

城市污水处理工艺对有机磷酸酯类化合物的去除

庞 龙¹, 张肖静¹, 庞 榕², 赵继红¹, 张宏忠¹

(1. 郑州轻工业学院 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心, 郑州 453001;
2. 黄河科技学院 医学院, 郑州 450001)

摘 要:城市污水处理厂进水中有机磷酸酯类化合物(OPs)的总质量浓度为 $1106.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,经厌氧好氧工艺三级处理后降至 $511.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率为53.8%。OPs的去除主要发生在厌氧和好氧环节,非氯代的OPs能够得到较好的去除,而氯代的OPs难以去除(磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯除外)。在污水处理厂剩余活性污泥(脱水污泥)中也检出较高质量浓度的OPs,总质量浓度为 $16.9 \sim 60.7 (\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。OPs去除率与其辛醇-水分配系数对数值($\log K_{ow}$)具有较强的相关性($r^2=0.53885$),表明具有较大 K_{ow} 值的OPs与剩余活性污泥具有较强的吸附作用,进而会影响其在污水处理过程中的去除。

关键词:城市污水处理工艺;有机磷酸酯类化合物;去除;吸附

中图分类号:X131.2

文献标志码:A

有机磷酸酯类化合物(OPs)广泛用于阻燃剂和增塑剂,其中氯代的OPs,如磷酸三(2-氯)乙酯(TCEP)、磷酸三氯丙酯(TCPP)和磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCP)主要用作阻燃剂,而非氯代的OPs,如磷酸三(丁氧基乙基)酯(TBEP)、磷酸三丁基酯(TnBP)和磷酸三苯基酯(TPhP)主要作为增塑剂^[1]。由于从2008年开始,多种溴代阻燃剂在欧盟等国家禁止使用,有机磷系阻燃剂的生产量和使用量逐年剧增。目前,有机磷系阻燃剂在欧盟的生产量已超过1000 t/a,被认为是一类高产量化合物^[2]。由于OPs并不是以化学键作用添加到材料中的,因此很容易导致OPs通过挥发、溶解以及磨损等作用进入环境当中^[3]。目前,已在地表水^[4]、土壤^[5]、空气^[6],甚至饮用水中^[7]发现OPs存在。目前,普遍认为城市污水处理厂(WWTPs)是地表水中OPs的主要来源^[8]。

为了解城市污水处理系统对OPs的去除,本研究选择郑州市王新庄污水处理厂(厌氧-好氧工艺)作为研究对象,重点考察常见的6种OPs在污水处理过程中的分布特征及去除效果,并据此分析不同OPs在污水处理过程中去除规律。

1 实验部分

1.1 试剂与材料

6种OPs均购自Dr. Ehrenstorfer GmbH, Augsburg, Germany: TCEP, TCPP, TDCP, TnBP, TPhP, TBEP。磷酸三丁基酯-d27(TnBP-d27)购自Cambridge Isotope Laboratories, Andover, MA, USA。乙腈、乙酸乙酯和甲醇均购自Fisher Scientific, Shanghai, China。实验所用溶剂均为HPLC级或以上。实验用水均为超纯水(Millipore, Bedford, USA)。Oasis HLB固相萃取柱(200 mg, 6 mL)购自Water Corporation, Milford, MA, USA,固相萃取装置和氮吹浓缩仪购自上海安普。

收稿日期:2016-03-24;修回日期:2016-05-10。

基金项目:环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金(KF2013-13);郑州轻工业学院博士科研基金项目(2013BSJJ023)资助。

第1作者简介:庞 龙(1983-),男,河南郑州人,郑州轻工业学院讲师,博士,研究方向:环境污染化学,E-mail:lpang@zzuli.edu.cn。

通信作者:张宏忠,E-mail:zhz@zzuli.edu.cn。

1.2 样品采集

王新庄污水处理厂位于郑州市东郊祭城镇,主要处理郑州市区生活污水,服务人口100万,服务区域105 km².采用厌氧好氧处理工艺(Anoxic/Oxic, AO),设计处理能力40万 t/d,实际处理能力50万 t/d,污水处理工艺流程及采样点示意图见图1.本实验分别在进水口、厌氧池、好氧池、二沉池和出水口采集水样,并同时采集剩余脱水污泥样品.在24 h内,每隔4 h采集水样一次,按照等体积进行混合.同时,按照同样方法从污泥压滤机采集脱水污泥样品.污水样品用玻璃纤维膜过滤(1.2 mm, 45 mm, Whatman, UK)后用棕色玻璃样品瓶4℃下避光保存.污泥样品经冷冻干燥后研磨,用孔径为180 μm的筛过滤后用棕色玻璃样品瓶4℃下避光保存.

