

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.014

PAEs和PAHs在DE氧化沟中的降解特征

白强¹, 李伟¹, 董丛健¹, 杨学福², 赵凯³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710032; 3. 西安创业水务有限公司, 陕西 西安 710086)

摘要: 以邻苯二甲酸酯(PAEs)和多环芳烃(PAHs)作为研究对象,使用气相色谱-三重四级杆质谱联用仪(GC-MS/MS)对其在西安市北石桥污水净化中心各级构筑物及DE氧化沟1个周期内水相和泥相中的浓度进行检测。结果显示,污水厂进水中能够检出5种PAEs和6种PAHs,生物处理单元是其去除的主要场所。其中,厌氧选择池对水相中PAEs的去除率为DEHA(33.6%)>DEHP(33.1%)>DEP(25.7%)>DBP(24.6%)>DMP(17.5%),对PAHs的去除率为Chr(35.9%)>Pyr(35.0%)>Flu(32.7%)>Phe(30.3%)>Ant(28.0%)>Nap(27.3%),主要是二沉池回流污泥的稀释作用和吸附作用所致。在后续DE氧化沟处理过程中,水相中对PAEs的去除率为DEP(89.3%)>DMP(86.4%)>DBP(58.0%)>DEHP(29.4%)>DEHA(19.0%),对PAHs的去除率为Nap(68.8%)>Ant(58.3%)>Flu(48.6%)>Phe(45.7%)>Pyr(12.3%)>Chr(8.5%)。在泥相中这两类物质的浓度基本保持不变,表明生物降解是PAEs和PAHs去除的主要原因。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 多环芳烃; DE氧化沟; 降解特征

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0089-06

Degradation Characteristics of Phthalates and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in DE Oxidation Ditch

BAI Qiang¹, LI Wei¹, DONG Cong-jian¹, YANG Xue-fu², ZHAO Kai³

(1. Northwest China Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China; 3. Xi'an Capital Water Company Limited, Xi'an 710086, China)

Abstract: The concentrations of phthalates (PAEs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water phase and sludge phase in each structure and DE oxidation ditch of Beishiqiao Wastewater Treatment Plant in Xi'an was detected by gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry (GC-MS/MS). Five kinds of PAEs and six kinds of PAHs were detected in the influent from the wastewater treatment plant, and the biological treatment unit was the main place for their removal. In anaerobic selector, the removal rate of PAEs in water phase in descending order was DEHA (33.6%), DEHP

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2021JM-365、2021JM-425); 陕西省教育厅重点实验室项目(20JS083)
通信作者: 李伟 E-mail: liwei@xauat.edu.cn

(33.1%), DEP (25.7%), DBP (24.6%) and DMP (17.5%), and that of PAHs in water phase in descending order was Chr (35.9%), Pyr (35.0%), Flu (32.7%), Phe (30.3%), Ant (28.0%) and Nap (27.3%), which was mainly caused by the dilution and adsorption of the returned sludge from the secondary sedimentation tank. After the treatment of the subsequent DE oxidation ditch, the removal rate of PAEs in water phase in descending order was DEP (89.3%), DMP (86.4%), DBP (58.0%), DEHP (29.4%) and DEHA (19.0%), and that of PAHs in water phase in descending order was Nap (68.8%), Ant (58.3%), Flu (48.6%), Phe (45.7%), Pyr (12.3%) and Chr (8.5%). In the sludge phase, the concentrations of these two substances remained basically unchanged, indicating that biodegradation was the main reason for the removal of PAEs and PAHs.

