

根-土界面的微生态过程与有机污染物的环境行为研究

徐建明, 何 艳

(浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘 要: 土壤-植物系统是地球生态系统中与人类生存与健康关系最为密切的亚系统。该系统中有有机污染物的运移必须历经根-土界面多层次的微生态过程的控制。这些微生态过程涉及到系统中许多生物、生物化学和物理化学反应机理, 与土壤中污染物迁移转化及其归宿等环境行为具有密切的关系。理解这些微生态过程及其对有机污染物环境行为的影响, 对提高作物生长、改善土壤环境质量和提高农产品品质安全具有直接的理论和实践指导意义。

关键词: 根-土界面; 根际; 有机污染物; 环境行为

中图分类号: S154.4; X171

根-土界面是污染物进入植物体内的主要通道和导致一系列生态安全问题的特殊微生态系统。污染物在土壤-植物系统中的迁移和转化受根-土界面多层次的微生态过程所控制, 主要表现在根系界面的微生态过程及根际界面的微生态过程两方面。探索根-土界面的微生态过程及其对污染物环境行为的影响, 合理调控根-土界面中的物质循环, 可以修复受污染和退化的土壤环境, 对优化土壤生态服务功能、改善环境质量和保障人体健康具有科学意义和实际价值。本文将就根-土界面的微生态过程进行简要论述, 并就这一过程影响下的有机污染物的环境行为展开讨论。

1 根系界面的微生态过程

植物根系是根-土界面微生态系统的核心内容与物质基础, 其中, 根系生长释放的根系分泌物则是根系界面影响和调节污染物质在根-土界面中扩散、迁移、转化和代谢的关键环节。

1.1 根系分泌物

根系分泌物是植物与土壤、水、大气进行物质、能量和信息交换的载体, 在改变根-土界面微生态系统中污染物的生物有效性、改善植物对污染土壤的修复作用、以及植物遗传改良等领域具有重要作用^[1-3]。作为诱导根际土壤理化及生物学性状较之一般土体明显优化的根本原因, 根系分泌物及其对污染

物在根-土界面环境行为的影响已成为目前相关根系界面微生态过程研究的重要方面。

纵观根系分泌物的研究历程, 1795年Plenk首次发现植物能通过根系向外分泌一些物质, 基本形成了根系分泌物的概念。尔后, 德国微生物学家Lorenz Hiltner于1904年提出根际的概念, 根系分泌物开始逐渐被学术界关注。但由于分析技术和实验条件的限制, 长期以来, 相关根系分泌物的研究一直进展缓慢。直到近二十年来, 现代仪器分析方法的飞速发展, 伴随根系分泌物在植物营养、农业生态与环境等领域中的重要作用被肯定, 根系分泌物逐渐成为世界各国科学家日益重视的研究热点。目前, 根系分泌物对有机污染物在根-土界面环境行为产生影响作用的微生态过程可归纳总结为: 酶系统的直接微生态过程、通过增加微生物的数量提高其活性的间接微生态过程以及根系分泌物诱导的共代谢或协同代谢微生态过程^[4-6]。

1.2 污染胁迫与特异性根系分泌物

调控根-土界面中的物质循环, 修复受污染和退化的土壤环境, 其关键就在于深入了解植物对污染胁迫的反应和适应性调节机制, 并据此协调根-土界面微生态系统中植物、土壤和微生物及其与环境之间的相互关系, 达到污染修复的目的。污染胁迫下根系分泌作用的响应变化、特异性根系分泌物的组分特征鉴定、及其与污染物在根-土界面环境行为的

①基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (40425007) 资助。

作者简介: 徐建明 (1965—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 主要从事土壤化学与环境领域的研究。E-mail: jmxu@zju.edu.cn