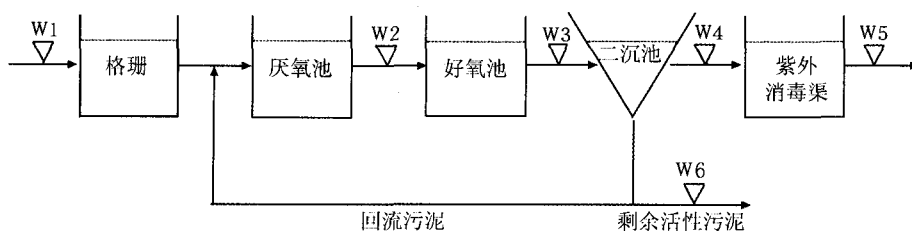


图1 AO工艺流程和采样点示意图

1.3 样品预处理

污水样品:污水样品采用 Oasis HLB 固相萃取柱(200 mg, 6 mL)进行预处理,参考文献方法^[9].在使用前,固相萃取柱先依次用4 mL 乙腈和4 mL 超纯水活化.取200 mL 采集的污水样品,加入10 μL 50 mg · L⁻¹ TnBP-d27 作为回收率内标后,将水样上柱净化,流速4 mL · min⁻¹,随后用5 mL 超纯水清洗柱子,在空气中干燥10 min.用8 mL 乙腈分两次洗脱,洗脱液氮吹至近干后用1 mL 乙腈/水(50/50, v/v)定容,取10 μL 溶液采用 HPLC-MS/MS 进行定量分析.

污泥样品:污泥样品采用微波辅助法进行萃取,参考文献方法^[10].污泥样品经冷冻干燥后,取0.5 g 样品加入体积为50 mL 的聚四氟乙烯离心管中,并加入10 μL 50 mg · L⁻¹ TnBP-d27 作为回收率内标.加入20 mL 乙腈/水(25:75, v/v)作为提取剂,室温下微波辅助萃取30 min,室温下9000 r · min⁻¹离心分离15 min,将上层提取液转移到500 mL 容量瓶中.重复提取3次,将提取液一并加入容量瓶中后用超纯水定容至500 mL.采用 Oasis HLB 固相萃取柱(200 mg, 6 mL)净化水样.

1.4 UPLC-MS/MS 分析条件

前期工作中已经建立了 UPLC-MS/MS 分析条件^[11].UPLC 分析采用 ACQUITY UPLC, Waters, USA, 采用的色谱柱为反相 Waters BEH C18 柱(2.1 mm × 50 mm, 1.7 μm, Waters).进样量10 μL,柱温箱温度45℃.采用二元流动相,0.1% 乙酸(A)和含有0.1% 乙酸的乙腈(B)作为流动相,流速0.2 mL · min⁻¹.梯度洗脱程序:0 min(40% B),2.5 min(40% B),4 min(50% B),4.5 min(50% B),7 min(80% B),9 min(100% B),10.5 min(100% B),11 min(40% B),12 min(40% B).

1.5 质量控制

实验对过程空白($n=3$),空白加标($n=3$),基质效应($n=3$)以及重现性($n=3$)进行考察.在每个加标样品中,加入50 ng 的 OPs 混合标准溶液.所有样品中均加入 TnBP-d27 作为回收率内标.测定结果表明,空白样品中没有发现 TDCEP; TBEP 和 TnBP 低于仪器检测限; TCEP, TPhP 和 TCPP 均有检出,质量浓度分别为(7.5 ± 0.5) μg · L⁻¹, (1.5 ± 0.4) μg · L⁻¹ 和 (2.5 ± 0.3) μg · L⁻¹.空白加标回收率和基质效应分别为53%~102%和89%~114%.水样和污泥中 OPs 的质量浓度为检出值减去背景值.6种 OPs 相关系数、线性范围、检测限及加标回收率见表1.

