

发酵牛粪和造纸干粉对土壤中多环芳烃降解的影响

杨婷^{1,2}, 胡君利², 王一明², 张晶², 吕家琰^{1*}, 林先贵^{2*}

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院南京土壤研究所//土壤与农业可持续发展国家重点实验室//
中国科学院南京土壤研究所-香港浸会大学土壤与环境联合开放实验室, 江苏 南京 210008

摘要: 运用泥浆反应法研究添加发酵牛粪和造纸干粉对土壤中多环芳烃 (PAHs) 降解的影响。试验按水土比 2:1 制成泥浆反应器, 设置对照、添加 2.5% 发酵牛粪和添加 2.5% 造纸干粉等 3 个处理, 25~28 °C 摇床培养, 分别于 10、20、30 d 采样测定土壤中多环芳烃降解菌的数量和多环芳烃含量。结果发现, 所有处理土壤中多环芳烃的含量均随培养时间的延长而逐渐降低, 而添加发酵牛粪和造纸干粉均有利于提高土壤中多环芳烃降解菌的数量, 在培养 30 d 后土壤中多环芳烃的降解率分别从对照处理的 19% 显著提高到 37% 和 35% ($P < 0.05$)。结果还发现, 多环芳烃分环降解率随苯环数增加而下降, 培养 30 d 后土壤中 2 环多环芳烃的降解率达 95% 以上, 3 环多环芳烃的降解率为 50% 左右, 对照处理 4~6 环多环芳烃的降解率为 7%~13%, 而添加发酵牛粪和造纸干粉处理土壤中 4~6 环多环芳烃的降解率显著提高到 21%~28% ($P < 0.05$), 但对 2~3 环多环芳烃的降解无明显影响, 表明这两种物质对土壤中多环芳烃降解的影响关键在于促进高环多环芳烃降解菌的生长繁殖及降解活性。

关键词: 多环芳烃降解菌; 泥浆反应器; 有机废弃物; 分环降解率

中图分类号: X172; X53

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 06-2161-05

多环芳烃 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 是一类环境中广泛存在且具有“三致”作用的持久性有机污染物^[1-2], 其水溶性差、辛醇-水分配系数高、稳定性强, 易于从水相分配到土壤颗粒上, 在土壤中残留持久并难以降解, 将给地球环境和人体健康带来潜在威胁^[3-5]。当前, 治理 PAHs 污染土壤的方法主要有物理修复、化学修复和生物修复等, 其中生物修复技术因为具有成本低、无二次污染等优点而备受重视^[6-10]。例如, 泥浆反应器具有处理周期短、降解条件易控制和处理效果好等特点^[11,12], 能快速、高效地消除土壤中的有机污染物, 进而实现污染土壤的离位生物修复^[13-14]。大量研究表明, 许多微生物能够利用 PAHs 作为碳源和能源或利用其它物质作为共代谢底物对 PAHs 进行降解, 这是去除土壤中 PAHs 的主要途径^[15-16]。然而, 4 环以上 PAHs 由于其结构的复杂性而难于降解, 如何提高土壤中高环 PAHs 降解微生物的活性是一个关键问题。目前已有利用堆肥和葡萄糖、淀粉等碳源物质来提高 PAHs 降解效率的相关研究^[17-19], 但鲜见直接利用有机废弃物作为材料来强化土著微生物修复 PAHs 污染土壤的报道。本试验采用泥浆法, 研究发酵牛粪和造纸干粉两种有机废弃物对土壤中 PAHs 降解的影响, 为 PAHs 污染土壤的修复提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自江苏无锡安镇某受工业废水污染农田的表层土壤 (0~20 cm), 剔除植物根系、石砾等杂物, 过 0.9 mm 不锈钢筛, 混匀备用。该土壤的基本化学性质如下: 有机质 19.2 g·kg⁻¹, 全 N 1.29 g·kg⁻¹, 全 P 0.48 g·kg⁻¹, 全 K 14.2 g·kg⁻¹, 水解 N 78.4 mg·kg⁻¹, 速效 P 3.56 mg·kg⁻¹, 速效 K 86.0 mg·kg⁻¹, PAHs 17.3 mg·kg⁻¹, pH 6.1。

