应用生 态 学 报 2021年7月 第32卷 第7期

Chinese Journal of Applied Ecology，Jul． 2021，32( 7) : 2623－ 2632

植物根系分泌物在污染及沙化土壤 修复中的应用现状与前景

杨富玲1 石 杨1 李 斌1 杜志烨1 汪梦婷1 廖恒毅1 陈 稷2 黄 进1\*

( 1成都理工大学生态环境学院，成都 610059; 2 四川农业大学农学院，成都 611130)

摘 要 近年来重金属污染等生态环境问题日益受到重视，而物理、化学修复方法存在的诸 如成本高、二次污染等问题，使得利用植物、微生物等进行联合治理成为环境修复的重要手 段。植物根系分泌物作为植物与土壤进行营养和信息交流的重要媒介，不但对植物的生长具 有重要作用，其在污染及沙化土壤修复中作用的研究也得以广泛开展。本文对根系分泌物的 组成、分泌机制进行了阐述，并对其在植物吸收重金属、化感作用、植物根系与根际微生物互 作、改变土壤理化性质等过程中的作用及机理进行了总结。此外，本文还对利用根系分泌物 和根际微生物在生态环境治理中的应用现状、面临的难题及未来的发展等进行了讨论。希望 本文可为基于植物与微生物进行的环境修复技术的实际应用提供理论支撑。

关键词 根系分泌物; 根际微生物; 重金属; 植物修复

Status and prospects of the application of root exudates in the restoration of polluted or desertated soil． YANG Fu-ling1，SHI Yang1 ，LI Bin1 ，DU Zhi-ye1 ，WANG Meng-ting1 ，LIAO Heng-yi1 ，CHEN Ji2 ，HUANG Jin1\* ( 1 College of Ecology and Environment，Chengdu University of Technology，Chengdu 610059，China; 2 College of Agronomy，Sichuan Agricultural University， Chengdu 611130，China) ．

Abstract: Ecological and environmental problems including heavy metal pollution have received increasing concerns． Given the shortage of physical and chemical remediation methods in high cost and secondary pollution，using plants and microorganisms for joint remediation of environment has become one of the most important strategies. Root exudates are an important medium for information and nutrient exchange between plants and soil． The roles of plant root exudates in remediation of polluted and degradated soil have been widely studied. In this review，we described the composi- tion，secretion mechanism and functions of root exudates and summarized the functions of root exu­date in heavy metal absorption，allelopathy，interaction between roots and rhizosphere microorga- nisms，and changes in soil physical and chemical properties. The progress，challenges and prospect of applying root exdudates and rhizosphere microorganisms in the remediation of ecology and envi­ronment have also been discussed. This review could provide theoretical support for the application of plant-microorganism based environmental remediation.

Key words: root exudate; rhizosphere microorganism; heavy metal; phytoremediation.

根系分泌物自18 世纪被注意以来，伴随着植物 学、生物化学、分析化学等学科的迅猛发展，人们对 它的组成、分泌机制及作用等也都有了较为深入的 认识。目前普遍认为，根系分泌物可能通过影响土

本文由国家自然科学基 金 项目 ( 31870383 ) 资 助 This work was sup­ported by the National Natural Science Foundation of China ( 31870383 ) . 2020-11-15 Received，2021-04-05 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huangjin18@ cdut. edu. cn 壤环境中的化学反应动力学，进而影响生物活性。 近年来，随着生态环境问题的日益严重及人类生态 环保意识的提高，如何利用包括植物和微生物方法 修复生态环境的研究和应用日趋成为热点。基于 此，本文从根系分泌物介导的植物-微生物相互作用 进行综述，探究分析了它在重金属及有机物污染或 沙化土壤生态修复中的应用前景。

1 根系分泌物及其组成与作用

1. 1 根系分泌物的组成及其分泌机制

早在18—19 世纪，人们就观察到根系分泌物对 邻近植株有促生或抑制作用。直到20世纪50 年代 人们认识到根系分泌物与促进植物生长的固氮作用 等的互利关系后，该领域的研究才日趋活跃。随着 研究技术手段的不断进步，根系分泌物的性质及根 际微生物间的相生相克关系等也逐渐被人们所认 知［1］。

在植物生长过程中，根系不仅从环境中摄取养 分、水分等供自身生长需要，同时也向其所在的生长 介质中分泌质子，释放无机离子，溢泌或分泌大量的 有机物，这些物质和根组织脱落物一起统称为根产 物，即根系分泌物［2－3］。目前，根系分泌物常用的鉴 定技术主要依赖色谱、光谱、质谱等技术及以上技术 的联用［4］。对于已知的、主要的根系分泌物组分， 可利用高效液相色谱进行定性、定量的分析; 而对于 极微量的、未知的组分，则可利用色谱-质谱联用技 术加以鉴定［2，4－5］。此外，利用其他谱学手段可以佐 证特定化合物的分子结构等。

根系分泌物的成分除了质子（ 即 H+ ） 、其他无 机离子、无机酸、氧气和水外，主要由碳基化合物组 成，是复杂但可溶的有机物的混合物［6－8］。这些有 机物通常可分为两类，第一类是按种类在根系分泌 物中占很高比例的低分子量化合物，如氨基酸、有机 酸、糖、酚类和其他次生代谢物; 第二类则是按质量 在根分泌物中占比例较高的分泌物，如粘液（ 多糖） 和蛋白质［7，9－13］（ 表1） 。

根系分泌物的组成受多种综合因子的影响，不 仅与植物的种类、品种、发育阶段有关，还与各种环 境因素如pH、温度、土壤类型、含水量等以及微生物 的存在有关［7－8，12－16］，而这些环境因素也在影响根际 微生物的种类和数量中发挥关键作用（ 表2） 。

近年来，虽然研究人员在根际土壤中根系分泌 物的组成及其与附近植株的相互作用方面的研究取 得了巨大的进展，但对根系分泌物分泌机制的认识 尚不完善。这是由于一方面根系分泌物中常见的低 分子量有机酸的化学性质相似，另外一方面根系分 泌物中蛋白质或氨基酸的检测尚存在着技术难度。 此外，由于根系分泌物中物质的浓度普遍较低，对它 们进行检测和定量分析前需要进行复杂的前期处 理，导致仅有少数研究尝试对根系分泌物的化学成 分进行了综合分析［7］。

