

微生物法处理电子废弃物拆解场地典型持久性 有机污染物的研究进展

张洁娜^{1,3}, 王景伟^{1,3}, 顾卫华^{1,3}, 黄 庆^{1,3}, 李英顺², 庄绪宁^{1,3},
赵 静^{1,3}, 张承龙^{1,3}, 白建峰^{1,3}

(1. 上海第二工业大学 电子废弃物研究中心, 上海 201209; 2. 上海新金桥环保有限公司, 上海 201201;
3. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209)

摘 要: 随着电子产品的更新换代, 电子产品陆续进入淘汰期。中国已是电子废弃物产生与处理大国, 包括国外电子废弃物的投放以及进口的电子产品所产生的电子废弃物等, 目前已有 109 家纳入正规“环保部基金补贴”的电子废弃物处理公司。在电子废弃物拆解过程中, 尤其是在粗放式的电子废弃物拆解过程中, 不规范处置将会造成电子废弃物污染问题, 包括多环芳烃、邻苯二甲酸酯、多氯联苯、多溴联苯醚和多溴联苯等几种典型的持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs), 将释放进入土壤环境受体, 具有长期残留性、生物蓄积性、半挥发性和高毒性。研究如何将土壤中现有的 POPs 进行高效处理, 并使其转化为对环境无害的物质显得尤为重要, 而微生物降解是消除土壤中 POPs 的环境友好方式。因此, 综述了电子废弃物处理过程中释放的几种典型 POPs 高效降解菌株的培养、分离及应用现状, 以期对电子废弃物周边 POPs 污染土壤的修复治理提供参考。

关键词: 电子废弃物; 持久性有机污染物; 微生物降解; 研究进展

中图分类号: X172

文献标志码: A

Research Progresses of Microbiological Treatment to Typical Persistent Organic Pollutants Produced by Electronic Waste Disassembly Site

ZHANG Jiena^{1,3}, WANG Jingwei^{1,3}, GU Weihua^{1,3}, HUANG Qing^{1,3}, LI Yingshun²,
ZHUANG Xuning^{1,3}, ZHAO Jing^{1,3}, ZHANG Chenglong^{1,3}, BAI Jianfeng^{1,3}

(1. WEEE Research Center, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. Shanghai New Golden Bridge Environmental Protection Co., Ltd., Shanghai 201201, China;

3. Shanghai Cooperative Innovation Centre for WEEE Recycling, Shanghai 201209, China)

Abstract: With the upgrading of electronic products, electronic products have been phased out. China has been a major player in electronic waste production and disposal, which include the release of foreign electronic waste and the electronic waste from imported electronic products etc., and there are 109 formal electronic waste disposal companies which have been incorporated into the “Ministry of Environmental Protection Fund Subsidies”. In the dismantling process of electronic waste, especially in the vulgar electronic waste dismantling process, improper disposal to electronic waste will lead to the contamination of electronic waste, including several typical persistent organic pollutants (POPs), such as polycyclic aromatic hydrocarbons, phthalic acid esters, polychlorinated biphenyls polybrominated diphenyl ethers, and polybrominated biphenyls and so on. They will be released into the soil environmental receptors, which

收稿日期: 2017-10-16

通信作者: 白建峰 (1978–), 男, 江苏泰兴人, 教授, 博士, 主要研究方向为电子废弃物资源化、环境友好生物技术与污染土壤的修复。E-mail: jfbai@sspu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21307080), 上海市知识服务平台项目 (ZF1224), 上海第二工业大学校重点学科建设项目 (XXKYS1602), 上海第二工业大学研究生项目基金 (EGD16YJS016) 资助

are long-term persistent, bioaccumulative, semi-volatile and highly toxic. It is particularly important for the environment to study how to disposal POPs in soil effectively and turn POPs into harmless substance. It is an environmentally friendly way for microbiological degradation to eliminate POPs in soil. The cultivation, isolation and application of highly effective degrading bacteria for several typical POPs in the process of electronic waste disposal are reviewed in order to provide a reference for the remediation and treatment of POPs in the vicinity of electronic waste.

