

网络出版时间:2016-09-07 09:03 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2016.10.015
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160907.0903.030.html>

4 种绿化树种根系分泌物中的化学成分分析

王姣龙^{1a}, 谌小勇^{1a,1b,2}, 闫文德^{1a,1b,1c}, 郝 博^{1a},
张 力^{1a}, 任晓军^{1a}, 刘之洲^{1a}

(1 中南林业科技大学 a 生命科学与技术学院, b 南方林业生态应用技术国家工程实验室, c 城市森林生态湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004; 2 College of Arts and Sciences, Governors State University, USA Illinois 60484)

【摘 要】 【目的】研究我国南方 4 种常见绿化树种根系分泌物组分及各组分含量的差异, 为城市绿化树种的选择和污染土壤的植物修复与治理提供研究数据。【方法】选取栾树(*Koelreuteria paniculata*)、紫玉兰(*Magnolia lilii flora*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、桂花(*Osmanthus fragrans*) 4 种常用绿化树种为试验材料, 对其根系分泌物进行 GC-MS 分析, 同时对根系分泌物中的总碳(TC)和总氮(TN)质量浓度进行测定。【结果】植物根系分泌物中检测到的成分数量依次为紫玉兰(35 种)、桂花(16 种)、栾树(15 种)、樟树(7 种), 4 种绿化树种根系分泌物成分主要包括烷烃、苯酚、烯烃、醛、酯、酮、醚、呋喃、胺肪、吡啶、咪唑、喹啉、有机酸、氨基酸等(按类型分), 相对含量较高的为酚醛和烷烃类, 其中栾树、紫玉兰、樟树、桂花根系分泌物中酚醛类相对含量分别为 20.22%, 13.61%, 41.94% 和 42.07%, 烷烃类相对含量分别为 56.65%, 7.77%, 37.29% 和 33.13%。有 5 种化合物(二十烷、二十三烷、2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基)苯酚、3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基)胺肪、8-羟基-2-甲醛喹啉)在 4 种绿化树种的根系分泌物中均可检测到; 有 2 种化合物(二十一烷、二十四烷)在栾树、紫玉兰、桂花根系分泌物中均可检测到; 顺-14-二十九烯烃在栾树、樟树、桂花根系分泌物中均可检测到。4 种绿化树种根系分泌物中 TC 质量浓度依次为: 栾树(28.78 mg/L) > 紫玉兰(24.15 mg/L) > 桂花(8.58 mg/L) > 樟树(7.98 mg/L); TN 质量浓度依次为: 栾树(6.65 mg/L) > 樟树(5.55 mg/L) > 紫玉兰(0.98 mg/L) > 桂花(0.76 mg/L)。【结论】不同绿化树种根系分泌物中化合物种类及类型存在差异。

【关键词】 栾树; 紫玉兰; 樟树; 桂花; 根系分泌物; 化学成分

【中图分类号】 S792.119; X173 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2016)10-0107-07

Chemical components of root exudates from
four urban greening tree species

WANG Jiaolong^{1a}, CHEN Xiaoyong^{1a,1b,2}, YAN Wende^{1a,1b,1c},
HAO Bo^{1a}, ZHANG Li^{1a}, REN Xiaojun^{1a}, LIU Zhizhou^{1a}

(1 a College of Life Science and Technology, b National Engineering Laboratory for
Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, c City of Hunan Province Key Laboratory of
Forest Ecology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China;
2 College of Arts and Sciences, Governors State University, Illinois 60484, USA)

Abstract: 【Objective】The variations in chemical compounds in root exudates from four common green-
ing tree species in southern China were studied to provide data and scientific basis for further research in se-
lection of greening tree species and phytoremediation of contaminated environments. 【Method】Chemical

【收稿日期】 2015-03-27
【基金项目】 国家林业行业公益性科研专项(201404316); 湖南省“百人计划”项目(0842); 湖南省高校创新平台开放基金项目(12K070); 国家林业局软科学研究项目(2013-R09); 湖南省自然科学基金创新群体项目(湘基金委字[2013]7号); 中南林业科技大学青年科学研究基金重点项目(QJ2010008A); 中南林业科技大学研究生科技创新基金项目(CX2015B17)
【作者简介】 王姣龙(1990—), 女, 河北石家庄人, 在读硕士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: hebei1990wj@163.com
【通信作者】 谌小勇(1958—), 男, 加拿大人, 教授, 博士生导师, 主要从事森林生态学研究。E-mail: XChen@govst.edu

