

# 贵屿土壤对污泥堆肥去除十溴联苯醚的影响

卢 妙<sup>1,2</sup>, 尹 华<sup>1,2</sup>, 彭 辉<sup>3</sup>, 杨萍萍<sup>1,2</sup>, 唐少宇<sup>1,2</sup>, 刘 皓<sup>1,2</sup>,  
魏西鹏<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学环境与能源学院 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广东 广州 510006; 2. 华南理工大学 广东省环境风险防控与应急处置工程技术研究中心, 广东 广州 510006; 3. 暨南大学 化学与材料学院, 广东 广州 510632)

**摘 要:** 考察了利用污泥堆肥同时实现污泥资源化、减量化和去除污泥中十溴联苯醚(BDE209)的可行性。以污泥、锯末、蘑菇渣为堆肥原料,通过测定堆体中BDE209浓度、温度、pH值、有机质含量、含水率及种子发芽指数等,比较了有/无添加贵屿土壤的堆肥效果,并分析了添加贵屿土壤对BDE209的去除效果。富集培养两个堆体物料中的微生物,制成相应的BDE209微生物复合菌剂,探讨了微生物是否是堆体降解BDE209的主要原因。结果表明,有/无添加贵屿土壤的堆体可维持55℃以上的时间分别为7和6d,均达到了堆体物料无害化要求;贵屿土壤的添加促进了堆肥物料的腐熟和BDE209的去除效果,使种子发芽指数从85.2%提高到102.3%,BDE209的残留率从86.2%下降到28.2%,并使BDE209的降解半衰期从203.9d下降到15.4d。从添加贵屿土壤堆体中提取的微生物复合菌剂对BDE209的去除率高达53.0%,而从对照堆体中提取的微生物复合菌剂对BDE209的去除率在10%以内,复合菌剂降解半衰期也从49.5d缩短到4.3d,表明生物降解可能是污泥好氧堆肥过程中BDE209的主要去除途径。

**关键词:** 污泥堆肥; 贵屿土壤; 十溴联苯醚; 微生物复合菌剂

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)05-0109-06

## Effect of Guiyu Soil on Removal of Decabromodiphenyl Ether(BDE209) by Sludge Composting

LU Miao<sup>1,2</sup>, YIN Hua<sup>1,2</sup>, PENG Hui<sup>3</sup>, YANG Ping-ping<sup>1,2</sup>, TANG Shao-yu<sup>1,2</sup>,  
LIU Hao<sup>1,2</sup>, WEI Xi-peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Lab of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters <Ministry of Education>, School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Environmental Risk Prevention and Emergency Disposal, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. College of Chemistry and Materials Science, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** Feasibility of simultaneous sludge resource, reduction and removal of decabromodiphe-

基金项目: 广东省科技厅公益研究与能力建设专项重点项目(2015B020215006); 广州市科信局产学研协同创新重大专项(2014Y2-00523)

通信作者: 尹华 E-mail: huayin@scut.edu.cn

nyl ether (BDE209) by sludge composting was investigated. Municipal sludge, sawdust and mushroom residues were chosen as raw materials for composting, the composting effect of adding and without adding Guiyu soil was compared by determining BDE209 concentration, temperature, pH value, organic matter content, moisture content and germination index (GI), and the effect of adding Guiyu soil on the removal of BDE209 was also evaluated. The relevant compound microorganism bacterium agent of BDE209 was prepared through the enrichment culture of microorganisms in the pile, to explore whether the microorganisms played an important role in the removal of BDE209. The results showed that durations of the two piles that keeping the temperature above 55 °C were 7 days and 6 days respectively, both of which had met the harmless requirement. The addition of Guiyu soil to the pile had positive impacts on the removal of BDE209 and GI, which increased the GI from 85.2% to 102.3%, decreased the BDE209 residual rate from 86.2% to 28.2%, and reduced the half-time of BDE209 from 203.9 d to 15.4 d. The removal rate of BDE209 by the microorganism extracted from the pile added with Guiyu soil was as high as 53.0%, but the removal rate of BDE209 from the control pile was less than 10%, and the half-time of compound microorganism bacterium agent was decreased from 49.5 d to 4.3 d. The results showed that biodegradation was the main removal pathway of BDE209 during sludge composting.

