

烤烟根系分泌物中单糖的组分含量及其相关分析

杨顺强^{1,2}, 杨焕文^{1*}, 王 戈¹, 高兴国²

(1 云南农业大学 烟草学院, 昆明 650201; 2 昭通学院 化学与生命科学学院, 云南昭通 657000)

摘 要:以 4 个不同烤烟品种为研究材料, 采用盆栽试验, 运用高效毛细管区带电泳法测定各品种根际土、非根际土、根系及叶片中的单糖组分及含量, 并分析其相关关系, 探究根系分泌物中糖类的分泌特性。结果表明: 在各样品中, 共检出木糖、葡萄糖、半乳糖、核糖、阿拉伯糖和鼠李糖 6 种糖; 不同品种根际土、非根际土、根系及叶片中检出的糖组分及含量均存在差异; 同一品种中, 叶片最高, 根系次之, 根际土和非根际土最低; 相关性分析表明, 木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖总量在根际土、非根际土、叶片和根系间呈正相关关系, 各单糖组分间均呈正相关关系, 部分组分呈显著或极显著相关关系。研究表明, 不同烤烟品种根系分泌这些单糖存在品种差异, 且根系分泌单糖可能是一个沿浓度梯度的扩散过程。

关键词:烤烟; 根系分泌物; 高效毛细管电泳; 单糖

中图分类号: Q946.3

文献标志码: A

Correlation Analysis of Monosaccharide Composition and Contents in Flue-cured Tobacco Root Exudates

YANG Shunqiang^{1,2}, YANG Huanwen^{1*}, WANG Ge¹, GAO Xingguo²

(1 College of Tobacco, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2 College of Chemistry and Life Sciences, Zhaotong College, Zhaotong, Yunnan 657000, China)

Abstract: In order to explore the monosaccharide composition and contents in root exudates and plant tissue, four flue-cured tobacco varieties were used as the experimental material. The composition and contents of monosaccharide in rhizosphere, non-rhizosphere soils, root and leaves of each variety were analyzed with high performance capillary electrophoresis in pot experiment. Six monosaccharides analyzed in all of varieties, they were xylose, glucose, galactose, ribose, arabinose, and rhamnose. The composition and contents of monosaccharide were different in rhizosphere soils, non-rhizosphere soils, root and leaves. In the same variety, leaves have the highest content, root takes second place, and rhizosphere, non-rhizosphere soils are the least. The correlation analysis show that there was a positive correlation between rhizosphere soils, non-rhizosphere soils, leaves and roots in total contents of xylose, arabinose, glucose, rhamnose and galactose. There was also a significant positive correlation between different monosaccharide for some of them. The results indicated that monosaccharides of root were secreted along with concentration gradient and diffused into rhizosphere.

Key words: flue-cured tobacco; root exudates; high performance capillary electrophoresis; monosaccharide

根系分泌物是指根系在其生长过程中向土壤释放的渗出物、分泌物、植物黏液、胶质和裂解物等, 这

收稿日期: 2013-07-12; 修改稿收到日期: 2013-10-18

基金项目: 云南省红云红河烟草(集团)有限公司项目(KX140906)

作者简介: 杨顺强(1980—), 男, 讲师, 在读博士研究生, 主要从事植物生理生态学研究。E-mail: ysq6666@163.com

* 通信作者: 杨焕文, 教授, 主要从事烟草生理生化研究。

些物质对土壤的物理、化学和生物学性状具有直接或间接的影响^[1-2]。胡学玉等^[3]研究表明,缺锌条件下,五月慢根系分泌较多的有机酸和氨基酸,对土壤中锌的活化起到了一定的作用;Gu等^[4]研究发现,在苹果园的前茬种植小麦,其根系分泌物促进了土壤中荧光假单胞菌的生长,从而抑制了后茬苹果病虫害发生的几率;Sood^[5]研究认为,根系分泌物中大量存在的柠檬酸和苹果酸对假单胞菌具有很大的促进作用,而固氮菌对根系分泌物中的糖类和氨基酸很敏感,而对有机酸不敏感。低分子量的糖类是根系分泌的主要有机化合物之一,目前有葡萄糖、果糖、半乳糖、蔗糖等 10 余种低分子量糖在根系分泌物中被发现^[6-8]。感病品种根系分泌物中的葡萄糖、果糖和蔗糖含量高于抗病品种^[9-10]。上述研究多偏重于根系分泌物的组分及作用,针对根系分泌物中单糖的组分及含量与其植物组织中的相关性研究还鲜有报道。为此,本试验以 4 个烤烟品种为研究材料,运用高效毛细管区带电泳法分析测定了其根际土、非根际土、叶片和根系中的单糖组分及含量,并分析其相关性,探究根系分泌物中糖类的分泌特性。

