

蚯蚓黏液对黑麦草幼苗生长及其对菲吸收的影响^①

史志明, 马丽丽, 胡飞龙, 胡 锋*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要: 以 50 mg/kg 菲人工污染黄棕壤为供试土壤, 设置添加蚯蚓黏液处理和不添加蚯蚓黏液对照(CK), 研究蚯蚓黏液对黑麦草幼苗生长及吸收菲的影响, 添加蚯蚓黏液处理根据蚯蚓黏液浓度设置 4 个水平, 分别为蚯蚓黏液原液浓度的 2/8, 3/8, 1/2 和 1 倍。结果显示: 蚯蚓黏液促进了黑麦草幼苗的生长, 根系鲜重比对照增加了 33.6%~146%, 地上部和整株生物量鲜重比对照增加了 12.4%~35.8% 和 34.5%~59.6%; 显著降低了根部菲的浓度, 约 23.0%~49.0%, 促进了黑麦草对菲的吸收, 使吸收量比对照增加了约 62.8%; 降低了黑麦草根系对菲的富集系数, 与对照相比降低约 33.7%~52.6%, 提高了菲在黑麦草体内的传输系数, 约 54.0%~102.0%。

关键词: 蚯蚓黏液; 黑麦草; 生物修复; 菲

中图分类号: S154.5; X171.5

多环芳烃是环境中普遍存在的一类疏水性有机污染物, 因其具有强烈的“三致”效应而引起人们的广泛关注^[1]。如何去除土壤中日益增多的多环芳烃, 关系到土壤生态系统和人类的健康。生物修复, 不同于传统的物理与化学修复, 因其具有环境友好、经济特性而被认为是最具潜力和应用价值的技术^[2]。

在以往的生物修复研究中, 研究者普遍关注的是微生物和植物, 但对土壤动物很少关注, 最近的一些研究证明, 土壤动物如蚯蚓、线虫等可以被用于生物修复^[3-6], 或者辅助用于其他修复手段^[7-8]。蚯蚓去除土壤中的多环芳烃涉及到多种机制^[9-10], 如蚯蚓通过自身的富集作用, 刺激土壤微生物活动等, 但这些报道中鲜有涉及蚯蚓黏液的研究。为此, 本试验选择黑麦草和菲作为材料来研究蚯蚓黏液对植物生长及其对菲吸收的影响, 这同时有利于更深入和全面地认识蚯蚓及其分泌物的生态功能, 为进一步探讨蚯蚓直接或辅助用于多环芳烃生物修复的潜在可能性提供一些理论依据, 并为更好地开发和利用蚯蚓资源提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料:

1.1.1 试剂和材料 菲, 购自 Aldrich Chemical Co., 分子量为 178.24, 纯度 97.0%。甲醇为色谱纯,

其他试剂为分析纯, 硅胶(200~300 目柱层层析)为分析纯。植物为黑麦草(*Lolium multi florum* L.), 购自江苏省农业科学院, 蚯蚓为赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*), 购自南京市大厂区长芦镇某个体蚯蚓养殖场。

1.1.2 土壤 供试土壤为黄棕壤(0~20 cm)。自然条件下风干后, 磨细过 2 mm 筛, 置于自封袋中备用。称取一定量的菲溶于丙酮溶液中, 配制成浓度为 1 000 mg/L 的菲标准储备液。于土壤中加入一定体积的菲标准溶液, 并加干土稀释, 配制成浓度为 50 mg/kg 的污染土壤, 充分混匀, 于通风橱中风干后置于棕色玻璃瓶中备用, 阴暗处放置。土壤基本理化性质见表 1。

1.1.3 黑麦草 挑选籽粒饱满、大小均一的黑麦草种子, 用去离子水浸泡 4 h, 再用 30% 双氧水消毒 30 min, 去离子水洗净, 置于浸有少量水的纱布上出苗, 15 天选取长势一致的幼苗进行移植。