供试有机废弃物为发酵牛粪和造纸干粉。发酵牛粪由南京某公司提供, 造纸干粉由安徽某造纸厂亚硫酸铵法麦草制浆废液浓缩而得, 具有较强粘性。各供试有机废弃物的基本性质见表 1。

表 1 有机废弃物的基本性质
Table 1 Basic properties of organic wastes

有机废弃物	pH	W _{有机质} /(g·kg ⁻¹)	W _{全N} /(g·kg ⁻¹)	W _{全P} /(g·kg ⁻¹)	W _{全K} /(g·kg ⁻¹)
发酵牛粪	6.89	169.3	15.10	3.71	4.92
造纸干粉	5.74	83.5	29.64	0.05	8.73

1.2 试验方法

试验处理如下: ①对照 (CK); ②添加发酵牛粪; ③添加造纸干粉, 发酵牛粪与造纸干粉的添加量均为 2.5%, 每个处理 4 个重复。试验采用泥浆法: 取 60 g 供试土样于 250 mL 三角瓶中, 按上述比例加入有机废弃物, 按水土比 2:1 加入无菌水, 置于 25~28 °C 摇床以泥浆状态培养, 于 10、20、30 d 分

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 重点项目 (2007AA061101); 国家自然科学基金项目 (40801091)

作者简介: 杨婷 (1984 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事有机污染土壤的生物修复研究。E-mail: lieryangting@163.com

*通讯作者, E-mail: ljlwh@sohu.com; xglin@issas.ac.cn

收稿日期: 2009-09-15

别测定 PAHs 降解菌数量和 PAHs 含量。

1.3 分析方法

PAHs降解菌数量采用改进的MPN法测定^[20], PAHs含量采用二氯甲烷索氏提取^[21]、HPLC测定^[22], 色谱条件如下: 采用Waters2690液相色谱仪以及荧光(Waters2475)检测器和紫外(Waters2996)检测器分析样品; 色谱柱为4.6 mm×250 mm烷基C18 PAHs专用柱; 流动相为色谱纯乙腈/水; 流量为1 mL·min⁻¹; 柱温为30 °C; 进样量为10 μL; 菲(Phenanthrene)、苯并[a]芘(Benzo[a] pyrene)、蒽(Anthracene)、芴(Fluorene)、二苯并噻吩(Dibenzothiophene)、二氯甲烷、正己烷、环己烷、乙腈均为HPLC级, 其它试剂为分析纯。

1.4 数据处理

采用Excel 2003和SPSS 11.5进行处理作图和方差分析, 并使用Duncan's新复极差法进行多重比较($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤中 PAHs 降解菌的动态变化

土壤中 PAHs 降解菌的数量在 0 d 时约为 $1.0 \times 10^5 \cdot g^{-1}$, 经过 10~20 d 的培养后迅速增长一个数量级, 到 30 d 时又下降一半左右(图 1)。结果说明, 泥浆法培养条件在试验早期为土壤中 PAHs 降解菌的生长繁殖提供了有利条件。整体来看, 添加发酵牛粪和造纸干粉对土壤中 PAHs 降解菌的生长产生了一定的影响, 同一培养阶段各处理土壤中 PAHs 降解菌的数量整体表现为: 发酵牛粪>造纸干粉>CK。

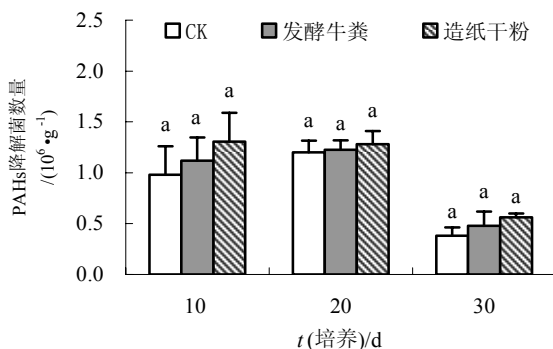


图1 土壤中 PAHs 降解菌数量动态变化

Fig.1 The dynamics of PAHs degrading microorganisms in soil

同一时间不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著, 下同。

2.2 土壤中 PAHs 含量的动态变化

随着培养时间的延长, 土壤中 PAHs 含量均逐渐降低(图 2)。培养 30 d 时, 添加发酵牛粪和造纸干粉处理土壤中 PAHs 含量显著低于 CK 处理($P<0.05$), 说明添加这两种有机废弃物均可促进土壤 PAHs 的降解, 但发酵牛粪和造纸干粉处理之间