根系分泌过程是指包括碳基有机物在内的由植 物合成的物质运输到根部并从根向根际土壤分泌的 过程［17］。在该过程中，土壤中分泌物的浓度随着与 根表面距离的增加而减小，就根系的相对位置而言， 根系分泌物的最大浓度主要发生在根尖和侧根部 位［17－18］。一般来说，根系分泌物通过被动（ 扩散、离 子通道 和 囊 泡 运 输） 或主动机制释放［17］（ 图 1） 。 大多数有机低分子量化合物（ low molecular weight

表 1 根系分泌物的组成及其在根际中的作用

Table 1 Components of root exudates and their roles in the rhizosphere

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 类别  Type of exudate | 具体化合物 Compound in detail | 根际功能  Rhizosphere function | 文献  Reference |
| 糖类  Sugar | 葡萄糖Glucose、阿拉伯糖Arabinose、果糖Fructose、木 糖 Xylose、核糖 Ribose、蔗糖 Sucrose、乳糖 Lactose、半乳 糖 Galactose、 寡糖 Oligosaccharide | 提供营养和能源，诱导形成菌根的信号物质; 微生物的 主要碳源 To provide nutrition and energy，induce the for­mation of mycorrhiza，and be the main carbon source of microorganisms | ［14，19－20］ |
| 氨基酸类  Amino acids | 苯丙氨 酸 Phenylalanine、 赖 氨 酸 Lysine、 组 氨 酸 Histi- dine、亮氨酸Leucine、天冬氨酸Aspartic acid、脯氨酸 Proline、丝氨酸Serine、苏氨酸Threonine、半胱氨酸Cys- | 为微生物生长提供碳、氮源  To provide carbon and nitrogen sources for microbial growth | ［6］ |
| 有机酸  Organic acid | 柠檬酸 Citrate、 苹果酸 Malate、 丁酸 Butyrate、 葡萄萄酸 Gluconic acid、 草酸 Oxalate | 通过螯合作用提高根系对P、Fe、Zn、Mn的吸收;根际微 生物的营养来源 To improve the absorption of P，Fe，Zn and Mn in root system by chelation，and to obtain nutrient source by rhizosphere microorganism | ［13－14，21－22］ |
| 酚酸类  Phenolic | 咖啡酸 Caffeic acid、 肉桂酸 Cinnamic acid、 香豆酸 Cuma- ric acid、 丁香酸 Syringic acid、 香草酸 Vanillic acid | 参与植物防御机制，赋予植物结构完整性和支持植物生 长 To involve in plant defence mechanism，impart structu­ral integrity and support plants | ［23］ |
| 生长因子  Growth factor | 生 长素 Auxins、 泛酸 Pantothenic acid、 维生素 B6 Vitamin B6、 生物素 Biotin、 尼克酸 Niacin | 提供营养和能源，刺激植物和微生物生长To provide nutrition and energy，stimulate plant and microbial growth | ［24］ |
| 其他  Others | 表面活性剂 Surfactants、 烟碱的 Nicotinic、 黄 酮类化合 Flavonoid | 促进植物和微生物生长，调节结瘤基因表达To promote the growth of plants and microorganisms and regulate the expression of nodulation genes | ［22］ |

表 2 环境因素对根系分泌的影响

Table 2 Influence of environmental factors on root exudation

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 因素  Factor | 影响  Effect | 文献  Reference |
| 植物物种 | 根分泌物中化合物的含量、种类和平衡因植物种类而异 | [25－26] |
| Plant species | Content，species and balance of compounds in root exudates vary with plant species |  |
| 微生物 | 微生物的存在会增加根系分泌物的含量 | [17] |
| Microorganism | Presence of microorganisms can increase the content of root exudates |  |
| 根的年龄 | 根系分泌物随发育阶段而变化 | [14，24] |
| Root age | Root exudates change with the development stage |  |
| 光 | 光照强度影响根系分泌化合物的数量和平衡，高光照强度增加了根系的分泌 | [26－27] |
| Light | Amount and balance of the secreted compounds by roots are affected by the light intensity，and the high light intensity increases the secretion of root exudates |  |
| 土壤 pH | 土壤酸化改变分泌液的成分 | [16] |
| Soil pH | Soil acidification changes the composition of the root extrude |  |
| 土壤温度 | 高温通过改变根的形态特征和地下碳分配的相关变化来提高根系的分泌率 | [7] |
| Soil temperature | High temperature improves root extrudate secretion rate by changing root morpholo­gical characteristics and underground carbon distribution |  |
| 土壤有机营养 | 缺乏营养时，根系分泌增加 | [7，28] |
| Organic nutrition of soil | When lack of nutrition，the root extrude secretion increases |  |
| 土壤含水量 | 干旱缺水时，为缓解干旱压力，根系分泌活动增加 | [8，28－29] |
| Soil moisture content | To relieve the drought stress，the secretion of root exudates increases |  |
| 土壤的颗粒度 | 来自土壤的机械压力改变根系分泌物的组成 | [30] |
| Soil particle size | Physical pressure from soil changes the composition of root exudates |  |

compounds，LMWCs) 是通过被动运输释放的，它 允 许离子或分子通过膜而不需要消耗能量[31]。

在扩散过程中，较小的极性分子和不带电分子 通过脂质膜进行渗透性传递，而这一过程取决于膜 的通透性、排出化合物的极性和胞浆的pH值刃。 其他化合物，如糖、氨基酸和羧酸盐阴离子，则需要 在特定蛋白质的帮助下通过膜，使得它们能够从完 整的根细胞的细胞质转移到土壤[15]。 研究表明，胞 浆K+扩散电位和质子通过ATP酶的挤压作用建立 正电荷梯度，促进羧酸盐阴离子的释放[13]。 此外， 在这些情况下，根细胞膜上的阴离子通道也参与对 某些阴离子释放的控制。 当根细胞向根际土壤分泌 包括糖类、氨基酸和金属等特定化合物时，则需要特 定转运体的参与。 高等植物中最具代表性的重金属

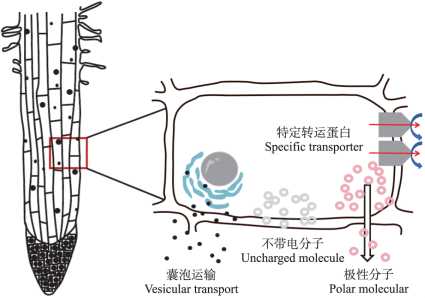


图 1 化合物通过植物细胞膜的根系分泌机制

Fig．1 Mechanism of how roots exudate compounds through the plant cell membrane.