2 结果与讨论

2.1 OPs在污水和污泥中的质量浓度水平

6种OPs在污水处理厂的进水中均有检出,质量浓度范围在 $15.2\sim 648.7\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,主要污染物为TBEP,TCPP和TCEP,质量浓度分别为 $648.7\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $204.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $172.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.与文献报道相比,本研究检出质量浓度小于德国WWTPs($3700\sim 4000\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ TBEP, $650\sim 2000\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ TCPP)^[12],而显著大于瑞士WWTPs($5200\sim 35\ 000\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ TBEP, $6600\sim 52\ 000\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ TnBP, $1100\sim 18\ 000\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ TCPP)^[13].虽然各国WWTPs检出质量浓度各不相同,但进水中OPs分布特征基本一致.同时,在脱水污泥中也检出了较高质量浓度的OPs,质量浓度范围在 $16.9\sim 60.7\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总质量浓度为 $228.3\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要污染物为TCPP,TnBP和TBEP,质量浓度分别为 $60.7\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $53.2\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $48.0\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.与珠江流域($96.7\sim 1312.9\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14]、瑞典($2.2\sim 4600\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[13]、德国($1700\sim 5100\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[15]、挪威($3870\sim 4810\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[16]等WWTPs脱水污泥中OPs质量浓度相比,郑州市王新庄污水处理厂脱水污泥中OPs的质量浓度仍处于较低水平.

表1 6种OPs的相关系数(r^2),线性范围,检测限(LODs, $S/N=3$)和回收率

化合物	r^2	线性范围/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	检测限/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	加标回收率/%	
				空白	基质
TBEP	0.9974	0.1~300	3	99±4.4	85±6.9
TCEP	0.9994	0.1~300	3	106±5.1	102±8.0
TDCEP	0.9937	0.1~300	2	89±3.6	58±3.4
TnBP	0.9978	0.1~300	2	99±6.5	95±1.7
TPhP	0.9963	0.1~300	2	101±4.4	62±4.0
TCPP	0.9991	0.1~300	3	97±5.4	70±3.0

2.2 OPs在污水处理过程中的去除

2.2.1 酯基和烷基取代的OPs

TBEP的去除主要发生在厌氧和好氧阶段,经过厌氧处理后,65.1%的TBEP可以被去除.经过好氧处理后,有75%的TBEP可以得到进一步去除.但在二沉池的出水中发现TBEP的质量浓度有所增加,其检出质量浓度为 $194.8\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.经过紫外消毒渠后,TBEP质量浓度下降到 $96.6\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明TBEP较易发生光降解^[17](图2).结果证明,经过污水处理过程,约有85.1%的TBEP可以被去除.TnBP的去除规律与TBEP相似,其去除作用主要发生在厌氧阶段,约有61.6%的TnBP可以在厌氧阶段被去除.在后续的处理过程中,TnBP的质量浓度没有发生明显变化,最终有29.0%的TnBP能够在污水处理过程中被去除.

2.2.2 氯代的OPs

实验中选择的氯代OPs主要包括TCEP,TCPP和TDCEP,其中TCEP和TCPP在进水中质量浓度较高,分别达到 $172.3\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $204.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.结果显示,TCEP在厌氧阶段去除率仅为12.6%.在好氧阶段TCEP的质量浓度为 $94.4\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为37.4%,说明好氧条件下能够比较有效地去除TCEP.在出水中TCEP的检出质量浓度为 $171.8\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,与进水质量浓度相比,TCEP的实际去除率仅为0.3%.TCPP质量浓度在AO工艺的各个阶段都没有显著降低,经处理后,TCPP质量浓度从 $204.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $196.0\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,仅有4%的TCPP被去除.TDCEP在进水中的质量浓度较低,检出质量浓度为 $15.6\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.在AO工艺中,约有46.9%的TDCEP在厌氧阶段能够被去除,但在随后的流程中,TDCEP的质量浓度没有发生明显变化.出水中TDCEP的检出质量浓度为 $7.5\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,即约51.7%的TDCEP在污水处理过程中能够被去除(图2).

2.2.3 苯基取代的OPs

TPhP在厌氧阶段得到较好去除,质量浓度从 $15.2\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $2.8\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除效率为81.5%.在好氧阶段TPhP质量浓度没有进一步降低,但二沉池出水中TPhP质量浓度有所升高,达到 $4.4\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,最终有74.9%的TPhP可以被AO工艺去除(图2).

