上海农业学报 2013,29(2):90-94

*Acta Agriculturae Shanghai*

文章编号：1000-3924(2013)02-090-05

根系分泌物及其在有机污染土壤修复中的作用

孟梁

(上海市环境科学研究院，上海200233)

摘 要:综述了根系分泌物的种类、产生途径和影响因素,讨论了其在植物修复有机污染土壤中的作用和研 究方法，并提出了今后该领域研究的发展方向，以期为植物修复技术的实际应用提供理论支持。

关健词：根系分泌物;植物修复;有机污染土壤 中图分类号：S154.4 文献标识码:A

Root exudates and their effects on remediation of

organic contaminated soils

MENG Liang

*{Shanghai Academy of Environmental Sciences» Shanghai* 200233, *China)*

**Abstract:**This paper summarized the species, secretory pathways and influencing factors of root exudates, discussed their effects and research methods for phytoremediation of organic contaminated soils, and proposed some developing directions of this research field from now on, thus giving theo・ retical support for the practical application of phytoremediation technology・

**Key words:**Root exudate； Phytoremediation； Organic contaminated soil

土壤是人类生存与发展的物质基础，是农业生产的关键要素，也是自然环境的重要组成部分。随着 农药施用、废水排放等工业和农业活动的增加，土壤有机污染日益严重。据统计，目前我国受有机物污染 的农田达6 000多万hmH居世界之首⑴。有机污染物进入土壤后，会使土壤肥力下降，影响农作物的产 量和品质,并会通过食物链的“富集和放大”作用对人体健康造成危害。同时，土壤有机污染具有长期性、 隐蔽性和不可逆性等特点，其危害严重，治理困难。因此，研究有机污染土壤修复对全球农业安全和环境 保护具有重要意义⑵。

植物修复(Phytoremediation)指利用植物及其根际微生物体系的物理、化学或生物过程来吸收、挥 发、转化、降解或固定土壤污染物的一种原位生物修复技术⑶，与传统修复方法相比，其操作简便、持效 长、成本低、环境友好、且易于被公众接受，已成为当前最有发展前途的土壤污染修复技术⑷。根系分泌 物(Root exudates)是植物修复有机污染土壤过程中的关键物质，其通过营造适宜的根际生态微环境以促 进根际微生物对有机污染物的降解，该过程是植物去除土壤有机污染物的主要作用机制目前，该领 域已成为植物修复研究的热点，新的观点、方法与技术不断涌现,但相关的研究报道较少⑷。本研究在总 结近年来国内外相关文献的基础上，对根系分泌物及其在植物修复有机污染土壤中的作用进行了论述， 以期为植物修复技术的实际应用提供理论支持。

1根系分泌物的定义、种类和产生途径

对根系分泌物的研究始于18世纪，1795年PlenkE首次发现植物根系能够向外分泌一些物质，但直 到20世纪50年代，由于固氮菌的利用才使这一领域的研究活跃起来閃o

收稿日期= 2012-09- 17

基金项目：2011年环保公益项目(201109019)；上海市环保科研重大项目［沪环科(2012-07)］资助

作者简介：孟 梁(1984 -),男，博士，工程师，主要从事有机污染土壤生物修复的研究。Tel： (021 )64085119, E-mail： [mengli- ang315300@163.com](mailto:mengli-ang315300@163.com)

**1.1**根系分泌物的定义和种类

根系分泌物是指植物根系在生命活动过程中向外界环境分泌的各种有机化合物的总称，其释放量占 年光合作用产量的10%〜20%,是植物与土壤、水、大气进行物质、能量和信息交换的重要介质之一⑷。 根据产生方式的不同，根系分泌物有广义和狭义之分,广义的根系分泌物有：（1）分泌物，即细胞在代谢过 程中释放的物质；（2）渗岀物，即细胞中主动扩散出来的低分子量化合物；（3）黏胶质，即根冠细胞、根表皮 细胞和根毛分泌的黏胶状物质；（4）分解物质，即成熟根表皮细胞的分解产物及脱落的根冠和根毛细胞 等〔诃；狭义的根系分泌物则仅指由溢泌作用进入土壤的可溶性有机物〔⑴。