1 材料和方法

1.1 材料培植

选用‘云烟 87’、‘K326’、‘NC102’和‘红花大金元’4 个烤烟品种为试材,分别编号为 I、II、III、IV。2012 年 2 月 24 日采用漂浮育苗法育苗,4 月 30 日移栽时, I、II、III 和 IV 的叶片数分别为 8、7、7、7。盆栽塑料盆上口直径 43 cm,下口直径 30 cm,高 35 cm。盆栽用土取自云南农业大学后山试验场未种植过烤烟的耕层土。 $m_{\text{土}}:m_{\text{砂}}=5:1$ (重量比),混匀,装盆,每盆装土 25 kg,盆栽土壤类型为红壤土,有机质 61.60 g/kg、pH 值 6.54、碱解氮 67.47 mg/kg、有效磷 30.84 mg/kg、速效钾 269.30 mg/kg。每盆 1 株,每品种移栽 30 盆。采用烟草专用复混肥料($N-P_2O_5-K_2O=12-10-24$),一次性底肥,每盆施 8 g 纯氮。移栽后采用相同的管理方法。

1.2 取样方法及处理

参照郭景恒、张辉等^[11-12]的方法。2012 年 6 月 23 日取样,各品种均处于旺长期,每品种选取生长一致的 3 株取混合样。取从下往上的第 10~13 片叶作为叶片样;小心将烟株从盆内取出,尽量避免伤根,轻轻抖落根系外围土壤作为非根际土,收集紧密附着于根系上的土壤作为根际土;在室内用镊子挑出根系、碎石等杂质,分别得非根际土样和根际土

样;将根系用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗 3 遍,剪取直径小于 1 mm 的须根作为根样。将叶片样和根样装袋,105 °C 杀青 20 min,65 °C 烘干至恒重,粉碎,过 40 目筛,备用;将根际土样和非根际土样风干至恒重,过 40 目筛,备用。

叶片样和根样各称取 0.200 0 g,分别放入 5 mL 离心管中,加入 4 mL 重蒸水,超声提取 30 min 后,12 000 r/min,5 °C 离心 15 min,上清液在 50 °C 下减压浓缩至干,用 1 mL 重蒸水分 3 次冲洗,合并得植物组织提取液,于-20 °C 下冷冻保存,备用;分别称取根际土和非根际土 10.000 0 g,放入 50 mL 离心管中,加入 40 mL 重蒸水,其他步骤同上,得根系分泌物提取液。各重复 3 次。

1.3 标准品及样品的衍生

参照杨兴斌、张斌等^[13-14]的方法。取葡萄糖、阿拉伯糖、核糖、半乳糖、木糖和鼠李糖用重蒸水配成 1 000、500、250、100、50、10、5 和 0 $\mu\text{g/mL}$ 的混合标准溶液,分别取混合标准溶液和样品提取液 200 μL ,依次加入 0.5 mol/L 的 PMP 甲醇溶液 100 μL ,0.3 mol/L 的 NaOH 溶液 100 μL ,摇匀,70 °C 水浴 30 min,冷却,加 0.3 mol/L 的 HCl 溶液 100 μL ,摇匀,中和 NaOH 后,加入 1 mL 氯仿萃取 3 次,过 0.45 μm 微孔滤膜,上机测定。

