

根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响

李 勇, 黄小芳, 万隆

(中国医学科学院 药用植物研究所, 北京 100193)

摘要: 根系是植物与外界环境进行物质和能量交换的重要器官, 研究根系分泌物对明确植物和外界环境的互作关系具有十分重要的意义。就近年来植物根系分泌物的相关研究报道, 从根系分泌物组成、产生途径、影响因素及其对根际微生态环境的影响等方面进行了阐述, 对植物根系分泌物研究方法及研究方向进行了展望。

关键词: 根系分泌物; 根际; 微生态环境

中图分类号: S144 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2008)增刊-0182-05

Root Exudates and Their Effects on Plant Rhizosphere Soil Micro ecology Environment

LI Yong, HUANG Xiaofang, DING Wanlong

(Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The root of plant is an important organ conferring material and energy exchange between plant and outside environment, and study root exudates have very important significance to clear the interaction between plants and environment. In this paper, root exudates related contents in recent years were summarized, which including components, producing approach, affecting factors of root exudates and their effects on plant growth and plant rhizosphere micro ecology. Finally, methods and directions of root exudates study in the future were expected.

Key words: Plant root exudates; Rhizosphere; Micro ecology

根系是植物与外界环境进行物质与能量交换的重要器官, 根系分泌物的组成和变化能够直接反映植物的新陈代谢和生长发育状况。自1904年Hiltner提出“根际”概念以来, 人们逐渐认识到, 尽管植物不能像动物一样靠迁徙寻找适合自己生存的环境, 但却可以通过改变根系分泌物的组成来调节自身对营养失衡、缺氧、旱涝、重金属毒害等恶劣环境胁迫的适应能力^[1]。植物不仅能够借助根系从土壤中吸收水分和矿物质营养, 而且还会通过根系向外界环境释放各类化学物质, 这些由植物根系在生命活动过程中向外界环境释放的化学物质统称为根系分泌物^[2]。近年来, 随着根际生态学的建立和发展, 根系分泌物在植物生长过程中的重要作用逐渐被人们所认知, 根系分泌物也逐渐成为植物根际营养学和根际生态学的研究热点。

1 根系分泌物的产生途径

根系分泌物种类繁多, 产生途径也十分复杂。广义的根系分泌物包括活体植物根系产生的渗出物、分泌物、粘胶质以及植物残体、脱落物等的降解物, 狭义的根系分泌物仅指植物通过根系分泌到土壤的各种化学物质。从化学组成来看, 根系分泌物主要是糖类、有机酸类和氨基酸类物质以及少量的脂肪酸类、固醇类、激素类、核苷酸类、黄酮类和酶类等有机物质^[3]。另外, 根系分泌物在与外界进行物质和能量交换的过程中, 还会有无机离子通过主动或被动方式在根际土壤与根系内部相互传递, 并通过改变根际土壤的pH值和氧化还原电位间接影响植物对根际矿质营养元素的吸收和利用。

植物根系分泌物可通过两种途径产生, 即代谢途径和非代谢途径, 其中前者又分为初级代谢和次

收稿日期: 2008-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目资助(30672619)

作者简介: 李 勇(1976-), 男, 河北衡水人, 博士, 主要从事药用植物病害防治研究。

通讯作者: 丁万隆(1963-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事药用植物栽培及病害生物防治技术研究。

生代谢。初级代谢为植物的生长和发育提供必需的物质、能量和信息。在植物的整个生长过程中, 部分代谢产物以根系分泌物的形式释放到根际, 分泌物的释放强度与根系活力、根际微生态环境等因素密切相关。与初级代谢物不同, 次生代谢物不直接参与植物的生长和发育, 它是植物适应环境胁迫的特殊产物。例如: 白羽扇豆在缺磷环境下, 根系大量分泌柠檬酸和苹果酸, 对土壤中的难溶磷起到活化作用^[4]。土壤中缺钾时, 籽粒苋根系分泌的草酸能够通过改变土壤矿物质原有结构提高可利用钾的含量^[5]。非代谢途径产生的根分泌物主要指植物残体或脱落物等的降解产物。大量研究结果表明, 次生代谢产物和非代谢途径产生的根分泌物中存在多种化感物质^[6-11]。