根系分泌物的种类繁多，已鉴定的约有200多种。按其分子量大小可分为低分子和高分子有机 物切，其中低分子分泌物主要为糖类、有机酸和酚类，高分子分泌物主要为多糖、脂肪酸、留类化合物和胞 外酶等物质“刃。此外，按其作用性质可分为大多数植物所共有的普通分泌物和特殊植物或植物在特定条 件下产生的专一性分泌物⑴蔦表1列出了一些常见的根系分泌物〔“一⑷。

|  |  |
| --- | --- |
|  | 表**1**常见的根系分泌物  **Table 1 Common root exudates** |
| 种类 | 名称 |
| 有机酸 碳水化合物 | 草酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸、乌头酸、乙酸、丙酸、丁酸、戊酸、琥珀酸、丙二酸、延胡索酸、乙醇酸、轻基乙酸 葡萄糖、果糖、蔗糖、木糖、麦芽糖、鼠李糖、阿拉伯糖、棉子糖、低聚糖、岩藻糖、半乳糖 |
| 氨基酸 | 皴氨酸、★氨基丁酸、谷氨酰胺、a •丙氨酸、天冬酰胺、色氨酸、谷氨酸、天冬氨酸、胱氨酸、半胱氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸、苏 氨酸、赖氨酸、脯氨酸、蛋氨酸、色氨酸、丝氨酸、A丙氨酸、精氨酸 |
| 酶类 笛醇类 | 硫酸酶、转化酶、淀粉酶、蛋白酶、DNA酶、多聚半乳糖醛酸酶、眄陳乙酸氧化酶、硝酸还原酶、蔗糖酶、尿酶、接触酶 谷留醇、胆窗醇、油菜窗醇、豆笛醇、麦角苗醇 |
| 酚酸类 | 咖啡酸、肉桂酸、香豆素、杏仁酸、阿魏酸、临轻基香豆酸、原儿茶酸、水杨酸、丁香酸、香草酸、对羟基苯甲酸、3,4.二瓮苯 甲酸、4-轻基苯乙酸 |
| 脂肪酸 生长因子  其他 | 棕搁酸、油酸、花生酸、亚油酸、亚麻酸、十八烯酸、软脂酸、硬脂酸  对氨基苯甲酸、尼克酸、植物生长激素、维生素、胆碱、肌醇、烟酸、泛酸  黄酮、嚓吟、核昔、荧光物质、糖昔、氢氤酸、有机磷化物、多肽、皂昔、植物抗毒素、铁螯合物质 |

**1.2**根系分泌物的产生途径

植物根系分泌物的产生途径主要有两种，即代谢途径和非代谢途径。代谢途径可分为初生代谢和次 生代谢。初生代谢产生的分泌物是植物根系在代谢过程中释放到根际土壤中的，如糖类和氨基酸等；次 生代谢产生的分泌物不直接参与植物的生长、发育和繁殖，而是用于植物对不良环境的适应，如酚类物质 等［切。非代谢途径产生的分泌物不受代谢调控,主要来自于植物根残体的分解或根表皮细胞内含物的释 放，如原儿茶酸等化感物质M。

2根系分泌物的影响因素

根系分泌物的成分和数量受很多因素的影响，不仅取决于植物体的生理特性,而且与外界环境条件 密切相关。

**2.1**植物种类和年龄’

根系分泌物在不同种属植物间存在显著差异，如豆科植物根系分泌物中脂肪酸的含量高于一般植 物。同一植物在不同年龄或发育阶段其根系分泌物的种类也有所不同，如幼年欧洲赤松根系分泌物中氨 基酸和糖的含量较高［切。

**2.2**矿质营养

营养物质的多少宜接影响根系分泌物的质和量，如缺磷时,油菜中苹果酸的分泌量增加60倍〔泅。

**2.3**根际环境

根际是植物生长的微环境，其透气性、湿度、pH和土壤颗粒性质等均会对根系分泌物产生影响，如白 菜在水分胁迫下会分泌更多的有机酸⑵］。此外，光照、土壤空.气、土壤有机质、植物损伤因子和机械阻力 等因素也会影响植物根系分泌物的释放。

**2.4**根际微生物

根际微生物代谢活动和群落变化会对植物根系的分泌作用产生促进或抑制效应，如多粘杆菌产生的 多糖素能增加根细胞膜的通透性，最终导致氨基酸的分泌量增加〔勿。

3根系分泌物在植物修复有机污染土壤中的作用

根系分泌物在土壤中最为重要的作用是能够调控根际环境，是保持根际微生态系统活力的关键因 素，也是植物与外界环境进行物质交流的重要媒介，它可通过改变植物根际的物理、化学、生物学特性和 各种养分以及有益、有害物质的生物有效性来改善植物和土壤微生物的生长，在植物克服和缓解逆境胁 迫中具有十分重要的意义⑺〕。根系分泌物对植物修复有机污染土壤的影响也是通过其在植物-土壤-微生 物系统中的上述生态效应所产生的。

