

# 玉米对土壤中菲芘修复作用的初步研究\*

徐圣友<sup>1,2</sup> 陈英旭<sup>1†</sup> 林琦<sup>1</sup> 吴伟祥<sup>1</sup> 王冬<sup>1</sup> 薛生国<sup>1</sup> 沈超峰<sup>1</sup>

(1 浙江大学环境与资源学院环境工程系, 杭州 310029)

(2 黄山学院资源与环境系, 安徽黄山 245021)

**摘要** 采用系列浓度菲芘进行盆栽试验, 研究玉米对污染土壤菲芘的去除效果与累积机理。结果显示, 玉米对菲芘的去除效果明显, 60 d 试验完成后, 玉米生长的土壤中平均大约有 69.8% ~ 91.2% 的菲与 77.0% ~ 88.4% 的芘被去除, 平均去除率分别比对照 1 (加叠氮化钠) 高 63.6% 和 72.3%; 比对照 2 (无叠氮化钠) 高 15.1% 与 38.2%。玉米能明显地吸收与累积污染土壤中菲和芘, 并随土壤菲芘含量的增加而增大。生物富集因子 (BCFs) 随着土壤菲芘含量的增加而减小, 芘的生物富集因子大于菲, 不同种类多环芳烃以及植物不同部位间 BCFs 差异较大, 菲的叶片 BCFs (0.79 ~ 2.45) 大于茎 (0.17 ~ 1.76), 根 BCFs (0.42 ~ 1.21) 最小, 芘处理时叶片和茎的 BCFs 分别是 1.03 ~ 3.31 与 0.2 ~ 2.17, 明显低于根 BCFs (2.07 ~ 6.40)。玉米能够在高浓度多环芳烃污染土壤中正常生长, 并且能累积与去除污染土壤中的菲和芘, 表明用玉米修复多环芳烃污染土壤是一种可行的方法。

**关键词** 植物修复; 多环芳烃; 菲; 芘; 吸收与累积

**中图分类号** X171.5 **文献标识码** A

多环芳烃 (PAHs) 是一类广泛分布于环境中的持久性有机污染物, 主要来源于人类活动和自然过程, 自然过程包括火山喷发与森林火灾, 人类活动主要包括石油开采与运输中的泄漏、煤和木材等的燃烧、石油化工产品生产中产生<sup>[1~5]</sup>。由于 PAHs 向环境排入量大于其耗减量, 导致全球环境中 PAHs 含量逐年增加<sup>[3~6]</sup>。PAHs 对人体和生物具有较强的致癌和致突变作用, 严重影响人类健康和生态环境, 为此美国国家环保局已将 16 种 PAHs 列为优先控制污染物黑名单<sup>[4]</sup>。如何有效清除污染环境中的 PAHs, 长期以来一直是一个全球性的热点和难点问题。

植物修复操作比较简单, 具有投资成本低, 无二次污染, 兼具保护和美化环境的功能, 是目前最具潜力的环境修复技术之一<sup>[7~12]</sup>。已有的研究也证实, 植物不仅能从环境中直接吸收、积累与降解 PAHs 等有机污染物, 而且还可通过促进根际微生物活动来加速其降解<sup>[9~10]</sup>。Binet 等认为植物可以通过增加土壤微生物数量、提高土壤腐质化作用以及改善土壤理化性质等促进土壤中 PAHs 的降解<sup>[9]</sup>; Yoshit-

omi 等发现玉米根系能促进土壤微生物生长与芘的降解<sup>[10]</sup>; 最近, Liste 等研究发现, 九种不同种类的植物都能促进污染土壤中芘的降解<sup>[13]</sup>; 高彦征等认为, 土壤 PAHs 的植物直接吸收去除所占的比例较小, 植物促进微生物降解是其去除的主要原因<sup>[14]</sup>。这些研究都从不同侧面阐明植物对 PAHs 的去除作用, 但报道的结果通常不一致, 有的报道称土壤 PAHs 含量与植物吸收有一定的相关性, 但也有人报道称两者之间没有相关性, 关于 PAHs 植物累积与土壤含量之间的关系报道较少。鉴于此, 本研究选择菲芘为目标污染物, 玉米为材料, 系统地研究菲芘在土壤与植物间的分配富集规律及修复效果, 旨在为利用植物修复土壤环境中多环芳烃污染提供理论与实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料与实验设计

