

# 植物根系分泌物研究方法评述

涂书新, 吴佳\*

华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070

**摘要:**根系分泌物是植物与土壤微环境进行物质、能量和信息交流的重要媒介,对根系分泌物数量、种类的研究是植物营养、化感作用、环境修复等研究领域的重要内容。目前,根系分泌物研究中应用的收集方法主要有溶液培收集、土培收集、基质培收集和连续性根系分泌物收集系统等;分离纯化方法主要有树脂法、衍生化与萃取法、层析法和分子膜与超速离心法;检测方法有生物活性测定方法和仪器分析方法。文章结合实例综合论述了这些根系分泌物收集、分离纯化以及测定的方法,为研究者找到合适的根系分泌物研究方法提供参考。

**关键词:**根系分泌物;收集;分离纯化;检测;研究进展

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 09-2493-08

在植物生长发育过程中,根系不仅是吸收和代谢器官,从生长介质中摄取养分和水分,而且是强大的分泌器官,向生长介质中溢泌或分泌质子、离子和大量的有机物质<sup>[1]</sup>,即根系分泌物(root exudates)。根系分泌物在土壤结构形成、土壤养分活化、植物养分吸收、环境胁迫缓解等方面都具有重要作用<sup>[2-4]</sup>,对根系分泌物的研究是植物营养、化感作用、生物污染胁迫、环境污染修复等研究领域的重要内容,受到国内外学者的普遍关注。但是,由于土壤中微生物对根系分泌物的吸收、利用以及根系分泌物本身组分复杂、含量低,种类和数量随植物类型、根际环境而异<sup>[5]</sup>等特点,使得根系分泌物难以有效提取。

目前开展的研究中,根系分泌物的收集、分离纯化和鉴定的手段多样,缺乏权威、统一、有效的方法,是根系分泌物研究中的一个国际性难题,制约着相关研究领域的深入发展。本文将现阶段根系分泌物研究中应用较多的收集、分离和鉴定手段进行了介绍和评价,希望有助于找到高效、可信、可行的根系分泌物研究方法和技术,供相关研究者参考。

## 1 根系分泌物的收集方法

### 1.1 间歇性(阶段性)根系分泌物的收集

对于根系分泌物收集方法还没有系统划分。根据是否在原位条件下进行可分为原位收集和扰动收集;根据是否在灭菌条件下进行又可分为无菌体系收集和开放体系收集;根据是否动态收集分为实时动态收集和静态收集。还有根据植株根系所在的培养系统,将根系分泌物收集方法分为溶液培收集、土培收集和基质培(蛭石培、砂培、琼脂培等)

收集等,本文围绕这一分类方法进行评述。

#### 1.1.1 溶液培收集法

溶液培收集法是根系分泌物收集常用的方法<sup>[6]</sup>。根据溶液中不同元素组分,又可将溶液培收集分为简单溶液收集和特定营养液收集。简单溶液收集根系分泌物是指将植株苗经过胁迫处理后,用无菌蒸馏水清洗,再放入预先加入微生物抑制剂的溶液中,使之生长一段时间,然后将植株移走,收集其培养液,过滤,确定根系释放物质,即为所收集的根系分泌物<sup>[7]</sup>。胡学玉等<sup>[8]</sup>在研究不同青菜(*Brassica chinensis* L.)品种吸锌能力差异及与根系分泌物的关系时,就是用简单溶液收集法对青菜根系分泌物进行收集,他们先将植株分别在加 Zn(+Zn)和不加 Zn(-Zn)的完全营养液中培养 5 周,然后转移至 500 mL 去离子水中,培养 48 h,进行根系分泌物的收集;Tu 等<sup>[9]</sup>在对砷超级累积植物和敏感植物的根系分泌物进行对比研究时,也是利用简单溶液收集法收集根系分泌物。他们将植物水培 2 周,转移到不同砷浓度的 50% Hoagland 营养液中培养 2 d 后,移至 800 mL 灭菌的去离子水中收集根系分泌物 6 h。特定营养液收集是指将植株苗放置在缺乏或过量特定元素的完全营养液生长一段时间后,收集其营养液,即为所收集的根系分泌物<sup>[10-11]</sup>。李勇等<sup>[12]</sup>在研究营养元素亏缺对人参(*Panax ginseng* C. A.)根分泌物主成分的影响时,就用不同处理的营养液对人参进行培养,最后收集第 3 次换下的营养液作为根系分泌物溶液,进行后续处理。在特定营养液收集时,一方面部分养分离子很可能会与根系分泌物中的部分成分发生化学反应,另一方面,由于

基金项目:农业部“十一五”农业公益性行业科研专项(200803034);国家自然科学基金项目(41071309);国家 863 项目(2007AA06Z332)

作者简介:涂书新(1962年生),男,教授,博士,主要从事环境污染与修复研究。E-mail: stu@mail.hzau.edu.cn

\*通讯作者。E-mail: wujia2008@webmail.hzau.edu.cn

收稿日期:2010-09-04

营养液中盐分含量很高,需要脱盐,而常规的脱盐方法繁琐,且容易影响实验效果。有研究发现,霍格兰营养液中含有的大量  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  等金属阳离子对根系分泌物中氨基酸类 N 素物质的收集有很大影响:用 2 mL 营养液过柱后,其中的  $Ca^{2+}$  被树脂 100% 离子交换;用营养液湿法装柱比用蒸馏水湿法装柱最大离子交换氨基酸的量减少 43%<sup>[13]</sup>。

总体而言,溶液培收集法操作简单、方便,能反映整个根系一些根系分泌物(有机酸)的变化状况<sup>[14]</sup>。但是,溶液培收集法的最大问题是没有能够严格控制无菌条件。虽然可以添加微生物抑制剂来抑制微生物的活动,但添加的化学试剂是否对植物根系产生影响及影响根系分泌物的测定是值得商榷的问题。通常的做法是要求根系分泌物收集尽量避免微生物的影响,方法是采用尽量好的无菌条件和有效的缩短收集时间,一般要求控制在 6 h 以内<sup>[10]</sup>。另外,该法收集时间较长,得到的根系分泌物成分多,种类复杂,很难对特定未知的分泌物进行分离鉴定。而且,溶液培养和真实生长环境有较大的差异,溶液培收集法是否能真实反映植株在土壤中的分泌情况还需进一步考证。