**Key words:** sludge composting; Guiyu soil; BDE209; compound microorganism bacterium agent

多溴联苯醚(PBDEs)由于价格低廉且阻燃效果优异,被广泛应用于电子电器等产品中。由于电子产品与PBDEs间缺乏化学键的束缚作用,使得电子产品中的PBDEs很容易进入环境,并随着大气、水体的迁移而造成广泛的污染,给人类、自然环境和野生动物等带来重大生态危害和健康风险<sup>[1,2]</sup>。

广东省汕头市贵屿镇是我国乃至全世界最大的电子垃圾拆解处置地,当地的生态环境已经受到了PBDEs等持久性有机污染物(POPs)的严重污染<sup>[3]</sup>。十溴联苯醚(BDE209)是检出率最高的一种PBDEs<sup>[4]</sup>,Peng和孟祥周等<sup>[5,6]</sup>报道了珠三角地区典型城市污水处理厂脱水污泥中含有较高浓度的BDE209。污泥好氧堆肥是一种传统且比较主流的剩余污泥处置方法,目前已有学者利用该方法修复四溴联苯醚<sup>[7]</sup>、五氯苯酚<sup>[8]</sup>和多环芳烃<sup>[9]</sup>等污染土壤,但该方法能否有效去除污泥中的BDE209尚未见报道。

笔者在污泥堆肥体系中加入长期受BDE209污染的贵屿土壤作为堆体接种BDE209的降解菌种<sup>[10]</sup>,考察贵屿土壤的添加对堆肥体系降解BDE209的影响。试验包括两方面:①以城镇脱水污泥为堆肥基质,将贵屿土壤作为微生物接种剂,以锯末、蘑菇渣作为调理剂,通过污泥好氧堆肥分析系统中BDE209的残留率和浓度、温度、pH值、含水率、有机质含量等变化,并分析BDE209的降解动力学特性;②富集培养堆肥样品中的微生物,并制成针对BDE209的微生物降解复合菌剂体系。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验以城镇脱水污泥作为堆肥基质,污泥取自广州市某污水处理厂。锯末购买于广州某木材加工厂,贵屿土壤取自广东省汕头市贵屿镇,蘑菇渣购买于安徽省六安市某园艺公司。各原材料的性质如表1所示。

表1 堆肥原料的主要成分

Tab.1 Primary composition of composting materials

项 目	含水率/%	有机质/%	C含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	N含量/(g·kg <sup>-1</sup> )	C/N值	BDE209浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )
污泥	76.67±0.03	36.46±0.42	137.68±0.16	23.89±0.17	5.76	0.059±0.004
蘑菇渣	16.78±0.04	60.93±0.41	264.37±0.84	25.83±0.37	10.23	—
锯末	11.73±0.08	99.14±0.07	502.43±1.42	1.45±0.02	346.51	—
贵屿土壤	10.45±0.04	6.73±0.23	36.48±0.07	10.57±0.25	3.45	1.472±0.007

## 1.2 堆肥试验

将 BDE209 溶于丙酮中,再将丙酮均匀喷洒于蘑菇渣中,在通风厨中放置 24 h,丙酮挥发完全后待用。设计 A、B 两个堆体,其中堆体 A 中污泥、锯末、蘑菇渣、贵屿土壤的质量比为 10:3:1:1,堆体 B 中污泥、锯末、蘑菇渣的质量比为 10:3:1,两个堆体的总质量均为 20 kg,两个堆肥体系中 BDE209 的初始浓度均为 2 mg/kg。将堆肥混合物放入高为 0.40 m、直径为 0.40 m 且保温良好的不锈钢反应罐中,采用间歇式通风,通风量为  $0.40 \text{ m}^3/\text{h}^{[11]}$ 。反应开始后,前 14 d 曝气间隔为 10 min,14 d 以后为 20 min,曝气时长均为 1 min。每 7 d 取样 1 次,测定 BDE209 浓度、堆体温度、pH 值、有机质含量、含水率及种子发芽指数,运行时间为 42 d。