Keywords: electronic waste; persistent organic pollutants; microbiological degradation; research progress

0 引言

电子废弃物数量迅速增多具有双重效应。一方面由于其具有资源化特性, 含有可回收利用的金属(铜)、贵金属(金、银)、塑料和玻璃, 另一方面电子废弃物的不当拆解又会带来污染, 产生大量的有毒有害物质, 如金属与金属化合物(铅、汞、镉、铬、钡、铍)及一些持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs), 如多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、溴代阻燃剂、多氯联苯(poly-chlorinated biphenyls, PCBs)、酞酸酯等。微生物降解是消除土壤中重金属和 POPs 的环境友好方式。目前关于微生物法处理电子废弃物中重金属的综述相对较多, 而针对微生物法处理电子废弃物中 POPs 的综述鲜有报道。

电子废弃物处理过程中产生的典型 POPs 由于其难降解性会使其长期残留在环境中, 最终危害人体健康。电子废弃物燃烧和填埋会产生 PAHs, 由于其低水溶性, 易吸附在固体颗粒和有机腐殖质上, 广泛存在于土壤、沉积物、地下水和大气中, 且化学结构稳定, 长期存在于环境中, 属于处理过程中的二次污染物。邻苯二甲酸酯类(phthalic acid esters, PAEs)是近年来产量最大、用量最多的增塑剂, 广泛用于橡胶、塑料、香料等行业^[1-2]。因而也被广泛用作电子废弃物中的塑料增塑剂, PAEs 增塑剂应用最多的是酞酸二异辛酯(DEHP), 其次是酞酸二酯。PCBs 由于其具有良好的绝缘性、抗热性和化学稳定性, 被广泛用做电子产品中的蓄电池、变压器、电力电容器的绝缘散热介质。PCBs 难溶于水, 主要被土壤、污泥及沉积物中的有机物吸附^[3]。多溴联苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)因其阻燃效率高、热稳定性好以及对材料性能影响小, 自上世纪 60 年代以来作为一种添加型阻燃剂被广泛地应用于电子电器产品中^[4]。PBDEs 缺乏化学键的束

缚作用, 因此添加于电子电器产品中的 PBDEs 很容易通过挥发、渗出等方式进入环境^[5]。多溴联苯(polybrominated biphenyls, PBBs)也是一类曾被广泛使用的溴代阻燃剂, 属于添加型阻燃剂, 以物理方法添加, 而非化学键合, 因此可以通过渗出等方式释放到外界环境中, 随着生物链在生物体内富集和放大, 并且具有长距离迁移的能力, 对人类健康和生态系统造成潜在的有害影响^[6]。

因此, 本文综述了电子废弃物处理过程中产生的典型 POPs, 包括 PAHs、PAEs、PCBs、PBDEs 和 PBBs 的高效降解菌株培养分离及应用现状的研究概况, 以期对 POPs 污染环境的修复治理产生一定的科学价值和实际意义。

1 PAHs 的降解

1.1 降解菌种类

PAHs 降解菌的种类主要包括细菌和真菌。PAHs 生物降解的难易程度取决于其自身的分子结构复杂程度, 且降解菌种数目随 PAHs 分子结构的复杂程度的上升而减少。PAHs 微生物降解多以好氧降解为主。

目前, 研究较多修复 PAHs 污染土壤的菌种多集中在细菌和真菌^[7], 已发现的能降解 PAHs 的广谱性细菌主要包括假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)、分枝杆菌属(*Mycobacterium* sp.)、鞘氨醇单胞菌属(*Sphingomonas* sp.); 能降解 PAHs 的广谱性真菌主要包括曲霉属(*Aspergillus* sp.)、黄孢原毛平革菌属(*Phanerochaete chrysosporium* sp.) 白腐菌属(*Phlebiabrevispora* sp.) 等; 真菌主要是通过共代谢的方式实现对 PAHs 的最终矿化, 主要包括真菌与细菌的协同作用, 一方面原因可能是真菌作用于 PAHs 的产物水溶性增加, 以及真菌的菌丝体传输作用, 从而提高细菌对 PAHs 的矿化^[8]。此外, 细菌也