#### 1.1.2 基质培收集法

基质培收集和土培收集基本类似,只是植物的生长介质不同。基质培收集根系分泌物常用的基质有石英砂、琼脂、蛭石和人造营养土等。

石英砂培收集方法是在实验处理下将植株在石英砂中进行培养一段时间后,然后用蒸馏水或是有机溶剂短时间浸泡石英砂,收集其浸泡液,再浓缩过滤即为根系分泌物。石英砂本身不含植物生长所需的有效成分,而且惰性较强不易与根系分泌物各组分进行化学反应,因此常被用于根系分泌物的研究中。王紫娟等<sup>[23]</sup>在研究紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum* Spreng.) 幼苗不同收集时间段的自然根系分泌物对旱稻幼苗的根长、苗长和根鲜质量的化感效应时,就是将发芽生长 10 d 后的紫茎泽兰幼苗分别种植在盛有 70 g 石英细砂、30 mL 10% 的 Hoagland 营养液的玻璃瓶中收集根系分泌物。张汝民等<sup>[24]</sup>用石英砂培养梭梭(*Haloxylon ammodendron* L.) 幼苗,在培养结束后,用 500 mL 蒸馏水浸泡石英砂 24 h,浸提离心,然后再用乙酸乙酯萃取其酸性、碱性和中性成分,测定根系分泌物成分。在砂培条件下,植物的通气状况较好,有利于植物根的生长,其根系分泌物量比水培的多<sup>[17]</sup>。但是,操作过程中的洗砂和淘砂比较麻烦,像是在实验前一般需要将石英砂用盐酸浸泡,之后用自来水冲洗至中性,然后用蒸馏水淘洗数次<sup>[18]</sup>。另外,在培养过程

中,石英砂表明容易生长青苔,对整个培育系统造成污染<sup>[19]</sup>。

琼脂培收集方法是将植株幼苗置于琼脂介质中,生长一段时间后,收集根系周围以及附着在根系上的琼脂,加热溶解,过滤,收集其过滤液即为根系分泌物。周艳丽<sup>[17]</sup>在研究大蒜(*Allium sativum* L.) 根系分泌物时,将蒜瓣播入装有琼脂培养基的塑料瓶中,培养结束后,通过用蒸馏水浸提琼脂,过滤得到根系分泌物。琼脂收集法操作简单,但是在培养过程中要注意防止微生物污染。

除了石英砂和琼脂外,也有研究应用蛭石或人造营养土作为基质。甄文超等<sup>[20]</sup>将生根草莓(*Fragaria ananassa* Duchesne.) 幼苗定植于蛭石中,培养 60 d 后,用蒸馏水浸提蛭石,取上清液浓缩、过滤,即为根系分泌物。利用蛭石或人造营养土栽培植物的效果也不错,但是作为根系分泌物收集试验中的基质实际应用不广,主要是由于这类基质易附着于根系表面,难于洗脱。

#### 1.1.3 土培收集法

土培收集根系分泌物比溶液培收集麻烦,传统的方法是将植物种植于土壤中,生长一段时间后直接获取根际土壤,将其与无菌水按一定比例混合、振荡、离心或过滤,所得滤液即为根系分泌物<sup>[21]</sup>。或将生长在特定土壤基质一段时间后的植株根系直接用蒸馏水淋洗,所得根系淋洗液即为根系分泌物,这种方法也称为根系淋洗法。Xu 等<sup>[22]</sup>采用根袋土培实验研究在土壤不同锌污染浓度下的根系分泌物情况时,用 200 mL 去离子水溶解粘附在根上的根际土,然后振荡、离心,取上清液作为根系分泌物。土培接近于植物自然生长状态下的实际状况,相比于溶液培收集法,这种方法最大的优点是更能反映植株在土壤中的实际分泌情况,而且由于土壤存在机械阻力,根系分泌作用比较旺盛,土培条件下单位植株干重产生根系分泌物的量要高于溶液培收集的根系分泌物的量。另外,该法能反映整个根系的分泌状况,但不能反映根系具体部位的分泌特征,所获得的分泌物成分复杂,不便于比较研究。而且由于分泌物易受微生物的分解,此方法所得结果受土壤微生物影响明显<sup>[23]</sup>。另外,根系淋洗法是将根系挖出后淋洗,根系已受损伤,收集的根系分泌物中更多的是根系本身的内含物和伤流液。

也有一些学者改变土培收集根系分泌物的传统方法,将离子膜、纤维素薄膜或是层析滤纸置于根系表面,一段时间后进行回收,用浸提液(如甲醇、酒精)对离子膜、纤维素薄膜或是层析滤纸多次浸提

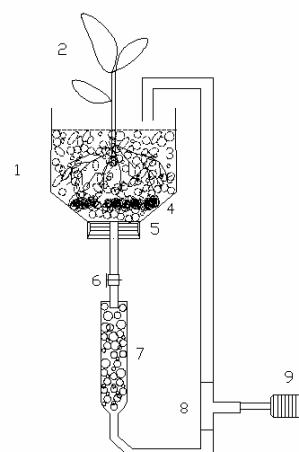
得到根系分泌物。如,田中民等<sup>[14]</sup>在白羽扇豆(*Lupinus albus* Linn.)缺磷培养的第17 d,用滤纸片原位收集法分别收集根尖和排根组织分泌的有机酸,同时切取相应的根尖(1 cm)和排根组织(0.5 cm)各0.1 g分析根组织、木质部伤流液和韧皮部汁液中有机的种类和数量。结果发现,滤纸片原位收集法所反映的有机酸分泌状况与相应根组织以及木质部伤流液中有机的种类和变化趋势基本一致,能准确反映白羽扇豆不同根段分泌有机酸的真实情况。这种原位收集法收集时间短,污染环节少,而且可以做局部收集反映根系各个部位的分泌状况,但还是扰动了根系原有的生长状态,可能会对根系的分泌活动产生影响。