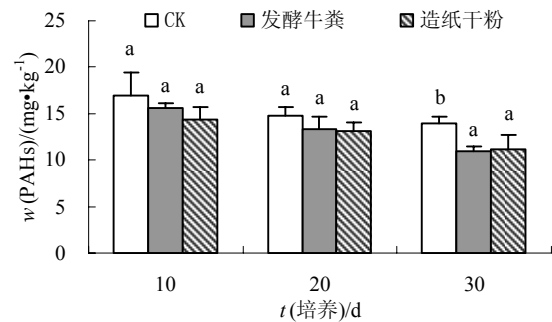


图2 土壤中 PAHs 含量的动态变化

Fig.2 The dynamics of PAHs content in soil

没有显著差异。培养结束时不同处理土壤中 PAHs 的降解率存在差异, CK 处理为 19%, 添加发酵牛粪和造纸干粉处理分别为 37%和 35%。

2.3 土壤中 PAHs 的分环降解率

从表 2 可知, PAHs 分环降解率随苯环数的增加而下降。2 环、3 环 PAHs 降解率分别为 95%~99% 和 43%~53%, 而 4 环以上 PAHs 降解率均在 30%以下。添加发酵牛粪和造纸干粉处理, 2 环、3 环 PAHs 降解率与 CK 处理相比无显著性差异, 而 4~6 环 PAHs 降解率均显著高于 CK 处理($P<0.05$)。添加发酵牛粪处理效果较佳, 4~6 环 PAHs 降解率分别为 CK 处理的 3.7、2.2 和 3.1 倍; 添加造纸干粉的作用次之, 4~6 环 PAHs 降解率为 CK 处理的 3.2、1.6 和 2.5 倍。

表2 不同处理下土壤中 PAHs 的分环降解率
Table 2 Degradation rate of PAHs with different rings in different treatments %

处理	PAHs 环数				
	2	3	4	5	6
CK	98.9±2.2a	53.4±8.9a	7.2±2.8a	12.6±4.1a	8.9±1.0a
发酵牛粪	99.3±1.4a	43.5±3.1a	26.6±3.4b	27.5±6.0b	27.5±2.9c
造纸干粉	95.3±7.2a	42.7±7.1a	23.3±4.0b	20.5±4.6ab	21.1±5.1bc
平均	98.4	48.5	18.9	17.8	17.2

3 讨论

土壤中 PAHs 消减的主要途径是微生物的降解作用, 有研究表明环境中 PAHs 含量和 PAHs 降解菌存在一定相关性^[23-24]。本试验表明, 添加发酵牛粪和造纸干粉均可增加土壤中 PAHs 降解菌的数量, 进而降低土壤中 PAHs 的含量。研究发现, 土壤有机质的含量对 PAHs 在土壤固液间的分配有显著的影响, 从而影响到 PAHs 在土壤中的迁移和生物有效性^[25]。Bogan 和 Sullivan^[26]研究表明, 土壤有机碳含量是影响 PAHs 在土壤中锁定的一个最重要的因素, 向胡敏酸/富啡酸含量较低的土壤中加入外源的富啡酸能够提高土壤中芘的矿化。此外, 胡敏酸还是通过淋洗方法修复 PAHs 污染土壤的一个友好的天然

表面活性剂^[27]。

研究表明, 向污染土壤中加入肥料、堆肥或有机物可促进PAHs的微生物降解^[28-30]。Kästner和Mahro^[18]研究了萘、蒽、荧蒽和芘在污染土壤和污染土壤与堆肥的混合物中的降解, 发现加入堆肥可增加与土壤结合的PAHs的去除。王蕾^[31]等研究表明外源添加碳源—邻苯二甲酸和葡萄糖对芘的降解效率可分别提高25%和16%。邹德勋^[19]以急性毒性较强的菲(Phe)和遗传毒性较强的苯并[a]芘(B[a]P)为代表性PAHs污染物研究了PAHs长期污染土壤的微生物强化修复, 结果表明, 添加C源(淀粉和葡萄糖)处理提高了土壤PAHs的降解率, 原因是添加C源改善了土壤微生物的营养条件, 促进微生物对PAHs的降解。本试验中, 利用泥浆反应法经过30 d的培养表明, 添加有发酵牛粪和造纸干粉显著降低土壤PAHs的含量, 促进土壤PAHs的降解, 降解率从对照的19%分别提高到37%和35%。这可能是因为发酵牛粪有机质含量高, 营养元素丰富, 造纸干粉有机质丰富, 含氮量高, 具有多种活性基团, 有利于土壤中PAHs降解微生物的生长繁殖, 从而促进土壤PAHs的生物降解。此外, 微生物能以腐殖质为营养基质, 影响PAHs的存在状态, 进而影响PAHs的降解过程^[32]。

