,经过曝气沉淀工艺后,水相中这 2 种物质的浓度明显下降,这可能是由于 PFOS 和 PFOA 均为表面活性剂,有在水体表面微层和气泡膜微层中富集的趋势,因而随着曝气产生气泡的上升及破裂消散,可能导致部分 PFOS 和 PFOA 迁移至气相;此外,进水中的胶体物质可能在沉淀池中发生沉降,这也可能是导致 PFOS 和 PFOA 水相浓度降低的原因。在厌氧和缺氧反应器中,水相中 PFOS 和 PFOA 浓度的升高应与厌氧反应器中回流污泥上这 2 种污染物的释放有关;尽管本文未能对回流污泥中 PFCs 的浓度进行采样分析,但已有相关研究表明,PFOA 和 PFOS 在污水厂污泥中的含量明显高出其在污水中的含量,例如,当 PFOS 在污水中的浓度为 $3.2 \sim 13.3 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其在污泥相中的含量可高达 $74 \text{ ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Bossi *et al.*, 2008)。而本研究对厌氧反应器内悬浮颗粒物的检测也表明,在颗粒物相中 PFOS 和 PFOA 的含量非常高。在好氧反应器中,PFOS 和 PFOA 的浓度降低,这是由于好氧反应器中的活性污泥量较大,大量的污染物由水相转移至污泥相中所致;特别是对于 K_{ow} 值更高的 PFOS,好氧反应器中其水相浓度降低至检出限以下。经历过紫外消毒工艺后,水中 PFOA 和 PFOS 的浓度又升高,这可能是前体物质在紫外光作用下发生光氧化反应,导致 PFOA 及 PFOS 的产生 (Wallington *et al.*, 2006)。

5 结论(Conclusions)

1) 在泰安市 2 座污水处理厂的进水中,羧酸类和磺酸类全氟化合物污染普遍存在,检测的 3 种羧酸类和 2 种磺酸类全氟化合物总浓度分别为 $3.9 \sim 4.9$ 和 $0.6 \sim 2.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,污染程度与发达国家污水厂进水污染情况相比较轻,工业废水中的污染物浓度高于生活污水。

2) PFOS 和 PFOA 分别是污水厂进水中磺酸类和羧酸类全氟化合物的主要成分,采用曝气- A^2O 工艺的 A 处理厂对于污水中全氟化合物具有一定的去除效果,出水中 PFOA 和 PFOS 的去除率分别为 65% 和 68%。

3) 在 A 处理厂污水处理不同工艺单元中,污水及悬浮颗粒物中典型全氟化合物的浓度变化较大,这主要是全氟化合物在水相与颗粒物相之间分布情况变化的结果,进水中 PFOS 在水相和颗粒物相的浓度分别为 $0.57 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.70 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,而在有回流污泥注入的厌氧反应器中,两相中 PFOS 的浓度可分别达到 $1.20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $22.59 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$;此外,曝气及紫外消毒等工艺也可能对全氟化合物及其前体物质在污水处理厂中的迁移转化行为产生较为重要的影响。

责任作者简介:汪磊(1979—),男,副教授,主要研究方向为有机污染物的水环境化学行为。E-mail: wang2007@nankai.edu.cn.

参考文献(References):

- Alzaga R, Bayona J M. 2004. Determination of perfluorocarboxylic acids in aqueous matrices by ion-pair solid-phase microextraction-in-port derivatization-gas chromatography-negative ion chemical ionization mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 1042(1/2): 155-162
- Becker M A, Silke G, Hartmut F. 2008. Perfluorooctane surfactants in waste waters, the major source of river pollution [J]. *Chemosphere*, 72(1): 115-121
- Bossi R, Strand J, Sortkjaer O, *et al.* 2008. Perfluoroalkyl compounds in Danish wastewater treatment plants and aquatic environments [J]. *Environment International*, 34(4): 443-450
- Guo R, Sim W, Lee E, *et al.* 2010. Evaluation of the fate of perfluoroalkyl compounds in wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 44(11): 3476-3486
- 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
- Lin Y A, Panchangam S C, Ciou P. 2010. High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems [J]. *Chemosphere*, 80(10): 1167-1174
- Ma R, Shih K. 2010. Perfluorochemicals in wastewater treatment plants and sediments in Hong Kong [J]. *Environmental Pollution*, 158(5): 1354-1362
- McMurdo J C, Ellis A D, Webster E, *et al.* 2008. Aerosol enrichment of the surfactant PFO and mediation of the water-air transport of gaseous PFOA [J]. *Environmental Science and Technology*, 42(11): 3969-3974
- Murakami M, Imamura E, Shinohara H, *et al.* 2008. Occurrence and sources of perfluorinated surfactants in rivers in Japan [J]. *Environmental Science and Technology*, 42(17): 6566-6572
- Schultz M M, Higgins C P, Huset C A, *et al.* 2006. Fluorochemical mass

- flows in a municipal wastewater treatment facility [J]. Environmental Science and Technology 40(23):7350-7357
- Sinclair E ,Kannan K. 2006. Mass loading and fate of perfluoroalkyl surfactants in wastewater treatment plants [J]. Environmental Science and Technology ,40 (5):1408-1414
- Wallington T J ,Hurley M D ,Xia J , *et al.* 2006. Formation of C7F15COOH (PFOA) and other perfluorocarboxylic acids during the atmospheric oxidation of 8: 2 fluorotelomer alcohol [J]. Environmental Science and Technology 40(3):924-930
- Young C J ,FurDui V I ,Franklin J , *et al.* 2007. Perfluorinated acids in arctic snow: new evidence for atmospheric formation [J]. Environmental Science and Technology 41(10):3455-3461
- Yu J ,Hu J ,Tanaka S , *et al.* 2009. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in sewage treatment plants [J]. Water Resource 43(9):2399-2408
- 章涛 孙红文 ,Alder A C , *et al.* 2010. 液相萃取-高效液相色谱-串联质谱联用测定污泥中的全氟化合物 [J]. 色谱 28(5):498-502
- Zhang T ,Sun H W ,Alder A C , *et al.* 2010. Analysis of perfluorinated compounds in sludge by liquid extraction and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography 28(5):498-502 (in Chinese)
- 张宪忠 孙红文 汪磊 ,等. 2009. 固相萃取-高效液相色谱串联质谱技术测定污水中的全氟化合物 [J]. 环境化学 ,28 (6):944-945
- Zhang X Z ,Sun H W ,Wang L , *et al.* 2009. Analysis of perfluorinated compounds in wastewater by solid phase extraction and high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Environmental Chemistry 28 (6):944-945 (in Chinese)