**3.1**根系酶系统的直接降解

根系分泌物中含有一定量的转化酶、磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶等植物外酶类物质，它们在根际中 形成的酶系统可直接降解有关的有机污染物滋〕。研究表明，硝酸还原酶和漆酶可降解TNT等军火废物， 并将破碎的环状结构转换成为无毒的成分〔旳。Nicell等〔旳试验发现辣根过氧化物酶可氧化毒性苯胺类 化合物，使其最终形成一种高分子聚合物而从土壤中去除。丁克强等在黑麦草对土壤中苯并［a］茁动 态变化的影响研究中发现根际土壤中多酚氧化酶含量提高，苯并［a］茁降解加快。

**3.2**根系分泌物促进微生物生长

根系分泌物中大量的糖类、有机酸和氨基酸等物质为根际微生物提供了丰富的营养和碳源，使降解 菌的生长和活性远强于非根际土壤，从而提高了其对土壤有机污染物的降解能力［旳。此外，根系分泌物 还能选择性地影响微生物的数量,改变根际微生物的相对丰度和群落多样性，诱导降解菌向根际富集，从 而加快根际有机污染物的去除〔旳。Sandmann等⑶］研究发现植物根际区农药的降解率与根际微生物数 量的增加呈正相关,这主要和根系分泌物有关。Zheng等⑶］研究发现薄荷类植物根系分泌物中含有芳香 化合物的降解菌,从而提高了这些植物对多环芳桂多聚体染料的耐受性。赵爱芬等®］报道水稻根系分泌 物能选择性地促进特定微生物*Bacillus* sp.对石油污染物的降解。

**3.3**根系分泌物的共代谢或协同作用

根际微生物能够将根系分泌物作为生长底物，通过共代谢途径将难降解的有机污染物最终分解为二 氧化碳和水等无机物。研究表明，根系释放的黄酮酸等物质可以作为微生物的生长基质，诱导其降解多 氯联苯⑶」。Donnelly等®］研究发现桑树分泌的酚类物质能够促进多氯联苯降解菌的协同代谢作用。 Joner等研究也表明，根系分泌物对土壤中高分子量多环芳桂的降解作用包括微生物的直接降解和通 过共代谢进行的生物转化过程。

**3.4**根系分泌物提高有机污染物的生物可利用性

根系分泌的一些水溶性有机酸具有表面活性，能够促进疏水性有机物在土壤颗粒上的解吸，提高其 生物可利用性，从而增加微生物与其接触的机会〔时。此外，根系分泌物还能刺激微生物产生生物表面活 性剂，同样可以提高有机污染物在土壤中的生物可利用性，增加污染物的根际微生物降解。Kim等⑶」研 究发现，添加苜蓿水溶性根系分泌物的土壤中蔥的解吸率比对照土壤高80%。郭平等〔遡研究也表明，植 物根系分泌物能增加五氯酚的溶解度,且分泌物中大分子组分愈多，其增溶作用愈强。

在上述作用中，后3种作用属于根系分泌物去除土壤有机污染物的间接作用，即根系分泌物促进根 际微生物降解有机污染物,是植物修复土壤有机污染的主要途径之一，已经成为该领域研究的热点和主 要方向丽。

4根系分泌物影响植物修复有机污染土壤的研究方法

**4.1**根系分泌物的收集和分离方法

根系分泌物影响植物修复有机污染土壤的研究中首先需要获得根系分泌物，涉及根系分泌物的收 集、分离和选择。目前,常用的根系分泌物收集方法主要有：溶液收集法，即将胁迫处理后的植株放入灭 菌营养液中培养一定时间，收集培养液，过滤，确定根系释放物质;土培收集法，即将植物种植于土壤一定 时间后，直接获取根际土壤，用无菌水振荡，过滤，或将植株根系直接用蒸憾水淋洗，所得滤液或淋洗液即 为根系分泌物；基培收集法，即将植物种植在固体培养基（如石英砂、琼脂和蛭石等）上收集根系分泌物， 其收集方法与土培收集法基本相同此外，还有研究者设计了一些系统或装置来对上述收集方法进行 改进，如分根收集装置、自动连续收集系统、层析滤纸定位收集、同位素标记结合土壤溶液取样器收集法 等:切。收集后的根系分泌物一般要经过分离纯化后才能用于试验，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，常用的分离方法有离子交换法、衍生化与萃取法和分子膜 与超速离心法