吸收转运体是锌、 铁转运体蛋白家族( zinc-regulated transporters，iron-regulated transporter-like proteins， ZIP) ，包括铁调控转运体( iron-regulated transporter， IRT) 等[32]。 此外，植物具有金属稳态机制，以避免 出现过高的游离金属离子浓度( 例如，铁、锌、 锰和 铜) ，其机制包括金属离子转运体的配位，用于摄 取、易位和分隔。 例如，禾本科植物分泌的木瓜酸是 一种从根分泌到根际的金属配体，它通过形成 Fe (川)-植物高铁载体配体,以降低Fe的毒性，并能 通过玉米( Zea mays) 中鉴定的黄色条纹蛋白家族 ( yellow stripe-like，YSL) 进入根系细胞 33－34 。

在根部细胞中，一般通过囊泡运输高分子量化 合物，但囊泡介导的植物化学物质运输的机制尚未 完全阐明[13]。 研究表明，植物的防御反应通常伴随 着抗菌化合物向病原体感染部位的运输。 例如，色 素囊泡( 如抗菌类黄酮、3-脱氧花青素) 会在高粱 ( Sorghum bicolor ) 叶片受到真菌感染部位发生聚 集[15]。 同样，在真菌处理过的紫草科植物根或根悬 浮培养中可观察到植物向根外分泌色素抗菌萘醌， 以抵抗病原体( 诱导和增强次生代谢产物，激发植 物的自然防御能力) [3 1] 。 此外，虽然一些研究表明， 囊泡参与物质的分泌，但目前的相关研究也只限于 植物叶片。 在根部，除了已知的根冠细胞内的高尔 基体可向胞外分泌粘液( 多糖) 外，目前关于其他植 物化学物质从根细胞分泌到胞外的机制研究仍然比 较有限[31]。 目前已知可参与囊泡运输的蛋白包括 定位于细胞膜和高尔基体负责多糖等有机物分泌的 转运蛋白，包括三磷酸结合盒转运蛋白( ATP-bin- ding cassette transporters，ABC) 、多药和有毒化合物 的外排 ( multidrug and toxic compound extrusion， MATEs) 家族、 主要促进者超家族 ( major facilitator super family，MFS ) 和铝活化苹果酸转运体家族 ( major facilitator super family，ALMT) 35 。根 细 胞 可在这些膜转运蛋白的帮助下分泌次生代谢产物、 多糖和蛋白质。研究也发现，有 25 个 ABC 转运蛋 白基 因 在 拟南芥 ( Arabidopsis thaliana) 根中表达显 著，并在拟南芥根系分泌物的分泌过程中起重要作 用［36］。基于这些研究结果，可以肯定的是囊泡运输 与化合物向根际的运输有关，但这些膜结合蛋白的 功能及过程等细节尚需要进一步的研究。

1. 2 植物根系分泌物的作用

根系分泌物不仅是植物与土壤进行物质、能量、 信息交流的重要媒介，也是根际微生态系统中的重 要枢纽。虽然大多数根系分泌物的功能尚未确定， 但根系分泌物中的某些化合物在决定根际相互作用 的结果以及最终植物和土壤群落动态方面起着重要 作用［37］。基于大量研究可知根系分泌物对植物的 作用大致可分为以下几个方面:

根系分泌物可提高植物对养分、重金属的吸收 或对重金属胁迫的应对能力。研究显示，在养分胁 迫条件下，根系会主动或被动地分泌有机酸、酸性磷 酸酯酶等物质，活化土壤中固化、难溶的营养元素， 从而缓解或克服植物养分缺乏的问题［38］。其中，酸 化质子可以影响微量元素和重金属/类金属的化学 形态和迁移率以利于金属元素离子形态的形成［39］。 如毛竹根系分泌物中的有机酸化合物，特别是草酸 和苹果酸，能显著活化污染土壤中的重金属，使土壤 中水溶性金属( 除铅外) 含量显著增加［40］。在利用 植物对重金属污染土壤进行生物修复的过程中，如 何利用植物自身的根系分泌物充分活化土壤中的重 金属，从而有利于植物高效地将重金属从土壤中移 除也是我们需要深入研究的一个问题［40］。而根系 分泌的草酸、乳酸和琥珀酸等有机酸可与金属离子 形成稳定的螯合物，即将重金属等转化为性质稳定 且不易被植物吸收的形态，这有助于降低自由离子 的活度系数，从而减少其对植物的毒性作用，这虽然 不利于植物移除土壤中的重金属，但对于减少重金 属污染源的扩散、减轻局部地区重金属毒性及改善 重金属污染区域的生态环境有重要意义［14，39－40］。 并且其络合的程度取决于所涉及的有机酸、金属的 浓度和类型以及土壤的pH值M。

根系释放的有机化合物作为植物化感作用的重 要化学分子介导，其本身与其他植物物种也会发生 相互作用，这些相互作用有可能是正面的，也有可能 是负面的［34］。 这些相互作用可以影响到生态系统 的生产力和多样性，在农业系统中，根系分泌物的积 极作用包括杂草控制、疾病控制、作物管理、提高产 量等［42－43］。 如玉米和蚕豆( Vicia faba) 间作可促进 蚕豆根系结瘤并有效提高玉米和蚕豆的产量［44］。 植物根系分泌物作为化感信号物质，也可作为毒素 抑制周边植物的生长，吸引一些土壤中的病原菌或 者害虫并引起土壤病害或者根部虫害等［45］。 因此， 如何利用化感作用并将其应用于除草、杀虫、植物生 长调节及抗病等应用也是一个的热点。 同样，如何 利用化感作用提高植物的生存和生长及群落的稳定 性，从而提高修复效率和稳定性也是一个值得深入 思考和研究的问题。

根系及其分泌物通过与附近特定的土壤微生物 相互作用影响着根际微生物的种类和分布。 根际微 生物多样性变化受植物的发育阶段、基因型和土壤 环境等因素的影响［46－ 47］ 。 根系主要利用其分泌物 中的低分子量有机化合物影响土壤微生物群落的结 构和功能，在植物与微生物的相互作用中发挥关键 作用。 研究表明，拟南芥的 8 种不同生态型中的每 一种均向其根际释放自己一套独特的化合物，并且 由于不同微生物对这些分泌物的偏好性差异，导致 微生物群落的不同［48］。 此外，与糖和氨基酸等其他 分泌物相比，酚类化合物的组成常与特定的微生物 物种之间存在正相关。 例如，拟南芥转基因植株 ( 过表达 ABC 转运蛋白，与野生型相比，能分泌更多 的酚类化合物到土壤中) ，可引起土壤微生物群落 结构的显著变化。 而施用外源香草酸，也可以明显 改变黄瓜 ( Cucumis sativus) 根际土壤细菌群落的丰 度和组成［49］。

