

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

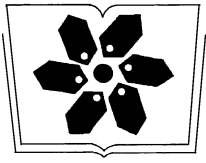
(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 5 期
Vol.31 No.5
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 5 期 2011 年 3 月 (半月刊)

目 次

盐胁迫下 3 种滨海盐生植物的根系生长和分布····· 弋良朋,王祖伟 (1195)

蕙兰病株根部内生细菌种群变化····· 杨 娜,杨 波 (1203)

森林不同土壤层全氮空间变异特征····· 张振明,余新晓,王友生,等 (1213)

基于生态位模型的秦岭山系林麝生境预测····· 罗 翀,徐卫华,周志翔,等 (1221)

黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释····· 王晓春,赵玉芳 (1230)

两种大型真菌菌丝体对重金属的耐受和富集特性····· 李维焕,于兰兰,程显好,等 (1240)

2005—2009 年浙江省不同土地类型上空对流层 NO₂ 变化特征 ····· 程苗苗,江 洪,陈 健,等 (1249)

关帝山天然次生针叶林林隙径高比 ····· 符利勇,唐守正,刘应安 (1260)

鄱阳湖湿地水位变化的景观响应····· 谢冬明,郑 鹏,邓红兵,等 (1269)

模拟氮沉降对华西雨屏区撑绿杂交竹凋落物分解的影响····· 涂利华,戴洪忠,胡庭兴,等 (1277)

喷施芳香植物源营养液对梨树生长、果实品质及病害的影响 ····· 耿 健,崔楠楠,张 杰,等 (1285)

不同覆膜方式对旱砂田土壤水热效应及西瓜生长的影响 ····· 马忠明,杜少平,薛 亮 (1295)

干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响 ····· 张仁和,郑友军,马国胜,等 (1303)

不同供水条件下冬小麦叶与非叶绿色器官光合日变化特征 ····· 张永平,张英华,王志敏 (1312)

水分亏缺下紫花苜蓿和高粱根系水力学导度与水分利用效率的关系 ··· 李文娆,李小利,张岁岐,等 (1323)

美洲森林群落 Beta 多样性的纬度梯度性 ····· 陈圣宾,欧阳志云,郑 华,等 (1334)

水体泥沙对菖蒲和石菖蒲生长发育的影响····· 李 强,朱启红,丁武泉,等 (1341)

蚯蚓在植物修复芫污染土壤中的作用····· 潘声旺,魏世强,袁 馨,等 (1349)

石榴园西花蓟马种群动态及其与气象因素的关系····· 刘 凌,陈 斌,李正跃,等 (1356)

黄山短尾猴食土行为····· 尹华宝,韩德民,谢继峰,等 (1364)

扎龙湿地昆虫群落结构及动态····· 马 玲,顾 伟,丁新华,等 (1371)

浙江双栉蝠蛾发生与土壤关系的层次递进判别分析····· 杜瑞卿,陈顺立,张征田,等 (1378)

低温导致中华蜜蜂后翅翅脉的新变异 ····· 周冰峰,朱翔杰,李 月 (1387)

双壳纲贝类 18S rRNA 基因序列变异及系统发生 ····· 孟学平,申 欣,程汉良,等 (1393)

基于物理模型实验的光倒刺鲃生态行为学研究 ····· 李卫明,陈求稳,黄应平 (1404)

中国铁路机车牵引能耗的生态足迹变化 ····· 何吉成 (1412)

城市承载力空间差异分析方法——以常州市为例····· 王 丹,陈 爽,高 群,等 (1419)

水资源短缺的社会适应能力理论及实证——以黑河流域为例 ····· 程怀文,李玉文,徐中民 (1430)

寄主植物叶片物理性状对潜叶昆虫的影响····· 戴小华,朱朝东,徐家生,等 (1440)

专论与综述

C₄ 作物 FACE (free-air CO₂ enrichment) 研究进展 ····· 王云霞,杨连新,Remy Manderscheid,等 (1450)

研究简报

石灰石粉施用剂量对重庆酸雨区受害马尾松林细根生长的影响····· 李志勇,王彦辉,于澎涛,等 (1460)

女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察 ····· 石 辉,王会霞,李秧秧,刘 肖 (1471)

蚯蚓在植物修复芘污染土壤中的作用

潘声旺*, 魏世强, 袁馨, 曹生宪

(成都大学环境科学与工程研究所, 成都 610106; 西南大学资源环境学院/重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400715)

摘要:采用盆栽试验法,研究了蚯蚓(*Pheretima hupeiensis*)在植物修复芘污染土壤中的作用。结果显示,试验浓度(20.24—321.42 mg/kg)范围内,蚯蚓活动促进了芘污染土壤中修复植物黑麦草(*Lolium multiflorum*)黑麦草的生长,其根冠比明显增大。添加蚯蚓72 d后,种植黑麦草的土壤中芘的去除率高达60.01%—86.26%,其平均去除率(74.66%)比无蚯蚓活动的土壤-植物系统(64.55%)提高10.11%,比无植物对照组(18.24%)提高56.42%。各种生物、非生物修复因子中,植物-微生物交互作用对芘去除的平均贡献率(51.75%)最为突出,比无蚯蚓活动时(44.94%)提高6.81%。说明蚯蚓活动可强化土壤-植物系统对土壤芘污染的修复作用。