**4.2**根系分泌物去除土壤有机污染物的试验方法

目前，根系分泌物影响植物修复有机污染土壤，特别是根际微生物降解有机污染物的研究主要是通 过室内模拟培养试验进行,所添加的根系分泌物主要为人工制备的分泌物或直接收集的分泌物。前者的 优点在于加入的碳量可以控制，并可避免根系无机营养消耗对微生物活性的影响，而后者则更能反映实 际的根际环境。Joner等⑶〕向多环芳炷污染土壤中添加人工合成根系分泌物(100 C/g),发现高环多 环芳炷的去除量和功能微生物的数量均有显著增加。Miya等研究表明，收集自燕麦的根系分泌物能 提高土壤中菲的微生物降解量，并且促进了菲降解菌的生长。同时,有研究者还向土壤中添加离体根提 取物或根残体来研究根系分泌物对根际微生物降解有机污染物的影响C42'43]»此外,值得注意的是已有研 究中所选择的根系分泌物几乎均为水溶性物质，而有关疏水性根系分泌物在植物修复有机污染土壤中的 作用还鲜有报道o Meng等〔⑸从植物离体根中分离出了脂溶性物质.，并发现其对土壤多环芳桂去除和 功能微生物活性增加起着关键作用。

5展望

根系分泌物对土壤有机污染物的去除作用是植物修复领域的一个重要研究方向，其对于明确和协调 植物和根际有机污染环境间的关系具有重大的理论和实践意义。随着研究技术手段的不断进步，今后应 在高效便捷的根系分泌物收集和分离方法、根系分泌物对根际微生物的进化选择和对其降解转化有机污 染物的调控机制、分泌物各组分对土壤有机污染物生物可利用性的影响及有机污染物胁迫下根系分泌物 与环境条件的关系等方面进行深人而全面的研究，从而为污染生态学领域取得新的突破和重要进展，同 时也为植物修复技术在有机污染土壤治理中的应用提供更广阔的前景。

参考文献

1. 陈红艳，王继华.受污染土壤的微生物修复[J].环境科学与管理,2008,33(8):114-117.

[2 ] Huang XD,El-Alawi Y>Penrose DM,et al. A multiprocess phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils[J]. Environ Pollut, 2004,130： 465 - 476.

[3 ] Schnoor JL,Lich LA,McCutcheon SC. Phytoremediaton of organic and nutrient contaminantsCJ]- Environ Sci Technol\* 1995,29： 318-323.

[4 ] Fan SX,Li PJ,Gong ZQ,et al. Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa(*Medicago sativa* L.) [J]. Chemosphere, 2008,71.1593- 1598.

[5 ] Olson PE,Castro A,Joern M,et al. Effects of agronomic practices on phytoremediation of an aged PAH-contaminated soiI[J]. J En­viron Quah2008,37： 1439- 1446.

1. Reichenauer TG,Germida JJ. Phytoremediation of organic contaminants in soil and ground water [ J]. Chemsuschem,2008,1:708 - 717.
2. Elroy AC, Truelove B.The rhizosphereEM]. New York: Springer-Verlag Beidelberg, 1986.

[8 ] Jones DL. Organic acids in the rhizosphere：a critical review[j]. Plant Soil, 1998,205：25 - 44.

[9 ] Gao Y乙Zhu L乙Phytoremediation and its models for organic contaminated soils[J].J Environ Sci,2003,15：302-310.

[10]陈波;林建国，陈清•根系分泌物及其对土壤污染物的作用[叮•湖北农业科学,2010,49(3):718-721.

1. 施卫明.根系分泌物与养分有效性[叮.土壤，1993,25(5)：252~256.
2. Marschner H. Mineral nutrition of higher plants[M]. London； Academic Press\*1995.
3. 张福锁.环境胁迫与植物根际营养[M].北京：中国农业出版社,1998.
4. 何欢，王占武，胡栋，等.根系分泌物与根际微生物立作的研究进展[J]・河北农业科学,2011,15(3)=69- 73.
5. Bertin C,Yang X, Weston LA. The role of root exudates and allelochemicals in the rhizosphere [J]. Plant Soil,2003,256：67 - 83.
6. 吴佳，涂书新.植物根系分泌物对污染胁迫响应的研究进展核农学报,2010,24(6):1320- 1327.
7. 刘峰，温学森.根系分泌物与根际微生物关系的研究进展[J].食品与药品,2006,8(9):37-40.
8. Wojcik-wojtkowiak D,Politycka B,Schneider M,et al. Phenolic substances as allelopathic agents arising during the degradation of rye (Secale-cereale) tissues [J]. Plant Soil\*1990,124；143 - 147.
9. 解文科，王小青，李 斌，等.植物根系分泌物研究综述•山东林业科技.2005,160(5):63 - 67.

