

2 种城市绿化树种根系分泌物对芘胁迫的响应

章帆^{1,2}, 闫文德^{1,3}, 王姣龙^{1,3}, 李际平¹

(1. 中南林业科技大学, 湖南长沙 410004; 2. 深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司, 广东深圳 518057; 3. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 湖南长沙 410004)

摘要: 为分析不同浓度芘胁迫下植物根系分泌物的变化情况, 进一步研究多环芳烃污染环境的植物修复机理提供科学理论和参考。选取栎树、樟树为试验对象, 测定在不同芘浓度胁迫下 (L_0 : 0 mg/kg; L_1 : 500 mg/kg; L_2 : 2 000 mg/kg) 两种树种的根系分泌物的组成成分、总碳、总氮含量及根系活力吸收面积、磷酸酶活性吸收面积及其生长形态。结果表明: 不同浓度芘胁迫下, 2 种绿化树种根系分泌物种类均发生明显变化, 栎树根系分泌物中检测到化合物种类顺序为: $L_1(20 \text{ 种}) > L_2(19 \text{ 种}) > L_0(15 \text{ 种})$; 樟树根系分泌物中检测到化合物种类顺序为: $L_1(14 \text{ 种}) > L_2(9 \text{ 种}) > L_0(7 \text{ 种})$ 。不同浓度的芘胁迫改变了植物根系的活性吸收能力, 且低浓度的胁迫可以促进植物的生长。本研究可为城市绿化树种去除土壤中的多环芳烃提供科学参考。

关键词: 栎树; 樟树; 芘; 根系分泌物; 根系活性; 根际修复

中图分类号: S792

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2018)11-0123-08

Response of root exudates in two greening tree species exposed to pyrene

ZHANG Fan^{1,2}, YAN Wende^{1,3}, WANG Jiaolong^{1,3}, LI Jiping¹

(1. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. Shenzhen-Hongkong Institution of Industry, Education & Research Environmental Technique Co., Ltd., Shenzhen 518057, Guangdong, China; 3. National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry and Ecology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: The changes of plant root secretion under different concentrations of pyrene stress were analyzed to provide scientific theories and references for further study on phytoremediation mechanism of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) pollution environment. *Koeleruteria paniculata* and *Cinnamomum camphora* were selected as experimental objects, and tested under different concentrations of pyrene (L_0 : 0 mg/kg; L_1 : 500 mg/kg; L_2 : 2 000 mg/kg). The components of root secretion, the contents of TC (technetium), TN (total nitrogen), the absorption area of root activity, the absorption area of phosphatase activity and the growth morphology of root secretion of the two species were studied. The results showed that: the species of root secretion of two greening tree species changed obviously under different concentrations of pyrene stress, and the order of species of compounds detected in the root secretion of *Koeleruteria paniculata* was as follows: $L_1(20 \text{ Kinds}) > L_2(19 \text{ Kinds}) > L_0(15 \text{ Kinds})$; The order of compounds detected in root exudates of *Cinnamomum camphora* was as follows: $L_1(14 \text{ Kinds}) > L_2(9 \text{ Kinds}) > L_0(7 \text{ Kinds})$. Different concentrations of pollutants of stress changed the active absorption ability of plant roots, and low concentration stress could promote the growth of plants. This study will serve as a scientific reference for the removal of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) from soil of urban greening trees.

Keywords: *Koeleruteria paniculata*; *Cinnamomum camphora*; pyrene; root exudates; root activity; phytoremediation

多环芳烃 (PAHs) 是一类广泛存在于自然界中、具有“三致” (致癌、致畸、致突变) 效应的持久性有机污染物 (Persistent Organic Pollutants, POPs) [1-2], 主要来源于煤炭、石油、汽油等有机高分子化合物的不完全燃烧。近年来, 人类的生产活动导致了环境中多环芳烃含量大幅度增加, 直接危害人体健康和国土生态环境安全。因此研

究如何去除土壤中多环芳烃, 以达到修复被污染土壤的目的, 具有重大的现实意义。

植物修复是指利用植物来消除土壤中的有机毒物 and 无机废物 [4], 根系分泌物是指植物在生长过程中由根系分泌产生的无机离子或小分子有机物的统称, 它具有改善根际周边的微环境, 协调土壤中微生物种群结构、加快有机质矿化等独特

收稿日期: 2017-12-26

基金项目: 湖南省科技计划项目 (2015SK2002); 国家林业公益性科研专项 (201404316)

作者简介: 章帆, 硕士研究生

通信作者: 李际平, 教授, 博士生导师; E-mail: lijiping@vip.163.com

引文格式: 章帆, 闫文德, 王姣龙, 等. 2 种城市绿化树种根系分泌物对芘胁迫的响应 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(11): 123-130.