许多环境微生物经过适应和诱导, 可以对PAHs进行代谢分解, 甚至矿化^[33]。一般来说, 随PAHs苯环数量的增加, 其降解速率降低。低分子量的PAHs(2环、3环)毒性小, 比较容易被生物降解, 而高分子量的PAHs(4环以上)毒性大, 难以被生物降解^[34]。本试验也表明随着PAHs苯环数的增加, 其平均降解率逐渐降低。添加发酵牛粪和造纸干粉土壤中4环以上PAHs的降解率从对照的7%~13%显著提高到21%~28%, 而对2~3环PAHs的降解无明显影响, 可知添加这两种外源有机废弃物的关键作用在于促进土壤中高环PAHs降解菌的生长繁殖, 并提高其降解活性, 从而促进高环PAHs的生物降解。已有报道指出高分子量的PAHs代谢方式多以与其它有机质一起共代谢的方式进行^[35], 添加发酵牛粪和造纸干粉为高环PAHs降解菌提供了共代谢底物, 促进高环PAHs以共代谢的方式进行降解, 从而提高其降解效率, 但具体的降解机理还有待进一步的研究。总之, 添加外源有机废弃物如何影响土壤中PAHs的生物有效性, 添加有机废弃物提高高环PAHs降解率的机理, 土壤PAHs的降解效率因添加有机废弃物种类不同而异的原因, 这些都将是值得进一步研究的课题。

4 结论

(1) 添加发酵牛粪和造纸干粉均有利于提高土

壤中PAHs降解菌的数量, 进而促进PAHs的降解, 在泥浆反应器中土壤PAHs的月降解率约提高到对照处理的2倍, 分别为37%和35%。

(2) PAHs分环降解率随苯环数的增加而显著下降, 添加发酵牛粪和造纸干粉处理4~6环PAHs的降解率从对照处理的7%~13%提高到21%~28%, 而对2~3环PAHs的降解无明显影响, 表明这两种有机废弃物关键在于促进土壤中高环PAHs降解菌的生长繁殖及降解活性。

参考文献:

- [1] WILCKE W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: A review[J]. *Journal of Plant Nutrient and Soil Science*, 2000, 163(3): 229-248.
- [2] DUGAY A, HERRENKNECHT C, CZOK M, et al. New procedure for selective extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants for gas chromatographic-mass spectrometric analysis[J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 958(1-2): 1-7.
- [3] SUSAN C W, KEVIN C J. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): A review[J]. *Environmental Pollution*, 1993, 81(3): 229-249.
- [4] XUE Weiling, WARSHAWSKY D. Metabolic activation of polycyclic and heterocyclic aromatic hydrocarbons and DNA damage: A review[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, 206(1): 73-93.
- [5] 高凡, 贾建业, 杨木壮. 难降解有机污染物在土壤中的迁移转化[J]. *热带地理*, 2004, 24(4): 337-341.
GAO Fan, JIA Jianye, YANG Muzhuang. Migration and transformation of the organic contaminants that are difficult to degrade in soil[J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(4): 337-341.
- [6] 宋雪英, 李昕馨, 伦小文, 等. 张士灌区多环芳烃污染土壤的植物修复[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 531-534.
SONG Xueying, LI Xinxin, LUN Xiaowen, et al. Phytoremediation of Polycyclic aromatic hydrocarbon contaminated farmland soil in Zhangshi Wastewater Irrigation Area[J]. *Ecology and Environment*, 2009, 18(2): 531-534.
- [7] 杨婷, 林先贵, 胡君利, 等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿与黑麦草修复多环芳烃污染土壤的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2009, 25(4): 72-76.
YANG Ting, LIN Xiangui, HU Junli, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on phytoremediation of pahs-contaminated soil by *Medicago sativa* and *Lolium muhiflorum*[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4): 72-76.
- [8] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 苯并[a]芘污染土壤的植物根际修复研究初探[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 425-431.
LIU Shiliang, LUO Yongming, DING Keqiang, et al. Study on remediation of Benzo [a] pyrene-contaminated soil by plant rhizosphere[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 425-431.
- [9] 许超, 夏北成. 运用多隔层根箱研究黑麦草根际微域中芘的降解[J]. *土壤学报*, 2009, 46(3): 426-433.
XU Chao, XIA Beicheng. Degradation of Pyrene in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne* L.) in a rhizobox[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(3): 426-433.