1.1.4 主要仪器 KQ-250B 超声波清洗器; BUCHI(B-490)旋转蒸发仪; 岛津 LC-20AT 高效液相色谱仪(HPLC), 配有 SPD-20A 紫外检测器, 分析色谱柱为 ODS C₁₈ 柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 保护柱为 C₁₈(4.6 mm×12.5 mm)等。

1.2 试验方法

1.2.1 蚯蚓黏液的提取 参考 Zhang 等^[11]的方法, 并略作改动。将蚯蚓先用去离子水洗净, 吸水纸

基金项目: 国家环保部和江苏省环保厅项目(江苏省污染土壤调查)资助。

* 通讯作者(fenghu@njau.edu.cn)

作者简介: 史志明(1984—), 男, 河南项城人, 博士研究生, 主要从事土壤污染修复和生态毒理研究。E-mail: zm.shi@163.com

吸干,挑选带有明显环带的成年蚯蚓,每条体重 0.20 g 左右,置于铺垫有湿润滤纸的培养皿中(每个培养皿约 20 条)清空肠道,4 h 后,再次用去离子水冲洗蚯蚓,吸水纸吸干,放入 200 ml 烧杯中(每个烧杯 200 条,总鲜重约 40 g)均匀撒入 5 g 磨细的石英砂(<0.2 mm),

培养箱(22℃±1℃)中黑暗培养。于第 2、6、16 h 用 2.5 倍蚯蚓体重的去离子水,分 5 次洗涤烧杯、蚯蚓和石英砂,洗涤液合并、离心,上清液即为蚯蚓黏液原液,分别记为 EM2、EM6 和 EM16。蚯蚓黏液原液的化学性质见表 2。

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of studied soil

pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	阳离子交换量(cmol/kg)	黏粒含量(g/kg)
6.31	31.6	2.02	3.06	23.6	345

表 2 蚯蚓黏液的化学性质
Table 2 Chemical properties of earthworm mucus

蚯蚓黏液	pH	可溶性有机碳(mg/L)	铵态氮(mg/L)	全磷(mg/L)	全钾(mg/L)	吡啶乙酸(mg/L)
EM2	8.01	82.8	8.84	6.60	55.6	0.69
EM6	7.70	102	24.6	5.73	97.1	0.24
EM16	7.31	193	406	11.5	159	0.30

注:EM2、EM6、EM16 分别代表第 2、6、16 h 时收集的蚯蚓黏液。

1.2.2 试验设计 考虑到蚯蚓黏液尚没有统一的方法进行表征,本试验中选用第 6 h 收集的蚯蚓黏液原液 EM6 进行试验,将其浓度记作 c,并将此稀释为 c 的 0, 2/8, 3/8, 1/2 和 1 倍。本试验设置 5 个处理,记为 CK, 2/8c, 3/8c, 1/2c 和 c,分别代表试验中加入的蚯蚓黏液浓度为 0, 2/8×c, 3/8×c, 1/2×c 和 c,每个处理有 3 个重复。蚯蚓黏液的加入量为土壤田间持水量的 65%。

称取 40 g 上述污染土壤置于 100 ml 高脚玻璃小烧杯中,加入相应浓度的蚯蚓黏液。稳定 24 h 后,移植黑麦草幼苗,每个烧杯 6 株。移植前进行称重,所有烧杯外用铝箔包裹。置于培养室中进行培养,自然光照,每天光照时间 12 h,相对湿度 50%~60%,白天温度 25℃±1℃,夜间温度 18℃±1℃。试验过程中每隔一天通过称重法补加相应浓度的蚯蚓黏液,使含水量保持田间持水量的 65%~70%,从培养初期到结束,各处理依次添加相应浓度蚯蚓黏液约为 30, 40, 44, 50, 65 ml。培养 15 天后采收,去离子水清洗,吸水纸吸干,分别称取植株总鲜重,地上部和根部鲜重,保存于-70℃的冰箱中待分析。