作用^[4-5]。研究表明,不同类型的植物根系分泌的物质不同,不同的根系分泌物对多环芳烃的降解效果也各不相同。杨艳^[6]研究了以芘、菲、萘、蒽对黑麦草根分泌效应的影响,结果在多环芳烃污染物胁迫下,黑麦草根分泌物中可溶性有机酸的含量均高于对照组,随着培养液中污染物浓度的升高,可溶性有机酸等分泌量也随之增加。谢明吉^[7]等通过对菲处理下黑麦草的根系分泌物中几种低分子有机酸的监测,发现黑麦草根分泌物中有机酸及氨基酸等含量随菲浓度的升高而变化。王姣龙^[8-9]通过对芘胁迫下4种绿化树种的根系分泌物成分进行分析,得出在不同浓度的芘胁迫下,植物根系分泌物有着不同程度的变化。

本试验采用栎树 *Koelreuteria paniculata* 和樟树 *Cinnamomum camphora* 为研究对象,以芘为 PAHs 代表物测定在不同芘浓度胁迫下2种城市绿化树种的根系分泌物的组成成分变化、根系活性及其生长形态的变化。目前植物修复的综述文章较多,具体探讨植物根系分泌物对土壤中污染物的修复机理的报告还较少。本研究将探究植物根系分泌物对土壤中多环芳烃污染物的响应作用,也为进一步探讨根系分泌物在多环芳烃污染物降解过程的机理提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

本研究于2015年9月在中南林业科技大学生态应用技术国家工程实验室进行。栎树和樟树2个树种是我国南方城市常见的绿化树种,栎树(阔叶落叶树种)喜光耐寒,对环境适应性较强^[10]。樟树(阔叶常绿树种)枝叶茂盛,树形优美常被作为绿化行道及防风林^[11]。污染物选取南方城市环境中常见的芘为多环芳烃代表物。将芘试剂(>97%)溶于丙酮溶液中,与石英砂按照一定比例均匀混合。配置完成后,置于通风厨内待丙酮挥发完全。共设置3个芘浓度(L₀:0 mg/kg 对照处理;L₁:500 mg/kg 低浓度处理;L₂:2 000 mg/kg 高浓度处理;浓度参考土壤中多环芳烃浓度^[12-14]),每组3重复。

选取1年生樟树实木苗,苗高,地径基本保持一致(栎树苗高约43.7 cm,地径约0.35 cm;樟树苗高约为55.7 cm,地径约0.49 cm),将植物根系整理后浸入0.15%的福尔马林溶液中灭菌,用蒸馏水冲洗根部表面(不破坏根),移植到装

有1 kg 石英砂的Φ8 cm 塑料盆中。每盆1株,共18盆。定期浇水,移动盆栽位置,保证每盆植株生长环境基本一致。

1.2 根系分泌物收集

培养50 d后,用清水冲洗幼苗根部(不损坏根部结构),再用去离子水浸泡大约3 min(加少量百里酚溶液抑制微生物活动)。以3株幼苗为单元置于1 000 mL 0.5 mmol/L CaCl₂的烧杯中,滴3~5滴百里酚抑菌,再用锡箔纸包裹烧杯,保持烧杯口通气状态,培养24 h,过滤后保存到冰箱,待测。

1.3 根系分泌物成分 GC-MS 分析

将收集的1 000 mL待测液减压至50 mL,加入100 mL CH₂Cl₂,振荡6 h,重复3次,将3次溶剂合并,减压浓缩至干,滴加2 mL CH₂Cl₂(过0.45 μm膜),移液至玻璃取样瓶中(保存在-20℃冰箱)。测定仪器:GC-MS型号为GC6890/MS5973气相色谱质谱联用仪,毛细管柱DB-5 ms,进样口温度为280℃,柱温为50℃,保持时间为3 min,以10℃min⁻¹程序升温至290℃,保持时间为20 min,使用的载气为He,以0.2 s速度扫全程,离子源温度为200℃,接口温度为250℃,使用面积归一化法测定。

1.4 根系分泌物中 TC、TN 含量

取30 mL待测液使用岛津TOC-500测定仪测定。

1.5 根活力的测定

采用甲稀蓝法^[15]测定。用排水法测量根体积,用滤纸吸干根系表面水分,浸入根体积10倍的甲稀蓝溶液(0.000 2 mol/L)中1.5 min取出,吸取1 mL甲基蓝溶液,稀释10倍。选择波长为660 nm,以纯水为参照对比在分光光度计下比色,读出光的密度。

总吸收面积(m²)=[(C₁-C_{1'})×V₁]+[(C₂-C_{2'})×V₂]×1.1;