components of total carbon(TC)and total nitrogen(TN) in root exudates of four urban greening tree species (*Koelreuteria paniculata*, *Magnolia liliiflora*, *Cinnamomum camphora*, and *Osmanthus fragrans*) were identified and analyzed using GC-MS. 【Result】 A total of 35 chemical components were found in root exudates of *M. liliiflora*, followed by *O. fragrans* (16), *K. paniculata* (15), and *C. camphora* (7). The types of chemical components from root exudates included alkane, phenol, olefin, aldehyde, ester, ketone, ether, furan, amidoxime, pyridine, carbazole, quinoline, organic acid, and amino acid with the highest contents of phenol, quinone and alkane. Specifically, the ratios of phenol and quinone in the total detected compounds from *K. paniculata*, *M. liliiflora*, *C. camphora* and *O. fragrans* were 20.22%, 13.61%, 41.94% and 42.07%, respectively. The alkane contents were 56.65%, 7.77%, 37.29% and 33.13%, respectively. Five common components in root exudates of all four studied tree species were eicosane, tricosane, 2,2'-methylenebis[6-(1,1-dimethylethyl)-4-methyl-, Pyridine-3-carboxamide, oxime, N-(2-trifluoromethylphenyl)-, and 2-Quinolinecarboxaldehyde, 8-hydroxy-. Two components (Heneicosane and Tetracosane) were found in root exudates of *K. paniculata*, *M. liliiflora* and *O. fragrans* and Z-14-Nonacosane was detected in root exudates of *K. paniculata*, *C. camphora* and *O. fragrans*. TC contents were in the order of *K. paniculata* (28.78 mg/L) > *M. liliiflora* (24.15 mg/L) > *O. fragrans* (8.58 mg/L) > *C. camphora* (7.98 mg/L) while TN contents were in the order of *K. paniculata* (6.65 mg/L) > *C. camphora* (5.55 mg/L) > *M. liliiflora* (0.98 mg/L) > *O. fragrans* (0.76 mg/L). 【Conclusion】 There were differences in types and contents of root exudates from different tree species.

Key words: *Koelreuteria paniculata*; *Magnolia liliiflora*; *Cinnamomum camphora*; *Osmanthus fragrans*; root exudates; chemical components

根分泌物在增加土壤养分的有效性,调节有机体之间的化感效应和改变土壤根际区微生物种群组成、数量及其活力等方面发挥着独特的作用^[1];且根分泌物通过直接或间接途径,能够有效地螯合、活化、转化、降解直至去除土壤中的有害污染物,使土壤质量得以提升或改善,这种功能特征被认为是污染土壤植物修复的主要理论基础之一^[1-3]。因此,依据植物根系分泌物的功能和修复机理,开展污染环境(包括污染土壤)的修复是一种非常有前途的生物修复和治理技术,已成为土壤和生态环境科学研究的热点领域^[4-6]。

目前研究已发现,不同植物根系分泌物的物质种类在 200 种以上^[7-8],按照分子质量大小可分为低分子分泌物和高分子分泌物两大类,前者主要包括有机酸、糖类、酚类和各种氨基酸,后者主要有多糖、多糖醛酸等黏胶以及酶类^[1,8]。植物分泌物数量可以达到植物总光合产物的 30%~40%^[9],大量有机物质通过根系分泌进入土壤,不仅可为土壤动物和微生物提供能源和碳源,而且深刻影响着土壤的理化性质和养分状况。由于植物种类之间特性的差异,不同种类植物根系分泌物的组成成分、数量、化合物的相对比例以及分泌过程是不尽相同的。比如,农作物中油菜和肥田萝卜的根系分泌物中主要

有机酸种类不同,油菜中主要为柠檬酸和苹果酸,而肥田萝卜中主要为酒石酸、丁二酸和苹果酸^[8];油菜和荞麦根系分泌物中含有的 5-乙基-2-壬醇、2-十四醇,在小麦的根系分泌物中都不存在。即使同一种属的植物,其根系分泌物也有差别, Moscatiello 等^[10]认为,生长季差异使代谢活动不同,从而导致根系分泌物种类及含量有一定差异。朱旭恒^[11]研究表明,在杉木幼苗胁迫初期根系分泌物种类和数量众多,在胁迫中后期分泌物种类和数量大幅减少。俞元春等^[12]用溶液培养法研究了不同种源马尾松和杉木苗木根系有机酸的分泌差异,结果表明,不同种源的杉木和马尾松分泌的有机酸种类不同。以上结果表明,林木自身的生态型和基因型决定了根系分泌物的种类和数量。