根系分泌物还可改善土壤理化性质。 根系向土 壤中分泌大量的有机和无机物质，不可避免地导致 土壤的物理和化学性质发生变化。 研究表明，玉米 根系分泌物掺入土壤会导致土壤团聚体稳定性立即 增加［50］。 根际附近土壤团粒结构明显多于非根际， 团粒结构的形成改善了土壤的孔性和结构性，进而 改善保水性、透气性等［51］。 此外，土壤 pH 在植物 生长所必需的养分供应方面起着重要作用。 根系分 泌的有机酸可以适当地降低土壤 pH 值，从而增加 了植物对磷等必需养分的获取［52］。

虽然根系分泌物对于植物应对外界环境具有诸

多有益作用，但其在某些情况下对植物也会产生负 面影响，如连作障碍等。 因此，为了提高作物的产 量，在种植生产中需要根据根系分泌物的各种特性 进行合理搭配。

2 根系分泌物与根际微生物互作在环境修复中的 应用

据估计，目前全球土壤问题严重，大约 30%的 土地受各种人为活动的影响被污染或发生退化，并 且这一比例还在继续上升。 与此同时，用于食品和 生物能源的可用土地需求却在不断增加。 通过土壤 修复能够使退化或受污染的土地恢复活力，并有助 于粮食作物与生物燃料的生产和土壤固碳，是满足 日益增长的世界人口的粮食和能源需求的一项有吸 引力的战略。

修复污染/退化土壤的方法主要可分为3 大类: 常规方法、植物修复以及植物与微生物联合治理技 术，常规方法通常基于物理化学技术，如土壤冲洗、 电场应用( 电动学) 以及对受污染基质的挖掘和再 埋等［53］。 通过这些方法可以对土壤进行有效的恢 复，但其自身也存在一些缺点，会导致土壤和景观的 物理化学和生物特性发生显著变化［53］。 而植物修 复虽然能够实现对污染场地的生态恢复，对环境也 比较友好，但也存在缺陷。 而联合植物及其根际微 生物的应用技术，不仅可应用于沙化土壤的修复，还 可以应用于重金属、有机物污染的修复。

目前，基于对根际和植物组织内植物与微生物 之间相互作用的最新研究，有关联合修复重金属或 有机污染物污染土壤的研究和应用有了很大的进 展。 例如，在修复受多环芳烃污染土壤的研究中，联 合运用阴沟肠杆菌( Enterobacter cloacae) HS32、 短杆 菌( Brevibacillus reuszeri) HS37 等后，与对照组相比， 土壤中增加了多种不同分子量的较小代谢物，对 Cr、Ni、Pb 等都实现了很好的去除效果［12］。 2. 1 重金属污染土壤修复

随着社会发展，重金属污染已成为世界性环境 问题，重金属因具有高毒性、难降解性、高富集性，对 生态环境乃至人类造成巨大的危害［54］。 一方面，植 物根系从外界环境吸收的重金属会破坏与植物光合 作用有关酶的活性，并造成三磷酸腺苷的降解，进而 破坏遗传物质脱氧核糖核酸，最终影响到植物的生 长、发育，并且积累在植物可食用部分的重金属可通 过食物链富集，对人体造成严重危害; 另一方面，土 壤中重金属也会对土壤微生物产生毒害作用，导致 土壤微生物数量和活性的降低，影响土壤生态平 衡［40］。 重金属污染的植物根际修复可自然发生，也 可通过人为引入具有污染物降解功能或耐重金属胁 迫的微生物来促进植物生长，以提高植物修复能力， 是一种修复重金属污染土壤经济、有效的方法。

植物和微生物对重金属的耐受能力是根际修复 的重要前提。 当植物处于重金属胁迫条件下，植物 可激活相关的生理、分子机制以更好地适应不良环 境［18］。 例如，植物通过分泌相关物质使重金属处于 非生物活性状态，或利用其细胞壁对重金属进行结 合，也可将重金属离子主动转运到细胞液泡中隔离 起来。 更为重要的是，植物可以响应环境变化释放 出不同种类和数量的根系分泌物，以调节养分的利 用率并排出不需要的金属污染物到土壤当中［40］。 在植物分泌的各种化合物中，特别是低分子量有机 酸( low molecular weight organic acids，LMWOAs ) 的 分泌能够刺激微生物生长，溶解不溶或难溶的矿质 营养物质，并对某些重金属解毒。 LMWOAs 根系分 泌物被认为是植物抵御高浓度金属离子的重要物质 之一，因为它们能够通过根际或质外体的螯合作用 排除金属和类金属，从而阻止金属离子进入细胞共 质体［55］。

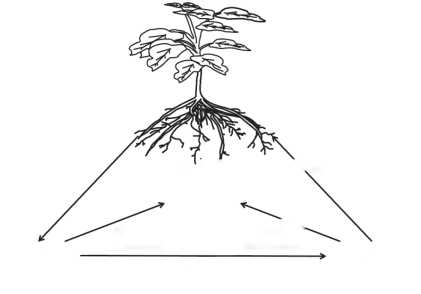
根系分泌物也是微生物的能量来源，可以为根 际微生物提供更好的生长环境。 同样，一些有益的 微生物也可以帮助植物在重金属污染的土壤中获取 足够的矿物质营养，从而使植物建立起更长、更繁茂 的根系［22］。 土壤微生物在重金属污染修复中起着 重要作用。 例如，某些微生物可以通过产生有机配 体及释放出通过配体与阳离子金属或解吸的阴离子 物质络合的代谢产物，增加重金属溶解度并改变其 化合形态，改变根系-环境界面处的吸收和积累，从 而影响植物对重金属的利用和吸收［40］。 根系分泌 物和微生物是根际生态的重要组成部分，在改善重 金属和养分的生物有效性方面发挥着重要作用。

总之，植物-微生物-重金属的相互作用是植物- 微生物在重金属污染修复应用的重要前提。 植物根 系与微生物之间的协同作用可以通过增强植物稳定 作用来实现修复过程。 例如，利用丛枝菌根真菌 ( arbuscular mycorrhizal fungi，AMF) 、根瘤菌 和 内生 菌等对植物的促生等作用，可有效提高植物的生长 并提高植物对重金属污染土壤的修复效果［56－57］。 其中,AMF可与某些高等植物建立共生关系，这些 关联在许多方面对植物都是有益的，包括通过增加 植物对养分的获取，以及增加土壤颗粒的稳定聚集 来改善土壤结构或将重金属结合到根中来限制其向 地上部的迁移，从而促进植物受重金属毒害的部位 生长53。在这方面/ AMF减少了向日葵(*Helianthus annuus* ) 对金属的吸收和分配［58］。 另外，植物根际 促生细菌 ( plant growth-promoting rhizobacteria，PG- PR) 作为另一类重要的微生物，可通过减轻重金属 对植物的毒害作用以保证植物正常的生长及生理活 动，从而有助于植物修复重金属污染土壤［59］。 使用 适当的微生物对植物根际进行接种，可有效提高修 复土壤重金属污染效率( 图 2) 。