## 1.3 微生物菌剂富集培养及复合菌剂体系设计

培养基:称取 10.0 g 蛋白胨、3.0 g 牛肉膏、5.0 g 的 NaCl 溶于 1 L 超纯水中,用玻璃棒充分搅拌,调节溶液 pH 值至 7.0 左右,于 121 °C、101.3 kPa 条件下灭菌 30 min 备用。

微生物菌剂的富集培养:从 A、B 两个堆体中分别称取 1.0 g 堆肥样品接种到上述 100 mL 培养基中,于 160 r/min、35 °C 摇床中培养 24 h。再从 100 mL 培养基中取出 1 mL 转接 1 次,继续培养 24 h 备用。

微生物菌剂降解 BDE209:将上述富集培养的微生物菌剂在超速离心机中离心(8 000 r/min)10 min,用超纯水清洗菌体 3 次,配制成 1 g/L 的菌悬液。将 2 mL 菌悬液投加到 20 mL 的 BDE209 溶液(1 mg/L)中,以去离子水代替菌悬液作为对照,每天取样 1 次,测定溶液中 BDE209 的浓度。

## 1.4 测定项目及方法

### 1.4.1 堆肥相关指标的测定方法

每天下午 5 点测定堆体温度。称取一定量的湿样放于冷冻干燥机中,以计算含水率。称取 1 g 左右上述冷冻干燥好的样品,放入马福炉(550 °C)中烘烤 6 h,以计算有机质含量。将湿样与去离子水按照质量比为 1:10 置于 25 °C、200 r/min 的摇床中振荡 3 h,充分浸提,离心后提取上清液测定 pH 值。取 5 mL 上述提取出来的上清液,注入铺有两层滤纸、直径为 9 cm 的培养皿中,每个培养皿中均匀放置 20 颗壮硕无损的白菜种子,每个样品做 3 个平行试验,用蒸馏水作为对照,在 25 °C 黑暗条件下培养

48 h,计算种子发芽指数(GI)。

### 1.4.2 堆肥样品中 BDE209 的相关计算

将堆肥样品冷冻干燥后磨细过 100 目筛,称取 2 g 干燥堆肥样品放入 50 mL 离心管中,向其中加入 20 mL 二氯甲烷和正己烷混合溶液(体积比为 1:1),在旋涡振荡器上振荡 5 min,接着在高速离心机中以 5 000 r/min 离心 5 min,将上清液过无水硫酸钠后倒入鸡心瓶中。残渣按照上述步骤再萃取 2 次。将收集到的上清液于 45 °C 下旋转蒸发至 1 mL 左右,过硅胶氧化铝层析柱净化后旋干,再用甲醇(色谱纯)定容至 10 mL,通过高效液相色谱(HPLC)测定 BDE209 浓度,并用灰分修正 BDE209 浓度。

### 1.4.3 微生物菌剂降解 BDE209 的相关计算

将微生物菌剂降解 BDE209 体系中的液体和对照组样品均置于分液漏斗中,滴加 3 滴 6 mol/L 的 HCl,再加入 20 mL 正己烷/二氯甲烷溶液(体积比为 1:1)后振荡萃取 2 min(重复 3 次),将收集到的有机相转移到鸡心瓶中,用旋转蒸发仪蒸干,再用甲醇定容后测定 BDE209 浓度。