同位素示踪法是利用放射性核素或稀有稳定核素作为示踪剂对研究对象进行标记的微量分析方法,在工业、农业、生命科学、资源勘探、环境保护、公众安全、国防与科学研究等领域都有应用<sup>[24-25]</sup>。如,已有不少研究者在将<sup>14</sup>C示踪法应用在植物根系分泌物的研究中。陈俊伟等<sup>[26]</sup>利用<sup>14</sup>C示踪法研究杉木根系分泌物,克服了杉木根系分泌物数量少的困难,发现杉木根系分泌物主要来源于光合产物,以有机小分子物质为主,其中以糖类为最多,其次是有机酸,而氨基酸含量最少。涂书新等<sup>[27]</sup>应用<sup>14</sup>C同位素示踪技术研究了籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)品种根系分泌物的动态、构成以及对含钾矿物钾素释放的作用。左元梅等<sup>[28]</sup>将<sup>14</sup>C示踪技术应用到对间作条件下玉米(*Zea mays* L.)根系分泌物改善花生铁营养的研究中。利用放射性同位素作为示踪剂具有灵敏度高,测量方法简单易行,能够准确定量、定位以及符合研究对象生理条件等优点,但是存在试验设备复杂和费用昂贵等不足。

## 1.2 连续性根系分泌物收集系统

除上述方法外,目前一些研究者<sup>[29-30]</sup>自行设计了连续性根系分泌物收集系统(图1),并在实践中取得了不错的效果。

连续性根系分泌物收集系统的工作原理一般就是将植物移栽到底部连接到根系分泌物收集器的培养容器中,培养过程中,植物的培养液在向下渗流的过程中将根系分泌物先下淋洗,使根系分泌物在收集器中被不断富集,而培养液则又循环到培养容器中。一般使用选择性吸附树脂柱收集根系分泌物,在收集完成后,再用合适的洗脱剂将根系分泌物洗脱下来。孔垂华等<sup>[31]</sup>采用连续性根系分泌物收集系统收集典型的水稻(*Oryza sativa* L.)化感品种PI312777幼苗的根系分泌物,然后用蒸馏水



1 栽培容器; 2 供试植物; 3 石英砂或粗砂子; 4 玻璃棉; 5 橡皮塞; 6 阀门; 7 树脂柱; 8 “T”型玻璃接口; 9 空气压缩机。

图1 连续性根系分泌物收集系统<sup>[29-30]</sup>

Fig.1 The continual collection system of root exudates

和甲醇淋洗得到根系分泌物,并用液相色谱/质谱(LC/MS)联用技术鉴定根分泌物中的非酚酸类物质,发现羟基脲酸、环己烯酮、黄酮和二萜内酯4类非酚酸类物质是水稻的主要化感物质,这与近期愈来愈多的研究结果一致,说明连续性根系分泌物收集系统能有效收集根系分泌物。张汝民等<sup>[16]</sup>在研究梭梭根系分泌物中化学成分时,对比了水浸提取和循环灌溉2种方法收集根系分泌物的效果,发现与循环灌溉收集的梭梭幼苗根系分泌物中能检测到35种化合物相比,水浸提取的根系分泌物在种类上较少,而且一些组分的数量也有减少,他们认为循环灌溉法更能够较真实地反映活体植物根系的代谢产物。王英等<sup>[32]</sup>在研究伊贝母(*Fritillaria pallidiflora* Schrenk.)根系分泌物自毒作用时,用连续性根系分泌物收集系统也成功收集到了伊贝母的根系分泌物。连续性根系分泌物收集系统能够在现实栽培中,对根系不造成伤害的情况下,实时、连续、准确地收集根系分泌物。但是在利用连续性根系分泌物收集系统收集根系分泌物时,需要注意防止培养容器、连续装置各部件被细菌污染,同时要注意控制培养液的量,培养液太多会导致植物根系处于无氧状态,不利于生长,太少则会影响循环系统的正常工作。另外,在收集根系分泌物时要控制培养液循环的流速,保证根系分泌物能够被充分收集<sup>[13]</sup>。

## 2 根系分泌物的分离、纯化方法

根系分泌物成分复杂,直接收集的根系分泌物不能直接用于分析,必须经过预处理后才能作定性和定量分析。如果不能对根系分泌物进行有效的分离,就会影响未知组分的结构鉴定和成分分析。因

此,在分离纯化过程中要根据待测组分的物理、化学及生物学性质,选择合理的分离纯化方法。根系分泌物的具体分离过程包括干扰物质的分离、样品浓缩、萃取、离析及避免微生物的降解等。

### 2.1 树脂法

根据分离机理的不同,树脂法可分为交换法和吸附法。交换法是利用根系分泌物待测组分与杂质的极性差异,采用特定的填料作固定相,根据待测组分和杂质在固定相上的交换能力不同,达到与杂质分离的目的。吸附法则是使用吸附树脂(如 XAD-2、XAD-4、XAD-16 或 GDX-102 树脂、氧化铝单体以及硅胶等),吸附和富集根系分泌物内的一些有机化合物,进行分离和纯化<sup>[33-36]</sup>。树脂大都是苯乙烯和二乙烯苯聚合而成的、具有三向空间网架结构的多孔海绵状高分子化合物,适合分离混合物中的有机物、阴阳离子或极性分子;硅胶属微酸性吸附剂,适合分离鉴定酸性、中性物质;氧化铝单体属微碱性吸附剂,适合分离鉴定碱性、中性物质。张汝民等<sup>[16]</sup>在探讨梭梭根系分泌物中化学成分时,就采用了经过他们预处理的 XAD-16 吸附树脂收集根系分泌物。在收集后,他们用甲醇对收集器中吸附的根系分泌物进行洗脱,收集洗脱液为梭梭根系分泌物提取液。张利等<sup>[37]</sup>用强酸性苯乙烯系阳离子交换树脂(001×7, 732 型)和强碱性季铵型阴离子交换树脂(201×7, 717 型)分别得到阳离子层析柱和阴离子层析柱来分离在铅胁迫下杨梅根系的根系分泌物,然后用 2 mol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>OH 和 2 mol·L<sup>-1</sup> HCl 分别洗脱阳离子层析柱和阴离子层析柱,从而得到阳离子组分和阴离子组分的根系分泌物。树脂法具有实用性强,吸附容量高,脱附再生容易,性能稳定,使用寿命长,便于综合利用,变废为宝,操作简便,无二次污染等特点<sup>[38]</sup>。