如何更加深入地调查、了解根系分泌物，了解植 物与根际微生物如何通过根系分泌物相互作用的机 理，是未来研究的方向，也是利用植物和根际微生物 联合高效修复重金属污染土壤的基础。

2. 2 有机物污染物土壤修复 土壤作为人类获取食物、饲料和燃料等的来源， 被称作“地球上最复杂的生物材料”［60］。 由于对快 速经济增长的需求，处于地圈、大气圈和水圈界面之 间的土壤受到了不同程度的人为干扰，导致大量的 有机污染物( organic pollutants，OPs) ，如农药、 多环 芳烃( polycyclic aromatic hydrocarbons，PAHs) 、石油 等进入土壤［61］。 土壤质量的下降严重威胁着人类 生存，而如何改善土壤质量问题已成为全世界关注 的焦点。

OPs 等污染物在土壤中的降解过程涉及一系列 物理、化学和生物过程，其降解受到其被吸附能力、 生物可利用性、生物有效性及其碳氢化合物终产物 的种类和性质等共同影响［62］。 同时，植物-微生物 组合可以使根区或根际有机污染物被有效矿化、吸 收并被用于促进植物生长，这些相互作用为植物根 际降解有机污染物提供了有利条件。 在这种情况



吸收「 、

Uptake I 重金属

Heavy metal

螯合作用 刺八

Chelation Stimulation

促进根系生长 Improve root growth

提高微生物活性

Improve microbial activity

微生物

Microorganism

释放

Release

根系分泌物

Root exudate

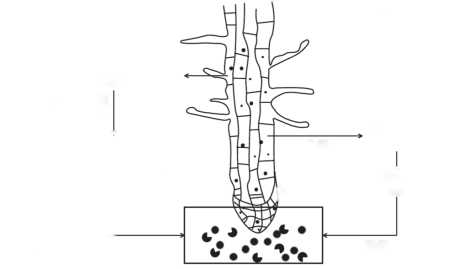
图 2 植物 -微生物 -重金属相互作用的机制示意图

Fig．2 Schematic diagram of the plant-microorganism-heavy metal interaction.

下，植物根系、根系分泌物、根际土壤和微生物之间 这种复杂的相互作用最终促使有机物降解为无毒或 毒性较小的化合物，因此根际修复方法正在成为植 物对有机污染物，特别是对顽固化合物进行修复的 最有效手段之一。

植物根系分泌物是植物-微生物相互作用的重 要调节物质，通过 4 种不同方式实现对有机污染物 的降解: 植物源酶在根际的直接降解、提高污染物 的生物有效性、共代谢过程以及能量/营养物质的刺 激［18］。 根系微生物可直接诱导土壤微生物分解代 谢相关基因的表达，从而改变特定微生物群的种群 变化并最终影响微生物对根际有机污染物的降 解［62］。 而在对有机污染土壤进行修复过程中，根系 分泌物可激活可降解有机污染物微生物群落或相关 根际微生物的活性，从而实现污染土壤中有机化合 物的矿化，帮助植物对有机污染物进行修复。 例如， 根系分泌的有机酸可以改变根际土壤化学性质，提 高土壤有机污染物的生物有效性。 根系分泌物可被 某些土壤微生物群落矿化为生长基质，并作为降解 持久性有机污染物的共代谢产物［62］。 除了糖、氨基 酸和有机酸外，植物还产生大量的次生代谢物。 许 多植物的次生代谢物的结构与污染物相似，因此它 们可以诱导微生物中可分解代谢污染物的基因，降 解外源与根系分泌物类似的污染物［63］( 图 3) 。同 样，微生物可通过促进植物生长和减少有机污染物 的危害，直接或间接地帮助寄主植物。 研究发现，接 种丛枝菌根真菌苏格兰球囊霉( *Glomus caledonium*) 能提高黑麦草( *Lolium perenne*) 在蒽污染土壤中的 存活率，并促进植物生长，而接种丛枝菌根真菌的紫 花苜蓿( *Medicago sativa*) 土壤中苯并芘含量显著低 于未接种处理［64］。

因此，植物与微生物的相互作用通过一系列代



根系中可降解有机物酶的活性 Activity of degradable organic enzyme in roots

根中的次级代谢物

Secondary metabolite in root 诱导分解代谢基因

Inducible catabolic

gene ,,

通过植物酶直接降解 Direct degradation — by the plant enzyme

降解

Degradation

根系分泌物

Root exudate

分泌

Secretion

提高污染物的生物宥效性

[Increased pollutant bioavailability

•有机污染物

Organic pollutant •酶

Enzyme

图 3 根系分泌物在根际降解中的作用

Fig．3 Roles of root exudates during degradation in the rhizo­sphere.

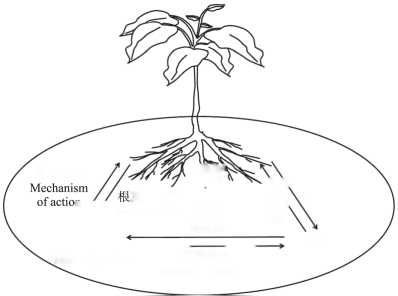
谢转化，促进了有机化合物污染土壤的修复。未来 可通过宏基因组学技术获得微生物代谢相关基因的 信息，进一步帮助我们设计更高效的微生物辅助植 物根际修复手段。

2. 3 沙化土壤修复

城市化、工业化和基础设施的发展，以及全球范 围内对土壤的使用、管理不当造成了土壤履行环境 和社会经济功能的内在能力下降，从而导致农业土 地进一步的损失［65］。因此，为了实现维持农业生产 力和环境质量、保持土壤的可持续利用以及最大限 度地减少土壤损失的目标，修复土壤结构变得至关 重要。

土壤沙化本质上是养分的流失、水分的流失、微 生物系统失衡，由此导致植物死亡，并最终导致土壤 结构的破坏，即空气、水分、土壤 3 组分构成的活性 土壤逐渐变为植物无法生存的土壤。而微生物-植 物互作可减缓土壤的退化，促进土壤的活化。