供试药品菲芘均为 Sigma 公司产品; 供试植物为玉米, 盆栽实验于 2003 年 4 月至 6 月在浙江大学

\* 中国科学院南京土壤研究所开放基金 (035116)、浙江省教育厅项目 (20040187) 和国家“863”项目 (2002AA649200) 资助

† 通讯作者, E-mail: yxchen@zju.edu.cn

作者简介: 徐圣友 (1967~), 男, 博士, 主要从事环境污染模拟与控制研究。E-mail: shengyouxu22@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-01-04; 收到修改稿日期: 2005-08-03

人工智能温室进行,实验周期为 60 d;土壤类型为小粉土,采自浙江大学华家池校区,土壤 pH 6.3,有机质为  $26.0 \text{ g kg}^{-1}$ 。土壤风干后过 1.0 mm 筛,取少量的土壤喷上溶解于丙酮的菲芘溶液,待丙酮挥发后再取此土与无污染土混匀,测定混合土样中的菲芘浓度(表 1),设 6 个水平处理(编号为 T0、T1、T2、T3、T4、T5),T0 为种植物无菲芘处理对照(CK0),每处理 3 次重复。处理土壤( $2 \text{ kg 盆}^{-1}$ )被装入内径 15cm 的塑料盆中,每盆土壤施 2 g NPK 复合肥料( $\text{N P}_2\text{O}_5 \text{ K}_2\text{O} = 1 \ 0.35 \ 0.8$ )<sup>[15]</sup>,浇自来水至田间持水量的 60%。同时设两组无植物对照(不种玉米),对照 1 (CK1)加 0.1% 叠氮化钠( $\text{NaN}_3$  与土壤混匀后加入对照盆中以压制土壤微生物活动)<sup>[14,16]</sup>,对照 2 (CK2)不加叠氮化钠。全部处理于室内平衡 1 周后,每盆种玉米种子 5 粒,待发芽后间苗为 3 株,定期补充水分,保持植物正常生长。本试验中,对照 1 可以认为是无植物、无土壤微生物处理,多环芳烃菲芘的消失可看成是非生物降解,包括光解、挥发以及物理化学分解;对照 2 菲芘的消失可以看作是非生物与微生物共同作用的结果;各种处理浓度均种玉米而没有加叠氮化钠,所有多环芳烃的消失均可看作是非生物与生物(植物与微生物)降解共同作用的结果。

### 1.2 土壤植物样品的采集与制备

实验结束后,采集盆栽土样装入封口袋内,玉米样品分根、茎、叶三部分取样,用去离子水洗净后装入封口袋内,所有样品均放入  $-20^\circ\text{C}$  冰柜中保存。分析前用冷冻干燥仪(德国,Christ 公司)冷冻干燥,干燥后的样品研磨过 1.0 mm 筛,再将过

筛后的样品装入事先准备好的小封口袋,放入冰柜内备用。

### 1.3 土壤植物样品中菲芘的提取与分析方法

多环芳烃提取分析参照 Simonich 和宋玉芳的方法略作改进<sup>[17~18]</sup>。土样样品:称取 2.0 g 冷冻备用的土壤样品,置于带盖的玻璃离心管内,加入二氯甲烷萃取液,然后将其放在超声水浴振荡器中连续震荡 1 h 后离心,在震荡过程中加冰以保持超声水浴箱中的温度不超过  $40^\circ\text{C}$ ,取 3 ml 离心管上清液过 Fisher Pasteur 玻璃管硅胶柱,经洗脱液洗脱后于旋转蒸发瓶中蒸干,再用甲醇定容过液相色谱专用膜后,移入液相色谱进样瓶内待测。