### 2.2 衍生化与萃取法

衍生化是根系分泌物分离纯化过程中常用的方法,其原理主要是利用特定的化学试剂与根系分泌物中待测组分发生衍生化反应,使待测组分理化性质部分改变,转化为易分离或易检测的衍生化合物。李勇等<sup>[12]</sup>在测定人参根系分泌物主成分时,用硅烷化试剂(BSTFA, SUPELCO)在 75 °C 下对根系分泌物衍生化 1.5 h。胡元森等<sup>[35]</sup>在研究黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)根系分泌物中的化感物质时,用硅烷化试剂(BSTFA:吡啶=5:1)在 80 °C 水浴中对根系分泌物衍生化 2 h。胡学玉等<sup>[8]</sup>对青菜根系分泌物中的氨基酸组分行 PITC 氨基酸衍生化反应后,再以 HPLC(高效液相色谱)分析其中的氨基酸含量。一般而言,可以利用四甲基氢氧化铵和碘丁烷将酸

转化为酯类物质;利用盐酸羟胺和乙酸酐将糖转化为糖腈乙酯;利用邻苯二甲酐或 2,4-硝基氟苯将氨基酸衍生化等。待测产物在通过衍生化后,其化学性质发生了明显变化,可用特定的有机溶剂萃取,从而与杂质分离。如:低分子量有机酸经过衍生化(酯化反应)后,选用丙酮或石油醚作为萃取剂,可与无机阴离子如 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和 Cl<sup>-</sup>进行有效分离。

萃取法是根据待测物质和杂质在 2 个不相溶或部分互溶的溶剂中的分配(溶解度)不同而达到分离纯化的目的。常用的有机溶剂有乙醚<sup>[35]</sup>、乙酸乙酯<sup>[39-40]</sup>和二氯甲烷<sup>[41]</sup>等。张汝民等<sup>[16]</sup>在探讨梭梭根系分泌物中化学成分的时候,用乙酸乙酯萃取分别得到酸性、碱性和中性成分。杨广君<sup>[42]</sup>在研究线辣椒(*Capsicum annuum* Linn.)根系分泌物对辣椒等受体作物生长发育的影响时,就采用二氯甲烷在分液漏斗中对收集到的根系分泌物粗体液进行分离,得到纯的根系分泌物提取液。虽然萃取法的操作比较繁琐,但是所用器械简单易得,因此现在应用仍然较广。

### 2.3 层析法

利用根系分泌物中各组分在固定相和流动相中分配平衡常数的差异,通过多次反复平衡过程,使各组分在固定相中得到分离。一般常用的有纸层析<sup>[43]</sup>、薄层层析<sup>[44]</sup>和柱层析<sup>[45]</sup>等方法。纸层析是指用滤纸做液体的载体,点样后,用流动相展开,以达到分离鉴定的目的;薄层层析是将适当粒度的吸附剂在玻璃板上铺成薄层,把欲分离的样品点到薄层上,然后用合适的展开剂展开,达到分离的目的;柱层析是将固定相装于柱内,使样品沿一个方向移动而达到分离。自从 Bulen<sup>[46]</sup>在 20 世纪中叶提出用柱层析测定植物组织中的有机酸后,层析法便被广泛地用于土壤中化感物质之一有机酸的研究。李德华等<sup>[47]</sup>对比了 DEAE 纤维素层析法和阴离子交换树脂对根系分泌物富集浓缩的效果,发现 DEAE 纤维素柱层析有较高的回收率(除酒石酸外,各有机酸的回收率在 93.7%~102.3%之间),可用于根系分泌物中有机酸的富集浓缩。但是由于柱层析法手续繁琐,且时间长,而纸层析和薄板层析法虽然操作简便,但是不够精确所以它们现在基本上已经不作为检测手段了。

### 2.4 分子膜与超速离心分离法

分子膜与超速离心分离法在根系分泌物研究的应用中已有较广泛的应用。不同分子量的分子膜孔径一般介于 0.001~1.000 μm 之间,利用分子膜超滤,可将分泌物中的细菌、蛋白质甚至病毒进行分离,防止微生物对根系分泌物的降解作用。由于不

同根分泌物组分离心力不同会分布于不同层面上,因此超速离心技术可将理化性质相近、分子量差异大的根系分泌物进行有效分离。

### 3 根系分泌物的检测方法

常用的根系分泌物鉴定技术主要有生物活性测定方法和仪器分析方法。一般来说,根系分泌物对根际微生物具有选择性。生物活性测定方法就是根据根际特异菌类的群落分布、生物量或活性对根系分泌物进行定性或定量研究,另外也可利用某些细菌、真菌和植物幼苗等对分泌物特定成分的敏感性来确定根系分泌物成分,是根系分泌物定性、半定量的测定方法。仪器分析法则通过现代分析技术的不断发展,利用各种检测设备确定复杂微量根系分泌物成分和含量。

常用于鉴定根系分泌物中有机组分的仪器有红外光谱仪(IR)、紫外-可见光谱仪(UV-VIS)、质谱仪(MS)、核磁共振仪(NMR)、毛细管电泳(HPCE)<sup>[8]</sup>、气相色谱仪(GC)、液相色谱仪(HPLC)、离子色谱(HPIC)<sup>[48]</sup>、氨基酸自动分析仪等。