可间接提高 PAHs 的降解效率,通过自身释放的生长因子促进真菌菌根的生长从而提高对 PAHs 的降解。其次,还包括真菌与植物的协同作用,主要发挥作用的是球囊菌门真菌与植物根系形成的丛枝菌根共生体^[9]。与细菌相比,真菌能降解 PAHs 的种类虽然不多,但真菌降解 PAHs 的效率通常高于细菌,尤其在高环 PAHs 的降解方面表现较为突出。

1.2 菌株降解 PAHs 的能力与过程分析

近年来,陈红云等^[10]从受 PAHs 污染的台州市路桥固废拆解场污染土壤中用经过腐植酸(HA)吸附的 PAHs 分离培养出 1 株高效降解菌株 Tzyx3,经过形态学鉴定、生理生化及分子生物学鉴定其为解脂耶氏酵母菌(*Yarrowia lipolytica*);并以 HA 溶液为吸附剂与高效菌株制成生物修复剂,对萘、菲、芘、荧蒹、苯并蒹、苯并芘进行降解,15 d 后,萘、菲、芘、荧蒹、苯并蒹、苯并芘的降解率分别为 90.7%、91.0%、74.7%、86.9%、84.7% 和 74.7%。由此可见,HA 可协作 Tzyx 对污染土壤中 PAHs 的降解,且对菲的降解率最高。蔡瀚等^[11]从广东省贵屿镇电子垃圾拆解地长期受 PAHs 污染的河涌中分离筛选出 1 株短短芽胞杆菌(*Brevibacillus brevis*, *B. brevis*),在最适生长条件下,pH 为 7,温度 25 °C,投菌量 1 g/L,培养 7 d,并以苯并[a]芘作为唯一碳源和能源,能使 1 mg/L BaP 的降解率达到 51.35%,属于 BaP 高效降解菌。

日前,土壤中的高环 PAHs 污染日趋严重,在筛选出高效 PAHs 降解菌的同时,深入研究高环 PAHs 降解菌的降解机理及其与土壤颗粒之间的相互作用机理显得尤为迫切。由于土壤中土著微生物的复杂性,将高效纯种降解菌大面积接种于 PAHs 污染场地进行实地修复的相关报道较少,探索土著微生物和外源高效降解菌之间的相互关系,以使外源高效降解菌充分发挥其对土壤中的 PAHs 的降解,来应对复杂多变的复合 PAHs 环境污染。

2 PAEs 化合物的降解

2.1 降解菌种类

PAEs 的微生物降解效果既受微生物种类、数量、PAEs 的初始浓度、分子量和化学结构影响外,还受营养盐等影响^[12]。PAEs 的生物降解率较低,其生物降解性随烷基链含碳数的增加和分枝侧链的增

加而降低。PAEs 可以被大量的细菌降解^[13]。

电子废弃物中常用的塑料种类为聚酰胺(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)、聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(HIPS)及混合塑料(PC/ABS)等。且塑料中所含的工业用增塑剂,一般为邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)。

目前已报道的 PAEs 降解菌主要有 *Pseudomonas* sp.、*Mycobacterium* sp.、芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)、诺卡氏菌属(*Nocardia* sp.)、红球菌属(*Rhodococcus* sp.)、寡养单胞菌属(*Stenotrophomonas* sp.)和戈登氏菌属(*Gordonia* sp.)等。