近几十年来,有关根系分泌物及其在生态学中的应用研究取得了很大进展,在分泌机理和实践应用等方面取得了一系列的研究成果^[5,13],然而这些研究主要集中在农作物、蔬菜和果树方面,针对林木的研究不多,对不同树种根系分泌物组成成分、分布特征以及分泌量的变化尚不清楚。作为植物根系分泌物对有机化合物污染土壤修复技术研究项目的一部分,本试验着重描述了我国南方 4 种主要城市绿化树种(栾树(*Koelreuteria paniculata*)、紫玉兰

(*Magnolia liliiflora*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)根系分泌物的组成特征,揭示这 4 种绿化树种在正常生长条件下,其根系分泌物在种类和相对比例上的差异,以期为进一步探讨不同植物种类根系分泌物在各种环境胁迫下的反应、深入研究根系分泌物降解和清除土壤有害污染物的机制提供基础数据和参考依据,同时也为城市绿化树种的选择和城市森林的建设、管理提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 缓苗处理

试验于 2014 年 5—8 月在中南林业科技大学南方林业生态应用技术国家工程实验室自动调节温室中进行,供试材料为我国南方城市 4 种常用绿化树种(栾树 *K. paniculata*、紫玉兰 *M. liliiflora*、樟树 *C. camphora*、桂花 *O. fragrans*)。购买各树种 2 年生实生苗,将幼苗根系用清水洗净后,移植到直径 20 cm 塑料盆中,每盆装石英砂 3 kg,每盆 1 株,每个树种 10 盆。每隔 2 d 浇灌 1 次营养液,每次 100 mL。营养液大量元素采用改良 Hoagland 配方,微量元素采用 Amon 配方。用 1 mol/L $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或质量分数 20% H_2SO_4 调整全营养液 pH 值,整体调整到 5.5 左右。

1.2 根系分泌物收集

缓苗处理 30 d 后,将幼苗根系用自来水小水流冲洗干净,再用新制去离子水(同时加入少量百里酚以抑制微生物活动)浸泡 5 min 并冲洗 3 次,然后以 2 株为单元放置在装有 300 mL 0.5 mmol/L CaCl_2 的广口瓶中,用锡箔纸包裹广口瓶,使根系处在黑暗状态,收集过程连续通气,收集 24 h。收集分泌物的容器预先高温消毒处理。将滤纸过滤后的根系分泌物置于冰箱冷藏(4 ℃)保存,用于化学成分测定。

1.3 根系分泌物提纯

将得到的根系分泌物减压浓缩至 20 mL(浓缩 15 倍),加入 40 mL CH_2Cl_2 ,振荡 6 h,分液,重复 2 次,将 2 次收集的有机溶剂合并,过 0.45 μm 膜,减压浓缩至干,加入过 0.45 μm 膜的 CH_2Cl_2 2 mL,于 -20 ℃ 冰箱保存,留作 GC-MS 分析。

1.4 根系分泌物成分的 GC-MS 及总碳(TC)、总氮(TN)分析

用 GC6890/MS5973 气相色谱-质谱联用仪分析根系分泌物成分,测定条件为:毛细管柱 DB-5ms (30 m×0.25 mm,涂膜厚 0.25 μm)。进样口温度

280 ℃,柱温 50 ℃,保持 3 min,以 10 ℃/min 程序升温至 290 ℃,保持 20 min。载气为 He,流量 1 mL/min,进样量 1 μL /mL。MS 电子轰击源 70 eV,扫描范围 M/Z 35~800 AMU,扫描速度 0.2 s 扫全程,离子源温度 200 ℃,接口温度 250 ℃,检测电压 1 kV,溶剂切除时间 3 min。应用 NIST 107 质谱数据库,通过计算机检索进行未知物及其相对含量(面积归一化法)的测定。根系分泌物成分中的总碳(TC)与总氮(TN)质量浓度采用日本岛津 TOC-500 测定仪测定。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2010 进行统计分析,利用 SPSS 18.0 统计分析软件进行方差分析和差异显著性分析, $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 4 个树种根系分泌物的化学成分