1.4 单糖种类及含量的测定

采用高效毛细管区带电泳法,根据样品和标样的迁移时间进行定性分析,采用外标法进行定量分析^[15]。毛细管:总长度 48.5 cm,有效柱长为 39.0 cm,内径为 75 μm ;硼砂缓冲液:50 mmol/L, pH 10.80;温度:20 °C;电压:10 Kv;进样方式:50 mbar 压力自动进样 5 s,检测波长为 245 nm。每次进样前,依次用 0.1 mol/L NaOH 溶液、重蒸水、硼砂缓冲液冲洗毛细管柱 3 min。根据混合标准溶液的图谱,以质量浓度对峰面积制作标准曲线得各单糖的标准曲线。

木糖: $y=1\,020.8x-6\,441.5, R^2=0.998\,5$

阿拉伯糖: $y=1\,147.9x-3\,447.2, R^2=0.999\,2$

核糖: $y=1\,147.9x-3\,447.2, R^2=0.999\,2$

葡萄糖: $y=416.15x-2\,543.1, R^2=0.997\,1$

鼠李糖: $y=821.91x+1\,092.4, R^2=0.996\,9$

半乳糖: $y=821.91x+1\,092.4, R^2=0.996\,9$

1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行数据分析,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 样品中各糖组分的分离测定

在优化条件下,对各烤烟品种的根际土、非根际土、根系和叶片样衍生后上机检测,在 21 min 内共检出木糖、阿拉伯糖、核糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖 6 种单糖,获得了基线稳定,无拖尾,灵敏度高的理想图谱,典型图谱(品种 II)如图 1。在根系和叶片样品图谱中出现了一些杂峰,这是由于根系和叶片中含有其他糖类等物质所致,这些物质的存在对目标成分的分离测定影响不大,此方法可以用来分析测定这些糖类。

2.2 各烤烟品种中糖组分及含量比较

在全部样品中,共检出了木糖、阿拉伯糖、核糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖,但检出的糖组分和含量因烤烟品种和样品的不同而存在差异(表 1)。在 4 个烤烟品种的根际土、非根际土、根系和叶片中均检出了阿拉伯糖、葡萄糖和半乳糖;非根际土中,品种 IV 未检出木糖;在根系中,品种 I、II 未检出鼠李糖;核糖仅在品种 II、IV 的叶片中检出。

检出的各糖在不同品种或样品中的含量差异大都显著或极显著($P < 0.05$, $P < 0.01$)。根际土中,葡萄糖和半乳糖含量大都较高,阿拉伯糖含量较低,最高的品种 I 中仅为 $0.868 \mu\text{g/g}$;非根际土中,葡萄糖含量最高,鼠李糖含量最低;根系和叶片中,葡萄糖含量最高,品种 III 叶片中高达 $72\ 632.480 \mu\text{g/g}$ 。各品种检出的所有糖中,除了品种 I 和 IV 中的阿拉伯糖外(根系中含量高于叶片),均是叶片最高,根系次之,根际土和非根际土最低,且叶片或根系含量较高的糖组分,其根际土和非根际土中含量也相对较高;各品种检出的所有糖中,根际土和非根际土中的含量差异均不显著,其他的含量差异均达显著或极显著水平。

2.3 不同部位间糖含量的相关性分析

将各烤烟品种根际土、非根际土、根系和叶片中所检出的木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖的总量进行相关性分析,结果表明:仅品种 I、II 的根际土和根系间呈弱负相关性,相关系数分别为 -0.023 、 -0.002 ;其余均呈正相关性,且相关系数较大,相关性较高。4 个品种的根系与叶片、叶片与