活跃吸收面积(m²)=[(C₃-C_{3'})×V₃]×1.1。

式中:C为溶液原来的浓度mg·mL⁻¹;C'为浸提后的浓度mg·mL⁻¹;1,2,3为离心管编号。

1.6 酸性磷酸酶活性的测定

根系酸性磷酸酶活性的测定采用Mclanchlan法^[16]。将植物根系侵入约为其体积10倍的以醋酸钠缓冲液(0.2 mol·L⁻¹,pH值约5.8)为溶剂的对

硝基苯磷酸二钠 ($0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 酶反应液, 用锡箔纸包裹。常温培养 60 min, 取出加入 1 mL NaOH 溶液终止酶促反应, 空白处不放植物根系, 以空白为对比, 波长 660 nm 分光光度。

酶活性 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1} = \text{试样 } A / (0.019 \times T \times W) \times V_{\text{总}}$ 。

式中: A 为试样的吸光度, 0.019 为 pH 值为 14 时, 对硝基酚的 μmol 吸光系数。

$$V_{\text{总}} = V_1 + V_2。$$

式中: V_1 为反应液体积; V_2 为 NaOH 体积; T 为时间; FW 为根鲜质量。

1.7 根系生长指标的测定

直尺及游标卡尺计算栎树、樟树的苗高和地径 (地面以上 20 cm 处直径)

1.8 数据处理及分析

数据用 Excel 2010 软件处理, 使用 SPSS19.0 进行单因素方差分析 ($P < 0.05$, 差异性显著)。

2 结果与分析

2.1 根系分泌物的成分分析

由表 1、2 可见, 对照组, 栎树根系分泌物中共检测到 15 种化合物, 其中包括 7 种烷烃类、4 种烯烃、3 种杂环类化合物以及 1 种酚醛类。经 L_1 处理下, 根系分泌物中共检测到 20 种化合物, 其中 9 种烷烃、3 种烯烃、2 种杂环类、3 种苯类、1 种酯类以及萘类。经 L_2 处理下, 根系分泌物中共检测到 19 种化合物, 其中 6 种烷烃、3 种硅氧烷、3 种烯烃、2 种杂环类、1 种酯类及萘类。空白组, 樟树根系分泌物中共检测到 7 种化合物, 其中 3 种烷烃类、2 种杂环类、1 种酚醛类和 1 种烯烃。经 L_1 处理, 樟树根系分泌物中共检测到 14 种化合物, 其中包括 7 种烷烃、2 种烯烃、2 种杂环类化合物、1 种酚醛类以及萘。经 L_2 处理, 根系分泌物中共检测到 10 种化合物, 其中包括 5 种杂环类、2 种烷烃、1 种酯类、1 种硅氧烷以及萘类。

表 1 3 种不同水平处理栎树根系分泌物中化学成分的对比较分析

Table 1 Comparison of component analysis of root exudate of *Koelreuteria paniculata* under three levels

编号	匹配项名称	质量比 /%		
		L_0	L_1	L_2
1	间二甲苯 Benzene, 1,3-dimethyl-	/	4.34	/
2	聚苯乙烯 Styrene	/	5.49	/
3	4-甲基-2(5H)-呋喃酮 4-Methyl-5H-furan-2-one	3.20	11.98	2.52
4	黄樟素 Safrole	/	10.92	/
5	丁基羟基甲苯 Butylated Hydroxytoluene	/	6.37	/
6	十六甲基芳辛并硅氧烷 Cyclooctasiloxane, hexadecamethyl-	/	/	0.97
7	十七烷 Heptadecane	/	3.07	/
8	8-羟基喹啉-2-甲醛 2-Quinolinecarboxaldehyde, 8-hydroxy-	1.23	/	/
9	十八烷 Octadecane	/	2.92	/
10	八甲基环四硅氧烷 Cyclononasiloxane, octadecamethyl-	/	/	0.96
11	二十一烷 Heneicosane	0.67	3.98	/
12	萘 Pyrene	/	13.61	17.68
13	(Z)-9-二十三碳烯 9-Tricosene, (Z)-	/	/	0.85
14	1-十九烯 1-Nonadecene	1.88	4.73	0.95
15	cis-Inositol tri-methylboronate	/	2.95	/
16	三十二烷 Dotriacontane	/	/	0.95
17	二十三烷 Tricosane	1.42	5.13	/
18	二十二烷 Docosane	0.45	3.83	/
19	二十四烷 Tetracosane	1.78	6.58	1.15
20	1-1,5-二甲基乙基-4-4-甲基戊基环己烷 Cyclohexane,1-(1,5-dimethylhexyl)-4-(4-methylpentyl)-	/	3.88	/
21	17-三十五烯 17-Pentatriacontene	1.85	/	/
22	2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基)苯酚 Phenol, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-	20.22	/	/
23	1-二十六烯 1-Hexacosene	/	1.95	/
24	2,6,10,14-Tetramethyl-7-(3-methylpent-4-enylidene) pentadecane	/	/	1.97
25	14-二十九烯 Z-14-Nonacosane	/	/	4.05