#### 3.1 结构分析检测方法

红外光谱仪(IR)<sup>[49]</sup>、紫外-可见光谱仪(UV-VIS)<sup>[50]</sup>、核磁共振谱(NMR)<sup>[51]</sup>和质谱仪(MS)<sup>[52]</sup>多用于判断待测物质中存在的功能团、共轭体系、氢原子和碳原子在分子中的结合方式以及得到待测物质的分子量和结构,然后确定其化学结构,最后用已知的标样或合成的标样根据测定的结构来鉴定结果。IR和UV-VIS主要根据待测组分在特定波长条件下产生的特征吸收峰不同而对未知组分进行鉴定,其中IR能给出待测组分的分子结构信息,包括待测组分的去向和存在的官能团等。NMR能够给出化学位移,自旋耦合裂分模式以及积分线高度等信息,能够对分子空间构型及各类结构单元的联结方式进行准确测定,预见性好。

#### 3.2 成分分析检测方法

气相色谱法是用气体作为流动相的色谱法,样品在气相中传递速度很快,在流动相和固定相之间可以瞬间达到平衡,具有分析速度快和分离效率高等特点。但是一般GC分析的物质要求沸点在500℃以下,相对分子量要少于450,所以应用具有一定的局限性,对于热稳定性差、易于分解、变质以及具有生理活性的物质,都不适合GC检测。HPLC引用了气相色谱的理论,只是以液体作为流动相,用高压输送。HPLC具有分析速度快、分离效能高、自动化等特点,而且其使用范围较广,不仅可以测定有机酸,还可以测定氨基酸。王水良等<sup>[53]</sup>用HPLC测定青菜根系分泌物中有机酸组分,得到草酸、柠

檬酸、苹果酸、琥珀酸、乙酸5种有机酸。Chang等<sup>[54]</sup>应用HPLC测定在N、P影响下水稻根系分泌物中氨基酸的变化。伴随着科学技术的不断发展和现代化仪器设备的更新换代,特别是电脑分析控制程序的普遍应用,利用GC<sup>[55]</sup>、HPLC<sup>[56]</sup>和气相色谱-质谱联用仪(GC/MS)<sup>[57]</sup>及液相色谱-质谱联用仪(LC/MS)<sup>[58]</sup>研究根系分泌物获得了很大的发展。质谱仪与多种色谱仪联用,即把色谱仪的分离装置作为质谱仪的进样系统,把质谱仪作为色谱仪的检测系统,充分联合发挥了色谱仪的高分辨率和质谱仪的高鉴别能力,具有需样量少、灵敏度高,能对待测组分的功能团进行有效鉴定等优点。李勇等<sup>[12]</sup>用GC-MS检测人参根系分泌物的组分,得到20多个有色谱峰。曹丽霞等<sup>[59]</sup>用GC-MS测定黑籽南瓜(*Cucurbita moschata* Dnch.)幼苗根系分泌的化合物种类,检测到了酚类、芳香烃类、酯类、胺类、烯烃类和烷烃类化合物。

氨基酸自动分析仪采用经典的阳离子交换色谱分离、茚三酮柱后衍生法,对蛋白质水解液及各种游离氨基酸的组分含量进行分析。仪器基本结构同普通HPLC相似,但针对氨基酸分析进行了细节优化(例如氮气保护、惰性管路、在线脱气、洗脱梯度及柱温梯度控制等)。在分析根系分泌物中氨基酸组分及含量时,氨基酸自动仪应用比较广泛<sup>[36]</sup>。许超等<sup>[60]</sup>在研究苡对玉米根系分泌氨基酸的影响时,用高速氨基酸分析仪测定根系分泌物中氨基酸,检测到了天门冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸等19种常见氨基酸。王艳红等<sup>[6]</sup>也用氨基酸自动分析仪对东南景天根系分泌物中氨基酸进行测定。

### 3 结语

根系分泌物是植物与土壤进行物质、能量和信息交流的重要媒介,也是构成植物根际不同微生态特征的最根本原因。因此研究根系分泌物,有助于进一步了解植物根-土壤界面的生理生化过程及其调控的机制,为协调植物和环境之间的关系提供理论依据和实践指导。众所周知,有效的研究方法是理论突破的重要前提。

根系分泌物的收集一直是困扰根系分泌物相关研究的重大问题,目前广泛采用的水培、土培或是基质培等方法,一方面培养条件与自然环境存在较大差别,忽视了土壤微生物、动物以及土壤温度等的影响,另一方面,极易对根造成伤害,导致试验结果可能与植物根系正常分泌结果有较大差异。与此同时,也有学者自行设计并应用了动态的、实时的根系分泌物收集方法,但是由于技术欠成熟、

装置复杂等原因应用还不广。同时,目前根系分泌物研究中还存在研究范围局限的问题。根系分泌物种类繁多,不仅包括低分子量的有机酸、糖类、酚类和各种氨基酸,还包括高分子的粘胶、酶类,而现在开展的研究主要针对的是有机酸、糖类、酚类和氨基酸,对粘胶的研究开展较少,可能是今后的研究热点之一。

因此今后的研究一方面需要改进和创新根际研究方法,不但要设计更为接近根自然生长状态的模拟根际环境,或是开发更为有效的不扰动根自然生长及破坏根际的原位收集法,而且还要注意排除微生物的分解和分泌作用,开发根系分泌物无菌收集装置;同时利用不断发展和完善的现代检测仪器和分析技术,建立更为准确的根系分泌物分离、纯化与测定技术。另一方面,需要扩大根系分泌物的研究物质范围,全面揭示各种根系分泌物与污染胁迫的关系及生态效应,从而取得深层次、更全面的机理性认识。