2 根系分泌物的影响因素

2.1 植物自身特性

根系分泌物不仅在不同种属植物间存在显著差异, 即使同种植物, 在不同的生长发育时期或生长环境下, 根系分泌物组成和含量也会发生改变。一般而言, 同种植物的根系分泌物组成具有明显的相似性, 不同基因型植物根系分泌物组成及含量存在较大差别^[12-14]。王玉萍等^[15]研究不同生长时期西洋参根系分泌物组成时发现, 生长初期、中期和花果期根系分泌物组成很相似, 但是也有个别成分发生改变, 生长初期和中期的西洋参根系分泌物中均检测到N-苯基萘胺, 而花果期未检测到该物质存在。

2.2 环境因素

大量研究发现, 植物根系分泌物的种类和数量在很大程度上受光照、温度、营养状况及根际微生物组成等外界因素影响。当植物遇到不利于自身生长的外界环境时, 根系分泌物组成及含量往往发生改变。王茹华等^[16]研究发现, 温度、光照和收集时间均对茄子根系分泌物量有影响。孙君明等^[17]研究光照对大豆幼苗根系分泌物中异黄酮含量的影响时发现, 光照能够刺激大豆幼苗根系异黄酮的产生。战秀梅等^[18,19]研究连作及根茬腐解物对大豆根系分泌物的影响时发现, 连作导致根系分泌物中异黄酮类物质黄豆甾元的产生, 而且连作和根茬腐解物对异黄酮和酚酸物质的分泌均有促进作用。

2.3 根际微生物

根际微生物是影响根系分泌物的重要因素。根系分泌物是根际微生物营养物质的主要来源, 外界环境因素改变导致根系分泌物组成的变化最终影响根际微生物类群的结构。反过来, 根际微生物类

群的变化又对植物根系分泌物的组成和分泌量产生影响。Prikryl 等^[20]在研究细菌对小麦根系分泌物的影响时发现, 根际分泌物的浓度和细菌的存在均影响小麦根系分泌物的分泌。张高峡等^[21]研究根系分泌物与微生物的关系时发现, 多粘杆菌产生的多糖素能增加细胞膜的通透性, 最终导致氨基酸的分泌量增加。

3 根系分泌物对植物根际微生态环境的影响

植物根系是养分吸收和向地上部输送营养与水分的重要器官。根系分泌物不同组分及其消长动态对植物养分吸收、生长发育、土壤微环境的调控等方面发挥着重要作用。

3.1 对植物矿质营养吸收的影响

根系分泌物中某些有机酸(如柠檬酸、酒石酸等)是良好的金属活化剂, 它们在根际难溶性养分的活化和吸收等方面具有积极作用。在植物根际土壤中, 根系分泌物通过酸化、螯合、离子交换或还原等途径将难溶性物质转化为可被植物吸收利用的有效养分, 从而提高根际土壤养分的有效性, 进而促进了植物的生长发育。陆文龙等^[22]用化学浸提法研究根系分泌物中的有机酸对磷酸盐的活化作用时发现, 柠檬酸、草酸、酒石酸、苹果酸均能明显促进土壤磷酸盐中磷的释放。周冀衡等^[23]用水培法研究烟草根系分泌物对不同形态磷、钾矿物的活化作用时发现, 磷和钾缺乏时, 根系分泌物对土壤中磷和钾的活化能力提高, 但不同基因型间存在较大差异。胡学玉等^[12]研究发现, 缺锌条件下青菜“五月慢”根系分泌物中草酸和丙氨酸含量显著增加, 并推测根系分泌物在青菜对锌的吸收过程中起重要作用。

3.2 对植物重金属毒害的缓解作用

根系是重金属进出植物的重要通道, 不同植物对重金属的耐受性存在差别。根系分泌物对重金属胁迫的调节主要表现在: ①提高根际土壤 pH 值。当植物处于重金属胁迫时, 植物能够主动或被动降低质子氢的分泌, 使根际土壤维持较高 pH 值, 从而降低土壤重金属活性^[24]。②改变根际土壤氧化还原状态。研究表明, 植物可以通过向根际释放氧气或氧化物将重金属氧化, 从而缓解其对自身的毒害^[25]。③利用根系分泌物吸附或螯合重金属。根分泌的有机酸可增加土壤中金属离子的溶解度, 并与根系分泌物中的某些物质形成稳定的金属螯合物复合体, 从而减轻重金属对植物的毒害作用^[26-29]。另外, 根分泌物还可以吸附或包埋重金属污染物, 使