Key words: phthalates; polycyclic aromatic hydrocarbons; DE oxidation ditch; degradation characteristics

邻苯二甲酸酯(PAEs)和多环芳烃(PAHs)是环境中常见的两类持久性有机微污染物。其中, PAEs是一类内分泌干扰物,具有生殖毒性和生长发育毒性。PAHs容易在生物体内蓄积,具有较强的致癌、致畸和致突变性^[1]。因此,许多国家已将这两类物质列入环境优先控制污染物名单。

污水处理厂是削减城市污水中有机物、氮和磷等污染物的主要场所,近年来其对PAEs和PAHs等有机微量污染物的去除受到广泛关注^[2-3]。与传统活性污泥法相比,DE氧化沟具有占地面积小、脱氮除磷效果好等优点^[4]。尽管常规污染物在DE氧化沟中的降解过程已被广泛研究,但有关PAEs和PAHs等有机微量污染物的去除尚未见报道。笔者对北石桥污水处理厂各构筑物、DE氧化沟不同阶段水相及泥相中的PAEs和PAHs浓度进行检测,探讨了它们的降解特征。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验仪器:气相色谱-三重四级杆质谱联用仪(GC-MS/MS);全自动固相萃取仪,采用ENVI C₁₈固相萃取小柱;HN200多功能氮吹仪。

试验试剂:7种PAEs混合标准溶液[邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸丁苄酯(BBP)、己二酸二辛酯(DEHA)、邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)]、16种PAHs混合标准溶液[苊烯(AcPY)、苊(Acp)、萘(Nap)、荧蒹(FL)、苯并[b]荧蒹(BbFL)、苯并[g,h,i]苊(BP)、茚(Flu)、二苯并[a,h]蒹(DBA)、蒹(Ant)、苊(Chr)、茚

并(1,2,3-cd)苊(Ind)、苯并(a)荧蒹(BkFL)、苊(Pyr)、菲(Phe)、苯并(a)苊(BaP)、苯并(a)蒹(BaA)、2,4,5,6-四氯间二甲苯(内标)。

1.2 样品采集及保存

采集西安市北石桥污水净化中心各构筑物出水及厌氧选择池污泥、DE氧化沟污泥和回流污泥样品。以10 min为间隔采集了DE氧化沟一个周期内的水样和泥样,取样点位置见图1(BO为硝化过程、BS为反硝化过程)。各采样点取样量为2 L,加入HCl将pH调至2.5,分别经滤纸和0.45 μm混合纤维滤膜过滤后,放入冰箱(4℃)保存待用。所取泥样经冷冻干燥后放入冰箱(4℃)保存待用。

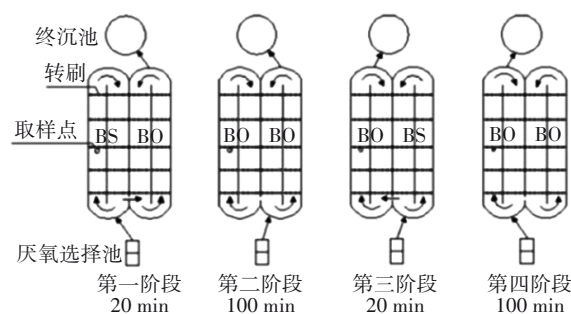


图1 DE氧化沟内取样点位置示意

Fig.1 Schematic diagram of sampling points in DE oxidation ditch

1.3 样品处理

水样:取1 L水样,萃取前加入内标和10 mL甲醇。先使用6 mL甲醇以6 mL/min的速度活化固相萃取柱,然后以5 mL/min的速度吸取1 L水样,接着使用6 mL试剂水(含1%甲醇的超纯水)以6 mL/min的速度淋洗固相萃取柱,再使用氮气干燥固相萃取柱,最后使用9 mL二氯甲烷在1 mL/min条件下洗

脱,将收集的洗脱液在氮吹仪中吹干,使用 1 mL 甲基叔丁基醚复溶后待测。

泥样:对泥样的处理采用 QuEChERS 方法^[5]。将污泥冷冻干燥 24 h,将冷干后的干污泥称取 1 g 移入离心管,依次加入 200 μ L 冰醋酸和 10 mL 正己烷,涡旋 1 min,依次加入 4 g $MgSO_4$ 、1 g NaCl,涡旋 1 min,在 3 400 r/min 下离心 8 min,取上清液过 0.22 μ m 滤膜后采用 GC-MS/MS 进行检测。