从栾树根系分泌物中共检测出 15 种化合物(表 1),其中包括 7 种烷烃(56.64%,相对含量数据,下同)、1 种酚醛类(20.22%)、4 种烯烃(17.02%)以及 3 种杂环类化合物(6.12%);从紫玉兰根系分泌物中共检测到 35 种化合物(表 2),其中包括 10 种烷烃(7.77%)、5 种酚醛类(13.61%)、1 种吡啶(28.13%)、1 种氨基酸(8.65%)、1 种烯烃(0.71%)、1 种酯(0.81%)、4 种酮(5.35%)、1 种醚(4.72%)、2 种有机酸(3.3%)、4 种杂环类化合物(20.26%)及其他物质(6.69%);从樟树根系分泌物中共检测到 7 种化合物(表 3),包括 3 种烷烃(37.29%)、1 种酚醛类(41.94%)、1 种烯烃(6.39%)以及 2 种杂环类化合物(14.38%);从桂花根系分泌物中共检测到 16 种化合物(表 4),其中包括 7 种烷烃(33.13%)、2 种酚醛类(42.07%)、3 种烯烃(13.39%)、1 种有机酸(1.75%)、2 种杂环类化合物(3.28%)及其他物质(6.38%)。

4 种绿化树种根系分泌物中相对含量较高的均为酚醛类和烷烃类,其中栾树、紫玉兰、樟树、桂花根系分泌物中酚醛类相对含量分别为 20.22%, 13.61%, 41.94% 和 42.07%,烷烃类相对含量分别为 56.64%, 7.77%, 37.29% 和 33.13%。从 4 种绿化树种根系分泌物中共检测到 3 种有机酸,分别为异丁烯酸、棕榈油酸和十八烯酸,另检测到 1 种氨基酸(庚酸庚酯-L-甲硫氨酸)。有 5 种化合物(二十烷、二十三烷、2,2'-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基)苯酚、3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基)胺肟、8-羟基-2-

甲醛喹啉)在 4 种绿化树种根系分泌物中均可检测到 兰、桂花根系分泌物中均可检测到,顺-14-二十九烯
到,2 种化合物(二十一烷、二十四烷)在栾树、紫玉 烃在栾树、樟树、桂花根系分泌物中均可检测到。

表 1 栾树根系分泌物成分分析

Table 1 Component analysis of root exudate of <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.				
编号 Number	化合物 Compound	保留时间/min Time	相对含量/% Mass ratio	
1	4-甲基-2(5H)-呋喃酮 4-Methyl-5H-furan-2-one	8.946	3.20	
2	8-羟基-2-甲醛喹啉 2-Quinolinecarboxaldehyde,8-hydroxy-	18.555	1.23	
3	二十一烷 Heneicosane	21.870	0.67	
4	1-十九烯烃 1-Nonadecene	22.869	1.88	
5	二十三烷 Tricosane	23.641	1.42	
6	二十二烷 Docosane	23.941	0.45	
7	二十四烷 Tetracosane	24.476	1.78	
8	17-三十五烯烃 17-Pentatriacontene	24.567	1.85	
9	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-	24.812	20.22	
10	顺-14-二十九烯烃 Z-14-Nonacosane	26.093	3.82	
11	4-(4-乙基环己基)-1-戊基-环己烯 Cyclohexene,-(4-ethylcyclohexyl)-1-pentyl-	28.300	9.47	
12	二十九烷 Nonacosane	28.372	24.72	
13	二十烷 Eicosane	30.498	19.26	
14	二十八烷 Octacosane	31.869	8.34	
15	3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基)胺肟 Pyridine-3-carboxamide,oxime,N-(2-trifluoromethylphenyl)-	34.394	1.69	