2.2 菌株降解 PAEs 的能力与过程分析

目前,广泛使用的 PAEs 已普遍存在于土壤、底泥、水体、生物、空气及大气降生物等环境中,严重污染环境土壤。严佳丽等^[14]从武汉市长期受生活污水及 PVC 材料污染的南湖底泥中分离筛选得到 1 株能以 DEHP 为唯一碳源和能源生长的菌株 *Gordonia* sp.,并将其命名为 HS-NH1。探索其最适的生长条件和降解条件,在温度为 30 °C、pH 7.0,60 h 内能将浓度 500 mg/L 的 DEHP 降解 90%以上。分析其降解机理,认为菌株 HS-NH1 在降解 DEHP 的过程中产生了一种中间代谢产物——邻苯二甲酸。金雷等^[15]从长期受塑料垃圾污染的土壤中通过富集、分离纯化得到 1 株 DBP 高效降解菌类芽孢杆菌属(*Paenibacillus* sp.),将其命名为 H-2。探索了菌株 H-2 的最佳降解条件,在温度为 30 °C,pH 7.0 的降解条件下,3 d 内对 100 mg/L DBP 的降解率高达 87.6%,且 H-2 可降解短链邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯和 DBP,而对于长链邻苯二甲酸二辛酯的降解效果相对较差。金德才等^[16]从 PAEs 污染土壤中分离筛选到 1 株能够以 PAEs 为唯一碳源和能源生长的菌株 *Rhodococcus* sp.,命名为 JDC-11,其最佳降解条件是温度 30 °C、pH 8.0、转速 175 r/min,在此条件下,JDC-11 能够在 24 h 内将 1 g/L DBP 完全降解,由此证明 JDC-11 是 1 株 DBP 高效降解菌。高俊贤等^[17]从镇江某垃圾站污染土壤中分离筛选出 1 株能够以 DBP 为唯一碳源和能源生长的细菌高效降解菌变形假单胞菌(*Pseudomonas plecoglossicida*),将其命名为 TM。并采用单因素和正交实验对 TM 菌株的降解条件进行优化,最终的

优化结果为, TM 的最适生长温度为 30 °C, 最适 pH 为 7.0, 在最适降解条件下, 在 72 h 内对 400 mg/L DBP 的降解率达到 88.56%, 由此可证明此菌株对 PAEs 能高效降解。

近年来, 研究学者从污染地中分离、纯化得到了大量具有 PAEs 降解能力的菌株。然而, 研究主要是进行单一底物的降解, 而在多种污染物共存的环境中, 通过混和菌群的构建替代单一菌, 探索其最适降解条件及其降解机理, 从而实现 PAHs 的高效降解, 是今后研究的主要方向。

3 PCBs 的降解

3.1 降解菌种类

PCBs 在有氧条件下, 分子结构中低于 5 个氯原子的 PCBs 能够被多种微生物氧化, 并且随着氯原子的逐渐增多, PCBs 的持久性和难降解性逐渐增强。在厌氧条件下, 9 氯以上的 PCBs 能够被厌氧微生物降解为低氯 PCBs, 但不能破坏苯环的结构, 对于其降解十分不彻底。

目前, 研究者筛选出的能降解 PCBs 的微生物主要包括细菌和真菌。细菌主要包括 *Pseudomonas* sp.、*Sphingomonas* sp.、碱杆菌属 (*Alcaligenes* sp.)、伯克霍尔德菌属 (*Burkholderia* sp.)、*Bacillus* sp.、无色杆菌属 (*Achromobacter* sp.)、毛单胞菌属 (*Comamonas* sp.)、罗尔斯顿菌属 (*Ralstonia* sp.) 和不动杆菌属 (*Acinetobacter* sp.)、类芽孢杆菌属 (*Paenibacillus* sp.)、棒状杆菌属 (*Corynebacterium* sp.)、*Rhodococcus* sp.、节杆菌属 (*Arthrobacter* sp.) 等^[18-19]。真菌主要包括 *Phanerochaete chrysosporium* sp.、*Phlebiabrevispora* sp.、黑曲霉属 (*Aspergillusniger* sp.)、平革菌属 (*Phanerochaete* sp.)、金孢属 (*Chrysosporium* sp.)、蚝侧耳属 (*Pleurotusostreatus* sp.)、黄曲霉属 (*Aspergillusflavus* sp.) 和酿酒酵母属 (*Saccharomyces cerevisiae* sp.) 等均可降解 PCBs。

3.2 菌株降解 PCBs 的能力与过程分析

近年来, 研究者崔静岚^[20]将台州某地区典型 PCBs 污染土壤和河流底泥等作为筛选源, 由于许多 PCBs 好氧降解菌主要是以联苯作为生长底物共代谢降解 PCBs 的, 直接以 PCBs 作为碳源和能源的降解菌很少。因此, 研究者先以联苯作为唯一