关系等,一直以来都是根系界面微生态过程相关研究的侧重点和焦点。

根系分泌物组成和含量的变化是植物响应环境胁迫最直接、最明显的反应,它是不同生态型植物对其生存环境长期适应的结果^[7]。这种根系界面的微生态过程,可促使植物在污染胁迫下建立体外抗性机制,主动释放特异性根系分泌物,诱导根际微生物群落结构的定向变化,并由此影响污染物在根系界面的吸收、积累等环境行为,从而改变污染物对根系的化学致毒效应^[8],这对实现污染根际的生物修复及植物受害症状的减轻和恢复均具有积极的意义。在此方面,相关金属及重金属胁迫下植物适应性调节机制的研究已取得相应进展,例如,禾本科植物缺 Fe 时,其根系可分泌特定的有机阴离子(高铁载体, *phytosiderophore*)来活化土壤中的 Fe,提高根际环境中 Fe 元素的有效性^[3]; Al 胁迫下,耐 Al 荞麦根系可向根外分泌草酸,并与 Al 以分子比 3:1 的形式结合,有效地减轻 Al 对根系的毒害^[9]。比较而言,目前针对有机污染物胁迫下的特异性根系分泌物的相关微生态过程研究则显得非常薄弱,其原因主要受到根系分泌物分析技术的限制。随着近年来新方法、新理论与新技术(¹³C-NMR、FT-IR、HPLC-MS、PLFA 磷酸酯脂肪酸分析法、DNA 指纹技术等)的问世及其在环境化学及生物学领域的成功应用,可以预见,如若能在根际分泌物的收集技术方面有所创新,则实现该活跃研究领域的突破性进展指日可待。另外,借鉴水溶性有机质研究法,采用树脂联用和超滤膜分离方法,将根系分泌物的亲水性和疏水性组分及其分子量大小进行区分,从新的视角对根系分泌物进行组分分析,以克服传统根系分泌物组分鉴定上遇到的困难,也可能是一种可选择的研究新途径。

2 根际界面的微生态过程

根际环境是根-土界面的重要组成部分。根际是指植物根系与土壤之间的微界面,其范围通常只有几个 μm 到几个 mm 。根际界面由于深受根系生长活动的影响,其物理化学和生物学性状随根系界面的微生态过程会产生响应变化,与非根际土壤存在很大的比较差异。

2.1 根际界面物理化学及生物学性状的响应变化过程

根-土界面微生态系统中,一方面根系对根际土

壤中阴阳离子吸收不平衡,根呼吸、微生物呼吸和土壤动物代谢产生 CO_2 ,以及根系分泌有机酸和其他化学成分,可诱导根际界面 pH 的响应变化;另一方面根和根际微生物呼吸耗氧、以及根系分泌的部分还原性物质,可诱导根际界面 Eh 的响应变化。同时,当根-土界面因污染物出现而产生化学胁迫时,植物会建立体外抗性机制,并主动释放特异性根系分泌物,提高微生物群落对毒性物质的转化率。在上述这些根际微生态调节过程中,微生物的响应可能是绝对数量增加,或者是污染物的根际特异微生物降解菌群的相对丰度增大;生物酶的响应可能是数量的增大和活性的增强,或者是特定酶(系)在某种污染物作用下的诱导表达,并由此改变生物体对另一类化合物的代谢行为。这些响应变化过程均将直接或间接地影响污染物在根-土界面中的存在形态、生物有效性、以及迁移、转化和代谢方式等环境行为,从而使根-土界面中污染物的形态转化及其致毒效应变得不可预测。鉴于此类微生态过程的相关研究结果已在众多文献中大量涉及^[5-6,10-11],在此不多作赘述。但需要强调的是,根际环境中,特别就湿生或水生植物而言,根-土界面氧化铁、锰胶膜的形成,以及伴随微生物的利用转化产生的根际土壤腐殖质组成的变化,无疑也会影响污染物在根-土界面的环境行为,并产生根际与非根际的差别^[12-14]。但目前为止,这部分的研究常被忽视。

