

几种植物根亚细胞中菲的分配

陈冬升, 凌婉婷, 张翼, 龚帅帅, 高彦征*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:以菲为多环芳烃(PAHs)代表物,采用温室水培试验方法,研究了黑麦草、苏丹草、墨西哥玉米、高羊茅、三叶草等5种植物根亚细胞中菲的分配作用.结果表明,经144 h培养,随着培养液中菲平衡浓度由 $0.056 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $0.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,黑麦草根、细胞壁、细胞器中菲的含量分别从 26.85 、 20.01 和 $36.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增大到 56.91 、 49.54 和 $59.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,富集系数则分别由 357.14 、 479.49 和 $649.25 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 145.92 、 127.04 和 $153.26 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$.黑麦草根及亚细胞组分中菲的含量大小为细胞器>根>细胞壁,其中细胞器中菲含量要比细胞壁高 $21\% \sim 163\%$.水中菲的起始浓度均为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,144 h后,供试5种植物根细胞器中菲的含量($48.64 \sim 145.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)均大于细胞壁($15.86 \sim 74.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$).5种植物根亚细胞中菲分配的比例大小顺序为细胞器>细胞壁>可溶部分;其中,根内 $46\% \sim 53\%$ 和 $31\% \sim 40\%$ 的菲分别分布在细胞器和细胞壁中.

关键词:多环芳烃;菲;亚细胞;分配作用;植物吸收

中图分类号:X131; X171.5 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)05-1339-06

Subcellular Distribution of Phenanthrene in Plant Root Tissues

CHEN Dong-sheng, LING Wan-ting, ZHANG Yi, GONG Shuai-shuai, GAO Yan-zheng

(College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Subcellular distribution of phenanthrene as a representative of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in roots of five plants was investigated using a greenhouse hydroponic experiment. Results showed that, with the increase of the equilibrium concentrations of phenanthrene in solution from 0.056 to $0.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the respective concentrations of phenanthrene in root, root cell organelle and cell wall increased from 26.85 , 20.01 and $36.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to 56.91 , 49.54 and $59.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and their concentration factors decreased from 357.14 , 479.49 , and $649.25 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ to 145.92 , 127.04 , and $153.26 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. The concentrations of phenanthrene in ryegrass root tissues followed the order of cell organelle > root > cell wall. In addition, concentrations of phenanthrene in cell organelle were generally $21\% \sim 163\%$ higher than those in cell wall. As to the roots of five different tested plants growing in solution with initial phenanthrene concentration of $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ after 144 h cultivation, the concentrations of phenanthrene were $48.64 \sim 145.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in root cell organelle, which were observed to be higher than those ($15.86 \sim 74.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in root cell wall. The subcellular distribution (%) of phenanthrene was in the following order: cell organelle > cell wall > cell soluble fraction. Based on the detected amounts of phenanthrene in subcellular fractions of plant root tissues, about $46\% \sim 53\%$ and $31\% \sim 40\%$ of phenanthrene were observed in root cell organelle and cell wall.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); phenanthrene; subcell; partition; plant uptake

由有机物不完全燃烧或高温裂解等产生的多环芳烃(PAHs)是环境中多见的一类重要有毒有机污染物,在土壤环境中分布广泛、污染面广^[1~4],对人体和生物具有强致癌和致突变作用;许多国家已将其列为优先控制污染物^[5]. PAHs可在土壤-作物系统中迁移,严重威胁农产品安全和人类健康.近来,关于植物吸收PAHs的研究已成为国际环境领域关注的一个热点^[6,7].

研究证实,植物能从土壤环境中直接吸收、积累与降解PAHs类污染物^[8].但从目前已有的文献资料来看,研究者通常通过测定植物根、茎、叶等部分的含量来表观地反映植物对PAHs的吸收、积累、迁移、转化等过程^[9];而有关PAHs及其代谢物在植物亚细胞组织中分配的研究国内外则至今少有报道.