土壤微生物与植物根系、土壤形成一个稳定的 动态系统，在这个系统中它们之间相互作用。植物 根系为土壤微生物提供养分，土壤微生物反过来促 进植物根系的发育，从而促进植物的生长，并进一步 促进根系分泌物的分泌。植物根系分泌物是土壤微 生物重要的碳源和能源，一方面，能提高土壤微生物 活性，使微生物大量繁殖，根际微生物活性的提高和 数量的增加会促进其产生的酶的活性，并增强对土 壤有机质的降解; 另一方面，微生物会对根分泌物起 到修饰限制作用［66］。植物根系分泌物可通过其化 学特性抵抗机械和水力作用的破坏，提高土壤机械 稳定性［50］。如存在于根系分泌物中的粘液、多糖， 对土壤颗粒有很强的黏着力，高分子黏胶物质与土 壤颗粒相互作用，促进团聚体的形成［67］。植物根尖 释放出的根系分泌物能紧紧黏附在土壤黏粒表面， 并填充土壤空隙，包裹团聚体，防止水破坏团聚体， 从而起到保护团聚体的作用［17］。因此，根和土壤界 面的土壤结构通常比远离根的土壤更加稳定和聚 集。其次，根际微生物是形成土壤团聚体最活跃的 生物因素，微生物通过分泌细胞外聚合物( extracel­lular polymeric substances，EPS) 粘连土壤颗粒，并使 颗粒聚合形成团聚体［68］。团聚体之间构成大量空 腔，为空气、水分留下空间。这种稳定的环境也为植 物提供了合适的生活环境，植物通过分泌根系分泌 物分解土壤难溶的营养元素并进一步固定土壤。在 这个过程中，植物和微生物都从土壤中获取营养，并 分别通过有机物的沉积和代谢活动改变土壤的性



有机废物 Organic waste

土壤

Soil

微生物 ——

Microorganism 代谢活动

Metabolic activity

作用机制柱

系分泌物 *营\*

// Root exudate 营养皿说 / / Nutrish

图 4 植物 、微生物群和土壤之间的相互作用 Fig．4 Interactions between plants，microbiota and soil．

质。且植物通过根部分泌物与微生物进行通讯

( 图 4 ) 。

3 展 望

近年来，随着生态环境问题的日益严重及全球 生态保护意识的提高，人们日益关注生态环境修复 的研究和应用。如如何修复污染土壤，以及在自然 和人为压力下，预防或维持土壤生态系统稳定等。 传统的方法如物理、化学修复成本高，并可能对土壤 生态环境造成不可逆的损害。而生物修复方法，包 括根际微生物、植物修复可通过自身的沉淀、吸附等 机制，在重金属胁迫下生存并从环境中去除重金属， 解决了物理化学修复方法成本高且容易产生二次污 染的缺点，为解决土壤污染问题提供了新的方向。

依靠根际修复污染土壤需要充分发挥植物-根 系分泌物-微生物三者的功能，并建立三者良性互动 的循环。对于如何在筛选根系分泌旺盛且分泌物活 性高的植物，结合科学营养及微生物菌肥施用，应用 于生态环境治理，值得深入探索。随着对根系分泌 物相关研究的深入开展，一些植物根系分泌物的组 成成分已被鉴定，其作用以及相关分泌机制也被逐 渐阐明，但根系分泌物在生态环境修复过程中作用 还有待于进一步研究。而如何高效便捷地收集、分 离、检测、分析以微量水平释放到根际土壤的根系分 泌物，如何利用、结合最新技术，深入、全面地了解根 系分泌过程、机理及其对周边生物和土壤的影响是 未来研究的重点。此外，系统生物学、各种组学、生 物信息学等的快速发展也为未来开展相关工作提供

了更多的思路和途径，CRISPR等基因编辑技术及 转基因技术等，为改造相关植物以提高其根系分泌 物的效能提供了更多可能。

参考文献 13

14]

15]

16]

17]

18]

19]

20]

21]

22]

23]

24]

25]

26]

[1] Oburger E ，Jones D． Sampling root exudates : Mission impossible? *Rhizosphere，* 2018，6： 116-133

2 Bowsher AW, Ali R, Harding SA, *et al.* Evolutionary divergences in root exudate composition among ecologi­cally-contrasting *Helianthus* species. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0148280, doi: 10.1371/journal.pone.0148280

1. 郭婉玑,张子良,刘庆,等 . 根系分泌物收集技术研 究进展. 应用生态学报, 2019, 30( 11): 3951-3962 [Guo W-J, Zhang Z-L, Liu Q, *et al*. Research progress of root exudates collection technology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(11) : 3951-3962]
2. Yin P, Jia A, Heimann K, *et al*. Hot water pretreat­ment-induced significant metabolite changes in the sea cucumber *Apostichopus japonicus*. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126211, doi: 10. 1016/j. foodchem. 2020. 126211
3. Liu W, Zhao Q, Zhang Z, *et al*. Enantioselective effects of imazethapyr on *Arabidopsis thaliana* root exudates and rhizosphere microbes. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137121, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 137121
4. Preece C, Peuuelas J. A return to the wild: Root exu­dates and food security. *Trends in Plant Science*, 2020, 25: 14-21
5. Shen X, Yang F, Xiao C, *et al*. Increased contribution of root exudates to soil carbon input during grassland degradation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 146: 107817, doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107817
6. De Vries FT, Williams A, Stringer F, *et al*. Changes in root-exudate-induced respiration reveal a novel mecha­nism through which drought affects ecosystem carbon cycling. *New Phytologist*, 2019, 224: 132-145
7. Shastri B, Kumar R. Chapter 6: Microbial secondary metabolites and plant-microbe communications in the rhizosphere / / Singh JS, ed. New and Future Develop­ments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2019: 93-111
8. Zhu Y, Yang J, Wang L, *et al*. Factors influencing the uptake and speciation transformation of antimony in the soil-plant system, and the redistribution and toxicity of antimony in plants. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140232, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 140232
9. Rebolledo-Prudencio OG, Dautt-Castro M, Estrada- Rivera M, *et al*. Chapter 1 : Trichoderma in the rhizo­sphere: An approach toward a long and successful sym­biosis with plants / / Gupta VK, Zeilinger S, Singh HB, eds. New and Future Developments in Microbial Biotech­nology and Bioengineering. Amsterdam, the Nether­lands: Elsevier, 2020: 3-38
10. Sarma H, Sonowal S, Prasad MNV. Plant-microbiome assisted and biochar-amended remediation of heavy metals and polyaromatic compounds: A microcosmic study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 176: 288-299