2.2 菌根界面的微生态过程

菌根是自然界中最为广泛存在的共生体系,陆地生态系统中大约有 80% 以上的植物可以形成菌根。作为真菌与植物的结合体,其对土壤的影响具有微生物和植物的双重特性,不仅能从微生物角度改变土壤微生物种类和数量,影响污染物在根-土界面的环境行为,还能从植物角度通过改善根系的吸收面积、降低植物与土壤之间的流体阻力、促进根系对水分和养分的吸收和利用等方式来影响污染物在根-土界面的环境行为。近年来,随着菌根真菌在环境领域中不断被拓展运用,学术界对根际界面的微生态过程的相关研究也延伸到了菌根际微界面,且研究手段多与污染胁迫紧密联系。例如,李晓林等^[15-16]发现红三叶菌根际中存在的菌根菌对 Zn 存在固定作用,因此可抑制红三叶根系对 Zn 的吸收并减轻 Zn 毒害;他们还研究了有机磷杀虫剂灭克磷对 AM 真菌(*Glomus mosseae*)生长的影响,发现低浓度的灭克磷对 *Glomus mosseae* 生长有刺激作用,而

且 *Glomus mosseae* 可以通过增加自身物质代谢的周转速率来降低农药毒害,从而表现出对农药的耐性; Sainz 等^[17]发现有机氯农药对菌根菌在根表面的定植范围没有影响,但显著降低了根际土壤菌根菌的孢子数和菌丝体密度,说明内生菌根菌可能受到植物保护,免受农药的毒害; Andrew 等^[18]曾对国内外近 20 年涉及菌根真菌和菌根对土壤有机污染物的降解作用和降解机制研究结果进行了综述;然而,根据新近的研究结果, Joner 等^[19]对菌根真菌和菌根在加速土壤有机污染物降解中的作用提出质疑,他们以 3 种多环芳烃化合物 (PAHs) 为例,对外生菌根真菌 *Suillus bovinus* 在 PAHs 相关环境行为中的影响作用进行了研究,发现由于 *Suillus bovinus* 的菌丝体具有疏水性的特点,更易吸收疏水性的 PAHs 到菌根内,由此抑制了 PAHs 在菌根际中的降解,这种作用与菌丝体对菌根际内养分的消耗作用类似。这些重要成果均有力地推动了菌根际界面微生态过程的研究进程。

3 有机污染物在根-土界面微生态过程影响下的响应环境行为

有机污染物在根-土界面微生态过程影响下的响应环境行为及其与生物有效性的相互关系一直都是污染环境修复研究领域内的一个热门话题。根-土界面中有机污染物的环境行为及其生物有效性非常复杂,不仅包括其在根际土壤中的迁移、转化和固定过程,还包括根际微生物、植物根系在其迁移、转化和固定过程中的影响作用,主要与上述根系界面及根际界面的微生态过程与机理有关。

在此方面,迄今为止国内外已开展了许多极有价值的研究,内容涉及根-土界面中有机污染物的形态转化、可给性及其环境行为特征等多方面^[20-26]。如植物根际土壤中杀真菌剂 Mefenoxam 在 30 天内降解 70%,而无植物的土壤中仅降解 40%^[27];生长 80 天的 C₄ 植物狗尾草 *Pennisetum clandestinum* 根际中微生物的数量增大 7 个数量级,西玛津的降解率达 52%,而非根际中仅降解 20%^[28];阿特拉津在植物根区土壤中的半衰期较无植物对照土壤缩短约 75%,且根区土壤中阿特拉津的降解菌数量比对照土壤多 9 倍^[29]; Yoshitomi 和 Shann^[30]原位收集了玉米 (*Zea mays* L.) 根系分泌物,研究了它们对 ¹⁴C-茚的矿化作用的影响,结果表明添加 *Zea mays* L. 根系分泌物的土柱中微生物的 BiologTM 功能多样性增