细胞壁是植物保护原生质体免受污染毒害的第一道屏障,其对污染物的固持可能在植物解毒、耐性和超富集等方面起重要作用. Wild等^[10]利用激光共聚焦荧光显微镜观察发现,PAHs可透过细胞壁进入细胞液泡中,由于液泡区室化作用而储存于液泡中.从亚细胞的水平上来看,理论上,植物为了避免PAHs的毒害,可表现出选择性分布.但至今,关于PAHs的亚细胞分配问题国内外相关资料还很少.研究PAHs等污染物在细胞壁、细胞器等亚细胞组织中

收稿日期:2009-07-23;修订日期:2009-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(20777036,40971137);江苏省自然科学基金项目(BK2007580);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0491)

作者简介:陈冬升(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染模拟与生物修复, E-mail: chdsh119@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoyanzheng@njau.edu.cn

的微观分配,将十分有助于阐明其植物吸收、积累、迁移、转化的内在机制。

菲是燃油和汽车尾气排放 PAHs 的标志物,在污染土壤中菲的含量一般较高^[11]。本研究以菲为 PAHs 代表物,采用温室水培试验方法,探索菲在黑麦草亚细胞组织中的分配作用,试图为进一步明确植物吸收机制、防治作物污染、保障农产品安全等提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

菲购自 Aldrich Chemical Co.,纯度 >98%,菲相对分子质量为 178.2, 25℃ 纯水中溶解度为 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 辛醇-水分配系数 ($\lg K_{ow}$) 为 4.46^[12]。二氯甲烷、丙酮、正己烷、层析用硅胶(200~300 目)为分析纯;甲醇为色谱醇。

主要仪器:KQ2300DE 医用数控超声波清洗器, RM-3 旋转浓缩蒸发器, Jouan VXE 38Q 超低温冰箱, LC-20AT 高效液相色谱仪(HPLC), RS-20 III 超速离心机, Labconco 7670510 冷冻干燥。培养液为 Hoagland 半强度营养液^[13]。

1.2 实验方法

向含有 1L 培养液的玻璃培养器皿中加入菲的甲醇储备液(控制甲醇浓度 <1%)^[14],定容至 1.0 L 后,分别制得含 0.5、0.75、1.0、1.5、2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 菲的培养液供试植物为黑麦草(*Lolium multiflorum* Lam)、苏丹草[*Sorghum sudanense* (Piper) Stapf.]、墨西哥玉米(*Euchsaena mexicana* Schrad.)、高羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb.)、三叶草(*Trifolium repens* L.)。植物种子经催芽、育苗后,温室中以水培方式预培养 15 d(株高 15 cm 左右);选择生长势较为一致的植株洗根后分别移入玻璃培养器皿中,每盆 9 株,培养器皿外壁用黑布包裹以使根系和溶液避光,培养过程中适量补充水和营养液,维持液面高度。其中黑麦草设置 0.5、0.75、1.0、1.5、2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 个菲处理浓度,苏丹草、墨西哥玉米、高羊茅、三叶草均选用 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 菲处理浓度。同时做对照植物处理,即植物生长于无菲的培养液中。分别于 144 h 左右取样。植物样品经蒸馏水充分淋洗后,用滤纸浸干表面水分,于 -65℃ 下保存待分析^[12]。温室中白天 25~35℃,夜间 15~25℃。实验中每个处理设 3 个平行。

1.3 植物根亚细胞组分的分离

参考 Lozano-Rodriguez 等^[15]的方法,分离植物

根亚细胞组分。称取上述处理的 0.5 g 植物根鲜样,加入 5 mL 缓冲液[含 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HEPEs (pH 7.5)、500 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖、1 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ DTT、5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 抗坏血酸、1% PVPP],研磨后,过 80 目钢丝网筛,网筛上残留的为细胞壁组分。滤液则收集在不锈钢离心管中,4 900 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 30 min 后,沉淀为细胞器组分。上清液为根细胞中可溶物质。另外,植物细胞膜组分的分离需要在 100 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下超高速离心^[15];本实验由于受仪器条件的限制,未能按照文献方法从细胞可溶部分中分离细胞膜组分,致使细胞可溶部分中含有部分细胞膜组分。细胞器和细胞壁经冷冻干燥后,按植物样提取方法测定其菲含量。