其沉淀于根围土壤,从而降低其对植物的伤害^[30]。

3.3 对邻近植物的化感作用

植物根系分泌物还能抑制其他植物的生长。Yamamoto 等^[31]研究发现,稗草分泌的 β -羟基苦杏仁酸对其他植物根和茎的生长均具有强烈的抑制作用,但对自身无明显的影响。Xuan 等^[32]研究发现,稗草根分泌物对莴苣、水稻和鸭舌草种子的萌发和生长具有明显抑制作用,并从中分离得到二乙基邻苯二甲酸盐、癸酸、肉豆蔻酸等 15 种植物毒性物质。陈英等^[33]借助水培法研究小麦幼苗根系分泌物的化感作用时发现,小麦根系分泌物的二氯甲烷提取物对玉米、鹰嘴豆和蚕豆幼苗的生长均具有明显的抑制作用,并证实该作用源于化感物质——间甲酚。另外,根系分泌物的积累对植物自身也会产生毒害作用^[34-37]。纵观当前的研究结果,化感物质对植物的化感作用主要表现在影响植物对矿物质和水分的吸收^[38,39]、细胞膜通透性^[38,40-43]、呼吸作用^[44,45]、光合作用^[46,47]、组织或细胞超微结构^[48-50]、激素的活性^[51]、特定酶的活性^[40]、植物基因表达及蛋白质合成^[41]等方面。

3.4 对土壤理化特性的影响

在植物的生长发育过程中,根系分泌物不仅能够影响土壤中养分的有效性、重金属的吸收与转运,而且还可以改变根际土壤的理化特性。根系分泌物对土壤微团聚体的稳定性及团聚体大小分布等物理性质有显著影响。植物根系分泌的粘多糖对土壤颗粒有很强的粘着力,高分子粘胶物质与土壤颗粒相互作用,促进微团聚体的形成^[52]。

3.5 对根际微生物种群结构的影响

植物赖以生存的土壤中聚居着大量微生物,其中既有植物有益微生物,也有植物病原微生物。根系分泌物中丰富的糖类、氨基酸及维生素等为植物根际微生物的生长和繁殖提供了充足的营养,同时也影响着土壤微生物的种类、数量及其在植物根际的分布。研究发现,不同土壤微生物在根际的定殖受根系分泌物的影响表现明显的根际效应^[53,54]。而且,根系分泌物还对根际微生物的生长和发育产生影响。韩雪等^[55]研究不同黄瓜品种的根系分泌物对黄瓜枯萎病菌孢子萌发、菌丝生长及病原菌生物量的影响时发现,抗枯萎病黄瓜品种的根系分泌物对上述指标均有明显的抑制作用,而感病品种恰相反。甄文超等^[56]在研究草莓根系分泌物和腐解物中 8 种氨基酸的含量时发现,不同氨基酸对尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)和立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)表现抑制或促进作用。韩丽梅等^[57]研究

大豆连作土壤中有有机物对大豆根腐病菌的影响时发现,土壤中糖类物质对半裸镰刀菌、粉红粘帚菌、尖孢镰刀菌的生长多表现低促高抑,而氨基酸和有机酸组分对三种病菌的生长多表现显著的促进作用。另外,连作土壤理化特性的改变以及根系分泌物中大量氢离子和低分子量有机酸的积累而引发的根际土壤 pH 值降低,也对根际土壤微生物种群结构的变化产生较大影响^[58-63]。

4 结论

植物根系向外界释放各种化学物质是一种正常的生理代谢活动,但环境胁迫对植物根系分泌物的组成和含量有影响。植物根系通过分泌作用与外界环境进行物质、能量及信息等的交换,研究根系分泌物对于明确植物与环境的相互关系、改善植物连作条件下土壤微生态环境的变化有着深远意义。近年来,国内外学者在根系分泌物研究领域获得了许多有价值的研究成果,但就研究本身而言还有待深入,研究方法还有待改进和创新。当前研究中存在的问题和发展的瓶颈主要体现在:

研究技术手段相对落后。当前,人们主要通过水培、砂培等方法模拟植物自然生长环境,通过室内培养研究植物根系分泌物组成及其化感活性。但是,上述培养条件与自然环境存在较大差别,试验结果可能与植物根系正常分泌结果有较大差异。尽管目前已经开发出根系分泌物原位收集方法,但由于技术欠成熟、仪器昂贵等因素而难以推广普及。因此,大力开发廉价、高效、实用的根系分泌物原位收集系统势在必行。

研究深度有待提高。目前,对根系分泌物的研究多侧重其对根际生态环境的影响以及分泌物中化感物质的分离鉴定,而对根系分泌物中化感物质的产生和作用机理缺乏广泛深入的研究,今后对该领域的研究有待加强。大量研究结果表明,根系分泌物与植物连作障碍存在某种必然联系,但它们之间究竟是何种关系以及连作障碍如何解决,目前尚无定论。近年来,人们逐渐认识到植物连作障碍的产生有着十分复杂的内涵,从植物、土壤和根际微生物“三位一体”的角度出发,可能更有助于正确认识和解决植物连作障碍问题。

参考文献

- [1] Ryan P R, Richardson A E, Delhaize E. The rhizosphere: an example of plants modifying their environment to benefit their survival [C] // International Conference Rhizosphere 2004 "Perspectives and Challenges A Tribute to Lorenz Hilt

- ner", 12– 17 September, Munich, Germany, 2004.
- [2] Rovira A D. Plant root excretions in relation to the rhizosphere effect[J]. Plant and Soil, 1956, 36(2): 178.
- [3] 韩 雪, 吴凤芝, 潘 凯. 根系分泌物与土传病害关系之研究综述[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 316.
- [4] Hofland E, Findenag G R, Nelemans J A. Solubilization of rock phosphate by rape. II local root exudation of organic acids as a response to P starvation[J]. Plant Soil, 1989, 113: 161.
- [5] 周 明, 涂书新, 孙锦荷, 等. 富钾植物籽粒苋 (*Amaranthus* spp.) 对土壤矿物钾的吸收利用研究[J]. 核农学报, 2005, 19(4): 291.
- [6] Stermitz F R, Baish H P, Foderaro T A, et al. 7, 8 Berrzoflavone: a phytotoxin from root exudates of invasive Russian knapweed[J]. Phytochemistry, 2003, 64: 493.
- [7] Abenavoli M R, Cacco G, Sorgona A, et al. The inhibitory effects of coumarin on the germination of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum*, cv. Simeto) seeds[J]. Journal of Chemical Ecology, 2006, 32(2): 489.
- [8] Nakano H, Morita S, Shigemori H, et al. Plant growth inhibitory compounds from aqueous leachate of wheat straw[J]. Plant Growth Regulation, 2006, 48: 215.
- [9] 甄文超, 王晓燕, 孔俊英, 等. 草莓根系分泌物和腐解物中的酚酸类物质及其化感作用[J]. 河北农业大学学报, 2004, 27(4): 74.
- [10] 柴 强, 黄高宝, 黄 鹏, 等. 鹰咀豆根系分泌物的分离鉴定及典型分泌物苯甲醛的化感效应[J]. 草业学报, 2005, 14(1): 106.
- [11] 陈长宝, 王艳艳, 刘继永, 等. 人参根际土壤中化感物质鉴定[J]. 特产研究, 2006, 28(2): 12.
- [12] 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.
- [13] 何海斌, 何华勤, 林文雄, 等. 不同化感水稻品种根系分泌物中萜类化合物的差异分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 732.
- [14] 韩 雪, 潘凯, 吴凤芝. 不同抗性黄瓜品种根系分泌物对枯萎病病原菌的影响[J]. 中国蔬菜, 2006, 5: 13.
- [15] 王玉萍, 赵杨景, 邵 迪, 等. 西洋参根系分泌物的初步研究[J]. 中国中药杂志, 2005, 30(3): 229.
- [16] 王茹华, 周宝利, 张凤丽, 等. 不同温度和光照度下以及收集时间内茄子根系分泌物质[J]. 植物生理学通讯, 2005, 41(2): 175.