碳源筛选出联苯降解菌, 然后再探索联苯降解菌对 PCBs 的降解能力, 先后驯化富集得到一种混合培养体 BP-Y 和分离筛选出 1 株 PCBs 降解菌, 并将其命名为 HC3。利用 HC3 和混合培养体 BP-Y 分别在实验室和实际土壤中的 PCBs 进行降解, 在实验室模拟降解实验中, 菌株 HC3 和混合培养体 BP-Y 对 PCBs 总量 5 d 的降解率为 28.1% 和 29.1%, 10 d 的降解率为 45.4% 和 59.2%, 降解效果非常显著。而在实际土壤 PCBs 降解实验中, 菌株 HC3 和混合培养体 BP-Y 对 PCBs 总量 5 d 的降解率为 16.8% 和 12.6%, 10 d 的降解率为 21.3% 和 28.7%, 与无菌添加的对照组相比有一定的降解效果, 但与实验室模拟降解实验的降解效率相比, 实际土壤 PCBs 降解实验的修复效率小于实验室降解效率的 50%, 表明在实际应用中环境因素和规模扩大化会影响 PCBs 的降解效率。张娟^[21]从浙江台州受电子废弃物污染土壤中采用富集培养和平板划线分离的方法分离筛选得到了 1 株降解能力较高的菌株纽伦堡潘多拉菌 (*Pando-raeanorimbergensis*), 并将其命名为 A1, 探索该菌株的最佳降解条件, 在 pH=7, 温度 30 °C, 初始底物浓度 150 mg/L, 装液量为 250 mL 三角烧瓶中装 30 mL, 培养时间 7 d 时, 对 PCBs 的降解效果最好。并运用共面 PCBs 试剂盒测得其降解率为 25%。方丽等^[22]从废旧变压器周围的土样中分离筛选出 1 株 PCBs 降解菌, 其为枯草杆菌 (*Bacillus subtilis*), 编号为 WF1, 该菌株能以联苯作为唯一的碳源生长。其最佳产酶条件为温度 35 °C、pH 7.0、250 mL 三角烧瓶中装液量 100 mL 以下、接种量 4%、PCBs 初始浓度 0.2 mg/L, 150 r/min 下振荡培养 3 d。最佳酶促反应条件为温度 35 °C、pH 7.5。唐伟^[23]从浙江萧山区某变电站含 PCBs 的废旧变压器储藏地覆土中筛选出能以 PBBs 为唯一碳源和能源的大量微生物, 16SrRNA 测序结果鉴定出这些微生物分别属于 13 个菌属, 已有多数菌属被证明过有降解 PCBs 的能力。该研究者以 *Bacillus* sp.T29 和 *Corynebacterium* sp.W5 作为研究对象, 均可与联苯共代谢降解 PCB61; 还研究了重金属 Cr 和 Cu 对降解菌生长的影响, 发现重金属 Cr 和 Cu 可能会抑制降解菌的生长, 从而影响 PCBs 的降解, 因此得出结论, 在利用降解菌修复土壤 PCBs 时, 为了达到更理想的降解效果, 应当先控制土壤中 Cr 和 Cu 的浓度。

虽然已经筛选出大量降解菌降解 PCBs, 但大多都处于实验室阶段, 这是由于许多微生物在实验室中的降解率很高, 但在实际应用过程中降解率则降低, 在实际的自然环境中, 由于降解温度、降解 pH 等条件不容易控制, 导致降解菌不能在最佳降解条件下使 PCBs 的降解率达到最高。因此, 降解菌对污染物的降解从实验室阶段过渡到实际生产中是未来研究的一个热点。

4 PBDEs、PBBs 的降解

4.1 降解菌的种类

PBDEs 是一类重要的溴代阻燃剂, 工业用 PBDEs 主要包括五溴联苯醚 (PeBDE)、八溴联苯醚 (OcBDE) 和十溴联苯醚 (BDE-209), 其中 BDE-209 应用最为广泛。目前对于降解 PBDEs 的微生物研究并不多见, 仅有少数微生物发现能降解 PBDEs。分离出的降解 PBDEs 的微生物有 *Bacillus* sp., *Pseudomonas* sp. 和 *Sphingomonas* sp. 细菌^[24]。