1.4 水和植物样品中菲的分析方法

(1) 植物、细胞器、细胞壁中菲的分析^[16] 样品经冷冻干燥后,粉碎、混匀,取一定量于 25 mL 玻璃离心管中,用 30 mL 1:1 的丙酮和正己烷溶液分 3 次、每次 10 mL 超声萃取 30 min;将萃取液收集,转移到旋转蒸发瓶中,40℃ 恒温下将萃取液浓缩至干,用正己烷定容到 2 mL;然后取 1 mL 过硅胶柱净化,用一定量的二氯甲烷和正己烷溶液洗脱;洗脱液收集至旋转蒸发瓶后 40℃ 恒温下浓缩至干,用甲醇定容到 2 mL,过 0.22 μm 孔径滤膜后,用 HPLC 分析。上述样品中菲分析方法的平均加标回收率为 103.10%,相对标准偏差为 3.34%。

(2) 水样分析^[16] 准确移取一定量水样于 10 mL 玻璃离心管中,用甲醇适当稀释(甲醇与水体积比为 7:3),过 0.22 μm 滤膜后用 HPLC 分析。

(3) HPLC 分析条件 配有紫外检测器,色谱柱为 4.6 mm × 150 mm 烷基 C_{18} 反相柱,流动相为甲醇,流速 1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温 40℃,进样量 20 μL ,菲的紫外检测波长为 245 nm,检测限为 44.1 pg。

1.5 植物根含水量、脂肪含量的测定^[18]

准确称取一定量的植物样品(鲜样),冷冻干燥后,重新称重,前后重量差即为植物含水量。称取一定量的植物样品(干样),用 1:1 的丙酮和正己烷溶液超声萃取 1 h,萃取液转移后,再次用 1:1 的丙酮和正己烷溶液超声萃取 1 h;收集萃取液至已知重量的玻璃器皿中,待丙酮和正己烷挥发至干后,将玻璃器皿重新称重,前后质量差即为植物脂肪含量。

1.6 植物根各亚细胞组分对菲的吸附实验^[19,20]

称取高羊茅、墨西哥玉米、苏丹草、黑麦草、三叶草干根样及其细胞壁、细胞器样品(干样)0.1 g 于

30 mL 玻璃离心管中,加入 20 mL 含 0.05% NaN₃ 和一定浓度菲的水溶液. 28℃ 和 200 r · min⁻¹ 下恒温振荡 24 h. 实验中每次处理设 3 个平行. 离心后取上清液测定菲浓度,计算出各植物根及亚细胞组分对菲的吸附量和吸附系数. 无植物根对照实验表明,吸附过程中菲的光解、挥发和离心管对菲的吸附可以忽略不计.

1.7 数据处理

利用 Excel 及 SPSS 统计软件进行实验结果的数据整理和统计分析.

2 结果与分析

2.1 根亚细胞中菲的含量

绘制了植物根及其亚细胞组织中菲含量与培养液中菲浓度的关系曲线(图 1). 供试培养液中菲浓度范围(0.056 ~ 0.39 mg · L⁻¹)内,随着培养液中菲浓度的增加,黑麦草根及其细胞壁和细胞器中菲含量增大,根及亚细胞组分中菲含量的大小为细胞器 > 根 > 细胞壁,其中细胞器中菲含量要比细胞壁高 21% ~ 163%.

比较了相同处理条件下黑麦草、高羊茅、三叶草、墨西哥玉米、苏丹草 5 种植物根及其亚细胞中菲含量的差异(表 1). 实验条件下,供试 5 种植物根

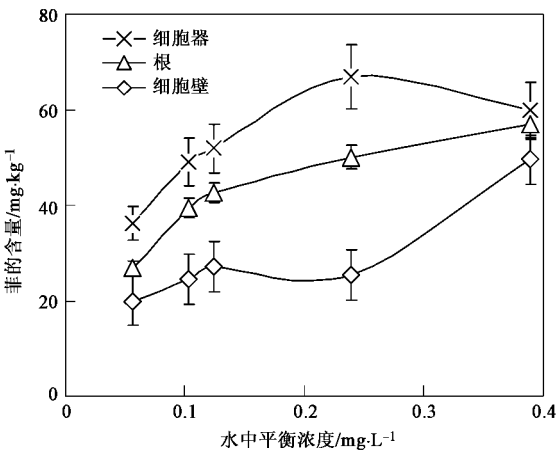


图 1 黑麦草根亚细胞中菲的含量与培养液中菲浓度的关系曲线
Fig. 1 Subcellular concentrations of phenanthrene in ryegrass root tissues as a function of the equilibrium concentrations of phenanthrene in solution