#### 参考文献:

- [1] 曹享云. 营养胁迫与根系分泌物[J]. 土壤学进展, 1994, 22(3): 27-33.  
CAO Xiangyun. The Influence of Nutrient Stress to Root Exudates[J]. Progress in Soil Science, 1994, 22(3): 27-33.
- [2] Guo T, Zhang G, Zhou M, et al. Influence of Aluminum and Cadmium Stresses on Mineral Nutrition and Root Exudates in Two Barley Cultivars[J]. Pedosphere. 2007, 17(4): 505-512.
- [3] 谢明吉, 严重玲, 叶菁. 菲对黑麦草根几种低分子量分泌物的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 576-579.  
XIE Mingji, YAN Chongling, YE Jing. Effect of phenanthrene on the secretion of low molecule weight organic compounds by ryegrass root[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 576-579.
- [4] Zeng F, Chen S, Miao Y, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress [J]. Environmental Pollution. 2008, 155(2): 284-289.
- [5] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬, 等. 植物根系分泌物与根际营养关系评述[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 64-67.  
TU Shuxin, SUN Jinhe, GUO Zhifen, et al. On Relationship between Root Exudates and Plant Nutrition in Rhizosphere[J]. Soil and Environmental, 2000, 9(1): 64-67.
- [6] 王艳红, 龙新宪, 吴启堂. 两种生态型东南景天根系分泌物的差异性[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 751-757.  
WANG Yanhong, LONG Xinxian, WU Qitang. Differences of root exudates between two ecotypes of *Sedum alfredii* Hance[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 751-757.
- [7] MURATOVA A, POZDNYAKOVA N, GOLUBEV S, et al. Oxidoreductase activity of sorghum root exudates in a phenanthrene-contaminated environment[J]. Chemosphere, 2009, 74(8): 1031-1036.
- [8] 胡学玉, 李学垣, 谢振翅. 不同青菜品种吸锌能力差异及与根系分泌物的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 234-238.  
HU Xueyu, LI Xueyuan, XIE Zhenchi. Differences of Zn uptake in various pakchoi cultivars and relationship between Zn uptake and root exudates[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 234-238.
- [9] TU S, MA L. Root exudates and arsenic accumulation in arsenic hyperaccumulating *Pteris vittata* and non-hyperaccumulating *Nephrolepis exaltata*[J]. Plant and Soil, 2004, 258(1): 9-19.
- [10] 杨瑞吉, 牛俊义. 磷胁迫对油菜根系分泌物的影响[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, 28(6): 895-899.  
YANG Ruiji, NIU Junyi. Effects of Phosphorus Deficiency on Root Exudation of Rape (*Brassica Campestris* L.) [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 2006, 28(6): 895-899.
- [11] LUO L, ZHANG S, SHAN X, et al. Oxalate and root exudates enhance the desorption of p,p'-DDT from soils[J]. Chemosphere, 2006, 63(8): 1273-1279.
- [12] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 营养元素亏缺对人参根分泌物主成分的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1688-1693.  
LI Yong, HUANG Xiaofang, DING Wanlong. Effects of nutrient deficiency on principal components of ginseng root exudates[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8): 1688-1693.
- [13] 贾黎明, 冯菊芬, 文学军, 等. 循环水根系分泌物收集技术的研究及应用[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 6-10.  
JIA Liming, FENG Jufen, WEN Xuejun, et al. Cycling-water collection technique on root exudates and its application[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(6): 6-10.
- [14] 田中民, 秦芳玲, 王波. 缺磷白羽扇豆根系分泌物收集方法的比较研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 154-158.  
TIAN Zhongmin, QIN Fangling, WANG Bo. Comparative studies on methods of collecting root exudates from phosphorus deficient white lupin[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003, 31(4): 154-158.
- [15] 王紫娟, 刘万学, 蔡静萍, 等. 紫茎泽兰根系分泌物对旱稻的化感作用[J]. 现代农业科技, 2007, 16: 71-72.  
WANG Zijuan, LIU Wanxue, CAI Jingping, et al. Eupatorium upland rice root exudates on Allelopathy[J]. Anhui Agriculture, 2007, 16: 71-72.
- [16] 张汝民, 张丹, 陈宏伟, 等. 梭梭幼苗根系分泌物提取方法的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 153-157.  
ZHANG Rumin, ZHANG Dan, CHEN Hongwei, et al. Study on the Extracts Methods of the Root Exudates from the Seedling of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 153-157.
- [17] 周艳丽. 大蒜 (*Allium sativum* L.) 根系分泌物的化感作用研究及化感物质鉴定[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2007.  
ZHOU Yanli. Research on Allelopathy and Allelochemicals of Garlic Root Exudates[D]. ShanXi: Northwest A & F University, 2007.
- [18] EL-HALMOUCHA Y, BENHARRATB H, THALOUARN P. Effect of root exudates from different tomato genotypes on broomrape (*O. aegyptiaca*) seed germination and tubercle development[J]. Crop Protection, 2006, 25(5): 501-507.
- [19] MARSEHER H. Mineral in High Plant[M]. London: Academic Press, 1995: 23-50.
- [20] 甄文超, 曹克强, 代丽, 等. 连作草莓根系分泌物自毒作用的模拟研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 828-832.  
ZHEN WenChao, CAO KeQiang, DAI Li, et al. Simulation of Autotoxicity of Strawberry Root Exudates under Continuous Cropping[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(6): 828-832.
- [21] 徐卫红, 王宏信, 刘怀, 等. Zn, Cd单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际Zn, Cd形态的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2089-2095.