4.2 菌株降解 PBDEs 的能力与过程分析

近年来, 赵宇^[25]从广东贵屿镇电子垃圾拆解地采集的沉积物样品中分离出 1 株 BDE-209 高效降解菌 *B. brevis*。*B. brevis* 的最适降解 pH 为 7, 投菌量 3.0 g/L, 温度 30 °C, 最佳菌龄为 36 h, 最佳氮源为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 5 d 后, 对 1.0 mg/L BDE-209 的降解率可达 54.38%, 并研究了 *B. brevis* 的耐受性, 研究表明, *B. brevis* 对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 有较好的耐受性, 但 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 会影响其对 BDE-209 的降解, 当 Cu^{2+} 浓度在 1.0~5.0 mg/L、 Cd^{2+} 浓度在 0.3~0.5 mg/L 范围内时, *B. brevis* 对 BDE-209 的降解均可达 50% 以上。王继华等^[26]从浙江台州路桥区电子垃圾拆解场地的土壤中通过污染物质量浓度梯度驯化法、最大污染物质量浓度驯化法及外加碳源辅助驯化法, 采用 3 种方法整体驯化之后进行菌株的分离, 分别得到 7、3 和 11 株降解菌株, 先分离菌株, 再采用 3 种方法逐级驯化共得到能在以 BDE-47 为唯一碳源的培养基中生长的 14 株, 为驯化最优组合, 且经形态学观察及生理生化鉴定可知, 先驯化再得分离到的菌株, 均可在上述 14 株中找到相对应菌株。先分离再驯化的方法可以全面、系统地将降解菌分离纯化出来, 但该方法所用时间较长, 工作量大。先驯化再进行降解菌的分离纯化, 虽然得到的降解菌株相

对较少, 但其降解能力比先分离后驯化所得到的菌株有所提高, 且利用该法能分离筛选得到降解菌群, 而降解菌群的降解能力相较于单菌株降解能力则大大提高。陈桂兰等^[27]利用电子垃圾污染河床沉积物为种源富集驯化获得的菌群 Cf3, 同样具有较高的 BDE-209 降解率, 其降解率可达 80%, 菌群 Cf3 被证明是高效降解菌群。

目前, 多集中在 PBDEs 单一底物降解菌的分离、筛选、鉴定等方面, 但是单一菌种降解底物单一, 未来应多聚焦于混合菌株对 PBDEs 的高效降解, 为 PBDEs 污染环境的修复提供一定的理论基础。

4.3 PBBs 的降解

2009 年 5 月, 瑞士日内瓦举行的《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》缔约方大会第四次会议决定将六溴联苯等物质新增列入公约的受控范围。目前为止, 有关降解 PBBs 的高效菌株的报道几乎没有。由于 PBBs 也是一类曾被广泛使用在电子产品中的一种添加型阻燃剂, 研究者后续应致力于 PBBs 降解菌的筛选。

5 结论与展望

5.1 结论

目前研究主要集中于污水处理厂的活性淤泥、石油污染土壤及焦化工业场地土壤中 POPs 降解菌株的分离和筛选研究, 而对于电子废弃物拆解场地 POPs 降解菌株的研究较少。随着电子废弃物的日益增多, 未来研究应多聚焦于电子废弃物所造成的环境污染, 尤其是 POPs 的降解。微生物降解是目前最行之有效的有机物降解途径, 且无二次污染。

5.2 展望

(1) 建立一个有关电子废弃物污染物的高效菌种库, 保存现有的菌种, 然后不断开发新的高效降解菌以扩充高效菌种库, 使得电子废弃物得到有效的降解。

(2) 为提高微生物在实际电子废弃物污染土壤环境中的应用, 应筛选获得一些多功能高效降解菌或者探索混合菌种对电子废弃物中 POPs 的降解最优条件及其降解机理, 以便更有效地降解电子废弃物中的 POPs。

参考文献:

[1] 吕律. DBP 高效降解菌群的富集及降解特性研究 [D].