的菲含量为 42.63 ~ 75.84 mg · kg⁻¹;统计结果表明,供试植物根的菲含量与根脂肪含量显著正相关($p < 0.05$). 不同植物根细胞壁和细胞器中菲含量差别很大,分别为 15.86 ~ 78.49 mg · kg⁻¹和 48.63 ~ 145.16mg · kg⁻¹;但对于同一植物,其根及亚细

表 1 5 种植物根及其亚细胞中菲的含量 ¹⁾					
Table 1 Concentrations of phenanthrene in root tissues					
植物	根脂肪含量 /%	培养液中菲的平衡浓度 ²⁾ /mg · L ⁻¹	根中菲含量 /mg · kg ⁻¹	细胞壁中菲含量 /mg · kg ⁻¹	细胞器中菲含量 /mg · kg ⁻¹
黑麦草	0.43	0.12 ± 0.02	42.63 ± 8.41 ^a	24.14 ± 1.28 ^b	51.85 ± 3.42 ^a
高羊茅	0.46	0.09 ± 0.01	45.71 ± 4.44 ^a	15.86 ± 2.92 ^a	48.63 ± 5.10 ^a
三叶草	0.64	0.09 ± 0.01	63.15 ± 4.41 ^b	44.49 ± 3.85 ^c	67.94 ± 1.85 ^{ab}
墨西哥玉米	0.70	0.07 ± 0.01	60.33 ± 2.28 ^b	30.33 ± 1.05 ^b	77.21 ± 2.99 ^b
苏丹草	0.84	0.06 ± 0.00	75.84 ± 5.16 ^c	78.49 ± 6.29 ^d	145.2 ± 28.10 ^c

1) 表中数据为平均值 ± 标准差(n = 3),同行括号内不同字母表示差异显著($p < 0.05$); 2) 培养液中菲起始浓度均为 1 mg · L⁻¹

胞组分中菲含量均为细胞器 > 根 > 细胞壁.

2.2 植物富集系数

植物富集系数是植物体内污染物的含量与水中污染物浓度的比值^[21]. 本实验中可用来反映黑麦草根中各组分对菲的富集能力,富集系数越大,表明其对菲的富集能力越强. 计算了黑麦草根及其亚细胞组分对菲的富集系数,如图 2 所示. 黑麦草根、细胞壁和细胞器对菲的富集系数分别为 145.9 ~ 4 795 L · kg⁻¹、106.4 ~ 357.1 L · kg⁻¹和 153.2 ~ 646.4 L · kg⁻¹,富集系数大小均表现为细胞器 > 根 > 细胞壁,且均与培养液中菲浓度负相关;表明菲污染强度

越大,植物富集能力趋于下降. 高彦征等^[16]报道,植物根系对多环芳烃(菲和芘)的富集系数随着污染强度的增大而减小. 这与本研究结果相一致.

2.3 菲在各亚细胞组织中分配的比例

菲在各亚细胞组织中分配的比例($R; %$)可用以下公式计算: $R = M_c/M_t \times 100\%$;式中, M_c 为根亚细胞组分中菲的质量(μg), M_t 为根中菲的总质量(μg). R 的高低可以直观地反映各亚细胞组分对根储存和积累菲的贡献. 不同菲污染强度下,菲在黑麦草根各亚细胞组分中所占比例见图 3. 总体来看,黑麦草根中菲绝大部分存在于细胞器(46% ~