实验结果表明,经过AO工艺三级处理后,酯基和烷基取代的OPs(TBEP和TnBP)和苯基取代的

OPs(TPhP)能够在不同程度上得到去除.除 TDCP 外,氯代的 OPs(TCEP 和 TCPP)质量浓度基本没有变化,与文献报道一致.Zeng 等在对珠江流域某污水处理厂进水和出水中 OPs 质量浓度进行测定,发现非氯代 OPs 较易得到去除,而氯代 OPs 的质量浓度基本没有变化^[18].Rodil 和 Liang 等发现 TCEP,TCPP、TBEP 等 OPs 在出水中的质量浓度甚至大于其进水质量浓度,推测可能是由于污水处理工艺中使用了大量含有 OPs 的塑料制品,在水流作用下的释放提高了出水中 OPs 的质量浓度^[19-20].

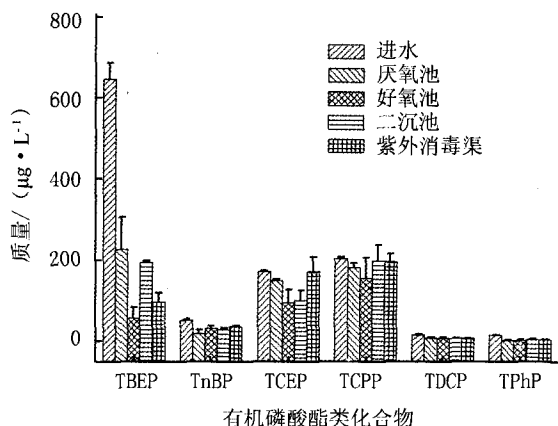


图2 AO.I工艺对6种OPs去除

化合物的 $\log K_{ow}$ 值决定了其与活性污泥的吸附能力,Rogers 等发现化合物的 $\log K_{ow}$ 值在 2.5 以下时,吸附能力较低;在 2.5~4.0 之间时表现出中度吸附能力;大于 4.0 时,表现出较高的吸附能力^[21].实验中 6 种 OPs 的 $\log K_{ow}$ 值^[22] 依次为:TPhP($\log K_{ow}=4.59$)>TnBP($\log K_{ow}=4.00$)>TBEP($\log K_{ow}=3.75$)>TDCP($\log K_{ow}=3.65$)>TCPP($\log K_{ow}=2.59$)>TCEP($\log K_{ow}=1.44$).其中,TPhP 和 TnBP 吸附能力最强,TBEP, TDCP 和 TCPP 表现出中等吸附能力,TCEP 的吸附能力最弱.结果表明,TPhP, TnBP, TBEP 和 TDCP 在厌氧阶段的质量浓度较进水质量浓度明显降低,而 TCPP 和 TCEP 的质量浓度没有明显变化.对 OPs 去除率与其 $\log K_{ow}$ 进行相关性分析发现,两者存在较好的相关性($y=-42.63633+25.01488x, r^2=0.539$),表明具有较大辛醇-水分配系数的 OPs 与活性污泥结合能力较强,进而能够通过活性污泥的吸附作用得到去除(见图 3).由此可以判断,TPhP, TnBP, TBEP 和 TDCP 质量浓度的降低,除微生物降解作用外,在活性污泥上的吸附也是重要因素之一.

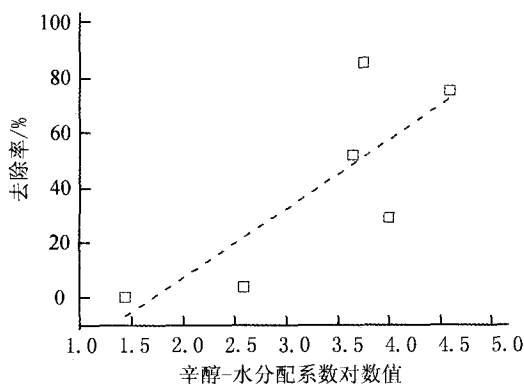


图3 OPs去除率—logKow拟合示意图

2.3 污水处理过程中 OPs 的分布特征

图 4 表明进水中 OPs 的总质量浓度为 $1106.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,主要为 TBEP(58.6%)、TCPP(18.5%)和 TCEP(15.6%)。经厌氧处理后,约有 46.7% 的 OPs 被去除,OPs 的总质量浓度降至 $590 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,说明 OPs 的去除主要发生在 AO 工艺的厌氧阶段.经好氧处理后,OPs 的总质量浓度降至 $349.8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,TCPP 和 TCEP 为主要 OPs,而 TBEP 占总质量浓度的比例下降至 16.2%,说明厌氧和好氧处理可以