植物样品:称取 0.5 g 冷冻备用的植物样品,置于带盖的玻璃离心管内,加入有机提取剂(丙酮 正己烷 = 1:1)萃取液,于超声水浴中提取 20 min 后离心(温度不超过  $40^\circ\text{C}$ ),将上清液转移到装有玻璃纤维棉和无水硫酸钠漏斗的旋转蒸发瓶中,再往离心管中加入有机提取剂,重复 2 次,合并有机相于旋转蒸发瓶中,蒸干后用甲醇定容,再进行样品净化和浓缩,其步骤与测定土壤样品的相同。

### 1.4 菲芘测定方法与质量控制

菲芘含量采用高效液相色谱仪(美国,安捷伦 1100 系列)测定,DAD 检测器,检测极限菲为  $45.0 \text{ pg}$ ,芘为  $52.6 \text{ pg}$ 。流动相为甲醇加水,检测波长菲 250 nm,芘 235 nm。本研究测定样品均为干样。土壤样品的回收率分别是菲 94.91% ( $n = 7$ ,  $RSD < 8.98\%$ )、芘 97.18% ( $n = 7$ ,  $RSD < 9.49\%$ )。植物样品的回收率分别是菲 90.45% ( $n = 7$ ,  $RSD < 5.26\%$ )、芘 98.10% ( $n = 7$ ,  $RSD < 3.53\%$ )。

表 1 处理土样最初添加的菲芘浓度<sup>1)</sup>

Table 1 Initial concentrations of phenanthrene and pyrene in treated soils ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

	T0	T1	T2	T3	T4	T5
菲 Phe	ND	3.31 $\pm$ 0.02	20.49 $\pm$ 6.37	79.88 $\pm$ 6.03	169.5 $\pm$ 1.09	378.4 $\pm$ 19.31
芘 Pyr	ND	4.32 $\pm$ 2.56	24.02 $\pm$ 0.52	117.89 $\pm$ 9.98	169.1 $\pm$ 3.24	365.4 $\pm$ 12.37

1) T0(CK0):未污染对照土,未加  $\text{NaN}_3$  Pollution-free control soils, without  $\text{NaN}_3$ ; ND:没有检出 Not detected;  $n = 3$

### 1.5 数据处理

本研究数据采用 SPSS (SPSS10.0 版本) 进行统计分析,处理间在 0.05 水平差异显著 ( $p < 0.05$ )。盆栽实验中多环芳烃的去除率 ( $R$ ) 为:  $R = (C_0 - C_t) \times 100 / C_0$ , 这里  $C_0$  代表土壤多环芳烃最初的添加浓度,  $C_t$  表示试验结束后土壤中多环芳烃的残留浓度。

## 2 结果与分析

### 2.1 污染土壤菲芘对玉米生长的影响

图 1 表示不同菲芘处理土壤中玉米根茎叶的干重。结果表明,在添加菲芘的土壤中,生长 60d 后收获的各浓度处理玉米的根茎叶间差异不显著,与对

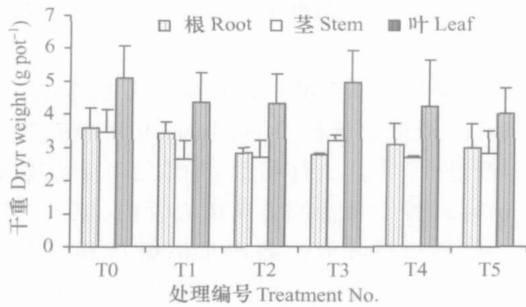


图1 不同浓度菲芘处理土壤种植玉米 60d 后玉米根茎叶生物量

Fig. 1 The Biomass of roots, stems and leaves of maize plants 60 days after transplanting to the soil treated with different concentrations of Phe and Pyr.