### 1.4.4 BDE209 的降解特性及半衰期

一般采用一级反应动力学来描述 POPs 的降解特性。将堆肥或降解体系中 BDE209 的残留量( $C_t$ )与降解时间( $t$ )进行指数相关回归分析,得到相关系数后,验证可否用一级动力学方程  $C_t = C_0 \times e^{-kt}$  来描述(其中, $k$  为降解速率常数; $C_0$  为堆体初始 BDE209 浓度),若可以,则半衰期  $T_{0.5} = \ln 2/k^{[12]}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆肥过程中理化参数的变化

#### 2.1.1 温度的变化

图 1 为堆肥过程中温度的变化。在堆肥前期(0~4 d),由于堆体中营养物质丰富,微生物大量繁殖,使得 A 和 B 两个堆体的温度呈快速上升趋势。到第 5 天时,由于两个堆体均经过高温期,微生物数量降低,堆体温度开始下降。A、B 两个堆体在 55 °C 以上分别维持了 7 和 6 d,最高温度分别为 67.9 和 66.1 °C,因此两个堆体都达到了《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—2012)要求。与此同时,A、B 两个堆体在 45 °C 以上的时间均为 10 d 以上,可见有足够的时间来消耗堆体中的有机质。至堆肥后期,堆体温度随室温波动,堆体腐熟。由于堆体 A 最高温度高于堆体 B,因此堆体 A 的反应较堆体 B 更强烈,堆体 A 中 BDE209 的残留率可能较堆体 B 低。

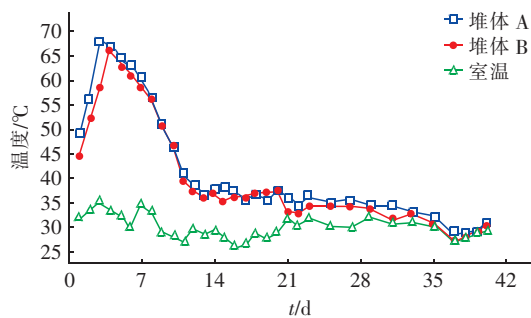


图1 温度的变化

Fig. 1 Change of temperature

### 2.1.2 含水率的变化

由于堆肥反应罐属于密闭系统,只留有进气口和出气口,所以堆肥产生的水分和因高温挥发产生的水蒸气等很少能挥发出去。因此在堆肥初期,堆体的含水率只呈现缓慢降低的趋势;当堆肥进行到第14天时,打开反应罐盖子,堆体的含水率迅速降低,到堆肥腐熟阶段,堆体A、B的含水率均维持在40%~60%之间,适宜污泥堆肥。因此本试验过程中含水率不会影响目标微生物对BDE209的降解。

### 2.1.3 有机质含量的变化

在堆肥初期,堆体中有机质含量迅速下降,微生物反应剧烈;当堆肥进行到第14天以后,A、B堆体中有机质含量均比较稳定,降温基本完成。到堆肥结束时,A、B两个堆体的有机质含量均在45%左右,分别降低了11.2%和14.6%。在整个堆肥过程中,0~14 d内有机质含量迅速降低,堆体中微生物反应最剧烈,因此在0~14 d内目标菌剂对BDE209的降解速度也可能是最快的。

### 2.1.4 pH值的变化

堆肥初始时,A、B两个堆体的pH值分别为6.68与6.71,当堆肥进行到第7天时,由于堆体中有机质快速分解,堆体温度快速上升,铵态氮含量增加,导致堆体的pH值快速上升,A、B两个堆体的pH值分别达到最大值,为8.82和8.43。当堆肥进行到第14天时,堆体反应温度下降,因此pH值稍有降低。在堆肥中后期,即21~42 d,整个堆体中营养物质大量消耗,堆体的反应速度下降,堆体pH值呈现逐渐下降的趋势。到堆肥结束时,A、B两个堆体的pH值分别为7.73和7.64。

