

水溶性有机物对植物吸收菲的影响及其机制研究

占新华, 周立祥*, 万寅婧, 蒋廷惠

(南京农业大学资源与环境学院环境工程系, 南京 210095)

摘要: 水培小麦试验研究了水溶性有机物(DOM)对植物吸收多环芳烃(菲)的影响, 并对其机制进行了初步探讨. 结果表明: 菲抑制了植物的生长, 抑制率达到 18.01%, DOM 可加剧菲对植物生长的抑制作用, 使生长抑制率升至 24.38%; 植物可吸收和富集水培液中的菲, 而 DOM 能明显地促进植物对菲的吸收和富集作用, 使得其根部浓缩系数高达 $37.63 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同时 DOM 还能促进根部吸收的菲向地上部转运; 植物在吸收菲的同时, 使得营养介质的 pH 显著升高, DOM 与菲存在显著的协同交互作用, 可使介质 pH 值的升高超过 1 个单位, 似表明植物对菲的吸收以与 H^+ 形成共运对的方式进行. 小麦对多环芳烃菲的吸收与无机养分的吸收之间存在协同效应, 且 DOM 可促进这种协同效应. 本研究的结果说明, DOM 对多环芳烃(菲)的吸收及其环境生态效应有重要影响.

关键词: 菲; 水溶性有机物; 植物; 吸收; 生物浓缩; 多环芳烃

中图分类号: X503.231 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1884-05

Impact of Dissolved Organic Matter on Plant Uptake of Phenanthrene and Its Mechanisms

ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang, WAN Yin-jing, JIANG Ting-hui

(Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Hydroponic assays were conducted to investigate the influence of dissolved organic matter on uptake of phenanthrene by wheat as well as its mechanisms. The results showed that, under hydroponic condition, phenanthrene impairment of plant growth occurred with wheat growth inhibited rate of 18.01%. The impairment would be greatly enhanced in the presence of dissolved organic matter (DOM) derived from pig manure, and the inhibited rate increased to 24.38%. Wheat could uptake and accumulate phenanthrene in the nutrient solution, which could be escalated by DOM, as indicated by wheat root bioconcentration factor being increased to $37.63 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the presence of DOM from $2.84 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the absence of DOM. At the same time, DOM could facilitate phenanthrene translocation from plant roots to the upper. As a result, the pH value of nutrient solution could increase by more than 1 unit when the co-existence of DOM and phenanthrene occurred in solution, suggesting that H^+ -phenanthrene cotransport system is involved in the uptake of phenanthrene by plants. A synergism was also found between wheat uptakes of phenanthrene and inorganic nutrients. Moreover, DOM accelerated markedly the synergism. It is concluded that DOM affects the uptake of phenanthrene by plants and the environmental behaviors of phenanthrene.

Key words: phenanthrene; dissolved organic matter; plant; uptake; bioconcentration; PAHs

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 因具有持久、生物积累、有毒和强的“三致”效应, 许多国家都将其列入优先污染物的黑名单或灰名单中^[1], 因此, PAHs 的环境行为、归趋和环境效应也一直是环境科学的研究热点之一.

由于经济的发展, 化石燃料消耗量的日益增加、工业“三废”的大量排放、污水灌溉和固体废物的土地利用, 使得进入土壤的 PAHs 的量与日俱增; 同时由于 PAHs 拥有稠合苯环的结构和疏水性, 因而其抗降解能力强, 容易在土壤环境中富集, 土壤 PAHs 的污染状况也越来越严重. 在一些重污染地区, 如工业发达城市和交通要道周围地区土壤以及污灌区土壤^[2~5], 其中的 ΣPAHs 可达数百、数千甚

至数万 mg/kg ^[6]. 这已引起了人们的广泛关注. 目前, 国内外对 PAHs 已进行了大量的研究, 但主要集中在 PAHs 的降解^[7,8]. PAHs 在土壤或其它介质上的吸持-解吸^[9,10]、表面活性剂对 PAHs 环境行为的影响^[11,12]、PAHs 在土壤中的空间分异^[13]等. 现有关于植物对土壤中 PAHs 的吸收研究^[14~16], 大多是植物吸收效果和在器官水平上的分布的研究, 鲜有涉及植物吸收 PAHs 机理的报道.