关键词:植物修复;多环芳烃;芘;黑麦草;蚯蚓

Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil

PAN Shengwang*, WEI Shiqiang, YUAN Xin, CAO Shengxian

Environment Science and Engineering Institute of Chengdu University, Chengdu 610106, China; College of Resources and Environment/Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment in Chongqing, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: Soil contamination by organic compounds, especially by the petroleum-derived polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), is a growing problem with serious environmental consequences. To evaluate the contribution of the soil macrofauna on the dissipation of PAHs in rhizosphere soil, a pot experiment was carried out to investigate effect of earthworm (*Pheretima hupeiensis*) on ryegrass (*Lolium multiflorum*) remedying soils polluted by pyrene in, and roles of biotic & abiotic factors in the process of dissipation of pyrene in soils were estimated. After washing with sterile distilled water, eight adult earthworms (7 to 8 cm in length) were added on the top of sample soil of each treated pots at initial experiments, giving (a) unplanted microbe-inhibited pots with spiked soil (0.1% NaN₃ was used to inhibit the microbial activity), (b) unplanted pots with spiked soil, (c) planted microbe-inhibited pots with spiked soil (0.1% NaN₃ was used), (d) planted pots with spiked soil and (e) planted pots with unspiked soil, and each treatment was established with five replications. Results showed that earthworm activity promoted growth of ryegrass growing in soils at initial concentrations of pyrene ranging from 20.24 to 321.42 mg/kg, whose biomass per plant was 15.65%—21.32% larger than those in corresponding treatments without earthworm introduced in, and apparently facilitated its root/shoot ratio, which was 20.44%—24.24% greater than those in corresponding non-inoculated soils at the end of the experiment. Seventy-two days after earthworms were introduced in, residual pyrene concentrations (2.78 to 128.53 mg/kg) in vegetated soils were much lower than the respective initial values, and the values varied significantly among treatments. During the experiment, averagely 74.66% of pyrene was removed from the soils with plantation of grass and incubation of earthworm, which was 10.11% higher than those with only plantation of ryegrass, and 56.42% higher than those without plantation of ryegrass and earthworm inoculation. As compared to those treatments with same pollution levels, the contents of pyrene accumulated in plant tissues growing in soils with earthworms were always lower than those without earthworm. Along with the increments of soil pyrene concentrations from 20.24 to 321.42 mg/kg, the extractable pyrene in roots and shoots of

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAD87B10-05);国家863项目(2006AA10Z427)

收稿日期:2010-01-26; 修订日期:2011-01-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqwei@swu.edu.cn

ryegrass growing in soils without earthworms increased from 4.11 to 16.79 mg/kg and from 0.87 to 3.01 mg/kg, while they did from 2.32 to 11.17 mg/kg and from 0.51 to 2.01 mg/kg when earthworms were introduced in, respectively. Despite incubation of earthworm evidently enhanced the remediation of pyrene in soils, contributions of biotic and abiotic factors to phytoremediation process displayed distinct diversity. Of 10.11% enhanced removal of the total pyrene, abiotic loss, earthworm accumulation, phytodegradation and microbial degradation accounted for 0.16%, 0.08%, 0.42% and 2.64%, respectively. Among all the remedying factors, the plant-microbial interaction was proved to be the primary pathway for pyrene degradation, whether the presence of earthworms or not, which accounted for 51.75% of the total removal, and was 6.81% higher than those in corresponding soils without earthworm activity. These findings suggest a feasible way for the establishment of high-efficient phytoremediation of soil PAHs pollution by introducing earthworms into the soil-plant system.

Key Words: phytoremediation; PAHs; pyrene; *Lolium multiflorum*; earthworm

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中普遍存在的持久性有机污染物,性质稳定、水溶性差,环境含量逐年上升。在我国,部分土壤 PAHs 含量已达到 10^2 — 10^4 $\mu\text{g}/\text{kg}$,交通干线、厂矿和城郊附近甚至高达 10^6 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[1]。因多数 PAHs 具有较强的“三致”效应,严重威胁着土壤的生态安全、农产品质量和人类健康,修复土壤 PAHs 污染已成为环境领域的焦点问题。

与传统修复方法相比,植物修复投资少、效益高、环境友好,发展潜力巨大。但该技术起步较晚,多数研究仅限于修复植物的筛选^[2-3]或土壤-植物系统的修复效应^[4],在环境因素对修复效果的影响方面,尤其是土壤动物(如蚯蚓、线虫等)对根际修复的强化作用方面研究尚少。事实上,蚯蚓活动不仅能改善土壤的理化性质、活化微生物生理活性^[5],还能促进修复植物的生长^[6]。因生物降解 PAHs 主要在好氧条件下进行^[7-8],蚯蚓活动引发的土壤-植物系统理化性质、生态功能的改变,尤其是通气状态的改善,能否对植物修复 PAHs 污染土壤产生促进作用?相关研究鲜见报道。本研究拟以环毛蚓(*Pheretima hupeiensis*)、黑麦草(*Lolium multiflorum*)为试验材料,对比研究蚯蚓活动对土壤-植物系统中 PAHs 去除效果的影响,以期为 PAHs 污染土壤的生态修复提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤

紫色土,采自西南大学试验农场,无污染史。理化性质:有机质 22.3 g/kg,CEC 27.43 cmol/kg,pH 7.19,速效 N、P、K 分别为 114.6、24.7、94.8 mg/kg。

1.1.2 植物

以 2 周龄黑麦草为试验材料。种子经双氧水处理后,无菌条件下催芽、培养 2 周后备用。

1.1.3 蚯蚓

为人工培育的湖北环毛蚓(*Pheretima hupeiensis*),培育方法^[9]如下:风干的牛粪经脱氨、灭菌(虫)后,重新碾碎,以 60 g/kg(干重比)的比率与未污染的试验土壤混匀后,分装于底部有滤孔的瓷盆中(每盆 20 kg)。母蚓经双氧水浸润 10 min 后,均匀引入培养盆中(每盆 200 余条),(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 、40%田间持水量下室内培育 30 d 后,选择同等大小(鲜重 0.5—0.6 g;体长 7—8 cm)、无环带个体待用。

1.1.4 化学品

芘(Pyr,pyrene)是一个有代表性的 PAHs,环境中芘的浓度和其它 PAHs 浓度有很好的相关性,且检出浓度较高。本研究以芘为 PAHs 代表物(购自德国 Fluka 公司,纯度>98%)。

1.2 试验方法

盆栽试验在温室内进行,试验周期 72 d。土壤采集后,风干、过 3 mm 筛。将定量芘(由设定污染水平、理论用土量估算)经丙酮溶解后,均匀洒在约 10%的理论用土量土壤表层。待丙酮挥发后,充分搅拌、过 3 mm

筛;用等量未污染土壤再次稀释,搅拌、过 3 mm 筛。经 9 次稀释、用完所有理论用土量后,制得相对均匀的人工污染土样。40% 田间持水量下平衡 1 周后,测得 6 个污染水平(T_0 — T_5)土样中芘浓度分别为:0(T_0)、20.24(T_1)、39.58(T_2)、79.86(T_3)、160.64(T_4)、321.42(T_5)mg/kg。试验分为 A、B 两组。

A 组包括 4 个处理、重复 5 次。①处理 1 (CK_1):土壤中加入 0.1% NaN_3 (抑制微生物活性)^[10],无植物;②处理 2 (CK_2):无植物、无 NaN_3 ;③处理 3 (TR_3):种植物、加 0.1% NaN_3 ;④处理 4 (TR_4):种植物、无 NaN_3 。土壤装盆后(每盆 2 kg,共计 120 盆),除 CK_1 、 CK_2 外,每盆移栽并保留黑麦草幼苗 12 株。试验期间,白天室温维持在 25℃,350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照强度下持续光照 16 h,夜间室温控制在 12℃左右;田间持水量维持在 40%(称重补水法)。

B 组中,除每盆添加 8 条蚯蚓外,试验设计、试验条件与 A 组相同,没有额外投加食物。试验期间,对照土样(CK_2)中蚯蚓体重较初始引入时平均减轻 15.03%,各污染水平(T_1 — T_5)下体重生长率与无污染的 T_0 组(-13.38%)间差异不显著($n=40$, $P>0.05$),其它处理(CK_1 、 TR_3 、 TR_4)中生长状况与 CK_2 类似,说明试验条件适合蚯蚓生长^[11]。

样品测定与质量控制

72 d 后采样,土壤、植物组织中芘的提取、净化方法参照文献^[12]。蚯蚓组织中芘的提取、净化参照 Johnson^[9]方法,略有改进:洗净后活体蚯蚓在去离子水中培养 12 h 后,转移到活化硅胶中埋置 48 h,待充分排净体内杂质后,洗净、用滤纸吸干、称重。液氮真空干燥后,充分碾碎。与 3 倍重量的无水硫酸钠混合,用正己烷索氏提取 12 h;将提取液浓缩至 1 mL 后,用凝胶渗透色谱法(GPC)进一步去除少量的油脂残余。滤液经旋转蒸发器蒸干后甲醇定容 2 mL,过 0.22 μm 孔径滤膜后待测。

经上述前处理后,HPLC(Waters600)测定,DAD 检测器(波长为 246 nm)、流动相为甲醇加水(83:17)。在此条件下,检出限为 54.2 $\mu\text{g/L}$,土壤中芘的加标(外标法、下同)回收率为 94.36%($n=7$, $RSD<6.58\%$)、植物组织为 93.42%($n=7$, $RSD<5.47\%$)、蚯蚓组织为 89.24%($n=7$, $RSD<6.71\%$)。

1.4 数据处理

采用 SPSS13.0 进行 Duncan's 多重比较。土壤中芘的去除率(R)计算式为: $R=(C_0-C_i)\times 100\%/C_0$, C_0 为初始浓度, C_i 为取样时残留浓度。去除因子 i 对芘去除的贡献率(T_i ,即因子 i 对芘的实际去除量与初始添加量的百分比)计算式为: $T_i=R_i\times 100\%/W\cdot C_0$,其中, R_i 为因子 i 对芘的实际去除量, W 为土壤质量。很明显,所有生物、非生物因子的贡献率之和理论上应等于去除率 R 。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓活动对植物生长的影响