- XU Weihong, WANG Hongxin, LIU Huai, et al. Effects of individual and combined pollution of Cd and Zn on root exudates and rhizosphere Zn and Cd fractions in ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9): 2089-2095.
- [22] XU W, LIU H, MA Q, et al. Root Exudates, Rhizosphere Zn Fractions, and Zn Accumulation of Ryegrass at Different Soil Zn Levels[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(3): 389-396.
- [23] 郇红建, 常江, 张自立, 等. 研究植物根系分泌物的方法[J]. *植物生理学通讯*, 2003, 39(1): 56-60.  
GAO HongJian, CHANG Jiang, ZHANG ZiLi, et al. Methods for investigating root exudates of plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2003, 39(1): 56-60.
- [24] 格拉希维里, 契切夫, 帕塔尔肯, 等. 核素数据手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2004: 6-7.  
GELAXIWEI T B, ЦИ QIEFU B П, PATAERKEN O O, et al. *Nuclide Guide*[M]. BeiJing: Atomic Energy Press, 2004: 6-7.
- [25] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 183-185.  
CHEN Yuelong, YANG Zhongfang, ZHAO Zhidan. *Isotope Geochronology and Geochemistry*[M]. BeiJing: Geological Publishing House, 2005: 183-185.
- [26] 陈俊伟, 倪竹如, 刘智宏, 等. 利用<sup>14</sup>C示踪法研究杉木光合产物分配和杉木根系分泌物[J]. *核农学报*, 1994, 8(3): 167-171.  
CHEN Junwei, NI Zhuru, LIU Zhihong, et al. Studies on photosynthate distribution and root exudates of Cinesische by <sup>14</sup>C tracer technique[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 1994, 8(3): 167-171.
- [27] 涂书新, 郭智芬, 孙锦荷. 富钾植物籽粒苋根系分泌物及其矿物释钾作用的研究[J]. *核农学报*, 1999, 13(5): 305-311.  
TU Shuxin, GUO Zhifen, SUN Jinhe. The root exudation of *Grain Amaranth* and its role in release of mineral potassium[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*. 1999, 13(5): 305-311.
- [28] 左元梅, 陈清, 张福锁. 利用<sup>14</sup>C示踪研究玉米/花生间作玉米根系分泌物对花生铁营养影响的机制[J]. *核农学报*, 2004, 18(1): 43-46.  
ZUO Yuanmei, CHEN Qing, ZHANG Fusuo, et al. The mechanisms of root exudates of maize in improvement of iron nutrition of peanut in peanut/maize intercropping system by <sup>14</sup>C tracer technique[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*. 2004, 18(1): 43-46.
- [29] HAO Z P, WANG Q, CHRISTIE P, et al. Allelopathic potential of watermelon tissues and root exudates[J]. *Scientia Horticulturae*. 2007, 112(3): 315-320.
- [30] 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 一种新型连续根分泌物收集装置[J]. *土壤*, 2003, 35(4): 311-313.  
LIAO Jipei, LIN Xiangui, CAO Zhihong, et al. A new system for continuous trapping of root exudate[J]. *Soils*, 2003, 35(4): 311-313.
- [31] 孔垂华, 徐效华, 梁文举, 等. 水稻化感品种根分泌物中非酚酸类化感物质的鉴定与抑草活性[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1317-1322.  
KONG ChuiHua, XU XiaoHua, LIANG WenJu, et al. Non-phenolic allelochemicals in root exudates of an allelopathic rice variety and their identification and weed-suppressive activity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1317-1322.
- [32] 王英, 凯撒·苏来曼, 李进, 等. 伊贝母根系分泌物自毒作用研究[J]. *植物研究*, 2010, 30(2): 248-252.  
WANG Ying, KAI SAR Sulayman, LI Jin, et al. Autotoxicity of root exudates of *Fritillaria pallidiflora* Schvek[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 30(2): 248-252.
- [33] HE H B, LIN W X, CHEN X X, et al. The Differential Analysis on Allelochemicals Extracted from Root Exudates in Different Allelopathic Rice Accessions[C]. Australia: The Regional Institute Limited: The Regional Institute Limited, 2005: 517-520.
- [34] 程智慧, 耿广东, 张素勤, 等. 辣椒对莴苣的化感作用及其成分分析[J]. *园艺学报*, 2005, 32(1): 100.  
CHENG Zhihui, GENG Guangdong, ZHANG Suqin, et al. Allelopathy to lettuce and related chemicals of hot pepper[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2005, 32(1): 100.
- [35] 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 Yuansen, LI Cuixiang, DU Guoyin, 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.
- [36] MURATOVA A, GOLUBEV S, WITTENMAYER L, et al. Effect of the polycyclic aromatic hydrocarbon phenanthrene on root exudation of *Sorghum bicolor* (L.) Moench[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 66(3): 514-521.
- [37] 张利, 何新华, 陈虎, 等. 铅胁迫下杨梅根系分泌有机酸的研究[J]. *浙江林学院学报*, 2009, 26(5): 663-666.  
ZHANG Li, HE Xinhua, CHEN Hu, et al. Organic acid exudates from *Myrica rubra* roots with lead stress[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2009, 26(5): 663-666.
- [38] 杨建峰, 贺立源, 左雪冬, 等. 有潜在性的大孔吸附树脂模拟植物根系分泌有机酸吸附的方法[J]. *华北农学报*, 2007, 22(3): 127-131.  
YANG Jianfeng, HE Liyuan, ZUO Xuedong, et al. A potential method of simulation of adsorption behavior of the macroporous resin for root exudates of organic acids[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(3): 127-131.
- [39] 尹燕东, 袁立群, 魏珉, 等. 温室CO<sub>2</sub>施肥对黄瓜幼苗根系生长及分泌物和伤流液组成的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1860-1867.  
YIN Yandong, QIU Liqun, WEI Min, et al. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment in greenhouse on root growth as well as root exudates and bleaching sap of cucumber seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1860-1867.
- [40] 刘尼歌, 莫丙波, 严小龙, 等. 大豆和水稻对铝胁迫响应的生理机制[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 853-858.  
LIU Nige, MO Bingbo, YAN Xiaolong, et al. Physiological mechanisms of soybean and rice in responses to aluminum stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 853-858.
- [41] 柴强, 黄高宝. 根系分泌物在不同播种模式中的化感效应研究[J]. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(2): 163-167.  
CHAI Qiang, HUANG Gaobao. Allelopathic effects of root exudates in different cropping patterns[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*. 2004, 39(2): 163-167.
- [42] 杨广君. 线辣椒根系分泌物对辣椒等受体作物生长发育的影响[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2008.  
YANG Guangjun. Allelopathy Functions of the Root Exudates of Line Pepper to Pepper and Other Crops[D]. ShanXi: Northwest A & F University, 2008.
- [43] 蒋桂芳, 任文彬, 张世清, 等. 脱乙酰几丁质酶降解产物的纸层析分析[J]. *华南热带农业大学学报*, 2006, 12(3): 28-31.  
JIANG Guifang, REN Wenbing, ZHANG Shiqing, et al. Paper chromatography of chitosanase's hydrolysates[J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006, 12(3): 28-31.
- [44] 白洁, 刘洁, 孙迎中. 川产五加属植物的薄层层析研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2000, 37(4): 624-628.  
BAI Jie, LIU Jie, SUN Yingzhong. The study on thin layer chromatograms of genus *Acanthopanax* growing in Shichuan[J]. *Journal of*