续表1
Continuation of table 1

编号	匹配项名称	质量比 /%		
		L ₀	L ₁	L ₂
26	顺 -14- 二十九烯炔 Z-14-Nonacosane	3.82	/	/
27	三十四烷 T etatriacontane	1.80	/	/
28	cis-6-Ethyl-cis-4a,trans-8a-perhydro-trans-1-(2-methoxycarbonylethyl)-trans-2,trans-6,8a-trimethylnaphthalene-2-carboxylic acid	/	/	9.85
29	反 -9- 十八烯酸甲酯 i-Propyl 11-octadecenoate	/	3.75	/
30	4-(4- 乙基环己基)-1- 戊基 - 环己烯 Cyclohexene, 4-(4-ethylcyclohexyl)-1-pentyl-	9.47	/	/
31	二十九烷 Nonacosane	24.72	/	7.91
32	二十烷 Eicosane	19.26	2.51	0.97
33	28- 去甲 -21 α (H)- 藿烷 28-Nor-17.alpha.(H)-hopane	/	/	3.72
34	二十八烷 Octacosane	8.34	/	2.97
35	3- 羧胺吡啶 -N-(2- 三氟甲基苯基) 胺肟 Pyridine-3-carboxamide, oxime, N-(2-trifluoromethylphenyl)-	1.69	0.22	2.69
36	3,5- 二 (1,1- 二甲基乙基)-4- 羟基苯丙酸十八酯 Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, octadecyl ester	/	/	10.46
37	六苯基环三硅氧烷 Cyclotrisiloxane, hexaphenyl-	/	/	28.95

表 2 3种处理水平下樟树根系分泌物中化学成分的比较
Table 2 Comparison of component analysis of root exudate of *Cinnamomum camphora* under three levels

编号	匹配项名称	质量比 /%		
		L ₀	L ₁	L ₂
1	2,4-1,1- 二甲基苯酚 Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	/	6.71	/
2	4- 烯丙基 -2,6- 二甲氧基苯酚 Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	/	7.66	/
3	十七烷 Heptadecane	/	6.53	/
4	8- 羟基喹啉 -2- 甲醛 2-Quinolinecarboxaldehyde, 8-hydroxy-	10.24	/	/
5	2H-3,9a-Methano-1-benzoxepin, octahydro-2,2,5a,9-tetramethyl-, [3R-(3.alpha.,5a.alpha.,9.alpha.,9a.alpha.)]-	/	/	2.12
6	1- 十九烯 1-Nonadecene	/	5.57	/
7	芘 Pyrene	/	19.29	42.70
8	2,6,10,14- 四甲基十八烷 Octadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	/	3.98	/
9	二十三烷 Tricosane	7.45	3.99	/
10	反 -13- 二十二烯酰胺 trans-13-Docosenamamide	/	5.74	/
11	二十四烷 Tetracosane	/	5.94	/
12	2,2' - 亚甲基双 (6- 叔丁基 -4- 甲基) 苯酚 Phenol, 2,2' -methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-	41.94	/	/
13	3- 羧胺吡啶 -N-(2- 三氟甲基苯基) 胺肟 Pyridine-3-carboxamide, oxime, N-(2-trifluoromethylphenyl)-	4.14	3.90	4.26
14	二十八烷 Octacosane	/	6.10	2.46
15	1,2- 二溴六十四烷 Tetrapentacontane, 1,54-dibromo-	13.38	/	/
16	顺 -14- 二十九烯炔 Z-14-Nonacosane	6.39	/	/
17	二十烷 Eicosane	14.46	6.96	1.76
18	N' -(2,4,6(1H,3H,5H)-Trioxypyrimidin-5-ylidenemethyl)-2-nitrobenzhydrazide	/	/	7.43
19	2,6,10,14-Tetramethyl-7-(3-methylpent-4-enylidene) pentadecane	/	/	3.65
20	角鲨烯 Squalene	/	9.27	/
21	二十九烷 Nonacosane	/	8.16	/
22	29,30-Dinorgammaceran-3-one, 22-hydroxy-21,21-dimethyl-, (8.alpha.,9.beta.,13.alpha.,14.beta.,17.alpha.,18.beta.,22.alpha.)-	/	/	3.08
23	3,5- 二 (1,1- 二甲基乙基)-4- 羟基苯丙酸十八酯 Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, octadecyl ester	/	/	11.66
24	六苯基环三硅氧烷 Cyclotrisiloxane, hexaphenyl-	/	/	20.89