照相比,高浓度处理植物生物量略有减小,但差异没有达到显著水平。玉米不同部位之间存在差异,对照与处理均是叶片生物量最大,根茎其次,说明不同浓度多环芳烃对玉米的生长影响较小,在一定浓度范围内,玉米能在菲芘污染土壤中正常生长。

## 2.2 玉米对污染土壤菲芘的去除研究

图2是60d后玉米处理和对照土壤中多环芳烃

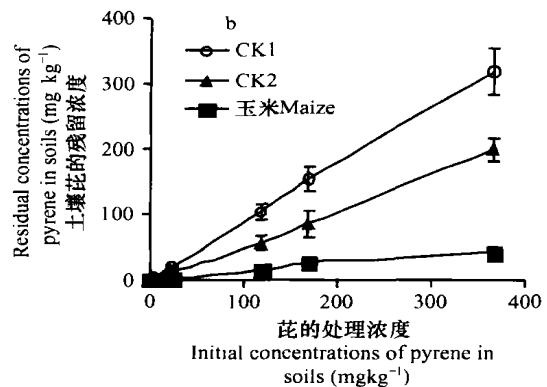
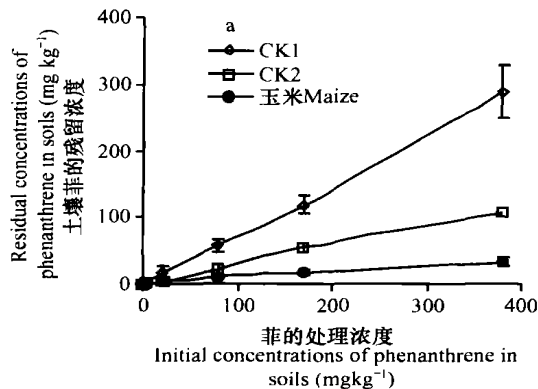


图2 菲芘处理种植与未种植玉米土壤中菲芘的残留量

Fig. 2 Residual concentrations of phenanthrene and pyrene in unplanted and planted soils

## 2.3 菲芘在玉米体内的累积

图3是土壤菲芘残留量与植物菲芘累积量的对应关系曲线。结合图2数据可知,随着土壤中菲芘处理浓度的增加,土壤中的残留量逐渐增大,玉米体内菲芘的含量也明显升高,且累积量与处理浓度成正相关(图3),说明添加到土壤中的菲芘能被植物吸收与累积。

不同种类多环芳烃在植物体内不同部分含量不同,芘的累积量是根>叶>茎秆(图3b),叶片是地上部分累积的主体,且浓度越高累积量越大。菲与

的残留含量。结果表明,随着处理浓度的增加,土壤中的多环芳烃残留量逐渐增加。

各处理均是对照1的残留浓度最高,对照2的残留浓度其次,玉米处理的土壤多环芳烃残留浓度最低,且各处理间差异显著。种植玉米土壤中菲的去除率为69.8%~91.2%,平均为84.2%(图2a),对照2菲的去除率则为62.3%~73.05%,平均为69.0%,对照1菲的去除率为7.4%~29.9%,平均为20.6%。可见,玉米处理菲的平均去除率比对照2高15.1%,比对照1高63.6%,去除菲的非生物作用较小,微生物与植物降解作用较大。土壤中芘的去除情况类似于菲,种植玉米60d后,处理土壤中芘的去除率为80.0%~88.4%,平均为84.7%(图2b),对照2与对照1芘的去除率分别为32.2%~55.1%与9.0%~18.6%,植物处理芘的平均去除率比对照2高38.7%,比对照1高72.3%。微生物降解在多环芳烃去除中作用较大,有微生物的对照2菲芘去除率分别比无微生物对照1高48.2%和34.1%。同菲相比,芘的非生物去除作用更小,主要是植物与微生物降解。

芘不同,植物体内菲的含量是叶片>根>茎秆(图3a)。T0(对照CK0)处理土壤中菲芘均没有检测到(图3),但玉米叶片中均检测到菲(0.87 mg kg<sup>-1</sup>)、芘(1.31 mg kg<sup>-1</sup>)的存在,说明叶片的菲和芘来源于大气沉降,或者是污染盆中的土壤挥发。但玉米叶片吸收的菲芘所占比例较小,玉米体内菲芘主要来自于植物根系吸收与运输。玉米叶片中的菲芘平均分别有84.4%和86.3%来自植物根系的土壤吸收;玉米茎中的菲芘平均分别有95.4%和84.0%来自植物根系的土壤吸收。