收稿日期: 2005-07-28; 修订日期: 2005-10-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20377024, 40571073); 瑞典国际科学基金 (IFS) 项目 (C/3501-1)

作者简介: 占新华 (1972~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为环境有机污染化学.

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

水溶性有机物(dissolved organic matter, DOM)是陆地-水生态系统中最为活跃的组分,在污染物的迁移、转化过程中起着载体的作用,是构成土壤的重要物质成分.一般地,土壤 DOM 含量(以 DOC 计)为80 mg/kg左右,但在施用有机肥或进行生物固体物质(biosolid)的土地利用时,可以使得局部地区土壤 DOM 含量超过200 mg/kg,而施用有机肥是常见的一项农业措施,是有机食品生产体系的主要施肥方式.笔者等前期的研究结果表明,DOM 可以促进 PAHs 的水溶性(S)增加和降低 PAHs 的正辛醇-水分配系数(K_{ow} 值)及抑制土壤对 PAHs 的吸附(结果未发表),这预示着 DOM 的存在可能会增大土壤中 PAHs 的生物有效性和环境风险.因而进行 DOM 对植物吸收 PAHs 的影响及其机制的研究对于正确评价 PAHs 污染土壤的环境风险、农产品的安全生产和 PAHs 污染土壤的植物修复具有极其重要的意义.

本文以菲(Phe)为 PAHs 的代表,选用农业上常用的有机肥——猪粪作为 DOM 的提取原料,通过小麦的水培试验探索 DOM 对植物吸收 PAHs 的影响及其机制,以期为进行 PAHs 污染土壤环境风险的科学评价、农产品的安全生产和 PAHs 污染土壤植物修复的强化提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试小麦品种为南农 9918(*Triticum aestivum* L.),为江苏地区主要品种之一.供试 DOM 为猪粪 DOM.猪粪取自南京农业大学养殖场,按参考文献[21]的方法提取 DOM.

1.2 试验设计

小麦的水培试验:小麦经催芽、育苗、预培养 14d(株高约 15cm)后,选择长势比较一致的植株移入烧杯中置于温室内(昼温 20~30℃,夜温 15~20℃,自然光照)进行水培,每杯装有 500mL 营养液(其配方见表 1),培养植株 9 株.设置 4 种处理,分别为:对照(CK, Hoagland 营养液)、含 100 mg/L 猪粪 DOM 的 Hoagland 营养液(DOM)、含 1.180 mg/L 菲的 Hoagland 营养液(Phe)、含 1.180 mg/L 菲+100 mg/L 猪粪 DOM 的 Hoagland 营养液(Phe+DOM),含菲处理中的菲用甲醇溶解后加入,且各处理均含有等量的甲醇,每处理重复 3 次.共培养 3 周,第 1 周用 1/2 浓度的 Hoagland 营养液培养(即营养液中各营养元素浓度为其通常配方浓度的一

半),第 2 和第 3 周用正常配方进行培养.早晚各通气 30min.换营养液时,把上周营养液定容至 500mL 后取样带回室内分析 pH、EC 和菲等的变化(因培养第 1 周小麦可能会继续利用胚乳中残余的养分,同时对营养液有适应过程,从而对营养液的影响较小,因此未对营养液进行分析).培养结束后,植株样品用超纯水充分洗净,根部在甲醇中浸洗后,去除表面水分,而后冷冻保存待分析植物体内菲浓度同时计算生物量.