大,且 ¹⁴C-茚的矿化作用明显增强; Shaw 和 Burns^[31]研究了根-土界面中 2,4-D 的矿化行为,发现 *Trifolium pratense* 和 *Lolium perenne* 根际中根沉降效应改变了 2,4-D 的矿化动力学方程,并加速了 2,4-D 的矿化,以 MPN 法表征的 2,4-D 的降解菌数量也有相应的增加; Kirk 等^[32]证实石油烃类污染物胁迫下,黑麦草和紫花苜蓿根区的微生物群落结构具有选择性富集效应,特异降解菌群数量在污染土壤中比未污染土壤中多,这是黑麦草和紫花苜蓿根际石油烃加速降解的根本原因。概括而言,上述成果多以根际环境中根系分泌物如分泌强度及成分的细微变化导致根际微生物区系的极大差异从而诱发有机污染物在根际土壤中环境行为的改变为前提,以探明根际微域中微生物活性及数量变化与污染物消减的关系为最终目的,基本处于现象研究阶段。而对植物如何激发根际生物降解的机理目前了解很少,对降解微生物的种类、降解基因和降解途径的多样性的探讨也极为薄弱,对降解菌群如何在根际进行空间分布并联合代谢目前尚缺乏研究。

针对目前对根-土界面微生态系统中微生物和根系分泌物在有机污染物根际环境行为中的作用机制还缺乏系统了解的现状,近来 Leigh 等^[33]通过实验室和温室根箱实验证实从树根释放的芳香类化合物可作为多氯联苯降解菌的底物,激发它们的生长。所以一般在多年生植物土壤上,多氯联苯降解菌的丰度较高。他们在 5 类植物根际中研究多氯联苯降解菌的动态,发现植树土壤的多氯联苯降解菌显著高于非植树土壤。丰度最高、多氯联苯降解潜力最大的细菌是 G⁺ 的红球菌 (*Rhodococci*)。他们还发现某些树种特别能激发多氯联苯细菌的生长,树根化学组成和周转速率可能起重要作用。Corgié 等^[34]利用 PCR-TTGE 和 RT-PCR-TTGE 的 DNA/RNA 分析技术,研究了菲加速降解的根-土界面微生态系统中土壤细菌的 16S rDNA 和 16S rRNA 的遗传特性变化特征,结果表明,虽然远根际土层中细菌的菌群结构较之非根际土无明显变化,但其中的活性菌种却存在较大的变异,这是诱导菲在远根际土层中加速降解的根本原因。徐建明等^[35-36]考察了根-土界面中结合态甲磺隆对水稻生长的胁迫效应,并采用 PCR-DGGE 指纹分析技术,对结合态甲磺隆胁迫影响下根-土界面中不同毫米级土层的微生物菌群结构进行了分子水平的研究,揭示了不同基因型水稻品种对结合态甲磺隆的抗性表征及其内在作用机

制。何艳等^[37-40]将根-土界面按不同毫米级微域范围划分,并对其中五氯酚(PCP)的降解行为进行了细致研究,发现根-土界面中 PCP 的降解并非与根系分泌物消减梯度相一致,而是距离根系生长室 3 mm 处根际土中的 PCP 降解程度最大。借助 PLFAs 技术追踪微生物群落结构的响应变化特征,结果表明受 PCP 污染胁迫下根系分泌物根际梯度递减效应的影响,根-土界面的微生物群落结构在毫米级微域内发生规律演替,并最终导致丛枝菌根真菌、放线菌及部分细菌在 3 mm 的近根际微域内相对聚集。因此,结合细菌、放线菌及丛枝菌根真菌的动态变化特征,可以清晰地解析 PCP 在根际土壤中不同毫米级微域中的特异降解行为,可信度 90% 以上。在此基础上,他们还开展了 PCP 污染土壤的模拟根际研究,试图从添加外源根系分泌物的角度在更深层面上系统揭示 PCP 在根际环境中的特异降解行为,结果表明,根系分泌物添加剂量不足或过量均会抑制土壤中 PCP 的降解,适宜的添加剂量才能最大程度激发土壤微生物活性,优化根际环境,诱导土壤环境质量的友好演变,实现 PCP 的快速降解。这些最新研究进展启示我们,借助新近发展的现代分析技术,通过根-土界面,特别是根-土界面毫米级微域中根系分泌物、特殊根际环境与有机污染物降解等环境行为三者之间的互动关系及其互作机理的研究并取得突破性的进展,极有可能将有机污染物根-土界面环境行为的研究上升到一个较高的研究水平。