表 2 紫玉兰根系分泌物成分分析

Table 2 Component analysis of root exudate of <i>Magnolia liliiflora</i> Desr.				
编号 Number	化合物 Compound	保留时间/min Time	相对含量/% Mass ratio	
1	异丁烯酸 Isocrotonic acid	5.477	2.49	
2	1,3,3-三甲基-2-氧杂二环[2.2.2]-6-羟基辛烷 2-Oxabicyclo[2.2.2]octan-6-ol,1,3,3-trimethyl-	11.880	0.55	
3	十二甲基环己硅氧烷 Cyclohexasiloxane, dodecamethyl-	13.133	0.93	
4	丙烯基二氧甲苯酯 Safrole	14.059	0.81	
5	5-羟基-4,7,7-三甲基二环[2.2.1]庚-2-酮 Bicyclo[2.2.1]heptan-2-one,5-hydroxy-4,7,7-trimethyl-,endo-	14.450	0.87	
6	甲基异丁香酚 trans-Ioeugenol	15.004	1.87	
7	3,4-二甲氧基苯甲醛 Benzaldehyde,3,4-dimethoxy-	15.349	0.97	
8	十四甲基环七硅氧烷 Cycloheptasiloxane,tetradecamethyl-	15.385	0.69	
9	1,2-二甲氧基-4-烯丙基苯 Benzene,1,2-dimethoxy-4-(1-propenyl)-	15.549	0.67	
10	3,4-(亚甲基二氧)苯丙酮 3,4-Methylenedioxypropiofenone	16.076	3.29	
11	5-烯丙基-1,2,3-三甲氧基苯 Benzene,1,2,3-trimethoxy-5-(2-propenyl)-	16.221	0.46	
12	3,4,5-三甲氧基苯甲醛 Benzaldehyde,3,4,5-trimethoxy-	16.848	0.93	
13	3,4,5-三甲氧基苯酚 Phenol,3,4,5-trimethoxy-	16.929	0.40	
14	2-羟基-4-异丙基-7-甲氧基环庚三烯酮 2-Hydroxy-4-isopropyl-7-methoxytropone	17.983	0.37	
15	8-羟基-2-甲醛喹啉 2-Quinolinecarboxaldehyde,8-hydroxy-	18.546	0.83	
16	十八甲基环壬硅氧烷 Cyclononasiloxane,octadecamethyl-	19.127	1.57	
17	长叶醛 Longifolenaldehyde	19.263	0.69	
18	8H-4,7,7-三甲氧基-2(1H)-萘酮 2(1H)-Naphthalenone,octahydro-4a,7,7-trimethyl-,trans-	20.135	0.82	
19	棕榈油酸 Palmitoleic acid	20.426	0.81	
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)-	20.880	0.39	
21	二十烷 Eicosane	20.925	0.53	
22	二十一烷 Heneicosane	21.870	0.34	
23	2,6,10,14-四甲基十八烷 Octadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	22.769	0.48	
24	顺-9-二十三烯 9-Tricosene,(Z)-	22.869	0.71	
25	3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基)胺肟 Pyridine-3-carboxamide,oxime,N-(2-trifluoromethylphenyl)-	23.523	0.55	
26	二十三烷 Tricosane	23.641	0.70	

表 2(续) Continued table 2

编号 Number	化合物 Compound	保留时间/min Time	相对含量/% Mass ratio
27	二十四烷 Tetracosane	24.467	1.37
28	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-	24.803	8.74
29	1-溴-11-碘十一烷 1-Bromo-11-iodoundecane	24.931	0.77
30	2-乙酰基-2 氯-1H-咪唑并[4,5-b]吡啶 Ethanone,2-(1H-imidazo[4,5-b]pyridin-2-yl)-1-(4-morpholyl)-	26.938	28.13
31	庚酸庚酯-L-甲硫氨酸 l-Methionine,n-pentafluoropropionyl-,heptyl ester	27.655	8.65
32	2,4,6-三甲基咔唑 Carbazole,2,4,6-trimethyl-	28.155	10.41
33	2,5-[(3,4-二甲氧基苯基)-3,4-二甲基四氢-[2R-(2.alpha.,3.beta.,4.beta.,5.alpha.)]-呋喃 Furan,2,5-bis(3,4-dimethoxyphenyl) tetrahydro-3,4-dimethyl-, [2R-(2.alpha.,3.beta.,4.beta.,5.alpha.)]-	28.527	8.47
34	乙烯基正十八醚 Octadecane,1-(ethenyloxy)-	29.853	4.72
35	二十基环辛硅氧烷 Cyclodecasiloxane,eicosamethyl-	30.462	5.02

表 3 樟树根系分泌物成分分析

Table 3 Component analysis of root exudate of *Cinnamomum camphora* (L.) Sieb.

编号 Number	化合物 Compound	保留时间/min Time	相对含量/% Mass ratio
1	8-羟基-2-甲醛喹啉 2-Quinolinecarboxaldehyde,8-hydroxy-	18.546	10.24
2	二十三烷 Tricosane	23.632	7.45
3	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-	24.794	41.94
4	3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基)胺脒 Pyridine-3-carboxamide,oxime,N-(2-trifluoromethylphenyl)-	25.085	4.14
5	1,2-二溴六十四烷 Tetrapentacontane,1,54-dibromo-	25.266	13.38
6	顺-14-二十九烯烃 Z-14-Nonacosane	25.666	6.39
7	二十烷 Eicosane	26.029	16.46

表 4 桂花根系分泌物成分分析

Table 4 Component analysis of root exudate of *Osmanthus fragrans* Lour.