- [10] 潘声旺, 魏世强, 袁馨, 等. 金发草对土壤中菲、芘的修复机制[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1273-1279.
PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al. Mechanisms of the removal and remediation of phenanthrene and Pyrene in soil by *pogonatherum paniceum*[J]. Environmental Science, 2009, 30(5): 1273-1279.
- [11] LAUCH R P, HERRMANN J G, MAHAFFEY R, et al. Removal of creosote from soil by bioslurry reactors[J]. Environmental Progress, 1992, 11(4): 265-271.
- [12] ZAPPI M E, ROGERS B A, TEETER C L, et al. Bioslurry treatment of a soil contaminated with low concentrations of total petroleum hydrocarbons[J]. Journal of hazardous materials, 1996, 46(1): 1-12.
- [13] SAPONARO S, BONOMO L, PETRUZZELLI G, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) slurry phase bioremediation of a manufacturing gas plant (MGP) site aged soil[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, 135(1-4): 219-236.
- [14] 丁克强, 骆永明, 刘世亮. 利用改进的生物反应器研究不同通气条件下土壤中菲的降解[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 245-251.
DING Keqiang, LUO Yongming, LIU Shiliang, et al. Degradation of Phenanthrene in soil at different aeration rates using modified biological reactor[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 245-251.
- [15] CERNIGLIA C E. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbon: A review[J]. Biodegradation, 1992, 3(2-3): 351-368.
- [16] 谭文捷, 李宗良, 丁爱中, 等. 土壤和地下水中多环芳烃生物降解研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1310-1317.
TAN Wenjie, LI Zongliang, DING Aizhong, et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and groundwater: A review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1310-1317.
- [17] WISCHMANN H, STEINHART H. The formation of PAH oxidation products in soils and soil/compost mixtures[J]. Chemosphere, 1997, 35(8): 1681-1698.
- [18] KÄSTNER M, MAHRO B. Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils affected by the organic matrix of compost[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1996, 44(5): 668-675.
- [19] 邹德勋, 骆永明, 滕应, 等. 多环芳烃长期污染土壤的微生物强化修复初步研究[J]. 土壤, 2006, 38(5): 652-656.
ZOU Dexun, LUO Yongming, TENG Ying, et al. Enhanced microbial remediation of long-term polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) polluted soils[J]. Soils, 2006, 38(5): 652-656.
- [20] WRENN B A, VENOSA A D. Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable-number procedure[J]. Can. J. Microbiol., 1996, 42(3): 252-258.
- [21] 陈晓秋, 苏鹏起, 林清. 废水及土壤中多环芳烃监测时样品的预处理[J]. 中国环境监测, 1994, 10(6): 27-28.
CHEN Xiaohu, SU Pengqi, LIN Qing. The pretreatment of monitoring polycyclic aromatic hydrocarbons sample in waste water and soil[J]. Environment Monitoring in China, 1994, 10(6): 27-28.
- [22] 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 土壤、植物样品中的多环芳烃(PAHs)分析方法研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 92-96.
Song Yufang, Qu Ziqing, Sun Tieheng. Analytical method of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and plant samples[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(1): 92-96.
- [23] 谷体华, 袁建军, 郑天凌, 等. 泉州湾表层沉积物对多环芳烃潜在降解活性的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2005, 44(B06): 102-106.
GU Tihua, YUAN Jianjun, ZHEN Tianling, et al. The potential biodegradation activity of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of Quanzhou Bay[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2005, 44(B06): 102-106.
- [24] 范淑秀, 李培军, 巩宗强, 等. 紫花苜蓿对多环芳烃菲污染土壤的修复作用研究[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2080-2084.
FAN Shuxiu, LI Peijun, GONG Zongqiang, et al. Study on phytoremediation of phenanthrene-contaminated soil with alfalfa (*Medicago sativa L.*) [J]. Environmental Science, 2007, 28(9): 2080-2084.
- [25] DROLET C, BANTON O, LAFRANCE P, et al. Assessing the fate of polynuclear aromatic hydrocarbons from oily waste land spreading by modeling[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(1): 211-217.
- [26] BOGAN B W, SULLIVAN W R. Physicochemical soil parameters affecting sequestration and mycobacterium biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil[J]. Chemosphere, 2003, 52(10): 1717-1726.
- [27] CONTE P, AGRETTO A, SPACCINI R, et al. Soil remediation: Humic acids as natural surfactants in the washings of highly contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2005, 135(3): 515-522.
- [28] MANILAL V B, ALEXANDER M. Factors affecting the microbial degradation of phenanthrene in soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1991, 35(3): 401-405.
- [29] WANG Xiaoping, YU Xiaobing, BARTHA R. Effect of bioremediation on polycyclic aromatic hydrocarbon residues in soil[J]. Environmental Science and Technology, 1990, 24(7): 1086-1089.
- [30] KOBAYASHI T, MURAI Y, TATSUMI K, et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Sphingomonas* sp. enhanced by water-extractable organic matter from manure compost[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(22): 5805-5810.
- [31] 王蕾, 裴麦茜, 王志盈, 等. 外加碳源对优良菌降解芘的影响研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(6): 24-31.
WANG Lei, NIE Maiqian, WANG Zhiying, et al. Influence of exotic carbon source on pyrene biodegradation by predominant strains[J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(6): 24-31.
- [32] 张锡辉, BAJPAI R. 土壤结合态稠环芳烃的生物降解[J]. 农业环境保护, 2001, 20(1): 15-18.
ZHANG Xihui, BAJPAI R. Biodegradation of polyaromatic compounds present in aged soils[J]. Agro-environmental Protection, 2001, 20(1): 15-18.
- [33] GUO C L, ZHOU H W, WONG Y S, et al. Isolation of PAH-degrading bacteria from mangrove sediments and their biodegradation potential[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 51(8): 1054-1061.
- [34] JUHASZ A L, NAIDU R. Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo [a] pyrene[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2000, 45(1-2): 57-88.
- [35] RENTZ J A, ALVAREZ P J J, SCHNOOR J L. Benzo [a] pyrene co-metabolism in the presence of plant root extracts and exudates: Implications for phytoremediation[J]. Environmental Pollution, 2005, 136(3): 477-484.