经 L_1 处理, 从栎树、樟树根系分泌物中检测到含量较高的为烷烃类、杂环类及萘类, 其中检测到萘类的质量比分别为: 13.62%、19.50%, 烷烃类质量比分别为: 33.71%、41.68%, 杂环类化合物质量比分别为: 12.21%、9.64%。十七烷、二十烷、1-十九烯、二十三烷、3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基) 胺胍这 5 类化合物在栎树樟树根系分泌物中均检测到。经 L_3 处理, 从栎树、樟树根系分泌物共检测到含量较高的有萘类、硅氧烷类, 萘类质量比分别为: 17.65%、42.71%, 检测到硅氧烷类质量比分别为: 30.89%、20.90%。

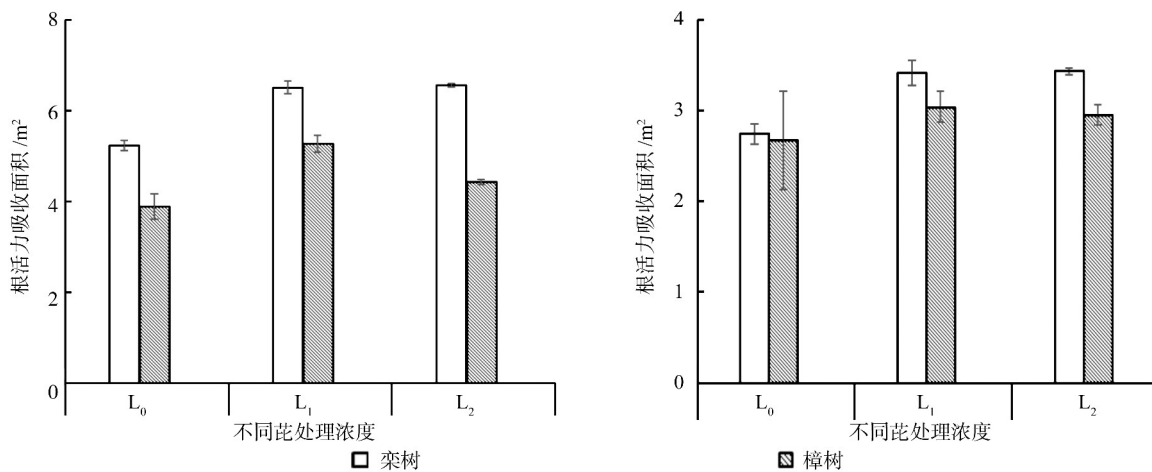
2.2 根活力分析

如图 1-a, 栎树根系总吸收面积范围为 5.24 ~ 6.57 m^2 (见图 1-a), 樟树根系总吸收面积范围为

3.90 ~ 5.26 m^2 。经 L_1 和 L_2 处理下栎树和樟树的根系总吸收面积均大于对照组, 栎树经 L_2 处理后吸收面积达到最大, L_0 处理与 L_1 、 L_2 处理之间差异性显著 ($P < 0.05$), 樟树经 L_1 处理吸收面积达到最大, L_0 处理与 L_1 、 L_2 处理之间差异性显著 ($P < 0.05$)。

栎树根活跃吸收面积范围为 2.74 ~ 3.43 m^2 (见图 1-b), 樟树根活跃吸收面积范围为 2.67 ~ 3.04 m^2 (见图 1-b), 栎树和樟树经 L_0 处理下根系活跃总吸收面积最小, 栎树根活跃吸收面积经 L_2 处理下达到最大, L_0 处理与 L_1 、 L_2 处理下差异性显著 ($P < 0.05$), 樟树经 L_1 处理后根活性总吸收面积为最大, 不同处理水平之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

栎树根系磷酸酶活性范围为 62.96 ~



图中不同大写字母表示同一树种在不同浓度处理下差异性显著 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 不同吡处理根系总吸收面积、根活跃吸收面积

Fig.1 Root acid absorption area and root acid phosphates activity in different pyrene treatments

69.56 $nmol \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$, 樟树根系磷酸酶活性范围为 8.80 ~ 10.46 $nmol \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ (见图 2), 栎树根系磷酸酶活性吸收面积经 L_1 、 L_2 处理后均大于对照组, L_2 处理后吸收面积最大, 不同水平处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。樟树经 L_1 处理下吸收面积最小, L_2 处理后吸收面积达到最大, 不同处理之间没有显著差异 ($P > 0.05$)。栎树根系磷酸酶活性随着吡浓度升高吸收面积逐渐增大, 樟树呈先下降后上升规律。

2.3 根系分泌物的 TC、TN 含量

如图 3-a 所示, 栎树根系分泌物中测得总碳含量为 9.80 ~ 28.78 mg/L , 大小为 $L_0 > L_1 > L_2$, 总碳含量随吡浓度的升高, 逐渐下降, 各处理水平之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 樟树根系