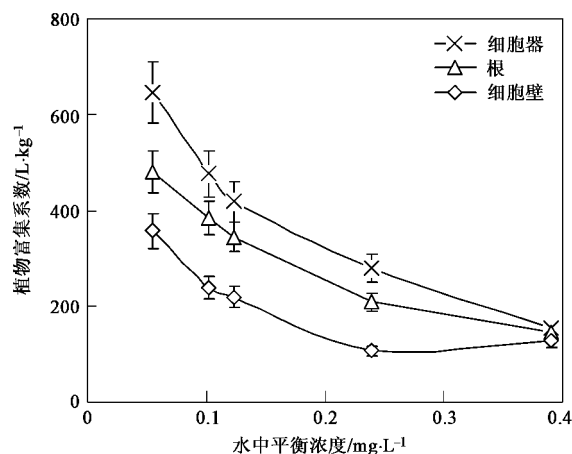


图2 黑麦草根及亚细胞组织对菲的富集系数

Fig. 2 Plant concentration factors of phenanthrene in ryegrass root tissues

53%) 和细胞壁(31% ~ 40%) 中, 另有 7% ~ 17% 菲的分布在可溶部分; 分配比例的总体趋势为细胞器 > 细胞壁 > 可溶部分。比较了相同处理条件下, 黑麦草、高羊茅、三叶草、墨西哥玉米、苏丹草 5 种植物根各亚细胞组分中菲分配的比例(图 4), 发现菲分配比例均表现为细胞器(46% ~ 59%) > 细胞壁(22% ~ 39%) > 可溶部分(9% ~ 22%); 表明, 细胞器和细胞壁为植物生长过程中菲的主要贮积部位。

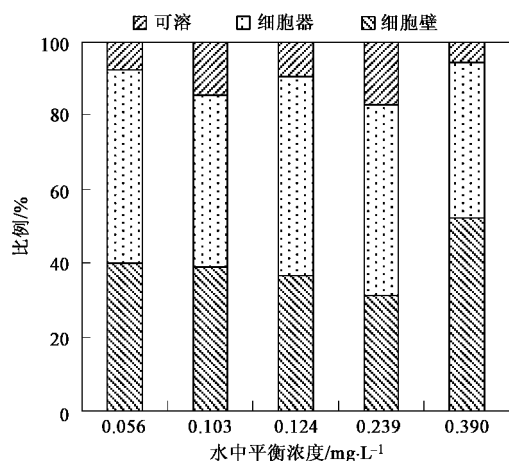


图3 黑麦草根各亚细胞组分中菲所占的比例

Fig. 3 Percentage of phenanthrene in ryegrass root tissues

3 讨论

植物对有机污染物的吸收与植物组织组成关系密切。Chiou 等^[22] 指出辛醇-水分配系数 (K_{ow}) > 1 000 的有机物, 根系吸收几乎全部来自其脂肪物质对有机物的分配作用。Gao 等^[20] 研究了 12 种脂肪含量不同的植物对土壤中菲和芘的吸收, 发现菲和

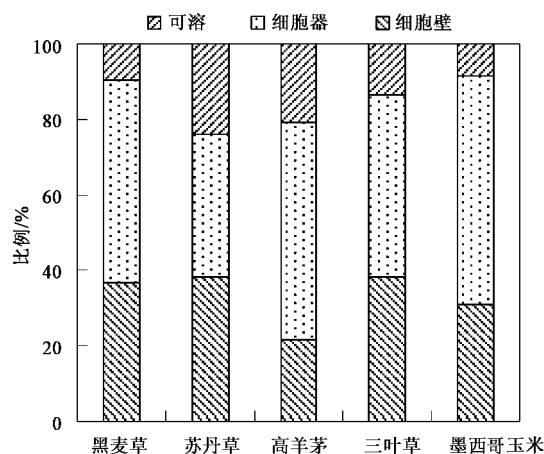
培养液中菲起始浓度均为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图4 5 种植物根各亚细胞组分中菲分配的比例

Fig. 4 Percentage of phenanthrene in root tissues of five plants

芘的根系富集系数与根脂肪含量显著正相关。一般认为, 植物根对亲脂性有机污染物的吸收是一个连续的分配过程, 可近似地看作为其从水溶液分配到根脂肪中的过程。近来, Li 等^[21] 研究了小麦根对林丹和六氯苯的吸收和吸附作用, 由于非极性有机物在脂肪-水间分配系数要远远大于其在植物其它组分-水间的分配系数, 无论吸收还是吸附, 植物脂肪含量都起着重要作用。分配作用是植物根吸收菲的主导机制。