表 1 Hoagland 营养液配方		
Table 1 Hoagland's nutrient solution		
项目	营养元素	营养液浓度
大量元素/mol·L ⁻¹	KH ₂ PO ₄	1×10 ⁻³
	KNO ₃	5×10 ⁻³
	Ca(NO ₃) ₂	5×10 ⁻³
	MgSO ₄	2×10 ⁻³
微量元素/mg·L ⁻¹	H ₂ BO ₃	2.86
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
	H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	0.02
柠檬酸铁/mg·L ⁻¹	FeC ₆ H ₅ O ₇ ·5H ₂ O	5
pH		5.5

1.3 测定方法

(1)试剂 甲醇(色谱纯)、丙酮(色谱纯)、二氯甲烷(色谱纯)、正己烷(色谱纯)、菲(分析纯)购自 Fluka 公司,纯度>97%.

(2)植物体内菲的提取 植物样品经磨碎、混匀后称取根 1g 或茎叶 2g,加入 40mL 体积比为 1:1 的丙酮和二氯甲烷混合液,超声萃取 60min.将萃取液过无水 Na₂SO₄ 漏斗后转移至圆底烧瓶,35℃下蒸干,然后用 12mL 的正己烷多次润洗后转移至装有 2g 硅胶的玻璃柱进行纯化,并用 25mL(1:1)的正己烷和二氯甲烷淋洗,洗脱液收集至圆底烧瓶蒸干,而后用 2mL 甲醇溶解,过 0.22μm 滤膜后用 HPLC 进行测定^[17].该方法菲的回收率为 90.19%.

(3)HPLC 的分析 采用美国 Waters 公司生产的 HPLC 进行分析测试,色谱柱为 3.9mm×150mmC₁₈反向柱,柱温 30℃,流动相为甲醇/水(80/20, V/V),流速 0.8 mL/min,进样量为 20μL,菲的检测波长为 254nm.

(4)pH、EC 的测定 按常规方法进行.

1.4 数据统计

采用 *t*-检验和方差分析中的新复极差测验^[18].

2 结果与讨论

2.1 DOM 和菲对小麦生长的影响

水培条件下, DOM 与菲的加入对小麦生长的影响结果如图 1, 对照的小麦生物量 > DOM 处理 > Phe 处理 > DOM + Phe 处理, 且对照处理与 Phe 处理及 Phe + DOM 处理之间达到显著性差异 ($p < 0.05$), 而与 DOM 处理之间差异不明显 ($p > 0.05$). DOM 和菲的存在对小麦的生长均表现出不同程度的抑制, 其抑制率 $[(\text{对照} - \text{处理}) \times 100\% / \text{对照}]$ 分别为 8.03% 和 18.01%. 菲对小麦生长的抑制影响强于 DOM. DOM 与菲共存对小麦生长的抑制效应 (抑制率 24.38%) 明显强于 DOM 和菲的单独处理, 且差异显著 ($p < 0.05$), 但抑制效果小于两者独立作用之和 (26.04%). 这说明 DOM 与菲在抑制植物生长方面存在着交互作用. 这可能是由于 DOM 的加入改变了 PAHs 的理化性质如水溶性 (S) 和正辛醇-水分配系数 (K_{ow}), 从而提高了 PAHs 的生物有效性, 促进了植物对 Phe 的吸收, 因而增强了其对植物的毒害作用所致, 这可从表 2 中的数据得到进一步的证实. Ke 和 Gao 等也曾报道了多环芳烃菲与芘处理的植物其生物量明显低于对照^[19,20].

2.2 DOM 对小麦吸收 Phe 的影响

DOM 既然能影响 PAHs 的理化性质 (笔者前期的研究结果), 也势必会影响 PAHs 的生物有效性. 表 2 结果说明, 不含菲的处理的营养液和植株体内都未检测出菲; 而加菲的处理在营养液和小麦的根