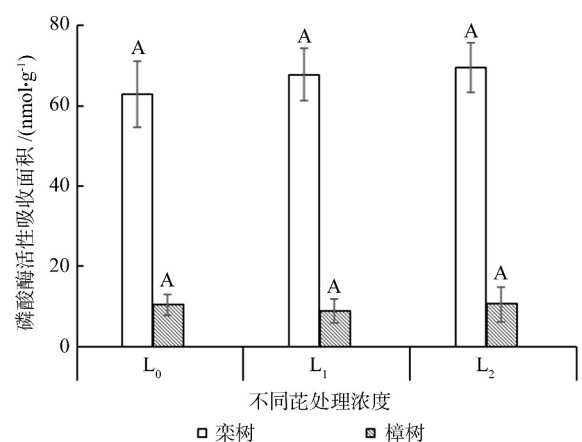


图 2 不同浓度处理磷酸酶活性吸收面积

Fig.2 The influence of the phosphatase activity in different pyrene treatments

分泌物中测得总碳含量范围为 4.86 ~ 9.44 mg/L , 大小顺序为: $L_2 > L_0 > L_1$, 总碳含量随污染物浓

度升高,出现先下降后上升的趋势,各处理水平之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图3-b可见,栾树根系分泌物中总氮含量范围为4.42~7.59 mg/L,大小顺序为: $L_1 > L_0 > L_2$,随芘浓度的升高,总氮含量先上升后下降。 L_0 处理与 L_1 处理之间不存在显著差异性($P > 0.05$), L_2 处理分别与 L_0 处理和 L_1 处理之间存在显著差异($P < 0.05$)。樟树根系分泌物中总氮含量范围为1.59~5.55 mg/L(见图3),随芘浓度的上升,根系分泌物中总氮含量呈先下降后上升趋势,大小顺序为: $L_0 > L_2 > L_1$,各处理之间均存在显著差异($P < 0.05$)。

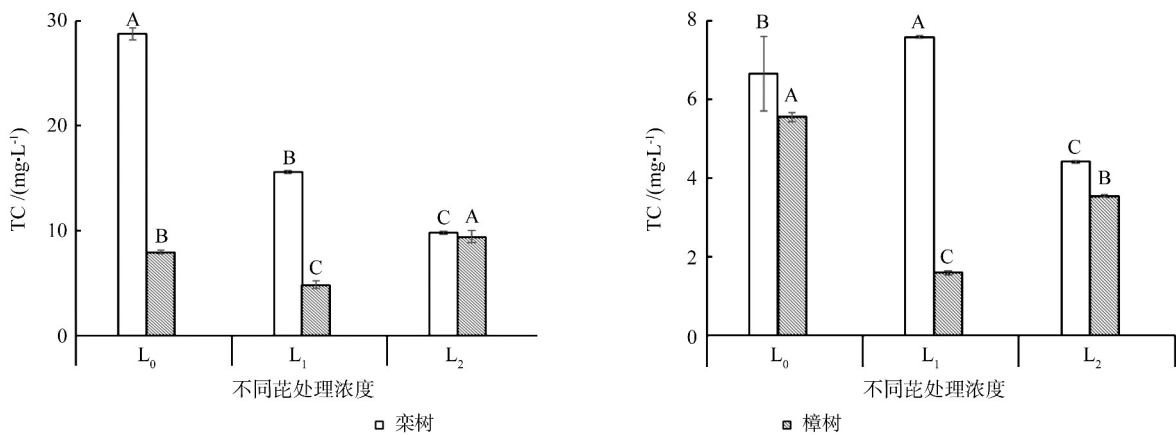


图3 不同芘浓度处理下根系分泌物中TC、TN含量
Fig. 3 Contents of TC and TN in root exudates treated with different pyrene concentrations