Effect of fermented cow dung and dry powdered sludge of papermaking waste on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil

YANG Ting^{1,2}, HU Junli², WANG YiMing², ZHANG Jing², LV Jialong^{1*}, LIN Xianguai^{2*}

1. College of Resources & Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture//Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences//Joint Open Laboratory of Soil and the Environment, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences and Hongkong Baptist University, Nanjing 210008, China

Abstract: A soil-slurry bioreactor was constructed to investigate the effects of fermented cow dung (FD) and dry powdered sludge of papermaking waste (PP) on the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). The bioreactor was performed at 25~28 °C including three treatments: control, 2.5% FD and 2.5% PP. The water : soil ratio was 2 : 1 for all treatments. The population size of PAHs-degrading microorganism and the residual content of PAHs in the bioreactor was monitored after incubations for 10, 20 and 30 days (D10, 20, and 30), respectively. The PAHs content in soils decreased gradually with incubation time. The addition of FD or PP seemed to stimulate the population size of PAHs-degrading microorganisms, which most likely resulted in the elevated degradation of PAHs on D30 up to 37% and 35%, respectively. The number of aromatic rings of PAHs seemed to negatively correlate with the degradation rates of PAHs. For instance, on D30, up to 95% of two-ring PAHs were degraded, while only 50% for three-ring PAHs regardless of all treatments. However, the degradation rates of four to six-ring PAHs were increased significantly ($P < 0.05$) from 7% ~ 13% to 21% ~ 28% in the FD or PP-treated bioreactor. These results suggested that FD and PP could facilitate the propagation and activity of microorganisms specific for the biodegradation of high molecular weight-PAHs in soil.

Key words: PAHs-degrading microorganisms; soil-slurry bioreactor; organic wastes; degradation rate of PAHs with different rings