4 问题和展望

根-土界面的微生态过程及其影响下的有机污染物的环境行为研究涉及土壤学、环境化学、植物生理生态学、微生物学等多学科,同时还有赖于现代先进的分析测试和微观观测手段。虽然目前对根-土界面的微生态过程及其影响下的有机污染物的环境行为的研究取得了一定的进展,但仍存在着很多尚未解决的问题:①现有研究成果尚无法对有机污染物在根-土界面的消减行为进行系统地诠释,往往将其简单的归结为降解作用,在降解过程中对结合残留态转化与腐殖化进程的剖析不深,对降解中间产物的鉴定也比较薄弱,在相关降解与形态转化的机理方面缺乏足够的认识;②就目前研究现状看,从共代谢角度系统研究有机污染物降解的文献不多,相关根-土界面中根系分泌物诱导的污染物共代谢降解过程更是鲜见报道。由于对根系分泌物中共

代谢碳源和能源的分析鉴定还缺乏系统考虑,因此很难建立根系分泌物中不同共代谢碳源与不同有机污染物关系的选择优化理论;③鉴于根-土界面环境的微域性、动态性和复杂性的特点,目前,对于有机污染物胁迫下毫米级微域中根-土界面微生物生态系统的动态调节过程,特别是对污染胁迫下根系分泌物的反应和适应性调节机制及其对根际微生物群落在数量和结构上的进化选择还缺乏系统的了解,此方面的研究工作还有待上升到分子水平;④根系分泌物的收集方法一直都是限制根系分泌物相关研究进展的最根本障碍,如何在不破坏根系生长的前提下实现根系分泌物的原位成功收集历来都是学术界的技术难题。对于特异性根系分泌物研究而言,则其组分在有机污染物胁迫下的细微变化及其特征的鉴定分析就更是难上加难。因此,为揭示有机污染物胁迫下特异性根系分泌物组分的细微变化及其诱导的根-土界面的微生态过程,阐明有机污染物在根-土界面的环境行为及其与根-土界面中各种微生态过程之间的相互关系,还有必要在根系分泌物的分析技术上开展基础方法论的研究;⑤目前对根-土界面中紧贴根面的根际土壤的采集还没有一致公认的最佳方法,根际研究中常用的人为抖动法、洗根法等,均存在一定的缺陷,掺杂了诸多根系生长量大小及长短等植物不确定参数的影响,这也是制约污染根际相关领域研究无法系统深入的根本原因。因此,为使紧贴根面微域土壤的采集成为可能,且操作简便,又充分避免根系组织的穿插影响,还有必要在原有根际土壤取样技术及方法上进行改良和创新。如何实现根-土界面中不同毫米级土层间彼此物理分离的同时,又确保土壤微生物及根系分泌物等的层间迁移活动,合理有效且快速地采集根际土壤,成为此类研究亟待解决的关键技术难题。

综上所述,鉴于根-土界面各种微生态过程的环境科学意义,今后应注重在分子水平上研究该系统中有有机污染物迁移转化的界面过程,明确根-土界面微生态系统中污染物的赋存形态及其合理的表征方法,并努力探索植物(含根际微生物)调控上述界面过程的理论基础,为高效优质农业的发展、土壤环境质量的保育等提供新的方法与技术。

参考文献:

- [1] Suresh B, Ravishankar GA. Phytoremediation-A novel and promising approach for environmental clean-up.