1.4 分析条件

色谱条件:色谱柱为 HP-5MS(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m),载气为氦气,流速为 1 mL/min,不分流进样。升温至 70 $^{\circ}C$ (保持 2 min),以 25 $^{\circ}C/min$ 升至 150 $^{\circ}C$,以 3 $^{\circ}C/min$ 升至 200 $^{\circ}C$,最后以 8 $^{\circ}C/min$ 升至 280 $^{\circ}C$ 。进样口温度为 280 $^{\circ}C$ 。

质谱条件:采用电子轰击源(EI),电离能为 70 eV;离子源温度为 280 $^{\circ}C$;采用多反应监测模式。

2 结果与讨论

2.1 主要构筑物对 PAEs 和 PAHs 的去除效果

试验期间共检测出 5 种 PAEs 和 6 种 PAHs,其在各构筑物中的浓度如表 1 和表 2 所示。可以看出,曝气沉砂池对 PAEs 和 PAHs 基本没有去除效

果。而厌氧选择池和 DE 氧化沟对这两类微量污染物的去除效果较为显著。其中,厌氧选择池对水相中 PAEs 的去除率排序为 DEHA(33.6%)>DEHP(33.1%)>DEP(25.7%)>DBP(24.6%)>DMP(17.5%),对 PAHs 的去除率排序为 Chr(35.9%)>Pyr(35.0%)>Flu(32.7%)>Phe(30.3%)>Ant(28.0%)>Nap(27.3%)。鉴于厌氧选择池的水力停留时间仅为 8 min,回流污泥的稀释作用可能是其浓度降低的主要原因^[4]。此外,厌氧选择池出水泥相中 PAEs 和 PAHs 的浓度明显高于回流污泥中 PAEs 和 PAHs 的浓度,这表明活性污泥吸附是水相中 PAEs 和 PAHs 浓度降低的另一个原因。后续 DE 氧化沟对 PAEs 和 PAHs 的去除效果也很明显,对 PAEs 的去除率为 DEP(89.3%)>DMP(86.4%)>DBP(58.0%)>DEHP(29.4%)>DEHA(19.0%),对 PAHs 的去除率为 Nap(68.8%)>Ant(58.3%)>Flu(48.6%)>Phe(45.7%)>Pyr(12.3%)>Chr(8.5%)。DE 氧化沟出水泥相中 PAEs 和 PAHs 浓度接近厌氧选择池出水泥相中的浓度,表明水相中 PAEs 和 PAHs 浓度降低的主要原因是生物降解,而非活性污泥吸附。

表 1 水相及泥相中 PAEs 浓度的变化

Tab.1 Change of PAEs concentrations in water and sludge phases

项 目	水相/(ng \cdot L ⁻¹)					泥相/(μ g \cdot kg ⁻¹)		
	进水	曝气沉砂池	厌氧选择池	DE 氧化沟	二沉池	厌氧选择池	DE 氧化沟	回流污泥
DMP	5 707	5 455	4 502	614	549	381	333	323
DEP	613	618	459	49	48	170	173	142
DBP	7 795	7 625	5 749	2 416	2 401	603	513	485
DEHA	1 081	1 123	746	604	577	261	258	202
DEHP	9 975	9 731	6 512	4 596	4 585	824	802	622
Σ PAEs	2 5171	24 552	17 978	8 279	8 159	2 241	2 080	1 776