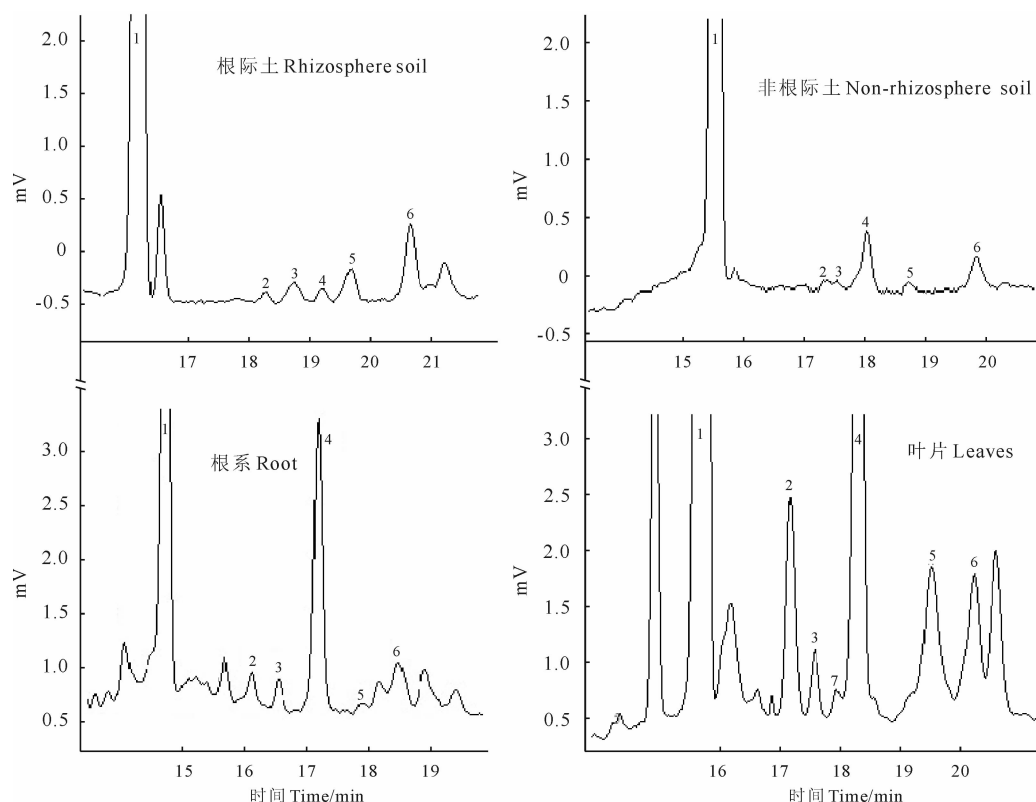


图 1 烤烟品种 K326 样品中糖类的毛细管电泳图谱

1. PMP; 2. 木糖; 3. 阿拉伯糖; 4. 葡萄糖; 5. 鼠李糖; 6. 半乳糖; 7. 核糖

Fig. 1 HPCE electrophoretogram of mixed standard solution and sample in K326

1. PMP; 2. Xylose; 3. Arabinose; 4. Glucose; 5. Rhamnose; 6. Galactose; 7. Ribose

表 1 不同烤烟品种间糖组分及含量

Table 1 Sugar composition and content in different flue-cured tobacco varieties

糖 Sugar/(μg/g)	品种 Variety	部位 Position			
		根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Non-rhizosphere soil	根系 Root	叶片 Leaf
木糖 Xylose	I	1.504cC/cC	1.661cC/aA	1 097.500bB/aA	2 449.542aA/bB
	II	1.372cC/dD	1.640cC/aA	1 052.125bB/bAB	3 052.500aA/aA
	III	1.725cC/aA	1.400cC/bB	1 011.250bB/cB	1 575.583aA/cC
	IV	1.604cC/bB	—	883.625bB/dC	1 131.4167aA/dD
阿拉伯糖 Arabinose	I	0.868cC/aA	0.680cC/aA	778.750aA/aA	665.417bB/cC
	II	0.734cC/bB	0.659cC/aA	577.717bB/dD	890.250aA/bB
	III	0.676cC/cC	0.604cC/bB	682.470bB/bB	1 046.083aA/aA
	IV	0.653cC/cC	0.607cC/bB	635.750aA/cC	511.695bB/dD
核糖 Ribose	I	—	—	—	—
	II	—	—	—	62.042bB
	III	—	—	—	—
	IV	—	—	—	391.958aA
葡萄糖 Glucose	I	2.033cC/dD	3.881cC/bB	23 093.451bB/aA	70 648.958aA/Bb
	II	2.163cC/cC	3.655cC/cC	8 238.727bB/dD	31 436.417aA/dD
	III	3.291cC/aA	3.913cC/aAB	10 872.305bB/cC	72 632.480aA/aA
	IV	2.307cC/bB	3.930cC/aA	16 016.114bB/bB	49 381.4167aA/cC
鼠李糖 Rhamnose	I	1.395bB/aA	0.495bB/bB	—	3 472.792aA/bB
	II	0.778bB/cC	0.443bB/cC	—	3 644.792aA/aA
	III	0.531cC/dD	0.556cC/aA	55.542bB/aA	3 462.417aA/bB
	IV	1.219bB/bB	0.365bB/dD	15.958bB/bB	746.083aA/cC
半乳糖 Galactose	I	3.688cC/cC	2.129cC/bB	192.208bB/aA	3 795.542aA/aA
	II	3.835cC/bB	1.140cC/cC	150.563bB/bAB	3 143.792aA/dD
	III	5.185cC/aA	2.588cC/aA	114.750bB/bB	3 290.375aA/cC
	IV	1.176cC/dD	2.149cC/bB	141.625bB/bB	3 550.542aA/bB