- 开封: 河南大学, 2016.
- [2] 褚娇艳, 刘腾飞, 张汉虞, 等. 一株邻苯二甲酸二丁酯降解菌的筛选及其降解特性 [J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1555-1562.
- [3] 范小欢. 老化多氯联苯的生物可利用性及其在土壤体系中的厌氧修复 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [4] 程吟文, 谷成刚, 王静婷, 等. 多溴联苯醚微生物降解过程与机理的研究进展 [J]. 环境化学, 2015, 34(4): 637-648.
- [5] LI Y, CHEN L, WEN Z H, et al. Characterizing distribution, sources, and potential health risk of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in office environment[J]. Environmental Pollution, 2015, 198(198): 25-31.
- [6] JACOBSON M H, DARROW L A, BARR D B, et al. Serum polybrominated biphenyls (pbbs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) and thyroid function among michigan adults several decades after the 1973-1974 PBB contamination of livestock feed[J]. Environmental Health Perspectives, 2017, 125(9): 097020.
- [7] LIU S H, ZENG G M, NIU Q Y, et al. Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: A mini review[J]. Biore-source Technology, 2017, 224: 25-33.
- [8] MA X K, DING N, PETERSON E C, et al. Heavy metals species affect fungal-bacterial synergism during the bioremediation of fluoranthene[J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2016, 100(17): 7741-7750.
- [9] 林先贵, 吴宇澄, 曾军, 等. 多环芳烃的真菌漆酶转化及污染土壤修复技术 [J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1720-1727.
- [10] 陈红云, 张昕欣, 于红艳. 固废拆解场污染土壤中多环芳烃降解菌的筛选鉴定与降解特性 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5489-5492.
- [11] 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 等. 1 株苯并 [a] 芘高效降解菌的筛选与降解特性 [J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1937-1944.
- [12] 郭静波, 陈微, 姜丽杰, 等. 邻苯二甲酸二丁酯生物降解研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(6): 1104-1110.
- [13] 杜欢. 邻苯二甲酸酯降解菌的筛选、降解特性及其在土壤修复中的应用研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- [14] 严佳丽, 陈湖星, 杨杨, 等. 一株高效 DEHP 降解菌的分离、鉴定及其降解特性 [J]. 微生物学通报, 2014, 41(8): 1532-1540.
- [15] 金雷, 陈瑜, 严忠雍, 等. 邻苯二甲酸二丁酯高效降解菌 H-2 的分离鉴定及其降解特性 [J]. 食品科学, 2014, 35(15): 203-205.
- [16] 金德才, 梁任星, 王洋洋, 等. 一株 DBP 高效降解菌的筛选及其降解特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41(1): 8-14.
- [17] 高俊贤, 刘琦, 连梓竹, 等. 一株 DBP 高效降解菌的分离、鉴定与降解性能 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(3): 1521-1526.
- [18] SHUAI J J, YU X R, ZHANG J, et al. Regional analysis of potential polychlorinated biphenyl degrading bacterial strains from China[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2016, 47(3): 536-541.
- [19] 张雪, 刘维涛, 梁丽琛, 等. 多氯联苯 (PCBs) 污染土壤的生物修复 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 1-11.
- [20] 崔静岚. 多氯联苯降解菌的筛选、降解特性研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [21] 张娟. 多氯联苯 (PCBs) 降解菌的筛选、鉴定及降解特性的初步研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [22] 方丽, 刘斌, 吴克, 等. 一株 PCBs 降解菌株分离鉴定及其酶学性质 [J]. 生物学杂志, 2012, 29(5): 60-63.
- [23] 唐伟. 高效多氯联苯降解菌的筛选鉴定及其降解性能研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [24] CAO Y J, YIN H, PENG H, et al. Biodegradation of 2,2',4,4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) by Phaeo-rochaete chrysosporium, in the presence of Cd²⁺ [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2017, 24(12): 11415-11424.
- [25] 赵宇. 十溴联苯醚高效降解菌的筛选、降解性能与机理 [D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- [26] 王继华, 关健飞, 宋北, 等. BDE-47 降解菌的筛选及破乳提高回收率的方法优化 [J]. 环境科学, 2014, 40(2): 309-314.
- [27] 陈桂兰, 陈杏娟, 郭俊, 等. 十溴联苯醚降解菌群的降解特性与组成分析 [J]. 微生物学通报, 2013, 40(3): 425-433.