1.2.3 菲的提取方法和分析 菲的提取参考高彦征等^[12]的方法,并略加改动。称取适量植株鲜样或风干土样和等量的无水 Na₂SO₄,置于 25 ml 玻璃离心管中,加入 10 ml 二氯甲烷作萃取剂,密封。将离心管置于加有冰水的超声波清洗器中进行超声萃取 1 h。经离心后移取 2ml 上清液,并过加有 3 g 柱层层析硅胶的硅胶柱,用 11 ml 1:1 的二氯甲烷和正己烷溶液分两次(5 ml + 6 ml)洗脱;洗脱液收集至旋转蒸

发瓶中,在 40℃ 水浴条件下旋转蒸发,浓缩至干。用 2 ml 甲醇进行溶解定容,过 0.22 μm 有机滤膜后上机分析。液相流动相:甲醇;流速:1 ml/min;柱温:30℃;进样量:40 μl;检测波长:254 nm。

1.2.4 数据统计和分析 将试验所得数据用 Excel 2003 进行整理和作图,采用 Grubbs 检验法对数据进行取舍,采用 SPSS 17.0 进行采用单因素方差分析评价处理间的显著差异,Levene 法进行方差齐次检验,必要时利用对数转换,对平均值采用 Duncan 法进行多重比较。显著性水平除特别注明均为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 蚯蚓黏液对黑麦草幼苗生物量的影响

由表 3 可以看出,蚯蚓黏液对黑麦草幼苗生物量鲜重产生显著的影响,随着所添加蚯蚓黏液浓度的增加,黑麦草生物量鲜重也都呈现不同程度的增加,其中根部在所有处理均达到显著水平,比对照增加了 33.6%~146%,而地上部和整株则在浓度为 1/2c 和 c

表 3 黑麦草幼苗根部、地上部及整株生物量鲜重(mg/株)
Table 3 Root, shoot and plant fresh weight of ryegrass

处理	根部	地上部	整株
CK	14.1 ± 2.6 c	51.3 ± 2.4 b	65.4 ± 4.1 b
2/8c	21.6 ± 3.3 ab	47.1 ± 2.3 b	68.8 ± 5.3 b
3/8c	18.8 ± 1.5 b	52.3 ± 5.5 b	71.1 ± 6.9 b
1/2c	30.4 ± 6.2 ab	57.7 ± 7.3 ab	88.0 ± 13.4 ab
c	34.7 ± 7.1 a	69.7 ± 2.4 a	104 ± 10 a

注:表中小写字母不同表示处理间差异达显著水平(P<0.05),下同。

时达到显著水平, 分别比对照增加了 12.4%~35.8% 和 34.5%~59.6%。这说明蚯蚓黏液促进了黑麦草幼苗的生长。

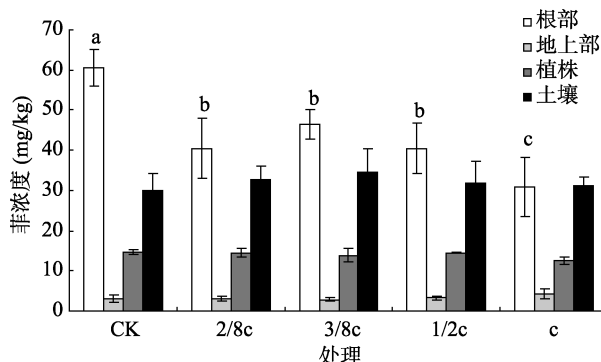
很多研究表明蚯蚓可能通过很多方式影响植物生长^[13], Edwards^[14]在相关的综述中指出, 75% 以上的研究表明植物生长与蚯蚓活动有正相关关系。这当然涉及很多因素, 但蚯蚓黏液是否也是促进植物生长的一个因素呢? Zhang 等^[11]的研究结果表明, 在水培条件下, 威廉腔环毛蚓(*Metaphire guillemi*)黏液促进了番茄幼苗的生长。与 Zhang 等^[11]的研究所不同的是, 本研究是在土培条件下, 采用的是赤子爱胜蚓黏液, 虽然是在菲污染胁迫下进行的, 但蚯蚓黏液同样表现出了促进植物生长的现象。