注: I~IV. 烤烟品种编号: I. ‘云烟 87’; II. ‘K326’; III. ‘NC102’; IV. ‘红花大金元’; 小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$); “/”前的字母表示部位间的差异性, “/”后的字母表示品种间的差异性。下同。

Note: I~IV. Varieties No.: I. ‘Yunyan 87’; II. ‘K326’; III. ‘NC102’; IV. ‘Honghua dajinyuan’; Lowercases express at $P<0.05$; Capital letters express at $P<0.01$; Letters in front of “/” express the diversity of different sites; Letters behind “/” express the diversity of different varieties. The same as below.

非根际土间的相关性均达显著或极显著水平;品种 IV 的根际土与叶片、根系间的相关系数分别为 0.837、0.839,达显著水平(表 2)。表明烤烟根系分泌物中的这些糖与其植物组织中的含量呈现正相关性。

2.4 糖组分间的相关性分析

对各烤烟品种中检出的木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、鼠李糖和半乳糖进行相关性分析结果(表 3)表明,4 个品种的各糖组分间均呈正相关关系,部分糖组分间达显著或极显著相关关系。其中,鼠李糖与半乳糖在 4 个品种中均显著相关,相关系数均为 1.00;达极显著相关的还有品种 I 中的葡萄糖与木糖、半乳糖,相关系数数分别为 0.99、0.96;品种 II 中葡萄糖与木糖、鼠李糖、半乳糖,相关系数分别为

1.00、0.97、0.98;品种 III 中木糖与阿拉伯糖,葡萄糖与鼠李糖、半乳糖,相关系数分别为 1.00、0.99、0.99。

3 讨 论

目前,植物根系分泌物的分泌机制还不十分清楚。植物根系分泌物的产生和释放是植物在环境胁迫压力下形成的,是植物在进化过程中产生的一种对环境的适应性机制,是一种被动过程^[16];根系分泌物中低分子量糖类分泌可能是沿电化学梯度的扩散过程,最后发生渗漏,属于被动释放^[17]。本研究中,4 个烤烟品种所检出的糖含量,除品种 I 和 IV 中的阿拉伯糖外(根系中含量高于叶片),均是叶片最高,根系次之,根际土和非根际土最低,在叶片和根

系中含量较高的糖组分其对应根际土和非根际土中
含量也相对较高。对木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、鼠李
糖和半乳糖的总量在根际土、非根际土、根系和叶片
中的相关分析表明,根际土和非根际土中的糖含量

与其根系和叶片中的含量呈正相关性,表明各烤烟
品种根系分泌单糖可能是一个沿浓度梯度的扩散
过程。
植物初生代谢产生的糖类等物质为植物生长、

表 2 不同部位间糖含量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of sugar content in different positions