有效去除 TBEP. OPs 的总质量质量浓度经过二沉池后有所升高($535.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 氯代 OPs(TCPP, TBEP 和 TCEP)为主要污染物, 与文献报道一致^[19-20]. 经紫外消毒渠处理后, 出水中 OPs 的总质量质量浓度为 $511.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, TCPP, TCEP 和 TBEP 为主要污染物, 说明紫外消毒三级处理工艺对 OPs 没有明显的去除效果, 同时氯代 OPs 在 AO 工艺中难以被有效去除.

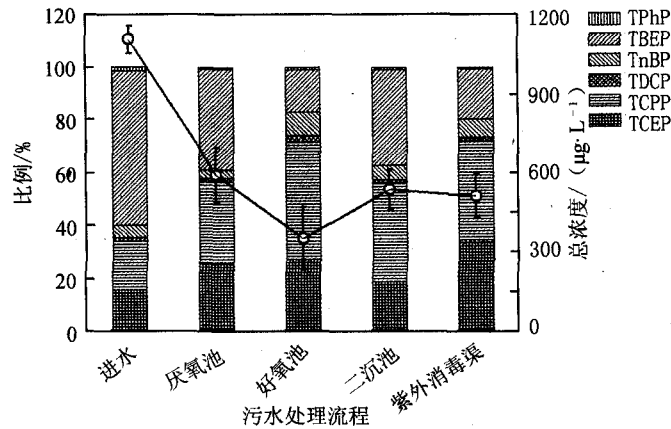


图4 有机磷酸酯在 AO 工艺中的总质量浓度及组成变化

3 结 论

- (1) AO 工艺对非氯代的 OPs 有较好的去除效果, 但对氯代的 OPs(TCPP 和 TCEP) 基本没有去除效果.
- (2) OPs 的去除主要发生在厌氧和好氧阶段, AO 工艺中的其他环节并不能有效降低 OPs 的质量浓度.
- (3) OPs 去除率与 $\log K_{ow}$ 具有较好的相关性, 表明在剩余活性污泥上的吸附作用是影响 OPs 在污水处理系统中去除的重要因素.

参 考 文 献

- [1] Andresen J A, Grundmann A, Bester K. Organophosphorus flame retardants and plasticisers in surface waters[J]. Sci Total Environ, 2004, 332(1-3):155-166.
- [2] Stapleton H M, Klosterhaus S, Keller A, et al. Identification of flame retardants in polyurethane foam collected from baby products[J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(12):5323-5331.
- [3] Lai Sen-chao, Xie Zhi-yong, Song Tian-li, et al. Occurrence and dry deposition of organophosphate esters in atmospheric particles over the northern south china sea[J]. Chemosphere, 2015, 127:195-200.
- [4] Peveryly A A, O'Sullivan C, Liu Liang-ying, et al. Chicago's sanitary and ship canal sediment: polycyclic aromatic hydrocarbons, polychlorinated biphenyls, brominated flame retardants, and organophosphate esters[J]. Chemosphere, 2015, 134:380-386.
- [5] Matsukami H, Tue N M, Suzuki G, et al. Flame retardant emission from e-waste recycling operation in northern Vietnam: Environmental occurrence of emerging organophosphorus esters used as alternatives for PBDEs[J]. Sci Total Environ, 2015, 514:492-499.
- [6] Mizouchi S, Ichiba M, Takigani H, et al. Exposure assessment of organophosphorus and organobromine flame retardants via indoor dust from elementary schools and domestic houses[J]. Chemosphere, 2015, 123:17-25.
- [7] Li jun, Yu Nan-yang, Zhang Bei-bei, et al. Occurrence of organophosphate flame retardants in drinking water from china[J]. Water Res, 2014, 54:53-61.
- [8] Quintana J B, Rodil R, Reemtsma T. Determination of phosphoric acid mono- and diesters in municipal wastewater by solid-phase extraction and ion-pair liquid chromatography-Tandem mass spectrometry[J]. Anal Chem, 2006, 78(5):1644-1650.
- [9] Wang Xiao-wei, Liu Jing-fu, Yin Yong-guang. Development of an ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for high throughput determination of organophosphorus flame retardants in environmental water[J]. J Chromatogr A, 2011, 1218(38):6705-6711.
- [10] Cao Shu-xia, Zeng Xiang-ying, Song Han, et al. Levels and distributions of organophosphate flame retardants and plasticizers in sediment from Taihu Lake, china[J]. Environ Toxicol Chem, 2012, 31(7):1478-84.