蚯蚓黏液是蚯蚓在生长代谢过程中, 从体表分泌产生的成分复杂的胶黏物质^[11, 15-16], 研究表明其主要成分为糖类和蛋白质, 也有研究表明蚯蚓黏液富含多种活性基团, 如 COOH, N-H 等^[17]。不同采集时间下蚯蚓黏液的部分化学组成见表 2, 蚯蚓黏液不但含有丰富的可溶性有机碳、氮磷钾等矿物质, 而且还含有微量的植物激素吲哚乙酸(IAA), 可见蚯蚓黏液促进植物生长是由于: 蚯蚓黏液自身的作用: 一方面蚯蚓黏液含有植物生长所需的营养物质, 如可溶性有机碳、氮磷钾等营养物质; 另一方面, 蚯蚓黏液含有至少一种植物激素。胡佩等^[18]证明了蚓粪中含有微量的植物激素, 这可以作为同样是蚯蚓分泌物之一的蚯蚓黏液含有植物激素的一个佐证; 以往研究蚯蚓与植物生长的关系, 由于所加蚯蚓数量少, 相应分泌的黏液也是被忽略, 但在本试验中, 所加蚯蚓黏液是大量的, 由于蚯蚓黏液中含有多种复杂的物质, 因此蚯蚓黏液可能通过为某些微生物提供碳源和氮源等营养物质, 从而刺激了土壤微生物活性, 改变了微生物群落结构, 从而间接促进了植物生长, 当然这个间接作用还有待于进一步研究。

2.2 蚯蚓黏液对黑麦草和土壤中菲浓度的影响

图 1 显示了菲在土壤中和黑麦草中的浓度, 黑麦草植株分为根部、地上部和整株。可以看出, 与 CK 相比, 随着蚯蚓黏液浓度的增大, 黑麦草根部分菲浓度都有不同程度的降低, 所有添加蚯蚓黏液的处理均显著低于 CK, 分别比 CK 低 23.0%~49.0%; 而黑麦草地上部和植株菲浓度与 CK 相比均没有达到显著差异; 菲在土壤中的残留浓度与初始设置浓度(50 mg/kg)相比, 包括 CK, 均有显著降低, 降低幅度为 30%~40%, 但处理间没有达到显著性差异。这说明黑麦草根部和地上部均吸收了菲, 根部浓度高于地上

部浓度, 而蚯蚓黏液的添加则降低了菲在黑麦草根部的浓度。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 1 土壤和黑麦草中菲浓度

Fig. 1 Phenanthrene concentrations in soil and ryegrass

菲在植株根部浓度所表现出的现象可以有如下解释: 蚯蚓黏液促进了土壤中菲的活化, 进而提高了菲的生物有效性, 从而促进了黑麦草对菲的积累, 之所以植株根部浓度呈下降趋势, 是由于黑麦草生物量增长不一致, 从而产生了不同程度的稀释作用。Zhang 等^[19]证明了蚯蚓黏液中含有多种氨基酸, 由于氨基酸含有至少两个亲水基(NH_2 - 和 COOH -)和至少一个疏水基(R -), 虽然 R - 基很短, 疏水性较弱, 但我们可以推测蚯蚓黏液由于氨基酸的存在或由氨基酸经过蚯蚓代谢作用使其 R -基加长, 具有了一定的表面活性, 从而对菲起到了活化作用, 提高了菲的生物有效性。

土壤中菲残留浓度所表现出的现象, 我们认为这是由于培养时间过短(15 天), 一方面植物吸收对菲的去除贡献很小, 高彦征等^[20]的研究表明植物吸收的贡献小于 0.54%, 因此处理间菲残留浓度差异表现不显著; 另一方面, 由于土壤的老化效应(aging effect), 导致土壤中菲的可提取浓度急剧下降^[21], 此外菲也具有较强的挥发性, 也可能是影响因素之一, 因此菲残留浓度表现出与初始设置相比显著降低。