图 1 展示了 A、B 组土壤(无 NaN_3)中黑麦草的生长状况。结果显示,试验浓度范围内,黑麦草在芘污染土壤中能够正常生长。无蚯蚓活动(A 组)时,其单株生物量、根冠比与 T_0 水平(0.602 g、0.321)间差异不显著($n=60$, $P>0.05$);有蚯蚓(B 组)时,单株生物量较同一污染水平 A 组间增加 15.65%—21.32%(平均值 $m=20.02\%$),其中, T_1 — T_4 水平的单株生物量与 A 组间差异显著($n=60$, $P<0.05$)。根冠比增加 20.44%—24.24%($m=22.08\%$),与同一污染水平 A 组间差异显著($n=60$, $P<0.05$)。说明蚯蚓活动对芘污染土壤中植物生长具有一定的促进作用。

2.2 蚯蚓活动对土壤-植物系统中芘去除的影响

表 1 显示,添加蚯蚓的土壤-植物系统(TR_4)中芘的残留量明显低于同一污染水平 A 组;试验结束时,B 组土壤中残留量与种植黑麦草的 A 组(TR_4)间差异显著($n=5$, $P<0.05$);与无黑麦草生长的 A 组(CK_2)间差异极显著($n=5$, $P<0.01$)。说明蚯蚓活动促进了土壤中芘的去除。

依照去除率计算式 $R=(C_0-C_i)\times 100\%/C_0$,可推算土壤中芘的去除情况。结果显示,种植黑麦草的土壤中芘去除率普遍高于同一污染水平的其它处理; T_1 — T_3 范围内,B 组土壤(TR_4)中平均去除率高达 74.66%(60.01%—86.26%);A 组(TR_4)去除率为 64.55%(51.28%—79.64%),而无植物对照组(CK_2)中仅为

18.24% (12.28%—24.23%)。

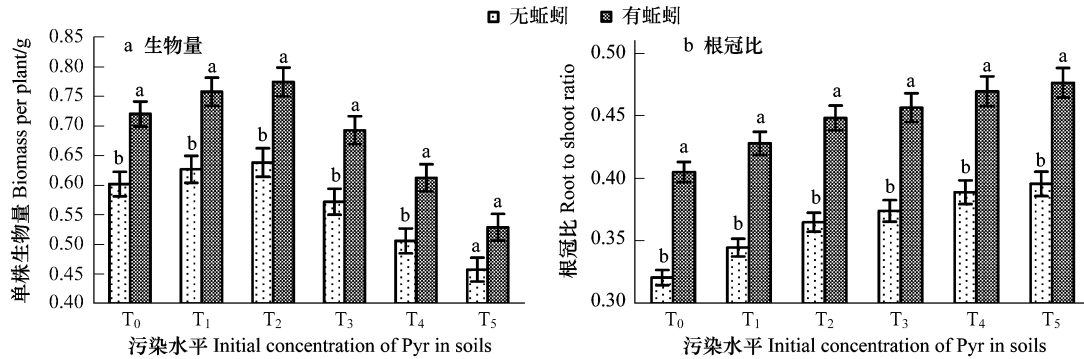


图1 不同污染水平下黑麦草的生长状况

Fig. 1 Growth difference of ryegrass grown in soils without NaN₃ under different pyrene pollution levels

表1 不同处理条件下土壤中芘的残留量

Table 1 Residual Pyr in soils under different treatment conditions (mg/kg)

处理 Treatment	残留量 Residues (mg/kg)				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
A 组处理 2 CK ₂ of group A	15.34±0.48 ^{Aa}	31.19±0.89 ^{Aa}	65.65±1.76 ^{Aa}	135.42±2.66 ^{Aa}	281.95±3.24 ^{Aa}
A 组处理 4 TR ₄ of group A	4.12±0.21 ^{Bb}	11.42±0.44 ^{Bb}	29.51±0.92 ^{Bb}	67.99±1.81 ^{Bb}	156.58±3.37 ^{Bc}
B 组处理 4 TR ₄ of group B	2.78±0.23 ^{Bc}	7.16±0.61 ^{Bc}	19.22±1.42 ^{Bc}	49.51±3.44 ^{Bc}	128.53±5.98 ^{Bc}

同列数据后不同大、小写字母表示 Duncan's 多重比较差异极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) ; T₁—T₅ 为初始污染水平

相同处理条件下,同一污染水平 A、B 组土壤中芘的去除率差异反映了蚯蚓活动对土壤芘污染修复效果的影响程度(图 2)。可以看出,不同污染水平下,蚯蚓活动对芘去除的强化程度也不一样:中度污染(T₃)时强化程度最高(12.90%),重污染(T₅)时次之(8.73%),低污染(T₁)时仅为 6.64%。