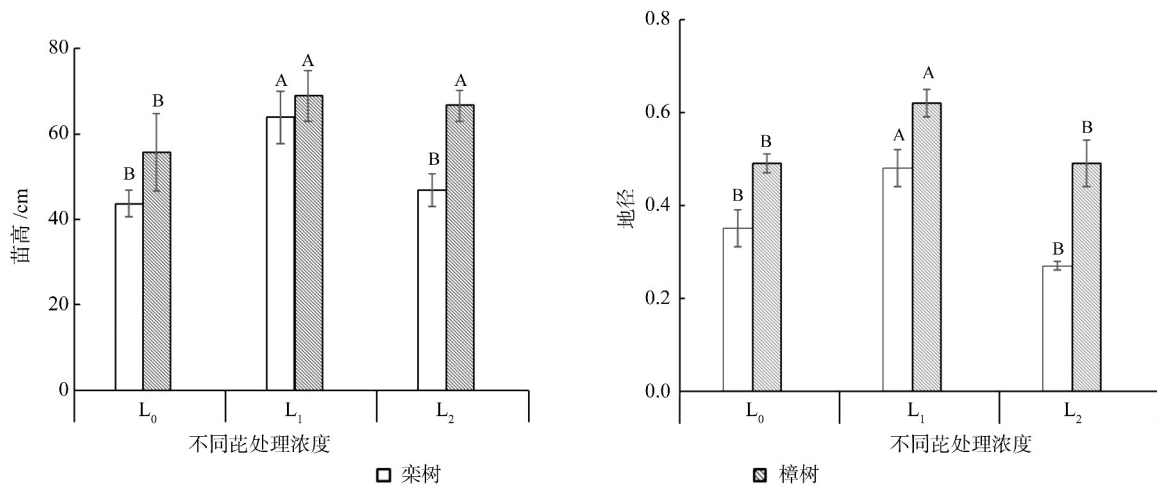


图4 不同芘浓度处理下植物苗高、地径
Fig. 4 Seedlings height and ground diameter with different pyrene concentrations

3 讨论

3.1 不同浓度芘胁迫对根系分泌物成分及比重的影响

根系分泌物是植物体利用地下部分和环境之

2.4 植物苗高地径分析

如图4-a,栾树在不同浓度芘处理下苗高范围为43.7~63.93 cm,地径范围为0.35~0.48 cm。图4-b樟树苗高范围为55.7~69.63 cm,地径范围为0.49~0.62 cm(见图4)。栾树苗高及地径在 L_1 处理下达到最大值,且 L_1 处理水平下的苗高与其余处理水平间存在显著差异($P < 0.05$)。樟树苗高和地径经 L_1 处理下为最大,苗高经 L_0 处理与 L_1 、 L_2 处理差异性显著($P < 0.05$),地径经 L_1 处理下与 L_0 、 L_2 处理之间存在显著差异($P < 0.05$)。

间进行能量、物质及信息交换传递的重要媒介,其分泌产物能改变根际生态环境,并对周围土壤环境产生影响,任何环境改变都会影响植物根系分泌物的种类和数量^[17]。本实验研究发现,不同芘浓度胁迫下,明显改变了植物根系分泌物的组

成成分及所占比例,与王姣龙^[18]试验的紫玉兰根系分泌物在芘胁迫下成分均发生明显变化的研究结果相似。随着添加芘污染物浓度的升高,从根系分泌物中检测到芘含量也不断增加,说明植物根系对土壤中芘污染物有一定的吸收和富集作用。和郜红建等^[19]研究了植物对土壤和水中的菲与芘的吸收能力,发现 PAHs 污染物主要被植物的根部吸收并富集。许超等^[20]研究了芘处理下对玉米根系分泌的影响,发现种植玉米对芘的降解率在低浓度处理下为 36%,高浓度在处理下为 28.2%,均能促进土壤中芘的降解。以上研究都证明了植物根系分泌物能帮助土壤中多环芳烃的降解。但本实验未检测土壤中剩余芘含量,后期实验设计中应添加检测剩余污染物的含量,更好的证明植物根系对污染物的降解作用。

3.2 不同浓度芘胁迫对植物根系活性的影响

测定根系活性吸收面积、TC、TN 含量及磷酸酶活性吸收面积,目的是为了研究植物根部在土壤中的吸收能力及根系分泌物的变化情况。栎树和樟树根系总吸收面积和活跃吸收面积在芘胁迫下均大于对照组;栎树 TC 含量逐渐上升,樟树先下降后上升;栎树 TN 含量先下下降后上升,樟树持续下降。本研究证明,芘胁迫下能促进根部活性吸收,与张力^[21]实验樟树幼苗植物根系分泌物在多环芳烃的胁迫下,TOC、TN 含量较其他浓度下值为最大,说明多环芳烃的添加对根系分泌能力有提高作用的结果相似。杨艳^[22]等研究了 4 种 PAHs 对黑麦草根系分泌物的可溶性有机碳的影响,说明了多环芳烃胁迫下促进了根系的分泌作用,可溶性有机碳含量均高于对照组。这主要与细胞膜的选择透过性有关,当污染物侵害植物时,细胞膜会做出应激反应,膜的选择透过性会发生改变^[23],从而引起植物根系分泌发生不同变化。而在污染物的胁迫下,植物根系分泌物具体的生理反应还有待进一步的研究证明。

3.3 不同浓度芘胁迫下对植物生长状况的影响

L₁ 处理下,对栎树、樟树的生长有一定的促进作用,经 L₂ 处理有抑制作用。栎树经 L₁ 处理,苗高、地径均高于对照组和 L₂ 处理组;经 L₂ 处理,苗高、地径均低于 L₁ 处理。樟树经 L₂ 处理下,苗高高于对照组及 L₁ 处理(约 3 cm),地径低于 L₁