编号 Number	化合物 Compound	保留时间/min Time	相对含量/% Mass ratio
1	顺-13-十八碳烯醛 13-Octadecenal,(Z)-	4.732	11.86
2	8-羟基-2-甲醛喹啉 2-Quinolinecarboxaldehyde,8-hydroxy-	18.537	2.03
3	十八烯酸 Oleic Acid	20.580	1.75
4	二十烷 Eicosane	20.916	1.67
5	十九烷 Nonadecane	21.861	1.34
6	2,6,10,14-四甲基十八烷 Octadecane,2,6,10,14-tetramethyl-	22.760	2.71
7	顺-8-十六烯 Z-8-Hexadecene	22.851	2.38
8	二十一烷 Heneicosane	23.623	3.77
9	3-羧胺吡啶-N-(2-三氟甲基苯基)胺脒 Pyridine-3-carboxamide,oxime,N-(2-trifluoromethylphenyl)-	23.913	1.25
10	二十四烷 Tetracosane	24.458	5.22
11	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	24.794	30.21
12	顺-14-二十九烯烃 Z-14-Nonacosane	25.530	1.35
13	二十三烷 Tricosane	26.029	9.24
14	29,30-Dinorgammaceran-3-one,22-hydroxy-21,21-dimethyl-, (8.alpha.,9.beta.,13.alpha.,14.beta.,17.alpha.,18.be	27.110	6.39
15	17-三十五烯烃 17-Pentatriacontene	27.237	9.66
16	正三十六烷 Hexatriacontane	30.461	9.17

2.2 4 种树根系分泌物中 TC 与 TN 质量浓度的比较

如图 1 所示,4 种绿化树种根系分泌物中 TC 质量浓度大小顺序为:栾树(28.78 mg/L) > 紫玉兰(24.15 mg/L) > 桂花(8.58 mg/L) > 樟树(7.98

mg/L);樟树与桂花之间 TC 质量浓度不存在显著性差异,其余树种之间均存在显著性差异($P < 0.05$)。4 种绿化树种根系分泌物中 TN 质量浓度大小顺序为:栾树(6.65 mg/L) > 樟树(5.55 mg/L) > 紫玉兰(0.98 mg/L) > 桂花(0.76 mg/L);

栎树与紫玉兰、桂花根系分泌物中 TN 质量浓度存在显著性差异($P<0.05$),樟树与紫玉兰、桂花之间也存在显著性差异($P<0.05$),樟树与栎树及紫玉兰与桂花之间无显著性差异。

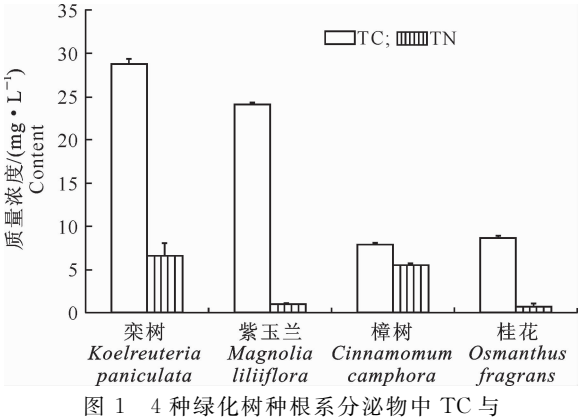


图 1 4 种绿化树种根系分泌物中 TC 与 TN 质量浓度的比较
Fig. 1 Comparison of TC and TN in root exudates of four greening tree species

3 讨论与结论

本研究利用 GC-MS 分析,从栎树根系分泌物中共检测到 15 种化合物,紫玉兰中检测到 35 种,樟树中检测到 7 种,桂花中检测到 16 种。4 种绿化树种根系分泌物中含量较高的均为酚醛类和烷烃类,其中栎树、紫玉兰、樟树、桂花根系分泌物中酚醛类相对含量分别为 20.22%,13.61%,41.94%和 42.07%,烷烃类相对含量分别为 56.65%,7.77%,37.29%和 33.13%。4 种绿化树种根系分泌物中共检测到 3 种有机酸(异丁烯酸、棕榈油酸和十八烯酸)以及 1 种氨基酸(庚酸庚酯-L-甲硫氨酸)。本研究供试 4 种绿化树种根系分泌物中主要组成成分与之前研究结果有一定的相似性。如邵东华等^[14]研究了油松和虎榛子不同林型根系分泌物组分的差异,得出在 3 种林型中检测到的化合物主要包括有机酸、酯类和酚酸类,3 种林型根际分泌物中酯类和酚酸类含量存在显著差异。柴强等^[15]对玉米根系分泌物的 GC-MS 鉴定表明,玉米根系分泌物的 CH₂Cl₂ 提取物主要包括烃类、苯、噻唑、酸、酮、酰胺、酯、醇和酚。刘成等^[16]对重茬大豆根系分泌物的成分进行了分析,发现重茬大豆根系分泌物成分主要包括烃、有机酸、醇、酯、酮、酚、醛、苯、噻唑、酰胺等物质。张新慧等^[17]对当归根际土壤提取液中化合物进行分离鉴定,从当归根际土壤水提液中鉴定到 17 个化合物,包括有机酸、酮、醛、酯和烃类等化感物质。