### 2.1.5 种子发芽指数的变化

图2为堆肥过程中种子发芽指数的变化。可知,堆肥开始时,因贵屿土样中含有BDE209等有毒

有害物质,使得堆体A的种子发芽指数比堆体B低;当堆肥进行到第7天时,小分子物质快速分解,产生大量的铵态氮,pH值迅速增高,使得A、B堆体的种子发芽指数相对于开始时均稍有降低。当堆肥进行到第35天时,A、B两个堆体的种子发芽指数均达到了80%以上,表明两个堆体都已经达到了腐熟。并且到堆肥结束时,堆体A的种子发芽指数达到了102.3%,说明堆肥结束后堆体A对植物生长有一定的促进作用。而且从第21天开始,堆体A的种子发芽指数明显优于堆体B,因此在堆肥后期堆体A中BDE209残留率可能小于堆体B。

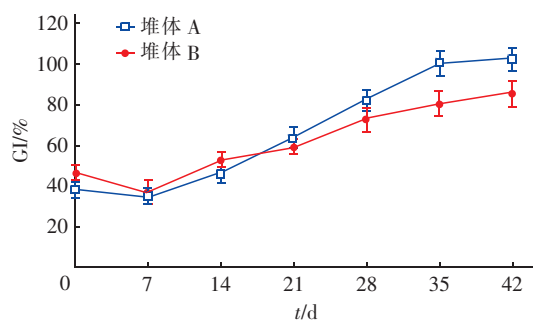


图2 种子发芽指数的变化

Fig. 2 Change of GI

## 2.2 堆肥样品中BDE209浓度的变化及降解特性

### 2.2.1 BDE209浓度的变化

在整个堆肥过程中,两个堆体BDE209的浓度和残留率均随着时间的延长而下降(见图3)。在堆肥前期(0~14 d),堆体中营养物质丰富,有机质快速分解,微生物新陈代谢旺盛,使得堆体A中BDE209的浓度和残留率快速降低;在堆肥中后期(15~42 d),由于堆体中有机质含量下降,营养物质大量消耗,堆体A中微生物新陈代谢速度减慢,导致BDE209的浓度和残留率整体变化较小。到堆肥结束时,堆体A中BDE209的浓度为0.564 mg/kg,此时残留率仅为28.2%;而堆体B中BDE209的浓度仍高达1.724 mg/kg,其残留率为86.2%,说明少量贵屿土壤的添加对污泥堆肥去除BDE209的效果较好。在整个反应过程中,A、B两个堆体的BDE209残留率均有所降低,说明BDE209的去除与污染物的挥发及腐熟物料的吸附有一定的关系。而添加贵屿土壤的堆体A对BDE209的降解可能是由于添加的贵屿土壤中含有丰富的BDE209降解菌,同时堆体中含有丰富的营养物质可供BDE209降解菌使用,使得堆肥结束时堆体A中BDE209的浓度



和残留率大大低于堆体 B。

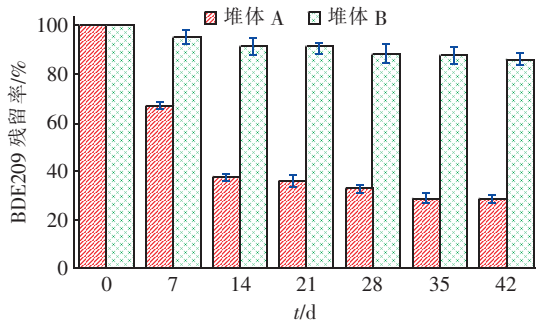


图 3 污泥堆肥过程中 BDE209 残留率的变化

Fig. 3 Change of BDE209 residual rate during sludge composting

### 2.2.2 堆料中 BDE209 的降解特性

BDE209 在 A、B 堆体中的降解特性见表 2。可见,BDE209 在两堆体中的降解特性均可用一级动力学方程来描述,并且贵屿土壤的添加使污泥堆肥降解 BDE209 的速率提升了 13.2 倍。