品种 Variety	部位 Position	根际土 Rhizosphere soil	非根际土 Non-rhizosphere soil	根系 Root	叶片 Leaf
I	根际土 Rhizosphere soil	1	0.464	−0.023	0.098
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.464	1	0.885	0.875 *
	根系 Roots	−0.023	0.885	1	0.998 * *
	叶片 Leaves	0.098	0.875 *	0.998 * *	1
II	根际土 Rhizosphere soil	1	0.297	0.002	0.193
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.297	1	0.964 *	0.936 * *
	根系 Roots	−0.002	0.964 *	1	0.993 * *
	叶片 Leaves	0.193	0.936 * *	0.993 * *	1
III	根际土 Rhizosphere soil	1	0.777	0.261	0.301
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.777	1	0.807 *	0.825 *
	根系 Roots	0.261	0.807 *	1	0.993 * *
	叶片 Leaves	0.301	0.825 *	0.993 * *	1
IV	根际土 Rhizosphere soil	1	0.873	0.837 *	0.839 *
	非根际土 Non-rhizosphere soil	0.873	1	0.874	0.903 *
	根系 Roots	0.837 *	0.874	1	0.996 * *
	叶片 Leaves	0.839 *	0.903 *	0.996 * *	1

注: * *, 在 0.01 水平上显著相关; * . 在 0.05 水平上显著相关;下同。
Note: * *, Significant correlation at 0.01 level; * . Significant correlation at 0.05 level; The same as below.

表 3 糖组分间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of sugar composition

品种 Variety	糖类 Sugar	木糖 Xylose	阿拉伯糖 Arabinose	葡萄糖 Glucose	鼠李糖 Rhamnose	半乳糖 Galactose
I	木糖 Xylose	1	0.82	0.99 * *	0.90 *	0.92 *
	阿拉伯糖 Arabinose	0.82	1	0.74	0.48	0.52
	葡萄糖 Glucose	0.99 * *	0.74	1	0.94 *	0.96 * *
	鼠李糖 Rhamnose	0.90 *	0.48	0.94 *	1	1.00 * *
	半乳糖 Galactose	0.92 *	0.52	0.96 * *	1.00 * *	1
II	木糖 Xylose	1	0.95 *	1.00 * *	0.94 *	0.95 *
	阿拉伯糖 Arabinose	0.95 *	1	0.92 *	0.79	0.82
	葡萄糖 Glucose	1.00 * *	0.92 *	1	0.97 * *	0.98 * *
	鼠李糖 Rhamnose	0.94 *	0.79	0.97 * *	1	1.00 * *
	半乳糖 Galactose	0.95 *	0.82	0.98 * *	1.00 * *	1
III	木糖 Xylose	1	1.00 * *	0.87	0.8	0.81
	阿拉伯糖 Arabinose	1.00 * *	1	0.87	0.8	0.81
	葡萄糖 Glucose	0.87	0.87	1	0.99 * *	0.99 * *
	鼠李糖 Rhamnose	0.8	0.8	0.99 * *	1	1.00 * *
	半乳糖 Galactose	0.81	0.81	0.99 * *	1.00 * *	1
IV	木糖 Xylose	1	0.95 *	0.90 *	0.72	0.73
	阿拉伯糖 Arabinose	0.95 *	1	0.71	0.46	0.48
	葡萄糖 Glucose	0.90 *	0.71	1	0.95 *	0.96 *
	鼠李糖 Rhamnose	0.72	0.46	0.95 *	1	1.00 * *
	半乳糖 Galactose	0.73	0.48	0.96 *	1.00 * *	1

发育和繁殖提供物质、能量及信息,部分物质在代谢过程中以根系分泌物的形式释放至根际,其释放强度与根的生长能力、根际微生态环境有关^[18-21]。本研究中4个烤烟品种所检出的糖组分及含量因品种不同而存在差异,对木糖、阿拉伯糖、葡萄糖、鼠李糖

和半乳糖含量进行相关分析表明,各糖组分间均呈正相关关系,部分糖组分间相关性达到显著或极显著水平。表明不同烤烟品种根系分泌物单糖的组分及含量因品种不同而存在差异。

参考文献:

- [1] LIN W X(林文雄), HE H B(何海斌), XIONG J(熊 君), *et al.* Advances in the investigation of rice allelopathy and its molecular ecology [J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(8): 2 687—2 694(in Chinese).
- [2] AROVIRA A D. Note on terminology: orlmaterials in the rhizosphere[A]//HARLEY J L. The Soil-Root Interface. London: Academic Press, 1979: 1—4.
- [3] HU X Y(胡学玉), LI X Y(李学垣), XIE ZH CH(谢振翅). Differences of Zn uptake in various pakchoi cultivars and relationship between Zn uptake and root exudates[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2002, **8**(2): 234—238(in Chinese).
- [4] GU Y H, MAZZOLA M. Modification of fluorescent pseudomonad community and control of apple replant disease induced in a wheat cuhivar-specific manner[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, **24**(1): 57—72.
- [5] SOOD S G. Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2003, **45**: 219—227.
- [6] MU J M(牟金明), LI W H(李万辉), ZHANG F X(张凤霞), *et al.* Root exudates and their function[J]. *Journal of Jilin Agricultural University* (吉林农业大学学报), 1996, **18**(4): 114—118(in Chinese).
- [7] LIU S P(刘素萍), WANG R X(王汝贤), ZHANG R(张 荣), *et al.* Effects of sugar and amino acid in root exudation of different resistant cotton cultivars on cotton fusarium wilt pathogen[J]. *Acta Univ. Agric. Boreali-Occidentalis* (西北农业大学学报), 1998, **26**(6): 30—35(in Chinese).
- [8] FU H J(付慧娟), LIU F(刘 方), LI SH H(黎绍惠), *et al.* Screening of verticillium wilt resistance on *Gossypium hirsutum* races and their root exudate effects on the wilt pathogen[J]. *Cotton Science* (棉花学报), 2011, **23**(5): 387—393(in Chinese).
- [9] HAO W Y(郝文雅), SHEN Q R(沈其荣), RAN W(冉 炜), *et al.* The effects of sugars and amino acids in watermelon and rice root exudates on the growth of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum*[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2011, **34**(3): 77—82(in Chinese).
- [10] WU F Z, XUE H, ZHENG W X. Allelopathic effect of root exudates of cucumber cultivars on *Fusarium oxysporum*[J]. *Allelopathy Journal*, 2006, **18**(1): 163—172.
- [11] GUO J H(郭景恒), PIAO H CH(朴河春), ZHANG X SH(张晓山), *et al.* Effects of ecosystem alternation on soil carbohydrates[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(8): 1 367—1 370(in Chinese).
- [12] ZHANG H(张 辉), HUANG P(黄 鹏), CHAI Q(柴 强), *et al.* Biological effects of root exudates and typical exudates in wheat under different water condition[J]. *Journal of Gansu Agricultural University* (甘肃农业大学学报), 2010, **45**(1): 52—57(in Chinese).
- [13] YANG X B(杨兴斌), ZHAO Y(赵 燕), ZHOU S Y(周四元), *et al.* Analysis of monosaccharide composition in angelica polysaccharides by precolumn derivatization high performance liquid chromatography[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* (分析化学), 2005, **33**(9): 1 287—1 290(in Chinese).
- [14] 张 斌. 板蓝根多糖提取、降解及毛细管区带电泳的单糖测定[D]. 河北保定: 河北大学, 2010.
- [15] WANG H B(王海波), CHEN X S(陈学森), XIN P G(辛培刚), *et al.* Study on sugar and acid constituents in several early apple cultivars and evaluation of their flavor quality[J]. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2007, **24**(4): 513—516(in Chinese).
- [16] WU F ZH(吴凤芝), ZHAO F Y(赵凤艳). Study on root exudates and continues cropping obstacle[J]. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2003, **34**(1): 114—118(in Chinese).
- [17] JONES D L, PETER R D. Role of root drived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere[J]. *Plant Soil*, 1995, **166**: 247—257.
- [18] DU Y J(杜英君), JIN Y H(靳月华). Simulations of allelopathy in continuous cropping of soybean[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1999, **10**(2): 209—212(in Chinese).
- [19] GAO Z Q(高子勤), ZHANG SH X(张淑香). Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology I. Root exudates and their ecological effects[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(5): 549—554(in Chinese).
- [20] LIU H SH(刘洪升), SONG Q H(宋秋华), LI F M(李凤民). The roles of root exudation on rhizosphere nutrient and rhizosphere microorganisms[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2002, **22**(3): 693—702(in Chinese).
- [21] WANG X(王 雪), DUAN Y X(段玉玺), CHEN L J(陈立杰), *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* (沈阳农业大学学报), 2008, **36**(9): 677—681(in Chinese).