2.3 蚯蚓黏液对黑麦草菲吸收量和土壤中菲残留量的影响

单纯分析菲在植物体中的浓度并不能全面认识蚯蚓黏液对植物吸收菲及其对土壤中菲残留所产生的影响, 为此我们进一步计算和分析了黑麦草对菲的吸收量和土壤中菲的残留量。由表 4 可以看出, 不同处理间土壤中菲的去除量没有达到显著性差异, 而黑麦草吸收量对土壤中菲去除的平均贡献率在 1.26%~1.56%, 虽然有增大的趋势, 但同样没有达到显著性差异。图 2 展示的是黑麦草地上部、根部的菲吸收量,

与 CK 相比,二者的菲吸收量均有增加,并在添加蚯蚓黏液浓度达到 c 时表现出显著性差异,比 CK 增加了 62.8%。

表 4 土壤中菲去除量、黑麦草吸收量及其贡献率
Table 4 Removals of phenanthrene in soil, phenanthrene accumulation in ryegrass and its contributions

处理	菲去除量(μg)	黑麦草吸收量(μg)	贡献率(%)
CK	807 ± 173	8.97 ± 0.80 b	1.27 ± 0.29
2/8c	688 ± 132	9.94 ± 1.27 b	1.46 ± 0.19
3/8c	615 ± 229	10.7 ± 0.5 b	1.43 ± 0.22
1/2c	728 ± 219	10.8 ± 0.3 b	1.26 ± 0.11
c	750 ± 79	14.6 ± 0.0 a	1.56 ± 0.28

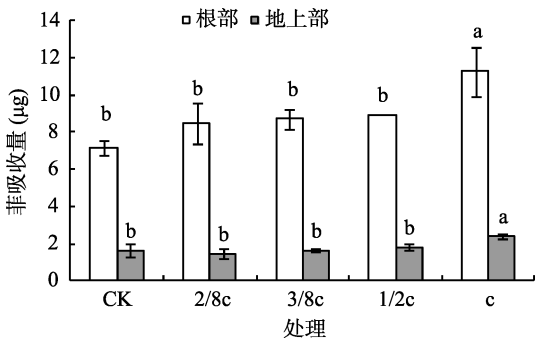


图 2 黑麦草对菲吸收量
Fig. 2 Uptake of phenanthrene in ryegrass

土壤中菲的去除方式有很多种,包括老化作用、土壤微生物的降解作用等,植物吸收的贡献仅仅是一小部分,贡献率在 1.27%~1.56% 之间,这同多数研究结果相一致^[20],但高于文献报道的数据,因此可以说蚯蚓黏液的加入促进了黑麦草对菲的吸收,提高了植物吸收在生物修复中的贡献率,这又从一个侧面证明了蚯蚓黏液提高了土壤中菲的生物有效性。而黑麦草菲吸收总量所表现出的现象原因可能有:直接作用,蚯蚓黏液促进了土壤中菲的活化,提高了菲的生物有效性,2.2 小节中已有讨论;间接作用,蚯蚓黏液通过促进黑麦草生长从而促进黑麦草对菲的吸收。

2.4 蚯蚓黏液对土-黑麦草体系中菲迁移的影响

根系富集系数(Root concentration factors, RCFs)是植物根部的污染物浓度与土壤中污染物残留浓度的比值,反映的是污染物从土壤中迁移到植物体的能力;茎叶富集系数(Shoot concentration factors, SCFs)是植物地上部污染物的浓度与土壤中污染物残留浓度的比值,反映的是污染物从土壤中迁移到植物地上部的能力;Mattina 等^[22]提出了反映污染物从植物根部迁移到地上部能力的传输系数(Translocation factors, TFs),并将其定义为茎叶富集系数与根系富

集系数的比值。与考察污染物在植物体中的浓度和吸收量相比,考察这 3 个系数能全面反映污染物在土-植物系统中的迁移。

由表 5 可以看出,与 CK 相比,随着添加蚯蚓黏液浓度的增大,根系富集系数均有所降低并均显著低于对照,约 33.7%~52.6%;茎叶富集系数不同处理间没有表现出显著性差异;而传输系数则表现出显著增大的现象,约 54.0%~102.0%。根系富集系数降低说明蚯蚓黏液的加入抑制了菲从土壤中向黑麦草根系的迁移,而传输系数的增大,说明蚯蚓黏液促进了菲从植物根部向地上部的迁移。