- Critical Reviews in Biotechnology, 2004, 24: 97-124
- [2] Glick BR. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. Biotechnology Advances, 2003, 21: 383-393
- [3] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养. 北京: 中国农业出版社, 1998: 2-50
- [4] Newman LA, Reynolds CM. Phytodegradation of organic compounds. Current Opinion in Biotechnology, 2004, 15: 225-230
- [5] Rentz JA, Alvarez PJJ, Schnoor JL. Benzo[a]pyrene co-metabolism in the presence of plant root extracts and exudates: Implications for phytoremediation. Environmental Pollution, 2005, 136: 477-484
- [6] 魏树和, 周启星, 张凯松, 梁继东. 根际圈在污染土壤修复中的作用与机理分析. 应用生态学报, 2003, 14 (1): 143-147
- [7] 何艳, 徐建明, 李兆君. 有机污染物根际胁迫及根际修复研究进展. 土壤通报, 2004, 35 (5): 658-662
- [8] Benizri E, Dedourge O, Dibattista-Leboeuf C, Piutti S, Nguyen C, Guckert A. Effect of maize rhizodeposits on soil microbial community structure. Applied Soil Ecology, 2002, 21: 261-265
- [9] Ma JF, Zheng SJ, Matsumoto H, Hiradate S. Detoxifying aluminium with buckwheat. Nature, 1997, 390: 569-570
- [10] Luo L, Zhang SZ, Shan XQ, Zhu YG. Oxalate and root exudates enhance the desorption of p, p'-DDT from soils. Chemosphere, 2006, 63: 1273-1279
- [11] Baudoin E, Benizri E, Guckert A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 1183-1192
- [12] Batty LC, Baker AJM, Wheeler BD, Curtis CD. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin ex. Steudel. Annals of Botany, 2000, 86: 647-653
- [13] Hansel CM, Fendorf S, Sutton S, Newville M. Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants. Environmental Science and Technology, 2001, 35: 3863-3868
- [14] 张甘霖, 龚子同. 水耕人为土某些氧化还原形态特征的微结构和形成机理. 土壤学报, 2001, 38 (1): 10-16
- [15] Li XL, Christie P. Changes in soil solution Zn and pH and uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal red clover in Zn-contaminated soil. Chemosphere, 2001, 42: 201-207
- [16] 范洁群, 冯固, 李晓林. 有机磷杀虫剂—灭克磷对丛枝菌根真菌 *Glomus mosseae* 生长的效应. 菌物学报, 2006, 25 (1): 125-130
- [17] Hartmann A, Schmid M, Wenzel W, Hinsinger P. Rhizosphere 2004-Perspectives and Challenges-A Tribute to Lorenz Hiltner. Munich, Germany: GSF-National Research Center for Environment and Health, 2005
- [18] Andrew AM, John WG. Ectomycorrhizas-extending the capabilities of rhizosphere remediation? Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 1475-1484
- [19] Joner EJ, Leyval C, Colpaert JV. Ectomycorrhizas impede phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) both within and beyond the rhizosphere. Environmental Pollution, 2006, 142: 34-38
- [20] 邢维芹, 骆永明, 李立平. 持久性有机污染物的根际修复及其研究方法. 土壤, 2004, 36 (3): 258-263
- [21] Liste HH, Alexander M. Accumulation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere soil. Chemosphere, 2000, 40: 11-14
- [22] Joner EJ, Johansen A, Loibner AP, dela Cruz MA, Szolar OHJ, Portal JM, Leyval C. Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil. Environmental Science and Technology, 2001, 3: 2773-2777
- [23] Gonzalez M, Miglioranza KSB, Aizpun de Moreno JE, Moreno VJ. Organochlorine pesticide residues in leek (*Allium porrum*) crops grown on untreated soils from an agricultural environment. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 5024-5029
- [24] Kamath R, Schnoor JL, Alvarez PJJ. A model for the effect of rhizodeposition on the fate of phenanthrene in aged contaminated soil. Environmental Science and Technology, 2005, 39: 9669-9675
- [25] Parrish ZD, Banks MK, Schwab AP. Assessment of contaminant lability during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil. Environmental Pollution, 2005, 137: 187-197
- [26] Meade T, D'Angelo EM. [¹⁴C]Pentachlorophenol mineralization in the rice rhizosphere with established oxidized and reduced soil layers. Chemosphere, 2005, 61: 48-55
- [27] Pai GS, Riley MB, Camper ND. Microbial degradation of