采用批量平衡实验方法, 进一步分析了黑麦草根和亚细胞组织对菲的分配作用。发现根和亚细胞组织对菲的分配曲线为线型, 计算了分配系数 (K_d) (见表 2)。细胞壁和细胞器均有较高的 K_d 值, 且表现为细胞壁 > 细胞器。这一方面与细胞壁和细胞器的组成成分有关, 另一方面, 可能由于实验所采用的分离方法中细胞膜与细胞壁未充分分离, 一部分细胞膜仍结合在细胞壁上, 使细胞壁含高脂成分而具有较高的 K_d 值。而植物众多细胞器如线粒体、高尔基体等因其膜结构组成中含有大量脂肪类成分, 因而对于亲脂性有机污染物菲有较强的分配作用。

表 2 植物根及其亚细胞组织吸附菲的 K_d 值/ $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$ Table 2 Partition coefficients (K_d) of phenanthrene by root tissues/ $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$

植物	根	细胞壁	细胞器
黑麦草	1 555. 8	1 429. 5	712. 16
高羊茅	1 565. 9	1 723. 6	1 372. 1
苏丹草	1 805. 4	2 154. 1	1 555. 8
三叶草	1 647. 5	1 895. 8	1 462. 3
墨西哥玉米	1 679. 9	1 842. 7	1 428. 3

K_d 值与前述根吸收的结果恰恰相反(根吸收中,细胞壁的非含量 < 细胞器)(图 1)。这表明,以往研究中多低估了碳水化合物对有机污染物的分配能力,导致对有机污染物植物分配作用的预测误差很大^[22]。本实验发现,细胞壁作为植物除脂肪外碳水化合物的主要成分,对于菲也具有较强的分配作用。Harms 等^[23]通过同位素示踪技术发现,细胞壁中木质素和胶体能与菲结合,束缚了菲移动,减少了菲的跨膜运动,一部分菲与细胞壁形成结合态残留^[24]。

根吸收实验中,细胞壁的非含量小于细胞器,这可能与以下因素有关:①细胞壁上菲的降解。Komp 等^[25]发现,储存在植物细胞壁内的多环芳烃更容易遭受光降解,另一方面,细胞壁上分布有多种酶,可催化降解有机污染物。②菲与细胞壁形成结合态残留,用常规溶剂萃取方法无法提取,导致测定值小于实际值。③细胞壁上菲进一步向细胞内迁移。本实验证实,在根可溶部分和细胞器中均有较高比例的非存在,表明菲可通过细胞壁、透过细胞膜,进入细胞内并分配于亚细胞组织中。

植物的耐毒机制较为复杂,包括细胞壁钝化、跨膜运输减少、主动外排、区域化分布等,主要与植物对 PAHs 的吸收与运输、PAHs 在植物体内各部位的分配及其与植物体内物质的结合形态等因素有关。本研究结果表明,进入植物体内的大部分 PAHs 被固持在其根部细胞壁和细胞器中,从而减轻了其对地上部分各器官的毒害作用,在一定程度上提高了植物对 PAHs 的耐性。

4 结论

(1) 培养液中菲平衡浓度为 $0.056 \sim 0.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随着培养液中菲浓度增加,根亚细胞各组分中菲的含量增大,富集系数则降低。供试 5 种植物根细胞器的非含量、富集系数均大于细胞壁。

(2) 5 种植物根中菲亚细胞分配的比例大小顺序为细胞器 > 细胞壁 > 可溶部分;其中,根内 46% ~ 53% 和 31% ~ 40% 的非分别分布在细胞器和细胞壁中。

参考文献:

- [1] Garcia F, Garcia F M, González B S, *et al.* Evolution of the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in burnt woodland soils[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**(3): 759-763.
- [2] Wang Z, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban to rural soils: a case