- [11] Liang Kang, Niu Yu-min, Yin Yong-guang, et al. Evaluating the blank contamination and recovery of sample pretreatment procedures for analyzing organophosphorus flame retardants in waters[J]. *J Environ Sci (China)*, 2015, 34:57-62.
- [12] Meyer J, Bester K. Organophosphate flame retardants and plasticisers in wastewater treatment plants[J]. *J Environ Monitor*, 2004, 6(7): 599-605.
- [13] Marklund A, Andersson B, Haglund P. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in Swedish sewage treatment plants[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(19):7423-7429.
- [14] Zeng Xiang-ying, He Li-xiong, Cao shu-xia, et al. Occurrence and distribution of organophosphate flame retardants/plasticizers in wastewater treatment plant sludges from the Pearl River delta, China[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2014, 33(8):1720-1725.
- [15] Bester K. Comparison of TCPH concentrations in sludge and wastewater in a typical German sewage treatment plant-comparison of sewage sludge from 20 plants[J]. *J Environ Monitor*, 2005, 7(5):509-513.
- [16] Green N, Schlabach M, Bakke T, et al. Screening of selected metals and new organic contaminants 2007[M]. in: Norwegian Pollution Control Agency (Ed.), 2008.
- [17] Yuan Xiang-juan, Lacorte S, Cristale J, et al. Removal of organophosphate esters from municipal secondary effluent by ozone and UV/H₂O₂ treatments[J]. *Sep Purif Technol*, 2015, 156:1028-1034.
- [18] Zeng Xiang-ying, Liu Zhi-yang, He Li-xiong, et al. The occurrence and removal of organophosphate ester flame retardants/plasticizers in a municipal wastewater treatment plant in the Pearl River Delta, China[J]. *J Environ Sci Heal A*, 2015, 50(12):1291-1297.
- [19] Rodil R, Quintana J B, Lopez-Mahia P, et al. Multi-residue analytical method for the determination of emerging pollutants in water by solid-phase extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. *J Chromatogr A*, 2009, 1216(14):2958-2969.
- [20] Liang Kang, Liu Jing-fu. Understanding the distribution, degradation and fate of organophosphate esters in an advanced municipal sewage treatment plant based on mass flow and mass balance analysis[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 544:262-270.
- [21] Rogers H R. Sources, behavior and fate of organic contaminants during sewage treatment and in sewage sludges[J]. *Sci Total Environ*, 1996, 185:3-26.
- [22] Reemtsma T, Quintana J B, Rodil R, et al. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in water and air I. Occurrence and fate [J]. *Trac-Trend Anal Chem*, 2008, 27(9):727-737.

Removal of Organophosphate Esters in Municipal Wastewater Treatment Process

PANG Long¹, ZHANG Xiaojing¹, PANG Rong², ZHAO Jihong¹, ZHANG Hongzhong¹

(1. Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Huanghe Science and Technology College, Department of Medicine, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The total concentration of OPs in the influent of municipal sewage plant was 1106.5 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, and reduced to 511.7 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ after treated by anoxic/oxic treatment process with the removal rate of 53.8%. The removal of OPs was mainly carried out in the anaerobic process and aerobic process, during which non-chlorinated OPs can be efficiently removed, but chlorinated OPs were persistent and recalcitrant (except tri(dichloropropyl)phosphate). High concentration of OPs was also detected in the dewatered activated sludge, and the concentration ranged from 16.9 to 60.7 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Significant linear correlations with $\log K_{ow}$ ($r^2=0.539$) was observed in the AO process, indicating that the OPs with high octanol-water partition coefficient (K_{ow}) are prone to be removed by adsorbing on the residual activated sludge.

Keywords: wastewater treatment process; organophosphate ester compounds; distribution; removal