2.3 蚯蚓活动对植物富集芘的影响

基于土壤中残留浓度、植物组织中积累浓度,可推算植物对芘的根系浓缩系数、茎叶浓缩系数(RCFs or SCFs, root or shoot concentration factors)(图 3)。可以看出,随着初始添加浓度的递增,积累浓度逐渐增大,而 RCFs、SCFs 则逐渐减小;相同污染水平下,有蚯蚓作用时植物组织中的积累浓度、浓缩系数均小于无蚯蚓时。

如 T₁—T₅ 范围内,无蚯蚓作用时根系、茎叶部积累浓度为 8.80(4.11—16.79)、1.84(0.87—3.01) mg/kg,有蚯蚓时分别为 5.42(2.32—11.17)、1.12(0.51—2.01) mg/kg;无蚯蚓作用时 RCFs、SCFs 为 0.40(0.11—0.99)、0.09(0.02—0.21),有蚯蚓时分别为 0.34(0.09—0.83)、0.08(0.01—0.18)。

2.4 蚯蚓对芘去除的强化途径

土壤中芘的去除主要源于各种非生物(如渗滤、吸附、光解、挥发等)和生物因素(如植物代谢、积累、微生物降解、植物-微生物交互作用等)的共同作用。如果用 T_a、T_d、T_c、T_m、T_{pm} 代表非生物损失、植物代谢、积累、微生物降解、植物-微生物交互作用在芘去除过程中的贡献率,用 R₁、R₂、R₃、R₄ 代表未添加蚯蚓时 CK₁、CK₂、TR₃、TR₄ 处理中芘的表观去除率,在不考虑因子间交互作用的情况下,则有:

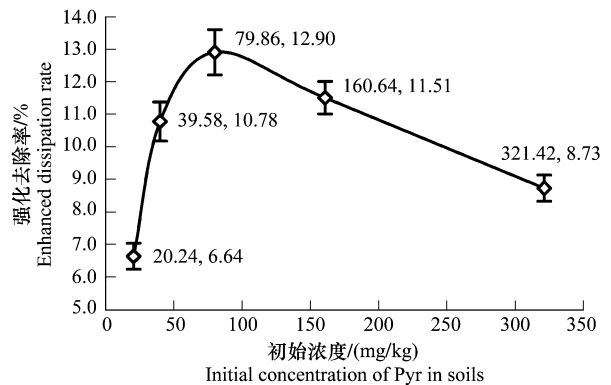


图2 不同污染水平下芘的强化去除差异

Fig. 2 Enhanced dissipation rates of Pyr in soils with different pollution levels

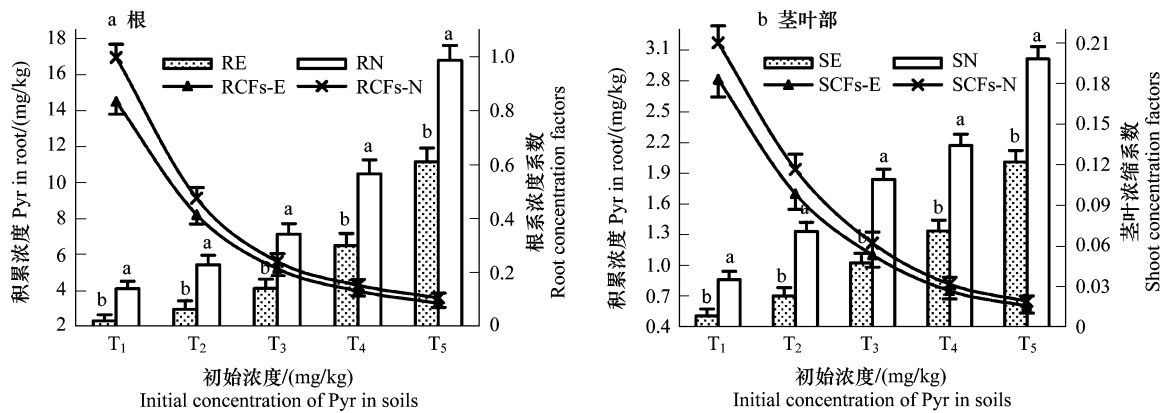


图3 植物组织对芘的积累作用

Fig. 3 Pyr in plant tissues as a function of Pyr concentrations in soils

RE、SE 和 RN、SN 分别代表有蚯蚓和无蚯蚓作用时芘在根系、茎叶部的积累浓度,同一污染水平上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$); RCFs-E、SCFs-E 和 RCFs-N、SCFs-N 分别代表有蚯蚓和无蚯蚓作用时根系、茎叶部芘浓缩系数

$$R_1 = T_a$$

$$R_2 = T_a + T_m$$

$$R_3 = T_a + T_c + T_d$$

$$R_4 = T_a + T_c + T_d + T_m + T_{pm}$$

B 组土壤中,因蚯蚓组织对芘的直接吸收作用以及蚯蚓活动对各种生物、非生物因子可能产生的强化去除作用,CK₁、CK₂、TR₃、TR₄中芘的去除率变化可分别表述为:

$$\Delta R_1 = T_a^e + T_e$$

$$\Delta R_2 = T_a^e + T_m^e + T_e$$

$$\Delta R_3 = T_a^e + T_c^e + T_d^e + T_e$$

$$\Delta R_4 = T_a^e + T_c^e + T_d^e + T_m^e + T_{pm}^e + T_e$$

式中, ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 分别代表添加蚯蚓后 CK₁、CK₂、TR₃、TR₄中芘去除率与相同处理条件下 A 组土壤中去除率差异; T_a^e 、 T_c^e 、 T_d^e 、 T_m^e 、 T_{pm}^e 代表蚯蚓活动所引起的 T_a 、 T_c 、 T_d 、 T_m 、 T_{pm} 变化量, T_e 代表蚯蚓组织直接吸收作用对芘去除的贡献率。由不同处理条件下土壤、蚯蚓组织、植物组织中芘含量,得出各修复因子在芘去除过程中的贡献率(表2)。