- study in Dalian, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(5): 965-971.
- [3] Gao Y Z, Collins C D. Uptake pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons in white clover[J]. *Environ Sci Technol*, 2009, **43**(16): 6190-6195.
- [4] Atagana H I. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in contaminated soil by biostimulation and bioaugmentation in the presence of copper (II) ions[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2006, **22**(11): 1145-1153.
- [5] Jian Y, Wang L, Peter P, *et al.* Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list[J]. *Mutat Res*, 2004, **557**(1): 99-108.
- [6] Lee S, Lee W, Lee C, *et al.* Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes [J]. *J Hazard Mater*, 2008, **153**: 892-898.
- [7] 范淑秀,李培军,巩宗强,等. 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.
- [8] Oleszczuk P, Baran S. Polyaromatic hydrocarbons in rhizosphere soil of different plants: Effect of soil properties, plant species, and intensity of anthropogenic pressure [J]. *Commun Soil Sci Plan Anal*, 2007, **38**(122): 171-188.
- [9] 凌婉婷,朱利中,高彦征,等. 植物根对土壤中 PAHs 的吸收及预测[J]. *生态学报*, 2005, **25**(9): 2320-2325.
- [10] Wild E, Dent J, Thomas G O, *et al.* Direct observation of organic contaminant uptake, storage, and metabolism within plant roots[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**(10): 3695-3702.
- [11] 何江涛,金爱芳,陈素暖,等. 北京东南郊污灌区 PAHs 垂向分布规律[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1260-1266.
- [12] Collins C D, Fryer M, Grosso A. Plant uptake of nonionic organic chemicals[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**(1): 45-52.
- [13] 沈小明,王梅农,代静玉,等. 不同浓度条件下玉米吸收菲的水培实验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1148-1152.
- [14] Gao Y Z, Zhu L Z, Ling W T. Application of the partition-limited model for plant uptake of organic chemicals from soil and water[J]. *Sci Total Environ*, 2005, **336**(1-3): 171-182.
- [15] Lozano-Rodriguez E, Hernandez L E, Bonay P, *et al.* Distribution of cadmium in shoot and root tissues of maize and pea plants: physiological disturbances [J]. *J Exp Bot*, 1997, **48**(306): 123-128.
- [16] 高彦征,朱利中,胡晨剑,等. Tween80 对植物吸收菲和芘的影响[J]. *环境科学学报*, 2005, **24**(4): 713-718.
- [17] Gao Y Z, Ling W T. Comparison for plant uptake of phenanthrene and pyrene from soil and water [J]. *Biol Fert Soils*, 2006, **42**(5): 387-394.
- [18] Simonich S L, Hites R A. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environ Sci Technol*, 1994, **28**(5): 939-943.
- [19] Brion D, Pelletier E. Modeling PAHs adsorption and sequestration in freshwater and marine sediments [J].

- Chemosphere, 2005, **61**(6): 867-876.
- [20] Gao Y Z, Xiong W, Ling W T. Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons between plant roots and water[J]. Plant Soil, 2008, **311**(1-2): 201-209.
- [21] Li H, Sheng G Y, Chiou C T, *et al.* Relation of organic contaminant equilibrium sorption and kinetic uptake in plants [J]. Environ Sci Technol, 2005, **39**(13): 4864-4870.
- [22] Chiou C T, Sheng G, Manes M. A partition-limited model for the plant uptake of organic contaminants from soil and water[J]. Environ Sci Technol, 2001, **35**(7): 1437-1444.
- [23] Harms H H. Bioaccumulation and metabolic fate of sewage derived organic xenobiotics in plants [J]. Sci Total Environ, 1996, **185**(1-3): 83-92.
- [24] Li Y, Yediler A, Ou Z Q, *et al.* Effects of a nonionic surfactant (Tween80) on the mineralization, metabolism and uptake of phenanthrene in wheat-solution-lava microcosm [J]. Chemosphere, 2001, **45**(1): 67-68.
- [25] Komp P, McLachlan M S. The kinetics and reversibility of the partitioning of polychlorinated biphenyls between air and ryegrass [J]. Sci Total Environ, 2000, **250**(1-3): 63-71.