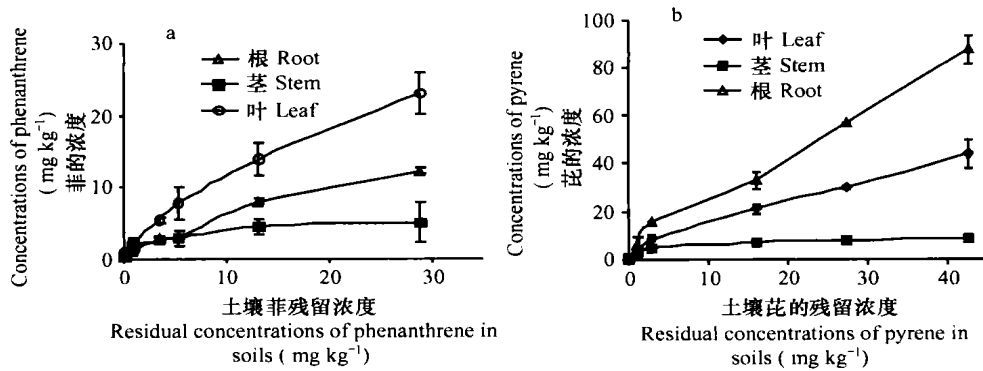


图3 玉米根茎叶中菲芘的含量

Fig. 3 Concentrations of phenanthrene and pyrene in roots, stems and leaves of maize

#### 2.4 菲芘的植物累积与土壤残留量的关系

生物富集因子 (Bioconcentration factors, 简称 BCFs) 是植物体内污染物的累积量与其生长土壤中污染物残留量的比值,常用于植物修复能力评价研究,BCFs 越大,表明植物的修复能力越高。图 4 是生物富集因子与土壤菲芘残留量对应关系曲线。结果表明,菲的生物富集因子随着土壤残留量的增大而降

低(图 4a),不同部位的 BCFs 大小不同,叶的 BCFs 大于茎和根,且均大于 1,平均达 1.46,说明玉米叶片是菲的主要富集场所。芘的生物富集因子也是随着土壤残留量的增大而降低,但不同部位的 BCFs 大小是根 > 叶 > 茎(图 4b),与菲的情况不同的是根系芘的生物富集因子均大于 2,平均达 3.61,叶的 BCFs 也均大于 1,平均达 1.95(图 4b),说明根是芘的最大富集部位,叶次之。

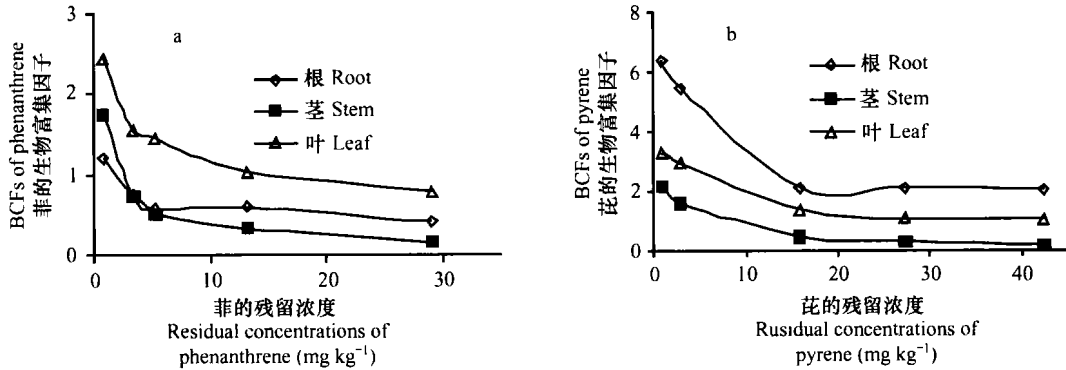


图4 玉米根茎叶中菲芘的生物富集因子

Fig. 4 Bioconcentration factors (BCFs) of phenanthrene and pyrene in roots and shoots of maize