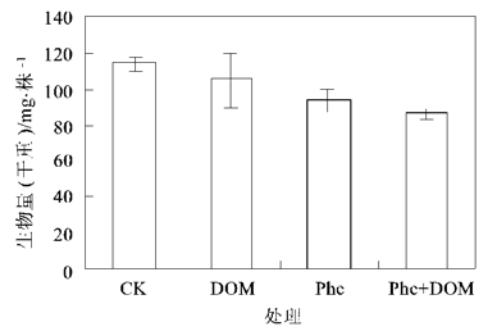


图 1 DOM 和菲对小麦生长的影响

Fig. 1 Effect of DOM and Phe on the wheat growth

与茎叶中均检测出菲; 植株根部菲的含量明显高于地上部. DOM 与菲同时处理的小麦根部与茎叶中菲的含量分别是单一菲处理的 13.3 倍和 1.51 倍, 都达到了显著性差异 ($p < 0.05$), 且在根部的差异达到极显著水平 ($p < 0.01$). 这意味着 DOM 的存在促进了植物根部对菲的吸收和根部吸收的菲向植物地上部的转运. 一些研究者的结果曾证实表面活性剂 Tween80 能促进植物根部对多环芳烃的吸收和根部吸收的多环芳烃向地上部的迁移^[14,20]. 有研究显示猪粪 DOM 虽不是表面活性剂, 但其具有表面活性性质^[21], 因而也可起到表面活性剂 Tween80 的类似作用.

表 2 DOM 对小麦吸收 Phe 的影响

Table 2 Influence of DOM on uptake of Phe by wheat

处理	CK ¹⁾	DOM ¹⁾	Phe	Phe+DOM
第 2 周营养液中 Phe 浓度变化 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	初始	n. d.	1.180 ± 0.029	1.180 ± 0.037
	结束	n. d.	0.504 ± 0.018	0.142 ± 0.064
	减少量	n. d.	0.676 ± 0.018	1.038 ± 0.064
第 3 周营养液中 Phe 浓度变化 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	初始	n. d.	1.180 ± 0	1.180 ± 0
	结束	n. d.	0.844 ± 0.262	0.685 ± 0.096
	减少量	n. d.	0.336 ± 0.262	0.495 ± 0.096
收获后植株体内 Phe 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	茎叶	n. d.	0.175 ± 0.024	0.264 ± 0.035
	根部	n. d.	3.35 ± 0.87	44.4 ± 5.36

1) n. d. 表示未检出

菲处理的小麦根部和地上部的浓缩系数 (植物体内菲浓度 / 营养液中菲浓度) 分别为 $2.84 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 DOM + 菲处理则是 $37.63 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与 $0.22 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 明显大于菲处理, 这是由于 PAHs 的生物浓缩系数与其溶解度 (S) 和 K_{ow} 之间存在着显著的相关性, 且随其溶解度的增大而增大和 K_{ow} 值的增大而减小^[22]; DOM 能增加 PAHs 的水溶性和降低其 K_{ow} , 从而 DOM 能促进 PAHs 在植株体内的积累. 单一菲处理小麦根部菲

的浓缩系数与 Kipoulou^[22] 报道的胡萝卜中菲的浓缩系数 3.20 较为接近, 而远高于 Joelle^[16] 和 Lise^[23] 的研究结果 (生物浓缩系数的数量级为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$). 其浓缩系数较低是由于栽培基质为土壤, 而土壤中的有机质和粘粒对 PAHs 有较强的吸持作用, 这种吸持作用使得土壤中 PAHs 的生物有效性显著低于水体, 且 PAHs 在土壤中的存留时间越长, 其生物有效性就越低; 土壤 PAHs 处理的浓度较高, 使得浓缩系数的分母增大, 浓缩系数降低; 本试验植

物为小麦, 而他们试验的品种为蔬菜, 植物品种不同, 浓缩系数也会有所差异. DOM 与菲同时处理小麦根部菲的浓缩系数 $37.63\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$, 在 Fan 等研究得出的水培硅藻菲的浓缩系数 $4.6\sim 38.3\text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围之内^[24]. 浓缩系数的结果显示菲在植物根部的浓缩系数高于植物地上部, 因此菲主要在植物的根部积累, 而 DOM 可增进菲在植物根部的累积. 菲处理中小麦体内菲的迁移系数(植物地上部含量/根部含量, 0.052) 远大于 DOM+ 菲处理(0.006), 这是由于 DOM 显著地促进了植物根部对菲的吸收, 使得根部菲含量增加倍数大, 而地上部菲含量的增加倍数却极为有限.