表 2 水相及泥相中 PAHs 浓度的变化

Tab.2 Change of PAHs concentrations in water and sludge phases

项 目	水相/(ng \cdot L ⁻¹)					泥相/(μ g \cdot kg ⁻¹)		
	进水	曝气沉砂池	厌氧选择池	DE 氧化沟	二沉池	厌氧选择池	DE 氧化沟	回流污泥
Nap	18	22	16	5	5	12	12	10
Flu	53	52	35	18	18	26	27	22
Phe	128	132	92	50	49	65	43	54
Ant	54	50	36	15	18	9	9	7
Pyr	312	300	195	171	170	196	190	155
Chr	130	128	82	75	75	97	93	75
Σ PAHs	695	684	456	334	335	406	345	327

厌氧选择池对不同种类 PAEs 和 PAHs 的去除效果也有较大差异。相较而言,厌氧选择池对辛醇

比系数高、分子质量大的物质去除率更高,例如对DEHP和Chr的去除率可分别达到33.1%和35.9%;而对辛醇比系数和分子质量较小的物质去除率相对较低,例如厌氧选择池对DMP和Nap的去除率分别为17.5%和27.3%。这是因为活性污泥对有机微污染物的吸附是其浓度下降的主要原因之一,而具有较大辛醇比系数的物质更容易被活性污泥吸附^[6]。

与厌氧选择池相反,DE氧化沟对分子质量较大的PAEs(DEHA和DEHP)和PAHs(Pyr和Chr)去除率较低,这与周林军等^[7]的研究结果一致,即好氧生物处理对PAEs的去除率随着分子质量的增大而减小。分子质量较大的PAEs具有更复杂的化合物结构,从而加大了空间位阻效应,使得微生物不能有效地接触目标物,导致去除率较低。

2.2 PAEs和PAHs在DE氧化沟中的去除效果

通过对DE氧化沟一个周期四个阶段水相和泥相中PAEs和PAHs浓度的测定,发现它们在水相中的浓度变化较明显,而在活性污泥中的浓度基本不变。这可能是因为:①流入DE氧化沟的是厌氧选择池出水(泥水混合液),由于污泥的吸附点位已被完全占据,所以活性污泥的吸附基本不起作用;②污泥中吸附的PAEs和PAHs生物降解速度较慢,其半衰期长达数日^[8],而DE氧化沟一个循环周期只有4h,所以微生物代谢对PAEs和PAHs赋存浓度影响较小。因此,仅分析水相中PAEs和PAHs浓度的变化。

2.2.1 第一阶段

DO和常规污染物浓度在DE氧化沟中的变化如图2所示。

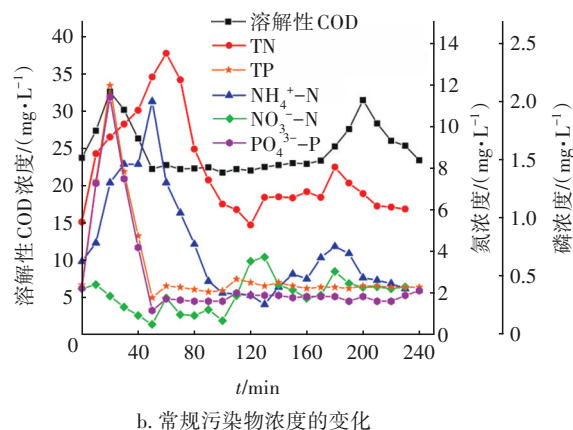
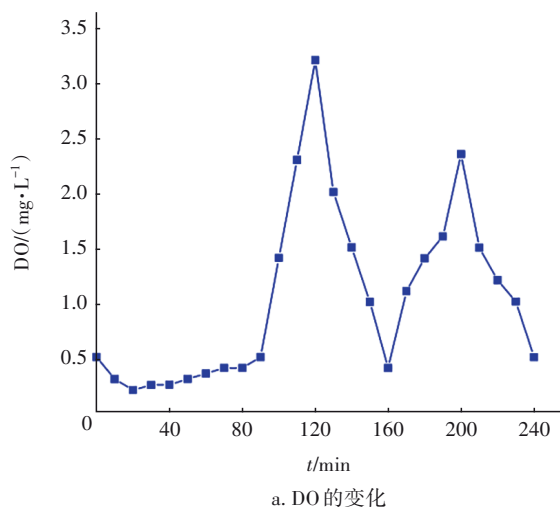
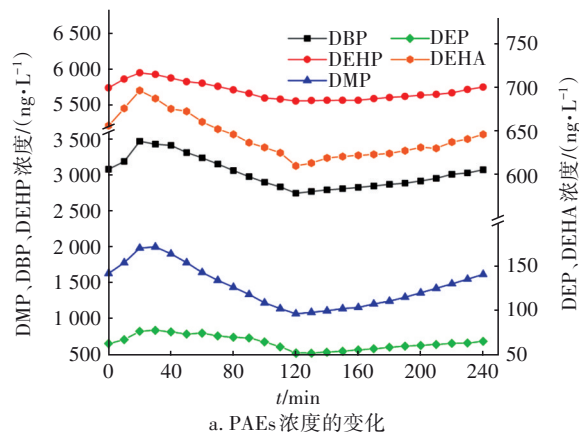