Adeleke R, Nwangburuka C, Oboirien B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. *South Afri­can Journal of Botany*, 2017, 108: 393 -406

Sasse J, Martinoia E, Northen T. Feed your friends: Do plant exudates shape the root microbiome? *Trends in Plant Science*, 2018, 23: 25-41

Badri DV, Vivanco JM. Regulation and function of root exudates. *Plant*, *Cell ＆ Environment*, 2009, 32: 666­681

李娇,蒋先敏,尹华军,等. 不同林龄云杉人工林的 根系分泌物与土壤微生物. 应用生态学报, 2014, 25 ( 2) : 325-332 [Li J, Jiang X-M, Yin H-J, *et al*. Root exudates and soil microbes in three *Picea asperata* plan­tations with different stand ages. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2) : 325-332]

Canarini A, Kaiser C, Merchant A, *et al*. Root exuda­tion of primary metabolites: Mechanisms and their roles in plant responses to environmental stimuli. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 157, doi: 10.3389/fpls.2019. 00157

Gupta A, Patel AK, Gupta D, *et al*. Chapter 13: Rhi- zospheric remediation of organic pollutants from the soil: A green and sustainable technology for soil clean up / / Singh P, Kumar A, Borthakur A, eds. Abatement of Environmental Pollutants. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2020: 263-286

More S. Root exudates a key factor for soil and plant: An overview. *The Pharma Innovation*, 2019, 8: 449 - 459

Akitomo K, Suzanne D, Ryan PR, *et al*. Microbiome and exudates of the root and rhizosphere of *Brachypo- dium distachyon*, a model for wheat. *PLoS One*, 2016, 11(10): doi: 10.1371 /journal.pone.0164533

Wu J, Yu S. Effect of root exudates of *Eucalyptus uro- phylla* and *Acacia mearnsii* on soil microbes under simu­lated warming climate conditions. *BMC Microbiology*, 2019, 19: 224, doi: 10.1186/s12866-019-1604-6 Ma Y, Oliveira RS, Freitas H, *et al*. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interac­tions: Relevance for phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 918, doi: 10.3389/fpls.2016.00918 Bali AS, Sidhu GPS, Kumar V. Root exudates amelio­rate cadmium tolerance in plants: A review. *Environ­mental Chemistry Letters*, 2020, 18: 1243- 1275 Koo BJ, Adriano DC, Bolan NS, *et al．* Root exudates and microorganisms / / Hillel D, ed. Encyclopedia of Soils in the Environment. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2005: 421-428

Gonz{lez-L6pez O, Ruano-Rosa D. Chapter 8： Root exudates, a key factor in the plant-bacteria interaction mechanisms / / Sharma V, Salwan R, Al-Ani LKT, eds. Molecular Aspects of Plant Beneficial Microbes in Agri­culture. London, UK: Academic Press, 2020: 111 -121 Dunn C, Zielinski P, Kent M, *et al.* Investigating whether light intensity can modify decomposition rates in peatlands through control of the ‘enzymic latch'. *Eco­logical Engineering*, 2018, 114: 167-172

1. Martin B ，Gleeson D，Statton J ，et al ． Low light availa­bility alters root exudation and reduces putative benefi­cial microorganisms in seagrass roots． Frontiers in Microbiology，2018，8: 2667，doi: 10． 3389 /fmicb． 2017．02667
2. Meier IC, Tuckmantel T, Heitk!tter J, et al. Root exu­dation of mature beech forests across a nutrient availabi­lity gradient: The role of root morphology and fungal ac­tivity. New Phytologist, 2020, 226: 583－594
3. Steinauer K, Chatzinotas A, Eisenhauer N. Root exudate cocktails: The link between plant diversity and soil microorganisms? Ecology and Evolution, 2016, 6: 7387 － 7396
4. Sasse J, Kosina SM, De Raad M, et al. Root morpho­logy and exudate availability are shaped by particle size and chemistry in Brachypodium distachyon. Plant Direct, 2020, 4, doi: 10.1002 /pld3.207
5. Rohrbacher F, St-Arnaud M. Root exudation: The eco­logical driver of hydrocarbon rhizoremediation. Agro­nomy, 2016, 6: 19, doi: 10.3390/agronomy6010019
6. Li S, Zhou X, Li H, et al. Overexpression of ZmIRT1

and ZmZIP3 enhances iron and zinc accumulation in transgenic arabidopsis. PLoS One, 2015, 10 ( 8 ) :

e0136647, doi: 10.1371/journal.pone.0136647

1. Nozoye T, Nagasaka S, Kobayashi T, et al. The phyto­siderophore efflux transporter TOM2 is involved in metal transport in rice. Journal of biological chemistry, 2015, 290: 27688－27699
2. Massalha H, Korenblum E, Tholl D, et al. Small mole­cules below-ground: The role of specialized metabolites in the rhizosphere. The Plant Journal, 2017, 90: 788 － 807
3. Shitan N, Yazaki K. Dynamism of vacuoles toward sur­vival strategy in plants. Biochimica et Biophysica Acta Biomembranes, 2020, 1862: 183127, doi: 10. 1016 /j. bbamem.2019.183127
4. Badri DV, Loyola-Vargas VM, Broeckling CD, et al. Altered profile of secondary metabolites in the root exu­dates of Arabidopsis ATP-binding cassette transporter mutants. Plant Physiology, 2008, 146: 762－771

37 Wen T, Zhao M, Liu T, et al. High abundance of *Rai-* stonia solanacearum changed tomato rhizosphere micro­biome and metabolome. BMC Plant Biology, 2020, 20: 166, doi: 10.1186 /s12870-020-02365-9

1. Pylak M, Oszust K, Fr-c M. Review report on the role

of bioproducts, biopreparations, biostimulants and

microbial inoculants in organic production of fruit. Reviews in Environmental Science and Bio / Technology, 2019, 18: 597－616