第 2、3 周营养液中菲浓度的变化结果均表明, DOM+ 菲处理中菲浓度的减少量大于单一菲处理, 分别是菲处理的 153.6% 和 147.3%. 营养液中菲浓度的减少主要是由于植物的吸收、容器与植物根部的吸附、菲的降解和挥发. 而在试验的控制条件下, 2 个处理菲的容器吸附与降解和挥发量应相近; DOM+ 菲处理的生物量小于菲处理(图 1), 其对营养液中菲的吸附也应小于菲处理, 因此其减少量是由于植物吸收造成的. 此结果进一步说明了 DOM 的存在可促进植物对菲的吸收.

2.3 DOM 和菲对小麦水培营养液中 pH 的影响

有机物质的跨膜运输可以通过顺电化学势梯度的简单扩散^[25]、载体协助扩散^[26]和与 H^+ 形成共运对的共运门(symport 或 co-transport) 运输如蔗糖、多羟基化合物(polyols)^[27, 28] 等方式. 共运门运输由于有机物质以与 H^+ 形成共运对的方式进入细胞内部, 因而会消耗 H^+ , 导致介质中 pH 升高. 本研究中 2 周的培养结果表明(表 3), 4 种处理在经过一段时间的水培之后, 营养液的 pH 值都有不同程度的增加, 其增加的顺序都是 $\text{DOM} + \text{Phe} > \text{Phe} > \text{DOM} > \text{CK}$, 且 $\text{Phe} + \text{DOM}$ 处理与其他处理之间差异显著, 较 CK 处理高 1 个 pH 单位以上; Phe 处理与 CK 之间的差异也达到 5% 的显著性水平, 而与 DOM 处理之间未达到显著性差异; DOM 处理与 CK 之间差异不显著. DOM 和 Phe 的单一处理均使得介质中的 pH 升高, 而 $\text{DOM} + \text{Phe}$ 处理的介质 pH 升高幅度更大, 其增加量大于 DOM 与 Phe 单一处理的增加量之和, 这表示 DOM 与 Phe 在提高介质 pH 方面存在着协同的交互作用. 加菲处理营养液 pH 值显著高于 CK, 笔者推测可能是由于植物对 Phe 的吸收主要是通过 H^+ -Phe 共运方式进行, 从而造成介质 pH 升高; $\text{DOM} + \text{Phe}$ 处理营养介质 pH 升高更为

显著则是 DOM 的存在促进了这种共运吸收. 对于此推断的正确与否, 有待进一步的深入探究.

表 3 DOM 对小麦水培营养液 pH 的影响¹⁾

Table 3 Impact of DOM on pH value in aquaculture solution					
处理		CK	DOM	Phe	Phe+ DOM
第 2 周营养液 的 pH 变化	初始	5.50a	5.50a	5.50a	5.50a
	结束	7.34c	7.52bc	7.70b	8.41a
	增加量	1.84c	2.02bc	2.20b	2.91a
第 3 周营养液 的 pH 变化	初始	5.50a	5.50a	5.50a	5.50a
	结束	7.53c	7.65bc	8.13b	8.58a
	增加量	2.03c	2.15bc	2.63b	3.08a