- [17] 孙君明, 丁安林, 沈黎明. 光照对大豆幼苗组织中异黄酮含量和分布的影响[J]. 植物学报, 1998, 40(1): 1015 – 1021.
- [18] 战秀梅, 韩晓日, 刘小虎, 等. 大豆连作及其根茬腐解物对大豆根系分泌物中异黄酮类物质——异黄酮元 (daidzein) 的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 739.
- [19] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 大豆连作及其根茬腐解物对大豆根系分泌物中酚酸类物质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(5): 631.
- [20] Přikryl Z, Váncura V. Root exudates of plants VI. Wheat root exudation as dependent on growth, concentration gradient of exudates and the presence of bacteria[J]. Plant and Soil, 1980, 57: 69.
- [21] 张高峡, 卢振祖. 从作物根际分离的多粘芽孢杆菌固氮作用的研究[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1998, 44(6): 745.
- [22] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 低分子量有机酸对不同磷酸盐的活化作用[J]. 华北农学报, 2001, 16(1): 99.
- [23] 周冀衡, 李永平, 杨虹琦, 等. 不同基因型烟草根系分泌物对难溶性磷钾的活化效应[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2005, 31(3): 276.
- [24] 许玉凤, 曹敏建, 王文元, 等. 植物耐铝毒害的研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(6): 452.
- [25] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. 植物学通报, 2005, 22(5): 614.
- [26] Hue N V, Craddock G R, Adams F. Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1986, 50: 28.
- [27] 胡红青, 黄巧云, 李学垣. 不同铝浓度对小麦根系分泌氨基酸和糖类的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(1): 15.
- [28] 林 琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 根系分泌物与重金属的化学行为研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 425.
- [29] 王 芳, 黄朝表, 刘 鹏, 等. 铝对荞麦和金荞麦根系分泌物的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 106.
- [30] 曹裕松, 李志安, 邹 碧. 根际环境的调节与重金属污染土壤的修复[J]. 生态环境, 2003, 12(4): 493.
- [31] Yamamoto T, Yokotani Tomita K, Kosemura S, et al. Allelopathic substance exuded from a serious weed, germinating banyard grass (*Echinochloa crusgalli* L.) roots[J]. Journal of Plant Growth Regulator, 1999, 18: 65.
- [32] Xuan T D, Chung I M, Khanh T D, et al. Identification of phytotoxic substances from early growth of banyard grass (*Echinochloa crusgalli*) root exudates[J]. Journal of Chemical Ecology, 2006, 32: 895.
- [33] 陈 英, 柴 强. 小麦的根系分泌物及典型分泌物间甲酚的化感作用研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2005, 41(2): 26.
- [34] Alias J C, Sosa T, Escudero J C, et al. Autotoxicity against germination and seedling emergence in *Cistus ladanifer* L. [J]. Plant and Soil, 2006, 282: 327.
- [35] 韩丽梅, 王树起, 鞠会艳, 等. 大豆根分泌物的鉴定及其化感作用的初步研究[J]. 大豆科学, 2000, 19(2): 119.
- [36] 王树起, 韩丽梅, 杨振明. 不同有机酸对大豆生长的化感效应[J]. 大豆科学, 2002, 21(4): 267.