### 3 讨论

多环芳烃由于其在环境中的持久性而采取生物去除的方法往往不彻底<sup>[13]</sup>,如何加速多环芳烃,尤其是高环多环芳烃的去除是一个挑战。植物对多环芳烃的吸收与累积可能是土壤中多环芳烃去除的主要原因之一。如丁克强等观察到种植黑麦草可加快土壤中可提取态菲与苯并[a]芘浓度的下降,且土壤中苯并[a]芘的可提取浓度随着时间逐渐减少<sup>[19,21]</sup>。姜霞等采用放射性同位素示踪的方法研

究灯心草对菲的吸收与迁移,结果表明,植物能够由根吸收菲并将其输送到植物的茎中<sup>[20]</sup>。Kelsey 等发现植物可吸收与累积土壤中的多环芳烃,且吸收速率与其生物有效性成正相关<sup>[7]</sup>。本研究表明玉米能明显地去除污染土壤中的菲和芘,在 60 d 实验中,大约有 84.2% 的菲和 84.7% 芘被玉米成功去除。此外,累积菲芘后的玉米对环境存在一定的风险,必须妥善处理,决不能让人畜误食导致伤害,或通过食物链富集传播。

微生物降解是土壤中多环芳烃去除的另一途径,植物可通过增加微生物的数量、提高微生物活性

或改变微生物种群结构来加快有机污染物的降解<sup>[12,19,22~24]</sup>。Reilly 等研究发现,植物可通过增加微生物活性来促进芘的去除<sup>[23]</sup>。Ke 等研究红树林植物对多环芳烃的降解时发现,土著与外来微生物在多环芳烃的降解中起着非常重要的作用<sup>[25]</sup>。Chen 等认为微生物数量与多环芳烃降解之间有非常好的线性关系,多环芳烃降解菌的分布同多环芳烃的分布一致<sup>[26]</sup>;丁克强等认为黑麦草可提高土壤中多酚氧化酶和可降解微生物的活性,形成更有利的可降解苯并[a]芘的根际修复环境<sup>[19]</sup>。可见,植物微生物联合作用将更有利于多环芳烃污染土壤修复效果的提高。本研究表明,对照 1(加叠氮化钠压制微生物活性)中的菲芘残留量较高,可能是多环芳烃的非生物消减较低缘故,这与高彦征研究结果相一致<sup>[14]</sup>。对照 2(不加叠氮化钠)土壤中菲芘含量大幅度减少,去除量较高,可能是土壤微生物作用的结果,表明土壤具有对多环芳烃污染的自然削减与修复功能,但其作用的相关机制不太清楚,还有待于进一步研究。

多环芳烃在土壤与植物间分配富集关系可用生物富集因子(BCFs)进行评估,BCFs 越大表明植物对污染物的富集能力越强<sup>[14,23,27]</sup>。本研究证实玉米根茎叶的生物富集因子随着土壤多环芳烃含量的增加而降低,但植物体内多环芳烃的累积量却与其生长的土壤含量成正相关。可能是植物对菲芘的累积量受最大值(阈值)限制,低浓度多环芳烃土壤中植物累积量远离阈值,故 BCFs 较高,而高浓度多环芳烃土壤中植物累积量较接近阈值,故 BCFs 较低。这同 Wang 与高彦征的研究相类似,Wang 等认为在通常情况下,BCFs 会随着土壤中污染物含量的增加而下降,尤其是移动性强的物质更加明显<sup>[15]</sup>。高彦征等研究发现,植物的根系富集因子(RCFs)随着土壤中多环芳烃的含量增加而下降,并且在同一植物土壤系统中,菲的 RCF 要小于芘<sup>[12]</sup>。本研究也发现,玉米根系中菲的富集因子为 0.42~1.21,而芘的富集因子为 2.07~6.40,相差达 5 倍左右(图 4)。此外,无菲芘污染土壤(T0)玉米根中检测到菲的存在,芘却没有检测到,表明根中的菲来源于地上部分的转移与运输,可能是溶解于韧皮部汁液中的菲通过筛管,随着韧皮部汁液而被动运输到植物的根部。芘可能由于分子量大,水溶性差,从木质部导管转移到韧皮部的横向运输阻力大,故在根中没有检测到,也可能是苯环数越高植物体内移动阻力越大的缘故,是否如此尚需进一步研究。