表 2 BDE209 在 A、B 堆体中的降解特性

Tab. 2 Degradation characteristics of BDE209 in different piles

项 目	降解动力学方程	相关系数	拟合度/%	降解半衰期/d
堆体 A	$C_t = 1.67 \times e^{-0.045t}$	0.89	79.93	15.4
堆体 B	$C_t = 1.94 \times e^{-0.0034t}$	0.97	93.47	203.9

## 2.3 复合菌剂降解 BDE209 的效果及降解特性

### 2.3.1 微生物复合菌剂降解 BDE209 的效果

用 A、B 两堆体的堆料制备的微生物菌剂对 BDE209 的降解效果如图 4 所示。

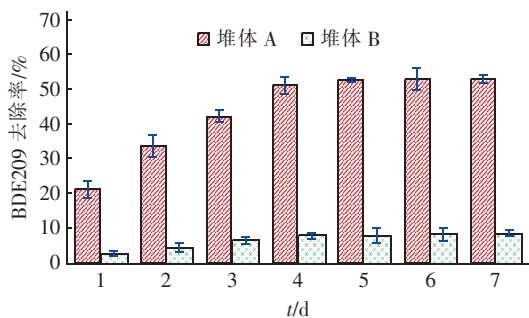


图 4 降解体系中 BDE209 的去除率变化

Fig. 4 Change of BDE209 removal rate in degradation system

堆体 A 在第 7 天时对 BDE209 的去除率仅达到 33.2%,而从堆体 A 中提取的微生物菌剂在第 4 天时对 BDE209 的去除率就已达到 51.0%,第 7 天

时对 BDE209 的去除率为 53.0%。从堆体 B 中提取的微生物菌剂对 BDE209 的去除率基本在 10% 以内。因此,堆肥过程中 BDE209 残留率的降低主要是由于贵屿土壤中微生物菌剂的作用,这也进一步说明少量贵屿土壤的添加对堆体去除 BDE209 具有重要作用。

### 2.3.2 微生物复合菌剂降解 BDE209 的特性

复合菌剂降解体系中 BDE209 的降解特性见表 3。可见,BDE209 在复合菌剂中的降解特性可用一级动力学方程来描述,并且贵屿土壤的添加使污泥堆肥降解 BDE209 的速率提升了 11.5 倍,与堆体中 BDE209 降解速率提高的倍数相近,因此可推断堆体中 BDE209 浓度的降低主要是由复合菌剂的降解作用引起的,但是由于堆体中其他因素的影响,使得半衰期相差倍数不完全相同。

表 3 微生物复合菌剂降解体系中 BDE209 的降解特性

Tab. 3 Degradation characteristics of BDE209 in biodegradation system

项 目	降解动力学方程	相关系数	拟合度/%	降解半衰期/d
堆体 A 中提取的复合菌剂	$C_t = 0.018 \times e^{-0.16t}$	1.00	99.80	4.3
堆体 B 中提取的复合菌剂	$C_t = 0.020 \times e^{-0.014t}$	0.97	93.38	49.5

## 3 结论

① 添加了少量贵屿土壤的堆体,其反应温度和 pH 值等指标均优于没有添加贵屿土壤的堆体,添加贵屿土壤的堆体微生物活动更加剧烈,堆肥效果更好。

② 添加了贵屿土壤堆体的种子发芽指数达到了 102.3%,经过堆肥化处理后的堆料不仅对植物没有毒性,还能促进植物种子的生长。

③ 没有添加贵屿土壤的堆体 B,堆肥结束后,其 BDE209 的残留率为 86.2%,降解半衰期为 203.9 d;而添加贵屿土壤的堆体 A,堆肥结束后,其 BDE209 的残留率仅为 28.2%,降解半衰期为 15.4 d。添加贵屿土壤的堆体接种 BDE209 降解菌后,可以显著降低堆体中 BDE209 的残留率,缩短 BDE209 的半衰期。