与 A 组相比,蚯蚓活动使土壤-植物系统(TR₄)中芘的平均去除率提高 10.11%,但蚯蚓组织积累部分仅占总添加量的 0.08%,说明蚯蚓的直接吸收作用并不是芘被强化去除的主要途径。试验过程中,非生物性损失、植物代谢对芘去除的平均强化率仅为 0.16%、0.42%,二者也不是强化去除的主要途径。相比之下,微生物降解、植物-微生物交互作用对芘去除的贡献率变化较大,前者较 A 组(15.68%)提高 2.64%,后者较 A 组(44.94%)提高 6.81%,分别占强化去除部分的 26.16%、67.28%。

3 讨论

研究表明^[4,13-14],植物-微生物交互作用是土壤-植物系统中 PAHs 去除的主要途径。因植物根系分泌物的种类、性质、生理活性存在一定的种间差异,其根际降解效应可能也不一样^[15-16];对污染物的忍耐性、污染环境根系活动状态是筛选修复植物的重要参数。本研究中,黑麦草能够在芘污染土壤中正常生长,其单株生物量、根冠比与对照组间无明显差异,说明黑麦草适合作为芘污染土壤的修复植物^[10]。

表2 生物、非生物因子在修复芘污染土壤过程中的贡献率

Table 2 Contributions of biotic & abiotic factors to remediation of Pyr in soils

项目 Factors	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
非生物损失/% Abiotic loss	32.07±13.2 ^{Ad} (1.17)	29.28±1.14 ^{Ad} (1.93)	25.64±0.89 ^{ABd} (2.28)	22.61±0.83 ^{ABc} (1.51)	18.16±1.04 ^{Bc} (1.16)
微生物去除/% Microbial degradation	210.23±4.87 ^{Ab} (14.46)	182.62±4.58 ^{ABb} (27.53)	152.25±3.62 ^{Bb} (37.61)*	134.34±3.33 ^{BCb} (34.15)*	104.62±2.81 ^{Cb} (18.47)
植物积累/% Plant accumulation	0.32±0.08 ^{Ad} (-0.08)	0.24±0.07 ^{ABd} (-0.07)	0.14±0.01 ^{Bd} (-0.04)	0.09±0.01 ^{BCd} (-0.02)	0.06±0.01 ^{Cd} (-0.01)
植物代谢/% Plant degradation	28.44±0.97 ^{Ac} (6.49)	17.01±0.82 ^{ABc} (5.37)	12.48±0.29 ^{Bc} (3.86)	5.56±0.22 ^{Cd} (3.26)	4.48±0.11 ^{Dd} (2.13)
蚯蚓富集/% Earthworm accumulation	0 ^{Ae} (1.30)	0 ^{Ae} (0.98)	0 ^{Ae} (0.73)	0 ^{Ae} (0.51)	0 ^{Ae} (0.37)
植物-微生物交互作用/% Plant-microbial interactions	525.30±20.33 ^{Aa} (42.89)	482.40±19.45 ^{ABa} (71.88)*	439.89±7.36 ^{Ba} (84.53)*	414.08±14.63 ^{BCa} (75.64)*	385.51±13.28 ^{Ca} (65.17)*

同列数据后不同大写字母或同行数据后不同小写字母表示差异达到显著水平($P<0.05$);括号中数据为添加蚯蚓后该因子对芘的强化去除率,*代表强化程度显著($P<0.05$);T₁—T₅为初始污染水平

试验期间,土壤-植物系统(TR₄)中芘的平均去除率由64.55%上升至74.66%,强化去除率高达10.11%。其中,26.16%的强化部分源于微生物降解;67.28%的强化部分源于植物-微生物交互作用。说明蚯蚓在植物修复土壤芘污染过程中所表现出的强化效应主要是通过植物-微生物交互作用实现的。Schaefer等^[17]认为,蚯蚓活动不仅能提高土壤养分的有效性和周转率,蚓粪中N、P成分及其它营养盐对促进土壤微生物的种群数量的增长、提高其代谢活性也具有重要作用。Singleton^[18]等证实,蚯蚓肠道中假单胞菌(*Pseudomonas*)、乳杆菌(*Acidobacterium*)以及青霉菌(*Penicillium*)、毛霉菌(*Mucor*)、曲霉菌(*Aspergillus*)对PAHs具有明显的降解作用。本研究也显示:中等污染水平(79.86 mg/kg)下蚯蚓活动对芘去除的强化效果最好(12.90%)。这可能与低污染环境污染物生物可利用性较低^[16]、高污染时微生物受污染物的毒害作用、降解活性被抑制^[11]有关。