- [37] 邹丽芸.西瓜根系分泌物对西瓜植株生长的自毒作用 [J]. 福建农业科技, 2005, 4: 30.
- [38] Booker F L, Blum U, Fiscus E L. Short tem of fenolic acids onion uptake and water relations on cucumber seedlings [J]. Journal of Experimental Botany, 1992, 43 (250) : 649.
- [39] Yu J Q, Matsui Y. Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus* L.) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings [J]. Journal of Chemical Ecology, 1997, 23 (3) : 817.
- [40] Politycka B. Phoxidase activity and lipid peroxidation in root of cucumber seedlings influenced by derivatives of cinnamic and benzoic acids [J]. Acta Physiologiae Plantum, 1996, 18 (4) : 365.
- [41] Wink M, Schmeller T, Latz Bruning B. Modes of action of allelochemical alkaloids: interaction with neuroreceptors, DNA, and other molecular targets [J]. Journal of Chemical Ecology, 1998, 24 (11) : 1881.
- [42] Gattas Hallak A M, Davide L C, Souza L F. Effects of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) root exudates on the cell cycle of the bean plant (*Phaseolus vulgaris*.) root [J]. Genetics and Molecular Biology, 1999, 22 (1) : 95.
- [43] Hejl A M, Koster K L. The allelochemical sorgoleone inhibits root H^{+} -ATPase and water uptake [J]. Journal of Chemical Ecology, 2004, 30 (11) : 2181.
- [44] Rasmussen J A, Hejl A M, Einhellig F A, *et al.* Sorgoleone from root exudate inhibits mitochondrial functions [J]. Journal of Chemical Ecology, 1992, 18: 197.
- [45] Einhellig F A, Rasmussen J A, Hejl A M, *et al.* Effects of root exudates sorgoleone on photosynthesis [J]. Journal of Chemical Ecology, 1993, 19: 369.
- [46] Shibu J, Andrew R G. Allelopathy in black walnut (*Juglans nigra* L.) alley cropping. II. Effects of juglone on hydroponically grown corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L. Merr.) growth and physiology [J]. Plant and soil, 1998, 203: 199.
- [47] Ye S F, Yu J Q, Peng Y H, *et al.* Incidence of Fusarium wilt in *Cucumis sativus* L. is promoted by cinnamic acid, an autotoxin in root exudates [J]. Plant and Soil, 2004, 263: 143.
- [48] Cruz Ortega R, Anaya A L, Hernandez Bautista B E, *et al.* Effects of allelochemical stress produced by *Sicyos deppei* on seedling root ultrastructure of *Phaseolus vulgaris* and *Cucurbita ficifolia* [J]. Journal of Chemical Ecology, 1998, 24 (12) : 2039.
- [49] Yu J Q, Shou S Y, Qian Y R, *et al.* Autotoxic potential of cucurbit crops [J]. Plant and Soil, 2000, 223 (1- 2) : 147.
- [50] Nishihara E, Parvez M M, Araya H, *et al.* Germination growth response of different plant species to the allelochemical L-3, 4 dihydroxyphenylalanine (L- DOPA) [J]. Plant Growth Regulation, 2004, 42: 181.
- [51] Kuti J O, Jarvis B B, Mokhtar-Rejali N, *et al.* Allelochemical regulation of reproduction and seed germination of two *Brazilian baccharis* species by phytotoxic trichothecenes [J]. Journal of Chemical Ecology, 1990, 16 (12) : 3 441.
- [52] 王韵秋, 郝绍卿, 于得荣, 等. 老参地土壤理化性状的变化 [C] // 全国人参科技资料汇编: 栽培分册 I . 国家医药管理局出版, 1985: 513.
- [53] 陈宏宇, 李晓鸣, 王敬国. 抗病性不同大豆品种根面及根际微生物区系的变化 I . 非连作大豆 (正茬) 根面及根际微生物区系的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (6) : 804.
- [54] 陈宏宇, 李晓鸣, 王敬国. 抗病性不同大豆品种根面及根际微生物区系的变化 II . 连作大豆 (重茬) 根面及根际微生物区系的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12 (1) : 104.
- [55] 韩雪, 吴凤芝, 潘凯. 根系分泌物与土传病害关系之研究综述 [J]. 中国农学通报, 2006, 22 (2) : 316.
- [56] 甄文超, 王晓燕, 曹克强, 等. 草莓根系分泌物和腐解物中氨基酸的检测及其化感作用研究 [J]. 河北农业大学学报, 2004, 27 (2) : 76.
- [57] 韩丽梅, 鞠会艳, 王旭明. 大豆连作土壤有机化合物对大豆根腐病菌生长的影响 [J]. 大豆科学, 2004, 23 (1) : 36.
- [58] 朱丽霞, 章家恩, 刘文高. 根系分泌物与根际微生物相互作用研究综述 [J]. 生态环境, 2003, 12 (1) : 102.
- [59] 雷娟利, 周艳虹, 丁桔, 等. 不同蔬菜连作对土壤细菌 DNA 分子水平多态性影响的研究 [J]. 中国农业科学, 2005, 38 (10) : 2076.
- [60] 胡元森, 刘亚峰, 吴坤, 等. 黄瓜连作土壤微生物区系变化研究 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (1) : 126.
- [61] 李琼芳. 不同连作年限麦冬根际微生物区系动态研究 [J]. 土壤通报, 2006, 37 (3) : 563.
- [62] 李春格, 李晓鸣, 王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响 [J]. 生态学报, 2006, 26 (4) : 1144.
- [63] 贾学文, 闫伟, 白淑兰, 等. 根际土壤微生物最佳分离条件筛选研究 [J]. 华北农学报, 2007, 22 (6) : 147- 151.