1) 对表中每行数据进行方差分析, 同一行含相同字母的处理间差异不显著, 否则, 差异显著($p < 0.05$), 下同

2.4 DOM 与菲对小麦水培营养液中电导率(EC) 的影响

植物无时不从周围的介质中吸收无机营养物质. 本试验采用 EC 来表征介质中的无机养分状况. DOM 和 Phe 的加入对植物吸收无机养分的影响结果如表 4 所示, 植物经过培养 1 周后, 4 种处理的介质的 EC 均有所降低, 其减少量为 $\text{Phe} + \text{DOM} > \text{Phe} > \text{DOM}$ 和 CK, 第 2、3 周的结果趋势相一致. 介质中 EC 的减少主要是由于植物吸收了介质中的无机养分所造成的(营养液 pH 由 5.5 增至 8.5 时, 其 EC 值的差异不显著, EC 值的变化量 $< 3\mu\text{S}/\text{cm}$), 减少量越大, 植物所吸收的无机养分子也越多. 介质溶液中 DOM 和 Phe 的加入, 促进了植物对无机养分的吸收, 且 $\text{DOM} + \text{Phe}$ 处理的促进作用明显大于 DOM 与 Phe 的单一处理, 这表明对无机离子吸收的影响, DOM 与 Phe 之间也存在交互作用. 同时联系 2.2 的结果: Phe 和 $\text{DOM} + \text{Phe}$ 处理的植物体内 Phe 的含量明显增加, 可以得知, 植物对有机污染物 Phe 的吸收与无机养分的吸收之间存在协同效应, 而 DOM 的存在可以促进这种协同效应. 这与 Tilquin 等报道的无机离子 Fe^{2+} 和 Ca^{2+} 可促进植物细胞对除草剂草甘膦(Glyphosate) 的吸收结果类似^[29].

表 4 DOM 对小麦水培营养液 EC 的影响

Table 4 Impact of DOM on EC in aquaculture solution					
处理		CK	DOM	Phe	Phe+ DOM
第 2 周营养液的 EC 变化/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	初始	1.72a	1.72a	1.72a	1.72a
	结束	1.66a	1.39b	1.15c	0.89d
	减少量	0.06d	0.33c	0.57b	0.83a
第 3 周营养液的 EC 变化/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	初始	1.72a	1.72a	1.72a	1.72a
	结束	1.08a	1.10a	0.80ab	0.77b
	减少量	0.64b	0.62b	0.92ab	0.95a

3 结论

(1) 水培条件下, 菲($1.180\text{ mg}/\text{L}$) 的存在可抑

制小麦的生长,对小麦生长的抑制率达到 18.01%。DOM 的加入则加剧了菲对小麦生长的抑制作用,生长抑制率升为 24.38%。

(2) 小麦能吸收和富集水培液中的菲,而 DOM 能明显地促进小麦对菲的吸收和富集,使得小麦根部浓缩系数高达 $37.63 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时 DOM 还能促进小麦根部吸收的菲向地上部转运。

(3) 菲处理可显著提高营养介质的 pH,DOM 与菲在提高营养介质的 pH 方面存在显著的协同交互作用,使介质 pH 值的升高超过 1 个单位。初步推测小麦对菲的吸收以与 H^+ 形成共运对的方式进行。

(4) 小麦对多环芳烃菲的吸收与无机养分的吸收之间存在协同效应,且 DOM 可促进这种协同效应。

参考文献:

- [1] 王连生. 环境化学进展 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.
- [2] 宋玉芳, 常士俊, 李利, 等. 污灌土壤中多环芳烃的积累与动态变化研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(1): 93~98.
- [3] Jones K C, Grimmer G, Jacob J, *et al.* Changes in the polynuclear aromatic hydrocarbon content of wheat grain and pasture grassland and over the last century from one site in the U.K. [J]. The Science of the Total Environment, 1989, 78: 117~130.
- [4] Malawska M, Wiolkomirski B. An analysis of soil and plant (*Taraxacum officinale*) contamination with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the area of the railway junction Iiawa glowna, Poland[J]. Water Air and Soil Pollution, 2001, 127(1~4): 339~349.
- [5] Grundl T J, Aldstadt J H, Harb J G, *et al.* Demonstration of a method for the direct determination of polycyclic hydrocarbons in submerged sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 2003, 37: 1189~1197.
- [6] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍. 两种植物条件下土壤中矿物油和多环芳烃的生物修复研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 108~112.
- [7] 孙铁珩, 宋玉芳, 许华夏, 等. 植物法生物修复 PAHs 和矿物油污染土壤的调控研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 225~229.
- [8] Miya R K, Firestone M K. Enhanced phenanthrene biodegradation in soil by slender oat root exudates and root debris[J]. J. Environ. Qual., 2001, 30: 1911~1918.
- [9] 周岩梅, 刘瑞霞, 汤鸿霄. 溶解有机质在土壤及沉积物吸附多环芳烃类有机污染物过程中的作用研究[J]. 环境科学学报, 2003, 23(2): 216~223.
- [10] Chiou C T, Susan E M, Daniel E K. Partition characteristics of PAHs on soils and sediments[J]. Environ. Sci. Technol., 1998, 32: 264~269.
- [11] 陈宝梁, 马战宇, 朱利中. 表面活性剂对范的增溶作用及应用初探[J]. 环境化学, 2003, 22(1): 53~58.
- [12] Cho H H, Choi J, Goltz M N, *et al.* Combined effect of natural organic matter and surfactants on the apparent solubility of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons[J]. J. Environ. Qual., 2002, 31: 275~280.
- [13] 张枝焕, 王学军, 陶澍, 等. 天津地区典型土壤剖面多环芳烃的垂向分布特征[J]. 地理科学, 2004, 24(5): 562~567.
- [14] 李滢, 区自清, 孙铁珩. 表面活性剂对小麦吸收多环芳烃 (PAHs) 的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(1): 99~102.
- [15] 高彦征, 朱利中, 胡晨剑, 等. Tween80 对植物吸收菲和花的影响[J]. 环境科学学报, 2004, 24(4): 713~718.
- [16] Joelle F, Corinne P G, Pascal E B, *et al.* Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils [J]. J. Environ. Qual., 2002, 31: 1649~1656.
- [17] 宋玉芳, 区自清, 孙铁珩. 土壤、植物样品中多环芳烃分析方法研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 92~96.
- [18] 南京农业大学. 田间试验和统计方法[M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1999. 63~233.
- [19] Ke L, Wang W Q, Wong T W Y, *et al.* Removal of pyrene from contaminated sediments by mangrove microcosms [J]. Chemosphere, 2003, 51: 25~34.
- [20] Gao Y Z, Zhu L Z. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils [J]. Chemosphere, 2004, 55: 1169~1178.
- [21] 占新华, 万寅婧, 周立祥. 水溶性有机物对土壤中菲的生态毒性影响[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 120~124.
- [22] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. Environmental Pollution, 1999, 106: 369~380.
- [23] Lise S P, Larsen E H, Larsen P B, *et al.* Uptake of trace elements and PAHs by fruit and vegetables from contaminated soils[J]. Environ. Sci. Technol., 2002, 36: 3057~3063.
- [24] Fan C W, Reinfelder J R. Phenanthrene accumulation kinetics in marine diatoms[J]. Environ. Sci. Technol., 2003, 37: 3405~3412.
- [25] Nelson E B, Thomas P P. Relationship of lipophilicity to influx and efflux of triazine herbicides in oat roots [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 1988, 30: 228~237.
- [26] Hart J J, Ditomaso J M, Linscott D L, *et al.* Characterization of the transport and cellular compartmentation of paraquat in intact maize seedlings [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 1992, 43: 212~222.
- [27] Williams L E, Lemoine R, Sauer N. Sugar transporters in higher plants: a diversity of roles and complex regulation[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(7): 283~290.
- [28] Noiraud N, Maurousset L, Lemoine R. Transport of polyols in higher plants[J]. Plant Physiol. Biochem., 2001, 39: 717~728.
- [29] Tilquin M, Peltier J P, Marigo G. Mechanisms for the coupling of iron and glyphosate uptake in catharanthus roseus cells[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2000, 67: 145~154.