尽管蚯蚓组织积累的芘相当有限(0.08%),但蚯蚓活动改善了土壤的理化性质、生态功能^[19],尤其是土壤中通气状况的改善^[20]对促进土壤-植物系统中芘的生物降解至关重要。Mallakin^[7]认为,对于具有较稳定(键结构的PAHs分子而言,充足的氧气供给不仅能促进PAHs的起始氧化过程,也能间接促进土壤中好氧微生物生长、强化其降解活性。此外,蚯蚓活动对黑麦草生长的促进,尤其是对其根系生长的促进作用,对扩大其根际效应范围、强化植物-微生物交互作用也具有十分重要的作用。

值得注意的是,与相同污染水平下土壤-植物系统相比,添加蚯蚓后芘在植物组织中积累浓度均明显低于A组($n=5, P<0.05$),植物积累对芘去除的贡献率也略小于A组,这可能与蚯蚓活动促进了土壤-植物系统对芘的去除、残留浓度较低、可供根系吸收利用的芘资源相对较少有关。该现象也说明,蚯蚓活动能在一定程度上减少植物组织对污染土壤中芘的积累、降低其生态风险。

References:

- [1] Li X H, Ma L L, Liu X F, Fu S, Cheng H X, Xu X B. Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5):944-950.
- [2] Manoli E, Samara C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 1999, 18(6): 417-428.
- [3] Oleszczuk P, Baran S. Polyaromatic hydrocarbons in rhizosphere soil of different plants; effect of soil properties, plant species, and intensity of anthropogenic pressure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(1/2):171-188.
- [4] Child R, Miller C D, Liang Y, Narasimham G, Chatterton J, Harrison P, Sims R C, Britt S D, Anderson A J. Polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading *Mycobacterium* isolates: their association with plant roots. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2007, 75(3): 655-663.
- [5] Scheu S. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives. *Pedobiologia*, 2003, 47(5/6): 846-856.

- [6] Eriksen-Hamel N S, Whalen J K. Earthworms, soil mineral nitrogen and forage production in grass-based hayfields. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(4): 1004-1010.
- [7] Mallakin A, Dixon D G, Greenberg B M. Pathway of anthracene modification under simulated solar radiation. *Chemosphere*, 2000, 40(12): 1435-1441.
- [8] Brauner J S, Widdowson M A, Novak J T, Love N G. Biodegradation of a PAH mixture by native subsurface microbiota. *Bioremediation*, 2002, 6(1): 9-24.
- [9] Johnson D L, Jones K C, Langdon C J, Pearce T G, Semple K T. Temporal changes in earthworm availability and extractability of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9): 1363-1370.
- [10] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. *Chemosphere*, 2004, 55(9): 1169-1178.
- [11] Bonnard M, Eom I C, Morel J L, Vasseur P. Genotoxic and reproductive effects of an industrially contaminated soil on the earthworm *Eisenia fetida*. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2009, 50(1): 60-67.
- [12] Pan S W, Wei S Q, Yuan X, Cao S X. The removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by mixed cropping of alfalfa and rape. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(11): 1355-1364.
- [13] Chen Y C, Banks M K, Schwab A P. Pyrene degradation in the rhizosphere of tall fescue (*Festuca arundinacea*) and switchgrass (*Panicum virgatum* L.). *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(24): 5778-5782.
- [14] Liste H H, Alexander M. Plant-promoted pyrene degradation in soil. *Chemosphere*, 2000, 40(1): 7-10.
- [15] Yi H, Crowley D E. Biostimulation of PAH degradation with plants containing high concentrations of linoleic acid. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(12): 4382-4388.
- [16] Siciliano S D, Germida J J, Banks K, Greer C W. Changes in microbial community composition and function during a polyaromatic hydrocarbon phytoremediation field trial. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69(1): 483-489.
- [17] Schaefer M, Petersen S O, Filser J. Effects of *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora cholortica* and *Eisenia fetida* on microbial community dynamics in oil-contaminated soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(11): 2065-2076.
- [18] Singleton D R, Hendrix P F, Coleman D C, Whitman W B. Identification of uncultured bacteria tightly associated with the intestine of the earthworm *Lumbricus rubellus* (Lumbricidae; Oligochaeta). *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(12): 1547-1555.
- [19] Contreras-Ramos S M, Álvarez-Bernal D, Dendooven L. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil amended with biosolid or vermicompost in the presence of earthworms (*Eisenia fetida*). *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(7): 1954-1959.
- [20] Eijsackers H, Bruggeman J, Harmsen J, de Kort T, Schakel A. Colonization of PAH-contaminated dredged sediment by earthworms. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(2/3): 216-225.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 5 March, 2011 (Semimonthly)
CONTENTS

Root system characters in growth and distribution among three littoral halophytes YI Liangpeng, WANG Zuwei (1195)

Population dynamics of endophytic bacteria isolated from the roots of infected *Cymbidium faberi* YANG Na, YANG Bo (1203)