处理。樟树及栎树苗高在不同浓度胁迫下,生长状况不同,可能是由于樟树较栎树更为耐受。这一研究现象与其他学者相似,陆志强^[24]等在沙培秋茄幼苗时发现:当浓度为 0.1 mg/L(低浓度)时芘和萘明显促进幼苗生长,当浓度升高到 10 mg/L,幼苗苗高显著降低;沈小明^[25]等研究发现菲胁迫影响玉米的生长状况,浓度为 1 mg/L 时玉米的生物量增加,当浓度增加至 5 mg/L 以上时其长势受到抑制。以上现象可能是因为多环芳烃化合物是环状结构,与某些能促进植物的生长激素相类似^[25],所以低浓度下的多环芳烃能促进植物生长。

4 结 论

在不同浓度芘胁迫下,从植物根系分泌物中均检测到芘,且随着污染物浓度的升高,芘所占比重不断增大,说明植物根部对芘污染物有一定的吸附能力。该实验未能检测砂石中剩余的芘含量,可以更科学的说明植物对污染物的降解功能,后期还有待更近一步研究试验。污染物的添加一定程度的促进了根部活动,影响其活性,后期可以检测植物根系分泌物的微生物生物量碳,进一步研究植物根系在受到胁迫时的反应。低浓度污染物的胁迫可以促进植物体的生长,高浓度胁迫会抑制植物生长。对比两种绿化树种可见,樟树对芘胁迫的耐受性优于栎树,本试验为进一步研究植物根系分泌物对 PAHs 污染胁迫提供基础理论,为城市建设绿化树种的选择提供科学依据。

参考文献:

- [1] Wilcke W, *et al.* Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil[J]. *Geoderma*, 2007,141(3):157-166.
- [2] Cerniglia CE. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1993,4(3): 331-338.
- [3] Haritash AK, Kaushik CP. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,169(1):1-15.
- [4] 刘世亮,骆永明,曹志洪,等.多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展[J]. *土壤学报*, 2002,34(5):257-265.
- [5] 蔡琼.林木根系分泌物研究进展[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2013,10(11):55-58.
- [6] 杨艳.多环芳烃污染的根系分泌效应[D].南京:南京农业大学,2009.
- [7] 谢明吉,严重玲,叶青.菲对黑麦草根系几种低分子量分泌物

- 的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 576-579.
- [8] 王蛟龙, 谌小勇, 闫文德, 等. 4 种绿化树种根系分泌物中的化学成分分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(10): 107-113.
- [9] 王蛟龙. 4 种绿化树种根系分泌物对多环芳烃胁迫的响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [10] 李馨, 姜卫兵, 翁忙玲. 栾树的园林特性及开发利用[J]. 中国农学通报, 2009, (1): 141-146.
- [11] 周海旭. 樟树叶中多酚及挥发油的提取、分离及其成分分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [12] Li X, Li P, Lin X, *et al.* Biodegradation of aged polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by microbial consortia in soil and slurry phases[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(1): 21-26.
- [13] 曲健, 宋云横, 苏娜. 沈抚灌区上游土壤中多环芳烃的含量分析[J]. 中国环境监测, 2006(3): 29-31.
- [14] 肖汝, 汪群慧, 杜晓明, 等. 典型污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2006(6): 49-53.
- [15] 叶思诚. 油茶适应低磷胁迫的根系生理响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- [16] McLanchlan K-D. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants I. Assay conditions and phosphatase activity[J]. *Aust. J. Agric. Res.*, 1980, (31): 429-440.
- [17] 高子勤, 张淑香. 连作障碍与根际微生态研究 I. 根系分泌物及其生态效应[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(5): 549-554.
- [18] 王蛟龙, 李际平, 谌小勇, 等. 砒胁迫下紫玉兰根系活性及根系分泌物的响应[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(2): 50-56.
- [19] Gao H J, Chang J, Zhang Z L, *et al.* Methods for investigation root exudates of plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2003, 39(1): 56-60.
- [20] 许超, 夏北成. 砒对玉米根系分泌氨基酸的影响[J]. *生态环境学报*, 2009(1): 172-175.
- [21] 张力, 刘益君, 陈毅. 樟树幼苗根系分泌物中有机酸对 PAHs 胁迫的响应[J]. *绿色科技*, 2017(11): 74-77.
- [22] 杨艳, 凌婉婷, 高彦征, 等. 几种多环芳烃的植物吸收作用及其对根系分泌物的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(3): 593-599.
- [23] Prikry L Z. Root exudates of plants[J]. *Plant and Soil*, 1980, 57(69): 121-127.
- [24] 陆志强. 多环芳烃对秋茄幼苗的生理生态效应及其在九龙江口红树林湿地的含量与分布[D]. 厦门: 厦门大学, 2002.
- [25] 沈小明, 王梅农, 代静玉. 不同浓度条件下玉米吸收砒的水培实验研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006(5): 1148-1152.
- [26] Baker J M. The effects of oils on plants[J]. *Environmental Pollution*, 1970, 1(1): 27-44.

[本文编校: 吴 毅]