- Sichuan University: Natural Science Edition, 2000, 37(4): 624-628.
- [45] 郭长城, 李鑫, 胡洪营. 芦苇生物活性组分对小球藻生长的促进效应[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1186-1189.  
GUO Changcheng, LI Xin, HU Hongying. Enhancing effect of Phragmites australis bioactive substances on the growth of *Chlorella pyrenoidosa*[J]. China Environmental Science, 2009, 29(11): 1186-1189.
- [46] BULEN W A, VARNER J E, BURRELL R C. Separation of organic acids from plant tissues chromatographic technique[J]. Analytical Chemistry, 1952, 24(1): 187-190.
- [47] 李德华, 贺立源, 李建生, 等. 一种根系分泌物中有机酸的前处理和高效液相色谱检测方法[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(2): 219-222.  
LI Dehua, HE Liyuan, LI Jiansheng, et al. A method for pretreatment and determination of organic acid in root secretion by high performance liquid chromatography[J]. Plant Physiology Communications, 2004, 40(2): 219-222.
- [48] KIM S, LIM H, LEE I. Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, 109(1): 47-50.
- [49] PONCE M A, SCERVINO J M, ERRA-BALSELLS R, et al. Flavonoids from shoots, roots and roots exudates of *Brassica alba*[J]. Phytochemistry, 2004, 65(23): 3131-3134.
- [50] THANASOULIAS N C, PILIOURIS E T, KOTTI M E, et al. Application of multivariate chemometrics in forensic soil discrimination based on the UV-Vis spectrum of the acid fraction of humus[J]. Forensic Science International, 2002, 130(2/3): 73-82.
- [51] EVIDENTE A, FERNÁNDEZ-APARICIO M, CIMMINO A, et al. Peagol and peagoldione, two new strigolactone-like metabolites isolated from pea root exudates[J]. Tetrahedron Letters, 2009, 50(50): 6955-6958.
- [52] FAN T W M, LANE A N, SHENKER M, et al. Comprehensive chemical profiling of gramineous plant root exudates using high-resolution NMR and MS[J]. Phytochemistry, 2001, 57(2): 209-221.
- [53] 王水良, 王平, 王趁义. 铝胁迫下马尾松幼苗有机酸分泌和根际pH值的变化[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 87-91.  
WANG Shuilang, WANG Ping, WANG Chenyi. Changes in Rhizosphere pH and Exudation of Organic Acids of Masson Pine (*Pinus massoniana*) Seedlings Under Aluminum Stress[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(1): 87-91.
- [54] CHANG E, ZHANG S, WANG Z, et al. Effect of nitrogen and phosphorus on the amino acids in root exudates and grains of rice during grain filling[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 612-618.
- [55] KERDCHOECHUEN O. Methane emission in four rice varieties as related to sugars and organic acids of roots and root exudates and biomass yield[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 108(2): 155-163.
- [56] ER H C, SHEN F Z, ZHI Q W, et al. Effect of Nitrogen and Phosphorus on the Amino Acids in Root Exudates and Grains of Rice During Grain Filling[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(4): 612-618.
- [57] LEE J G, LEE B Y, LEE H J. Accumulation of phytotoxic organic acids in reused nutrient solution during hydroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2006, 110(2): 119-128.
- [58] EVIDENTE A, FERNÁNDEZ-APARICIO M, ANDOLFI A, et al. Trigoxazonane, a monosubstituted trioxazonane from *Trigonella foenum-graecum* root exudate, inhibits *Orobanche crenata* seed germination[J]. Phytochemistry, 2007, 68(19): 2487-2492.
- [59] 曹丽霞, 陈贵林, 敦惠霞, 等. 缺磷胁迫对黑籽南瓜幼苗根系生长和根系分泌物的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(5): 164-169.  
CAO LIXIA, CHEN GUILIN, DUN HUIXIA, et al. Effect of phosphorus deficiency on root growth and root exudates of *Cucurbita ficifolia* B[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica. 2009, 24(5): 164-169.
- [60] 许超, 夏北成. 苡对玉米根系分泌氨基酸的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 172-175.  
XU Chao, XIA Beicheng. Effect of pyrene on amino acid in root exudates of maize (*Zea mays* L.)[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 172-175.

## A review on research methods of root exudates

TU Shuxin, WU Jia

College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract:** Root exudates are the exchange carriers of substance, energy and information between the plant and soil in rhizosphere. The research on their types and amount is an important part in the fields of plant nutrition, allelopathy and environmental remediation. Currently, the main methods for collecting root exudates are solution culture, soil culture, medium culture and continual collection system; separation and purification methods include resin exchange, derivatization and extraction, column chromatography, molecular membrane and ultracentrifugation; and detection methods are mainly biological activity assay and instrumental analysis. In this paper, these methods were reviewed with examples so as to help researchers to find out efficient methods in their root exudates studies.

**Key words:** root exudates; collection; separation and purification; detection; research progress