图2 DO和常规污染物浓度在DE氧化沟中的变化

Fig.2 Change of DO and conventional pollutant concentrations in DE oxidation ditch

本阶段I沟进水,且I沟转刷停止工作,混合液由I沟流向II沟。混合液的DO浓度由0.5 mg/L快速降低到0.2 mg/L,氧化沟为厌氧状态; NH_4^+-N 浓度从3.53 mg/L增加到7.31 mg/L, NO_3^--N 浓度由2.22 mg/L下降到1.87 mg/L;同时,聚磷菌大量释放 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$,致使本阶段的TP和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度大幅度升高;由于进水中包含大量溶解态有机物,导致溶解性COD由23.8 mg/L升高至32.6 mg/L。

与 NH_4^+-N 和溶解性COD的变化类似,本阶段5种PAEs和6种PAHs的浓度均呈上升趋势,如图3所示。这是由DE氧化沟进水中PAEs和PAHs的浓度较高、生物降解速率较慢导致的。Chang等^[9]研究了PAEs在厌氧条件下的降解速率,发现即使在30℃和pH为7.0的最佳条件下,DEP、DBP、DEHP的降解速率常数仅分别为0.045、0.074、0.027 d^{-1} 。Yuan等^[10]的研究结果表明,沉积物中Acp、Flu、Phe、Ant、Pyr的厌氧降解速率也仅分别为0.194、0.096、0.067、0.029、0.013 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。



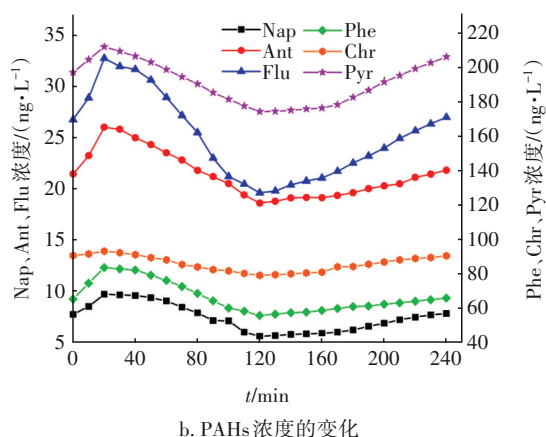


图3 水相中PAEs和PAHs浓度在DE氧化沟中的变化

Fig.3 Change of PAEs and PAHs concentrations in water phase in DE oxidation ditch

2.2.2 第二阶段

第二阶段共计100 min, II沟进水, I沟和II沟相互独立。此阶段I沟转刷开启曝气,混合液DO浓度逐渐升高并达到好氧状态; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度从7.31 mg/L下降到2.02 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度由1.87 mg/L最低下降到0.69 mg/L;聚磷菌会把磷过量吸收到体内,致使TP和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度大幅度下降;本阶段没有进水且有机物降解速率较快,溶解性COD由32.6 mg/L快速降低至22.3 mg/L。