[2()] Zhang FS,Ma J,Cao YP. Phosphorus deficiency enhances root exudation of low-molecular weight organic acids and utilization of sparingly soluble inorganic phosphates by *radishCRaghanus sativus* L.) and rape( *Brassica napus* L.) plants[J]. Plant Soil, 1997,196： 261-264.

[21] Huang CY, Webb MJ,Graham RD. Pot size affects expression of Mn efficiency in barleyfj]. Plant Soil, 1996,178：205 一 208.

[22]张高峡，卢振祖•从作物根际分离的多粘芽砲杆菌固氮作用的研究[J].武汉大学学报：自然科学版.1998,4(6)=745 - 478. 张福锁.土壤•植物营养研究新动态[M].北京：北京农业大学出版社.1992.

1. Aprill W,Sims RC. Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil]J」. Chemosphere, 1990,20：253-265.
2. Bhadra R,Wayment DG,Hughes JB,et al.Confirmation of conjugation processes during TNT metabolism by axenic plant roots[J]. Environ Sci Technol ,1999,33 ； 446 - 452.
3. Nicell J,Bewtra J,Biswas N,et al. Reactor development for peroxidase catalyzed polymerization and precipitation of phenols from wastewater[J]. Water Res,1993,27-1629- 1639.
4. 丁克强，略永明，刘世亮，等.黑麦草对土壤中苯并[a]苗动态变化的影响[J].土壤学报,2004,41(4):348-353.
5. Holden PA,Firestone M K.Soil microorganisms in soil cleanup：How can we improve our understanding[J]. J Environ Qual, 1997, 26:32-40.
6. Steer J, Harris JA. Shift in the microbial community in rhizosphere and non-rhizosphere soils during the growth of *Agrostis stolonif- era* [J]. Soil Biol Biochem, 2000,32:869 - 878.
7. Sandmann ERIC, Loos MA. Enumeration of 2,4-D-degrading microorganisms in soils and crop plant rhizospheres using indicator media:high populations associated with sugarcane(*Saccharum officinarum*) [J].Chemosphere, 1984,13： 1073 - 1084.
8. Zheng ZX,Sheth U,Nadiga M,et al. A model for the role of the proline-linked pentose phosphate pathway in polymeric dye toler­ance in oreganoLJj. Process Biochem, 2001,36:941 - 946.
9. 赵爱芬，赵 雪，常学礼.植物对污染土壤修复作用的研究进展[J]. 土壤通报,2000,31(1):43 - 46.
10. Gilbert ES»Crowley DE.Plant compounds that induce polychlorinated biphenyl biodegradation by *Arthrobacter* sp.strain B1B[J]. Appl Environ Microb \* 1997,63 • 1933 - 1938.
11. Donnelly PK, Hegde RS, Fletcher JS. Growth of PCB-degrading bacteria on compounds from photosynthetic plantsEJ] - Chemo­sphere, 1994,28： 981 - 988.
12. Joner EJ,Corgie SC,Amellal N,et al. Nutritional constraints to degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in a simulated rhizo・ sphere]J].Soil Biol Biochem,2002,34：859 - 864.
13. Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S, et al. Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment^].Environ Sci Pollut Res,2005,12：34-48.
14. Kim YB,Park KY,Chung Y,et al. Phytoremediation of anthracene contaminated soils by different plant species[J]. J Plant Biol, 2004,47:174-178.
15. 郭 平，王 瑾,康春莉，等•根系分泌物对五氯酚的增溶作用和影响机制[J]・环境化学,2009,28(4)=519-523.
16. Gao YZ,Zhu LZ. Plant uptake,accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils[J]. Chemosphere,2004,55： 1169-1178.

[403舗红建，常 江,张自立，等.研究植物根系分泌物的方法⑴.植物生理学通讯,2003,39(1):56-61.

1. Miya RK,Firestone MK.Enhanced phenanthrene biodegradation in soil by slender oat root exudates and root debris[J]. J Environ Qual,2001,30:1911 —1918.
2. Rentz J A, Alvarez PJJ, Schnoor JL. Repression of *Pseudomonas putida* phenanthrene-degrading activity by plant root extracts and exudatesUJ. Environ Microbiol, 2004,6:574 - 583.
3. Mueller KE,Shaun JR. PAH dissipation in spiked soil： Impacts of bioavailability, microbial activity, and trees[Jj. Chemosphere, 2006,64:1006- 1014.
4. Dennis PG,Miller AJ,Hirsch PR. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities]〕]. Fems Microbiol Ecol,2010,72：313 - 327.
5. Meng L,Zhu YG. Pyrene biodegradation in an industrial soil exposed to simulated rhizodeposition：How does it affect functional mi­crobial abundance[J]. Environ Sci Technol,2011 \*45： 1579- 1585.