表 5 黑麦草对菲的生物富集和传输系数
Table 5 Bioaccumulation and translocation factors of ryegrass

处理	根系富集系数	茎叶富集系数	传输系数
CK	2.06 ± 0.34 a	0.102 ± 0.021	0.050 ± 0.014 b
2/8c	1.25 ± 0.29 b	0.096 ± 0.025	0.077 ± 0.009 a
3/8c	1.37 ± 0.22 b	0.082 ± 0.006	0.064 ± 0.007 b
1/2c	1.30 ± 0.30 b	0.102 ± 0.015	0.082 ± 0.023 a
c	0.997 ± 0.274 b	0.117 ± 0.008	0.101 ± 0.005 a

有学者认为植物对土壤中非离子型有机污染物的吸收可看作有机污染物在土壤-植物之间的分配过程,具体讲就是在土壤固相-水相-植物根部水相-根部有机相,地上部水相-地上部有机相之间连续分配过程^[23-24],其动力来自于叶片的蒸腾拉力^[25]。而有机污染物的这些分配过程与污染物本身的性质有关,如污染物在水中的溶解度,正辛醇-水分配系数(K_{ow})等。占新华等^[26]的研究认为表面水溶性有机物(DOM)和 Tween-80 能降低菲的正辛醇-水溶液分配系数,是由于其能增加菲在水溶液中的溶解度。在 2.2 的讨论中指出蚯蚓黏液可能具有微弱的表面活性,因此可能改变了菲在水溶液中的表观溶解度和正辛醇-水分配系数,并进而改变了黑麦草对菲的生物富集和传输系数。当然这些因素具体是通过什么机制影响的还有待进一步研究。

3 结论

蚯蚓黏液中不但含有大量的可溶性有机碳(DOC)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、磷和钾等植物可利用的营养物质,还含有微量的植物激素 IAA,促进了黑麦草生长;此外,蚯蚓黏液显著降低了根部菲的浓度,但促进了黑麦草对菲的吸收;降低了黑麦草根系对菲的富集系数,增强了菲在黑麦草中从根部向地上部的迁移能力。