本研究 4 种绿化树种中,只有紫玉兰和桂花的根系分泌物中存在有机酸,得到的酸类物质含量明显少于其他植物。郜峰等^[18]研究认为,地黄根系分泌物的酸性组分与中碱性组分中相似度在 80% 的有机化合物分别有 20 和 19 种,其中从酸性组分中鉴定出酸类物质 13 种。胡元森等^[19]采用 GC-MS 分析法鉴定发现,黄瓜水培液根分泌物中含有苯甲酸、对羟基苯甲酸、香草酸、阿魏酸、苯丙酸等多种有机酸。高欣欣^[20]通过对中烟 100 根系分泌物提取物进行 GC-MS 分析,在中性提取条件下得到 2-羟基丙酸、苯甲酸、丁二酸、延胡索酸、月桂酸、肉豆蔻酸、辛酸和十五烷酸。此外,本研究从供试 4 种绿化树种根系分泌物中只检测到 1 种氨基酸,而王雪等^[21]在供试的 5 种大豆品种根系分泌物中共检测到了 14 种氨基酸,潘凯等^[22]在 5 种不同抗性黄瓜品种根系分泌物中检测到 16 种氨基酸,分别为半胱氨酸 Cys、苏氨酸 Thr、丙氨酸 Ala、缬氨酸 Val、异亮氨酸 Ile、天冬氨酸 Asp、亮氨酸 Leu、苯丙氨酸 Phe、甘氨酸 Gly、甲硫氨酸 Met、组氨酸 His、谷氨酸 Glu、酪氨酸 Tyr、赖氨酸 Lys、丝氨酸 Ser 和精氨酸 Arg。

根系分泌物是林木与土壤环境进行物质、能量和信息交流的重要载体。根系分泌物种类繁多,包括糖类、有机酸、氨基酸和酚类化合物等。根系分泌物中 TC 含量反映的是植物根系通过分泌作用向根基环境的碳输入情况,TN 则反映了植物根系与根基环境的氮素交换情况。4 种绿化树种根系分泌物中 TC 质量浓度大小顺序为栎树>紫玉兰>桂花>樟树,栎树根系分泌物中 TC 质量浓度显著高于其余 3 种树种,说明栎树通过根系分泌物向根际环境中释放的碳素较多。4 种绿化树种根系分泌物中 TN 质量浓度大小顺序为栎树>樟树>紫玉兰>桂花,栎树根系分泌物中 TN 质量浓度显著高于紫玉兰、桂花,樟树与紫玉兰、桂花之间也存在显著性差异,可见 4 种绿化树种通过根系分泌物向根际环境输入的氮素情况不同,且栎树在碳素和氮素输入方面存在优势。

[参考文献]

[1] Bais H, Weir T L, Perry L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. Annual Review of Plant Biology, 2006, 57: 233-266.
[2] 魏树和, 周启星, 张凯松, 等. 根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 143-147.
Wei S H, Zhou Q X, Zhang K S, et al. Roles of rhizosphere in