- mefenoxam in rhizosphere of *Zinnia angustifolia*. Chemosphere, 2001, 44: 577–582
- [28] Singh N, Megharaj M, Kookana RS, Naidu R, Sethunathan N. Atrazine and simazine degradation in Pennisetum rhizosphere. Chemosphere, 2004, 56: 257–263
- [29] Arthur EL, Perkovich BS, Anderson TA. Degradation of an atrazine and metolachlor herbicide mixture in pesticide-contaminated soils from two agrochemical dealerships in IOWA. Water, Air and Soil Pollution, 2000, 119: 75–90
- [30] Yoshitomi KJ, Shann JR. Corn (*Zea mays* L.) root exudates and their impact on ^{14}C -pyrene mineralization. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 1769–1776
- [31] Shawa LJ, Burns RG. Rhizodeposits of *Trifolium pratense* and *Lolium perenne*: Their comparative effects on 2,4-D mineralization in two contrasting soils. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 995–1002
- [32] Kirk JL, Klironomos JN, Lee Hun, Trevors JT. The effects of perennial ryegrass and alfalfa on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil. Environmental Pollution, 2005, 133: 455–465
- [33] Leigh MB, Fletcher JS, Fu XO, Schmitz FJ. Root turnover: An important source of microbial substrates in rhizosphere remediation of recalcitrant contaminants. Environmental Science and Technology, 2002, 36: 1579–1583
- [34] Corgié SC, Beguiristain T, Leyval C. Profiling 16S bacterial DNA and RNA: Difference between community structure and transcriptional activity in phenanthrene polluted sand in the vicinity of plant roots. Soil Biology & Biochemistry, 2006 (In Press)
- [35] Xu J, Li Z, Wang H. Changes in microbial community diversity in rhizosphere of rice (*Oryza sativa* L.) stressed by bound residues of metsulfuron-methyl in soil // Li CJ, et al. Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection. Tsinghua University Press: Beijing, China, 2005: 748–749
- [36] Li ZJ, Xu JM, Muhammad A, Ma GR. Effect of bound residues of metsulfuron-methyl in soil on rice growth. Chemosphere, 2005, 58: 1177–1183
- [37] 何艳. 五氯酚的土水界面行为及其在毫米级根际微域中的消减作用 (博士学位论文). 杭州: 浙江大学, 2006: 85–95
- [38] 何艳, 徐建明, 汪海珍, 吴愉萍. 五氯酚 (PCP) 污染土壤模拟根际的修复. 中国环境科学, 2005, 25 (5): 602–606
- [39] He Y, Xu JM, Tang CX, Wu YP. Facilitation of pentachlorophenol degradation in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne* L.). Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 2017–2024
- [40] He Y, Xu JM, Wu YP. Rhizospheric gradients of pentachlorophenol (PCP) dissipation in a spiked soil // Interactions of Soil Minerals with Organic Components and Microorganisms. Wuhan, China, 2004: 39

Micro-Ecological Processes in Root-Soil Interface and Their Impacts on Environmental Behavior of Organic Pollutants

XU Jian-ming, HE Yan

(College of Environment and Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The plant-soil subsystem is one of the most important terrestrial ecosystems relating to the human health. The movement of organic pollutants in this subsystem is dominated by various micro-ecological processes on root-soil interface. These micro-ecological processes are mostly driven by physio-chemical and biological changes induced by root-soil interactions, such as root exudation of organic anions and protons. In order to safeguard the sustainable production of safety food and to maintain the environmental quality, it is essential to understand the mechanisms of these micro-ecological processes. This paper presents a personal overview on the recent achievements in this research field with the aim of provoking further in depth research in the near future.

Key words: Root-soil interface, Rhizosphere, Organic pollutants, Environmental behavior