参考文献：

- [1] Menzie CA, Potocki BB, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment[J]. Environmental Science & Technology, 1992, 26(7): 1 278–1 284
- [2] 邹德勋, 骆永明, 徐凤花, 滕应, 李振高. 土壤环境中多环芳烃的微生物降解及联合生物修复[J]. 土壤, 2007, 39(3): 334–340
- [3] 袁馨, 潘声旺, 陈勇, 何秋霖. 蚯蚓对土壤-植物系统中菲, 芘降解的强化效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 904–911
- [4] Coutiño-González E, Hernández-Carlos B, Gutiérrez-Ortiz R, Dendooven L. The earthworm *Eisenia fetida* accelerates the removal of anthracene and 9, 10-anthraquinone, the most abundant degradation product, in soil[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2010, 64(6): 525–529
- [5] Contreras-Ramos SM, Alvarez-Bernal D, Dendooven L. *Eisenia fetida* increased removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil[J]. Environ. Pollut., 2006, 141(3): 396–401
- [6] Parrish ZD, White JC, Isleyen M, Gent MP, Iannucci-Berger W, Eitzer BD, Kelsey JW, Mattina MI. Accumulation of weathered polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by plant and earthworm species[J]. Chemosphere, 2006, 64(4): 609–618
- [7] Contreras-Ramos SM, Álvarez-Bernal D, Dendooven L. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil amended with biosolid or vermicompost in the presence of earthworms (*Eisenia fetida*)[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1 954–1 959
- [8] Hickman ZA, Reid BJ. Earthworm assisted bioremediation of organic contaminants[J]. Environ. Int., 2008, 34(7): 1 072–1 081
- [9] 李洁明, 孙红文, 李阳, 王翠苹, 张彦峰, 张清敏. 蚯蚓辅助微生物修复芘污染土壤[J]. 环境科学学报, 2008, 28(009): 1 854–1 860
- [10] 胡淼, 陈欢, 田蕾, 胡锋, 魏正贵, 李辉信. 蚯蚓对细菌降解土壤中菲的作用[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 218–222
- [11] Zhang SJ, Tang C, Li HX, Wei ZG, Hu F. Earthworm mucus enhanced cadmium accumulation of tomato seedlings[J]. International Journal of Phytoremediation, 2009, 12(1): 24–33
- [12] 高彦征, 朱利中, 凌婉婷, 熊巍. 土壤和植物样品的多环芳烃分析方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 1 003–1 006
- [13] Scheu S. Effects of earthworms on plant growth: Patterns and perspectives[J]. Pedobiologia, 2003, 47(5/6): 846–856
- [14] Edwards CA. Earthworm Ecology[M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2004
- [15] Binet F, Fayolle L, Pussard M, Crawford J, Traina S, Tuovinen O. Significance of earthworms in stimulating soil microbial activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(1): 79–84
- [16] Brown GG, Barois I, Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains[J]. European Journal of Soil Biology, 2000, 36(3): 177–198
- [17] Lavelle P, Lattaud C, Trigo D, Barois I. Mutualism and biodiversity in soils[J]. Plant and Soil, 1995, 170(1): 23–33
- [18] 胡佩, 刘德辉, 胡锋, 沈其荣. 蚓粪中的植物激素及其对绿豆插条不定根发生的促进作用[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1 211–1 214
- [19] Zhang SJ, Hu F, Li HX. Effects of earthworm mucus and amino acids on cadmium subcellular distribution and chemical forms in tomato seedlings[J]. Bioresour Technol., 2009, 100(17): 4 041–4 046
- [20] 高彦征, 凌婉婷, 朱利中, 沈其荣. 黑麦草对多环芳烃污染土壤的修复作用及机制[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 498–502
- [21] Ling WT, Zeng YC, Gao YZ, Dang HJ, Zhu XZ. Availability of polycyclic aromatic hydrocarbons in aging soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(5): 799–807
- [22] Mattina MJI, Lannucci-Berger W, Musante C, White JC. Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil[J]. Environmental Pollution, 2003, 124(3): 375–378
- [23] Chiou CT, Sheng G, Manes M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(7): 1 437–1 444
- [24] Ryan J, Bell R, Davidson J, O'connor G. Plant uptake of non-ionic organic chemicals from soils[J]. Chemosphere, 1988, 17(12): 2 299–2 323
- [25] Simonich SL, Hites RA. Organic pollutant accumulation in vegetation[J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(12): 2 905–2 914
- [26] 占新华, 周立祥, 万寅婧, 蒋廷惠. 水溶性有机物对植物吸收菲的影响及其机制研究[J]. 环境科学, 2006, 27(9): 1 884–1 888

Influence of Earthworm Mucus on Ryegrass Seedling Growth and Phenanthrene Uptake

SHI Zhi-ming, MA Li-li, HU Fei-long, HU Feng*

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A microcosm incubation experiment was conducted to investigate the effects of earthworm (*Eisenia fetida*) mucus on the growth of ryegrass seedling and uptake phenanthrene. The tested soil was artificially spiked with phenanthrene (50 mg/kg) and 2 treatments (ryegrass inoculated with and without earthworm mucus) were set up. According to the different concentrations of earthworm mucus, 2/8, 3/8, 1/2 and 1 of the concentration of the original earthworm mucus were set up as the treatments. Results showed that: 1) earthworm mucus significantly enhanced the growth of ryegrass seedling, with the fresh weight biomass of root shoot and the total ryegrass seedlings increased by about 33.6%–146%, 12.4%–35.8% and 34.5%–59.6%, respectively; 2) remarkably lowered the phenanthrene concentration in root of ryegrass by approximately 23.0%–49.0%, and elevated phenanthrene uptake of ryegrass by approximately 62.8%; and 3) reduced root concentration factors and improved the translocation factor by about 33.7%–52.6% and 54.0%–102.0% respectively.

Key words: Earthworm mucus, Ryegrass, Bioremediation, PAHs