## 4 结 论

经初步研究表明,玉米表现出具有强化修复菲芘污染土壤的作用,对土壤中菲芘的去除效果明显;玉米能够吸收与累积土壤中污染的菲和芘,且累积量与土壤菲芘的添加量正向关,生物富集因子与土壤菲芘的含量负相关。玉米能够在系列浓度多环芳烃污染土壤中正常生长,没有受到高浓度( $> 300 \text{ mg kg}^{-1}$ )菲芘的影响。因此,用玉米修复多环芳烃污染土壤是一种可行的绿色环保方法。

## 参 考 文 献

- [1] Geva B, Jones K C, Hamilton T J. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) deposition in a small rural lake, Cumbria, UK. *Sci. Total Environ.*, 1998, 215: 231~242
- [2] Haeseler F, Blanchet D, Druelle V, *et al.* Ecotoxicological assessment of soils of former manufactured gas plant sites: Bioremediation potential and pollutant mobility. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, 33(24): 4380~4384
- [3] Joner E J, Johansen A, Cruz M A D, *et al.* Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil. *Environ. Sci. Technol.*, 2001, 35: 2773~2777
- [4] Jian Y, Wang L, Peter P, *et al.* Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation Research*, 2004, 557: 99~108
- [5] Tao S, Cui Y H, Xu F L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin. *Sci. Total Environ.*, 2004, 320: 11~24
- [6] 高学晟,姜霞,区自清. 多环芳烃在土壤中的行为. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 501~504. Gao X S, Jiang X, Ou Z Q. Behaviors of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soils (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 501~504
- [7] Xu S Y, Chen Y X, Wu W X, *et al.* Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. *Sci. Total Environ.*, 2005, In Press
- [8] 夏会龙,吴良欢,陶勤南. 有机污染环境的植物修复研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 457~460. Xia H L, Wu L H, Tao Q N. A review on phytoremediation of organic contaminants (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2003, 14(3): 457~460
- [9] Binet P, Portal J M, Leyval C. Dissipation of 3~6 ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 2011~2017
- [10] Yoshitomi K J, Shann J R. Corn (*Zea mays* L.) root exudates and their impact on <sup>14</sup>C-pyrene mineralization. *Soil Biol. Biochem.*, 2001, 33: 1769~1776
- [11] Ding K Q, Luo Y M, Sun T H, *et al.* Bioremediation of soil contaminated with petroleum using forced-aeration composting. *Pedosphere*,