1. Singh D, Prasanna R. Potential of microbes in the bio­fortification of Zn and Fe in dietary food grains: A review. Agronomy for Sustainable Development, 2020, 40: 15, doi: 10.1007 /s13593-020-00619-2
2. Chen C, Li Z, Li S, et al. Effects of root exudates on the activation and remediation of cadmium ion in con­taminated soils. Environmental Science and Pollution Re­search, 2020, 27: 2926－2934
3. Marra LM, De Oliveira-Longatti SM, Soares CRFS, et al. Initial pH of medium affects organic acids production but do not affect phosphate solubilization. Brazilian Jour­nal of Microbiology, 2015, 46: 367－375
4. Farooq M, Jabran K, Cheema ZA, et al. The role of allelopathy in agricultural pest management. Pest Mana­gement Science, 2011, 67: 493－ 506
5. Guerrieri A, Dong L, Bouwmeester HJ. Role and exploi­tation of underground chemical signaling in plants. Pest Management Science, 2019, 75: 2455－2463
6. Li B, Li YY, Wu HM, et al. Root exudates drive inter­specific facilitation by enhancing nodulation and N2 fixa­tion. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113: 6496－6501
7. Kato-Noguchi H. Involvement of allelopathy in the inva­sive potential of Tithonia diversifolia. Plants, 2020, 9: 766, doi: 10.3390 /plants9060766
8. Korenblum E, Dong Y, Szymanski J, et al. Rhizosphere microbiome mediates systemic root metabolite exudation by root-to-root signaling. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117: 3874－3883
9. Tian P, Razavi BS, Zhang X, et al. Microbial growth and enzyme kinetics in rhizosphere hotspots are modula­ted by soil organics and nutrient availability. Soil Bio­logy and Biochemistry, 2020, 141: 107662, doi: 10. 1016/j.soilbio.2019.107662

48 Micallef SA, Shiaris MP, Colon-Carmona A. Influence of Arabidopsis thaliana accessions on rhizobacterial com­munities and natural variation in root exudates. Journal of Experimental Botany, 2009, 60: 1729－ 1742

1. Zhou X, Wu F. Vanillic acid changed cucumber ( Cucu- mis sativus L. ) seedling rhizosphere total bacterial, Pseudomonas and Bacillus spp. communities. Scientific Reports, 2018, 8: 4929, doi: 10. 1038/s41598-018- 23406-2
2. Naveed M, Brown LK, Raffan AC, et al. Plant exudates may stabilize or weaken soil depending on species, ori­gin and time. European Journal of Soil Science, 2017, 68: 806－816
3. Li J, Yuan X, Ge L, et al. Rhizosphere effects promote soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration in rocky areas of desertification. Agriculture, Ecosystems ＆ Environment, 2020, 304: 107126, doi: 10.1016/j.agee.2020.107126

52 Macias-Benitez S, Garcia-Martinez A, Caballero P, et

al. Rhizospheric organic acids as biostimulants: Monito­ring feedbacks on soil microorganisms and biochemical properties. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 633, doi: 10.3389/fpls.2020.00633

1. Dalcorso G, Fasani E, Manara A, et al. Heavy metal pollutions: State of the art and innovation in phytoreme­diation. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20: 3412, doi: 10.3390/ijms20143412
2. Suman J, Uhlik O, Viktorova J, et al. Phytoextraction of heavy metals: A promising tool for clean-up of pollu­ted environment? Frontiers in Plant Science, 2018, 9:

1476, doi: 10.3389/fpls.2018.01476

1. Yan A, Wang Y, Tan SN, *et al*. Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal- polluted land. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 359, doi: 10.3389/fpls.2020.00359
2. Gupta P, Rani R, Usmani Z, *et al*. Chapter 5: The role of plant-associated bacteria in phytoremediation of trace metals in contaminated soils / / Singh JS, Singh DP, eds. New and Future Developments in Microbial Biotech­nology and Bioengineering. Amsterdam, the Nether­lands: Elsevier, 2019: 69-76
3. Fagorzi C, Checcucci A, Dicenzo GC, *et al*. Harnessing rhizobia to improve heavy-metal phytoremediation by legumes. *Genes*, 2018, 9: 542, doi: 10. 3390/ genes9110542
4. Hassan Sel D, Boon E, St-Arnaud M, *et al*. Molecular biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in trace metal-polluted soils. *Molecular Ecology*, 2011, 20: 3469­3483
5. Wu B, Wang Z, Zhao Y, *et al*. The performance of bio­char-microbe multiple biochemical material on bioreme­diation and soil micro-ecology in the cadmium aged soil. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 719- 728
6. Huang Y, Yesilonis I, Szlavecz K. Soil microarthropod communities of urban green spaces in Baltimore, Mary­land, USA. *Urban Forestry ＆ Urban Greening*, 2020, 53: 126676, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126676
7. Qian Z, Mao Y, Xiong S, *et al*. Historical residues of organochlorine pesticides ( OCPs ) and polycyclic aro­matic hydrocarbons ( PAHs) in a flood sediment profile from the Longwang Cave in Yichang, China. *Ecotoxico­logy and Environmental Safety*, 2020, 196: 110542, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.1 10542
8. Ite AE, Ibok UJ. Role of plants and microbes in biore­mediation of petroleum hydrocarbons contaminated soils. *International Journal of Environmental Bioremediation ＆ Biodegradation*, 2019, 7: 1 - 19
9. Reichenauer TG, Germida JJ. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSus- Chem*, 2008, 1: 708-717
10. Rajtor M, Piotrowska-Seget Z. Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi ( AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere*, 2016, 162: 105-116
11. Hasan SS, Zhen L, Miah MG, *et al*. Impact of land use change on ecosystem services: A review. *Environmental Development*, 2020, 34: 100527, doi: 10. 1016 / j. en- vdev.2020.100527
12. Xu H, Shao H, Lu Y. Arbuscular mycorrhiza fungi and related soil microbial activity drive carbon mineralization in the maize rhizosphere. *Ecotoxicology and Environmen­tal Safety*, 2019, 182: 109476, doi: 10.1016/j.ecoenv. 2019.109476
13. Lin Y, Wang L, Li R, *et al*. How do root exudates of

bok choy promote dibutyl phthalate adsorption on molli- sol? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 161: 129-136

1. Costa OYA, Raaijmakers JM, Kuramae EEJFIM. Micro­bial extracellular polymeric substances: Ecological func­tion and impact on soil aggregation. *Frontiers in Microbio­logy*, 2018, 9: 1636, doi: 10.3389/fmicb.2018.01636

作者简介 杨富玲,女, 1998年生,硕士研究生. 主要从事 环境微生物、分子生物学研究. E-mail: 1229438849@ qq.com 责任编辑 肖 红

杨富玲,石杨,李斌,等. 植物根系分泌物在污染及沙化土壤修复中的应用现状与前景. 应用生态学报, 2021, 32( 7) : 2623­

2632

Yang F-L, Shi Y, Li B, *et al*. Status and prospects of the application of root exudates in the restoration of polluted or desertated soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021 , 32( 7) : 2623-2632