④ 从添加贵屿土壤的堆体中提取的微生物菌剂对 BDE209 的去除率在第 7 天时达到了 53.0%,降解半衰期为 4.3 d;而从未添加贵屿土壤的堆体中提取的微生物菌剂对 BDE209 的去除率较低,半衰

期长达49.5 d。

### 参考文献:

- [1] Zhang S W, Xia X H, Xia N, *et al.* Identification and biodegradation efficiency of a newly isolated 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) aerobic degrading bacterial strain [J]. *Int Biodeterior Biodegrad*, 2013, 76:24-31.
- [2] Nomiya K, Takaguchi K, Mizukawa H, *et al.* Species- and tissue-specific profiles of polybrominated diphenyl ethers and their hydroxylated and methoxylated derivatives in cats and dogs [J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(10):5811-5819.
- [3] 郝迪, 亦如瀚, 吴昊, 等. 贵屿地区不同类型农业土壤多溴联苯醚的污染特征和暴露评估[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5):882-890.  
Hao Di, Yi Ruhan, Wu Yu, *et al.* Pollution characteristics and exposure risk assessment of polybrominated diphenyl ethers in different types agricultural soils in Guiyu area [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):882-890 (in Chinese).
- [4] Kademoglu K, Xu F C, Padilla-Sanchez J A, *et al.* Legacy and alternative flame retardants in Norwegian and UK indoor environment: Implications of human exposure via dust ingestion [J]. *Environ Int*, 2017, 102:48-56.
- [5] Peng X Z, Tang C M, Yu Y Y, *et al.* Concentrations, transport, fate, and releases of polybrominated diphenyl ethers in sewage treatment plants in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environ Int*, 2009, 35(2):303-309.
- [6] 孟祥周, 杨超, 潘兆宇, 等. 污水及污泥中多溴联苯醚的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(2):102-106.  
Meng Xiangzhou, Yang Chao, Pan Zhaoyu, *et al.* Research advance on polybrominated diphenyl ethers in wastewater and sewage sludge [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(2):102-106 (in Chinese).
- [7] Chen Y N, Ma S, Li Y P, *et al.* Microbiological study on bioremediation of 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) contaminated soil by agricultural waste composting [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2016, 100(22):9709-9718.
- [8] Zeng G M, Yu Z, Chen Y N, *et al.* Response of compost maturity and microbial community composition to pentachlorophenol (PCP)-contaminated soil during composting [J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(10):5905-5911.
- [9] Zhang Y, Zhu Y G, Houot S, *et al.* Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contaminated soil through composting with fresh organic wastes [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2011, 18(9):1574-1584.
- [10] 赵宇, 尹华, 龙焰, 等. 一株十溴联苯醚高效好氧降解菌的筛选、鉴定及降解特性 [J]. *微生物学通报*, 2013, 40(6):988-998.  
Zhao Yu, Yin Hua, Long Yan, *et al.* Screening, identification and characteristics of an effective decabromodiphenyl ether degrading aerobic strain [J]. *Microbiology China*, 2013, 40(6):988-998 (in Chinese).
- [11] Jiang T, Li G X, Tang Q, *et al.* Effects of aeration method and aeration rate on greenhouse gas emissions during composting of pig feces in pilot scale [J]. *J Environ Sci*, 2015, 31:124-132.
- [12] 廖敏, 马爱丽, 谢晓梅. 缺陷假单胞菌 M5R14 粗酶液降解拟除虫菊酯类农药特性初探 [J]. *环境科学*, 2011, 32(6):1793-1798.  
Liao Min, Ma Aili, Xie Xiaomei. Primary study on the characteristics of crude pyrethroid pesticide-degrading enzyme extracted from *Pseudomonas diminuta* strain M5R14 [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(6):1793-1798 (in Chinese).



作者简介: 卢妙(1992-), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥资源化利用。

E-mail: 156081441@qq.com

收稿日期: 2017-08-23