Spatial variability of forest soil total nitrogen of different soil layers ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, WANG Yousheng, et al (1213)

Habitat prediction for forest musk deer (*Moschus berezovskii*) in Qinling mountain range based on niche model LUO Chong, XU Weihua, ZHOU Zhixiang, et al (1221)

Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China WANG Xiaochun, ZHAO Yufang (1230)

Growth tolerance and accumulation characteristics of the mycelia of two macrofungi species to heavy metals LI Weihuan, YU Lanlan, CHENG Xianhao, et al (1240)

Characters of the OMI NO₂ column densities over different ecosystems in Zhejiang Province during 2005—2009 CHENG Miaomiao, JIANG Hong, CHEN Jian, et al (1249)

The forest gap diameter height ratio in a secondary coniferous forest of Guan Di Mountain FU Liyong, TANG Shouzheng, LIU Yingan (1260)

Landscape responses to changes in water levels at Poyang Lake wetlands XIE Dongming, ZHENG Peng, DENG Hongbing, et al (1269)

Effect of simulated nitrogen deposition on litter decomposition in a *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocala mopsi* plantation, Rainy Area of West China TU Lihua, DAI Hongzhong, HU Tingxing, et al (1277)

Effect of aromatic plant-derived nutrient solution on the growth, fruit quality and disease prevention of pear trees GENG Jian, CUI Nannan, ZHANG Jie, et al (1285)

Influences of different plastic film mulches on temperature and moisture of soil and growth of watermelon in gravel-mulched land MA Zhongming, DU Shaoping, XUE Liang (1295)

Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seedling ZHANG Renhe, ZHENG Youjun, MA Guosheng, et al (1303)

Photosynthetic diurnal variation characteristics of leaf and non-leaf organs in winter wheat under different irrigation regimes ZHANG Yongping, ZHANG Yinghua, WANG Zhimin (1312)

The root system hydraulic conductivity and water use efficiency of alfalfa and sorghum under water deficit LI Wenrao, LI Xiaoli, ZHANG Suiqi, et al (1323)

Latitudinal gradient in beta diversity of forest communities in America CHEN Shengbin, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1334)

Influence of silts on growth and development of *Acorus calamus* and *Acorus tatarinowii* in turbid water LI Qiang, ZHU Qihong, DING Wuquan, et al (1341)

Roles of earthworm in phytoremediation of pyrene contaminated soil PAN Shengwang, WEI Shiqiang, YUAN Xin, et al (1349)

Population dynamics of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) along with analysis on the meteorological factors influencing the population in pomegranate orchards LIU Ling, CHEN Bin, LI Zhengyue, et al (1356)

Geophagy of *Macaca Thibetana* at Mt. Huangshan, China YIN Huabao, HAN Demin, XIE Jifeng, et al (1364)

The structure and dynamic of insect community in Zhalong Wetland MA Ling, GU Wei, DING Xinhua, et al (1371)

Analysis of layer progressive discriminant relations between the occurrence of *Bipectilus zhejiangensis* and soil DU Ruiqing, CHEN Shunli, ZHANG Zhengtian, et al (1378)

New mutations in hind wing vein of *Apis cerana cerana* (Hymenoptera: Apidae) induced by lower developmental temperature ZHOU Bingfeng, ZHU Xiangjie, LI Yue (1387)

18S rRNA gene variation and phylogenetic analysis among 6 orders of Bivalvia class MENG Xueping, SHEN Xin, CHENG Hanliang, et al (1393)

Laboratory study on ethology of *Spinibarbus hollandi* LI Weiming, CHEN Qiuwen, HUANG Yingping (1404)

Dynamic change in ecological footprint of energy consumption for traction of locomotives in China HE Jicheng (1412)

Approach to spatial differences analysis of urban carrying capacity: a case study of Changzhou City WANG Dan, CHEN Shuang, GAO Qun, et al (1419)

Social adaptive capacity for water resource scarcity in human systems and case study on its measuring CHENG Huaiwen, LI Yuwen, XU Zhongmin (1430)

Effects of physical leaf features of host plants on leaf-mining insects DAI Xiaohua, ZHU Chaodong, XU Jiasheng, et al (1440)

Review and Monograph

Progresses of free-air CO₂ enrichment (FACE) researches on C₄ crops: a review WANG Yunxia, YANG Lianxin, Remy Manderscheid, et al (1450)

Scientific Note

Influence of limestone powder doses on fine root growth of seriously damaged forests of *Pinus massoniana* in the acid rain region of Chongqing, China LI Zhiyong, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1460)

Leaf surface microstructure of *Ligustrum lucidum* and *Viburnum odoratissimum* observed by Atomic force microscopy (AFM) SHI Hui, WANG Huixia, LI Yangyang, LIU Xiao (1471)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 5 期 (2011 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 5 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号
许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel:(010)62941099
www.ecologica.cn
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

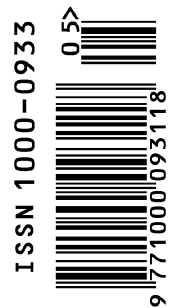
Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add:16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel:(010)64034563
E-mail:journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元