- remediation of contaminated soils and its mechanisms [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 143-147.
- [3] 许超, 夏北成. 土壤多环芳烃污染根际修复研究进展 [J]. 生态环境, 2007, 16(1): 216-222.
- Xu C, Xia B C. Research progress in rhizoremediation on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soil [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(1): 216-222.
- [4] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 97-101.
- Shi G R. Ecological effects of plant root exudates [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(1): 97-101.
- [5] 郇红建, 蒋新, 常江, 等. 根分泌物在污染土壤生物修复中的作用 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 135-139.
- Gao H J, Jiang X, Chang J, et al. Effects of root exudates in the bioremediation of contaminated soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(4): 135-139.
- [6] 徐卫红, 黄河, 王爱华, 等. 根系分泌物对土壤重金属活化及其机理研究进展 [J]. 生态环境, 2006, 15(1): 184-189.
- Xu W H, Huang H, Wang A H, et al. Advance in studies on activation of heavy metal by root exudates and mechanism [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 184-189.
- [7] Elory A C, Truelove B. The rhizosphere [M]. New York: Springer-Verlag Beidelberg, 1986.
- [8] Marschner H. Mineral nutrition of higher plants [M]. London: Academic Press, 1995: 537-595.
- [9] Whipps J M. Carbon economy [M]//Lynch J M. The Rhizosphere. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1990: 59-97.
- [10] Moscatiello R, Squartini A, Mariani P, et al. Flavonoid-induced calcium signalling in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* [J]. New Phytologist, 2010, 188(3): 814-823.
- [11] 朱旭恒. 不同逆境胁迫对杉木幼苗生理指标及根系分泌物的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- Zhu X H. Influence of different adversity stresses on Chinese fir seedlings' physiological indexes and root exudates [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry, 2009.
- [12] 俞元春, 余健, 房莉, 等. 缺磷胁迫下马尾松和杉木苗根系有机酸的分泌 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 50(2): 9-12.
- Yu Y C, Yu J, Fang L, et al. Organic acids exudation from the roots of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* seedlings under low phosphorus stress [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2007, 50(2): 9-12.
- [13] 吴佳, 涂书新. 植物根系分泌物对污染胁迫响应的研究进展 [J]. 核农学报, 2010, 24(6): 1320-1327.
- Wu J, Tu S X. Research progress on response of plant root exudates to pollution stress [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(6): 1320-1327.
- [14] 邵东华, 任琴, 宁心哲, 等. 油松和虎榛子不同林型根系分泌物组分及化感效应 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(2): 333-338.
- Shao D H, Ren Q, Ning X Z, et al. Root exudate constituents and allelopathic effects from forests of *Pinus tabulaeformis*, *Ostryopsis davidiana*, and a mixed forest [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2011, 28(2): 333-338.
- [15] 柴强, 冯福学. 玉米根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物的化感效应 [J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(5): 43-48.
- Chai Q, Feng F X. Identification of root exudation of *Zea mays* L. and allelopathy of 1,2-benzenedicarboxylic acid [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(5): 43-48.
- [16] 刘成, 马凤鸣, 吴蕾, 等. 重茬大豆根系分泌物的成分及化感作用研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 50(22): 11957-11959.
- Liu C, Ma F M, Wu L, et al. Research on the composition in the exudate from root system of continuous cropping soybean and its allelopathy [J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2010, 50(22): 11957-11959.
- [17] 张新慧, 郎多勇, 张恩和. 当归根际土壤水浸液的自毒作用研究及化感物质的鉴定 [J]. 中草药, 2010, 41(12): 2063-2066.
- Zhang X H, Lang D Y, Zhang E H. Autotoxicity of water extracts from rhizosphere soil of cultivated *Angelica sinensis* and identification of their allelopathic compounds [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2010, 41(12): 2063-2066.
- [18] 郇峰, 洪冲, 陈红歌, 等. 地黄根系分泌物生物活性研究及化感物质的鉴定 [J]. 江西农业学报, 2010, 22(3): 131-134.
- Gao F, Hong C, Chen H G, et al. Bioactivity of root exudates of *Rehmannia glutinosa* and identification of their allelopathic compounds [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(3): 131-134.
- [19] 胡元森, 李翠香, 杜国营, 等. 黄瓜根分泌物中化感物质的鉴定及其化感效应 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 954-957.
- Hu Y S, Li C X, Du G Y, et al. Identification of allelochemicals in cucumber root exudates and its allelopathy to radicle and *Fusarium oxysporum* [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 954-957.
- [20] 高欣欣. 烤烟根系分泌物成分鉴定与分析 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Gao X X. Identification and analysis of chemical compositions of root exudate from flue-cured tobacco [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [21] 王雪, 段玉玺, 陈立杰, 等. 大豆根系分泌物中氨基酸组分与抗大豆胞囊线虫的相关性研究 [J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 10(6): 677-681.
- Wang X, Duan Y X, Chen L J, et al. Correlation analysis of amino acids components in soybean cultivars root exudates and resistance to soybean cyst nematode [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 10(6): 677-681.
- [22] 潘凯, 吴凤芝. 枯萎病不同抗性黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 根系分泌物氨基酸组分与抗病的相关性 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1945-1950.
- Pan K, Wu F Z. Correlation analysis of amino acids components in cucumber root exudates and *Fusarium wilt* resistance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 1945-1950.