本阶段5种PAEs和6种PAHs浓度都呈现出明显的下降趋势。Huang等^[11]研究了PAEs在A²/O反应器中的降解规律,发现厌氧反应器、缺氧反应器和好氧反应器的PAEs去除量分别占总去除量的17.14%、15.02%和63.46%。有研究表明^[12],曝气过程可将PAHs去除率提高90%。本阶段氧化沟I沟不进水,并且I沟和II沟相互独立,好氧条件下PAEs和PAHs浓度呈下降趋势。水相中对PAEs的去除率为6.3%~45.9%,其中对DMP的去除率最高(45.9%),对DEHP的去除率最低(6.3%);对PAHs的去除率为15.1%~42.2%,对Nap的去除率最高(42.2%),对Chr的去除率最低(15.1%),这与周林军等^[7]所报道的分子质量越大微污染物越难生物降解的结论一致。

2.2.3 第三阶段

本阶段转刷依然开启,混合液由II沟流向I沟。尽管本阶段DO浓度较高(1.5~3.2 mg/L),但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度并没有明显下降,主要是因为含有较高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的II沟混合液进入I沟所致;尽管DO

浓度较高,但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度仅略有增加,这可能是由于大量菌胶团内部仍处于缺氧状态或同步硝化反硝化所致^[4];TP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和溶解性COD浓度仍维持在较低水平。

本阶段5种PAEs和6种PAHs浓度均有小幅度增加,可能是由于碳源不足所致。韩蕊等^[13]的研究表明,当碳源不足时,微生物的降解速率也会随之下降。第三阶段的碳源处于较低水平,虽然还是处于好氧条件,但本阶段微生物的降解速率小于第二阶段,加之II沟混合液的流入会对I沟有一定的冲击,因此本阶段PAEs和PAHs浓度出现了小幅度增加。

2.2.4 第四阶段

第四阶段中,I沟进水,转刷依然开启,随着转刷开启个数的变化,DO浓度基本呈现出先升高后下降的趋势;DO浓度的变化导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加;随着硝化反应的进行, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度也有一定程度的升高;聚磷菌在好氧条件下对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的过量吸收致使磷维持在较低水平。尽管本阶段进水中带入了大量溶解态有机物,但在好氧条件下微生物对有机物的去除速率较快,所以溶解性COD并没有过高积累。

本阶段5种PAEs和6种PAHs浓度都呈现出明显的上升趋势。高春娣等^[14]的研究结果表明,好氧条件下降解有机物过程中,当DO降低时,微生物的降解速率会下降。本阶段DO下降会降低微生物的活性,从而降低对PAEs和PAHs的降解。同时,进水中带入的PAEs和PAHs浓度较高,导致本阶段PAEs和PAHs浓度呈现出明显的上升趋势。

3 结论

① 生物处理单元是PAEs和PAHs去除的主要场所,其中厌氧选择池对水相中 ΣPAEs 和 ΣPAHs 的去除率分别为26.8%和33.3%,二沉池回流污泥的稀释作用和吸附作用是其下降的主要原因。DE氧化沟对水相中 ΣPAEs 和 ΣPAHs 的去除率分别为53.9%和26.7%,生物降解作用是主要原因。

② DE氧化沟I沟第一阶段处于厌氧状态,PAEs和PAHs浓度显著增加;第二阶段处于好氧状态,同时没有进水的影响,PAEs和PAHs浓度明显降低;第三阶段处于好氧状态,但是本阶段碳源不足导致微生物降解速率变慢,PAEs和PAHs浓度有小

幅增加;第四阶段处于好氧状态,但是本阶段DO的降低导致微生物降解速率有所下降,且进水中又含有较高浓度的PAEs和PAHs,致使第四阶段PAEs和PAHs浓度显著增加。

参考文献:

- [1] ZHANG A G, ZHAO S L, WANG L L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 113(1/2): 592-599.
- [2] 李梅,王翠彦,于小迪,等. 污水处理厂中邻苯二甲酸酯类物质分布及去除特性研究[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5): 186-190.
- LI Mei, WANG Cuiyan, YU Xiaodi, *et al.* Distribution and removal characteristics of phthalic acid esters in sewage treatment plants [J]. *Journal of Safety and Environmen*, 2014, 14(5): 186-190(in Chinese).
- [3] SUN J S, JIA L R, LI B, *et al.* The occurrence and fate of PAHs over multiple years in a wastewater treatment plant of Harbin, Northeast China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 491-498.
- [4] DUAN J M, LI W, ZHAO K, *et al.* Variation of organics, nitrogen and phosphorus within a cycle of a bio-denitro system [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 40(1/3): 24-32.
- [5] SADOWSKA-ROCIK A, SURMA M, CIESLIK E. Comparison of different modifications on QuEChERS sample preparation method for PAHs determination in black, green, red and white tea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(2): 1326-1338.
- [6] 李清雪,王钊,张翠平,等. 城市污水处理系统中典型内分泌干扰物的迁移转化特征[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(5): 2383-2386.
- LI Qingxue, WANG Zhao, ZHANG Cuiping, *et al.* Occurrence and removal of typical endocrine disrupting chemicals in a wastewater treatment plant [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5): 2383-2386(in Chinese).
- [7] 周林军,古文,刘济宁,等. 11种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 1972-1981.
- ZHOU Linjun, GU Wen, LIU Jining, *et al.* Fate of eleven phthalic acid esters in aerobic sewage treatment system [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5): 1972-1981(in Chinese).
- [8] 梁志锋,周文,林庆祺,等. 城市污泥中邻苯二甲酸酯(PAEs)的厌氧微生物降解[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(4): 1163-1170.
- LIANG Zhifeng, ZHOU Wen, LIN Qingqi, *et al.* Anaerobic biodegradation of phthalic acid esters (PAEs) in municipal sludge [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(4): 1163-1170.
- [9] CHANG B V, LIAO C S, YUAN S Y. Anaerobic degradation of diethyl phthalate, di-*n*-butyl phthalate, and di-(2-ethylhexyl) phthalate from river sediment in Taiwan [J]. *Chemosphere*, 2005, 58(11): 1601-1607.
- [10] YUAN S Y, CHANG B V. Anaerobic degradation of five polycyclic aromatic hydrocarbons from river sediment in Taiwan [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2007, 42(1): 63-69.
- [11] HUANG M Z, MA Y W, WANG Y, *et al.* The fate of di-*n*-butyl phthalate in a laboratory-scale anaerobic/anoxic/oxic wastewater treatment process [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(20): 7767-7772.
- [12] LICHTFOUSE E, SCHWARZBAUER J, ROBERT D, *et al.* *Environmental Chemistry: Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems* [M]. Berlin: Springer, 2005.
- [13] 韩蕊,王冬莹,芮洋,等. 一株降解邻苯二甲酸酯真菌的筛选及其降解特性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 2941-2946.
- HAN Rui, WANG Dongying, RUI Yang, *et al.* Biodegradation of PAEs by a newly isolated fungus *Eupenicillium javanicum* F9 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(11): 2941-2946 (in Chinese).
- [14] 高春娣,王淑莹,彭永臻,等. DO对有机物降解速率及污泥沉降性能的影响[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(5): 12-15.
- GAO Chundi, WANG Shuying, PENG Yongzhen, *et al.* Influence of DO on organic matter degradation rate and sludge settling property [J]. *China Water & Wastewater*, 2001, 17(5): 12-15(in Chinese).

作者简介:白强(1995-),男,陕西泾阳人,硕士研究生,研究方向为持久性有机物去除技术。

E-mail:2455121893@qq.com

收稿日期:2022-04-11

修回日期:2022-05-20

(编辑:任莹莹)