- 2002, 12(2): 145 ~ 150
- [12] Hans H L, Martin A. Accumulation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere soil. *Chemosphere*, 2000, 40: 11 ~ 14
- [13] Liste H H, Alexander M. Plant-promoted pyrene degradation in soil. *Chemosphere*, 2000, 40: 7 ~ 10
- [14] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. *Chemosphere*, 2004, 55: 1 169 ~ 1 178
- [15] Wang M, Jones K C. Uptake of chlorobenzenes by carrots from spiked and sewage sludge-amended soil. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, 28: 1 260 ~ 1 267
- [16] Kan A T, Fu G M, Hunter M A. Irreversible adsorption of naphthalene and tetrachlorobiphenyl to tula and surrogate sediment. *Environ. Sci. Technol.*, 1997, 31(8): 2 176 ~ 2 185
- [17] Simnich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Sci. Technol.*, 1994, 28: 939 ~ 943
- [18] 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 土壤、植物样品中多环芳烃(PAHs)分析方法研究. *应用生态学报*, 1995, 6(1): 92 ~ 96. Song Y F, Qu Z Q, Sun T H. Analytical method of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil and plant samples (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(1): 92 ~ 96
- [19] 丁克强, 骆永明, 刘世亮, 等. 黑麦草对土壤中苯并[a]芘动态变化的影响. *土壤学报*, 2004, 41(3): 348 ~ 353. Ding K Q, Luo Y M, Liu S L, *et al.* Dynamics in benzo [a] pyrene concentrations in soil as influenced by ryegrass plants (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 348 ~ 353
- [20] 姜霞, 区自清, 应佩峰.  $^{14}\text{C}$ 菲在“植物-火山石-营养液-空气”系统中的迁移和转化. *应用生态学报*, 2001, 12(3): 451 ~ 454. Jiang X, Qu Z Q, Ying P F. Transportation and transformation of  $^{14}\text{C}$ -phenanthrene in closed chamber (nutrient-lava-air) system (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3): 451 ~ 454
- [21] 丁克强, 骆永明, 刘世亮, 等. 黑麦草对菲污染土壤修复的初步研究. *土壤*, 2002, 34(4): 233 ~ 236. Ding K Q, Luo Y M, Liu S L, *et al.* Remediation of phenanthrene-contaminated soil by growing *Lolium multiflorum* Lam (In Chinese). *Soils*, 2002, 34(4): 233 ~ 236
- [22] Wilson S C, Jones K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs). *Environ. Pollut.*, 1993, 81: 229 ~ 249
- [23] Reilley K A, Banks M K, Schwab A P. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *J. Environ. Qual.*, 1996, 25: 212 ~ 219
- [24] Joner E J, Leyval C. Rhizosphere gradients of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dissipation in two industrial soils and the impact of arbuscular mycorrhiza. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, 37: 2 371 ~ 2 375
- [25] Ke L, Wang W Q, Wong W Y, *et al.* Removal of pyrene from contaminated sediments by mangrove microcosms. *Chemosphere*, 2003, 51: 25 ~ 34
- [26] Chen Y C, Katherinebanks M, Paulschwab A. Pyrene degradation in the Rhizosphere of Tall Fescue (*Festuca arundinacea*) and Switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *Environ. Sci. Technol.*, 2003, 37: 5 778 ~ 5 782
- [27] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environ. Pollut.*, 1999, 106(3): 369 ~ 380

## REMEDICATION OF PHENANTHRENE AND PYRENE-CONTAMINATED SOIL BY GROWING MAIZE ( *ZEA MAYS* L. )

Xu Shengyou<sup>1,2</sup> Chen Yingxu<sup>1†</sup> Lin Qi<sup>1</sup> Wu Weixiang<sup>1</sup> Wang Dong<sup>1</sup> Xue Shengguo<sup>1</sup> Shen Chaofeng<sup>1</sup>

(1 Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

(2 Department of Resource and Environment, Huangshan University, Huangshan, Anhui 245021, China)

**Abstract** A study was carried out to investigate mechanisms of the removal and accumulation of phenanthrene and pyrene by *Zea Mays* L. Pot experiment was conducted with a series of concentrations of phenanthrene and pyrene in a greenhouse. The results showed that maize significantly removed phenanthrene and pyrene from soils. At the end of the 60-day experiment, the extractable phenanthrene and pyrene were lower in planted soil than in non-planted soil. About 69.76% ~ 91.16% of phenanthrene and 76.97% ~ 88.37% of pyrene were removed from the soils, respectively. As compared to control 1 (with addition of  $\text{NaN}_3$ ), maize removed on average 63.56% of phenanthrene and 72.27% of pyrene from the soils and relative to control 2 (without  $\text{NaN}_3$ ), 15.13% of phenanthrene and 38.15% of pyrene were removed. Maize did take up PAHs from the soils, and generally the higher the concentration of PAH in soil, the more maize took up. Bioconcentration factors (BCFs) for phenanthrene and pyrene tended to decrease with increasing concentrations of the contaminants in soil, and the BCFs for pyrene were large than those for phenanthrene. The BCFs for phenanthrene in shoots were 0.79 ~ 2.45 (leaves) and 0.17 ~ 1.76 (stems), higher than in roots (0.42 ~ 1.21) in the same treatment. However, the BCFs for pyrene in shoots were 1.03 ~ 3.31 (leaves) and 0.2 ~ 2.17 (stems), much lower than in roots (2.07 ~ 6.40). Maize can grow in soils higher in PAHs, and accumulate phenanthrene and pyrene. The results indicate that removal of PAHs from contaminated soils by *Zea mays* L may be a feasible approach to remediation of the soils.

**Key words** Phytoremediation; Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Phenanthrene; Pyrene; Uptake and accumulation