

植物-微生物联合对环境有机污染物降解的研究进展

傅婉秋 谢星光 戴传超 吴清倩 贾永*

(南京师范大学生命科学学院 江苏省微生物与功能基因组学重点实验室 江苏省微生物资源产业化工程技术研究中心 江苏 南京 210023)

摘要: 环境中有机污染物的过量积累对生态系统及人类健康造成严重威胁。近年来,许多学者研究发现植物-微生物联合作用对环境有机污染物的去除及生态系统的修复具有非常显著的效果。本文主要从植物-内生菌、植物-菌根菌以及植物-根际微生物这三个层面详细阐述植物-微生物联合降解有机污染物的研究现状,分析植物-微生物在联合降解中的作用,揭示植物-微生物联合降解的机理。但就目前而言,植物-微生物联合降解有机污染物仍存在许多问题,植物-微生物联合降解有机污染物的机理及生态学效应仍不清楚。因此,还需要进一步探讨其潜在作用机制并加强应用实践,这将有助于污染生态系统的治理,促进环境可持续发展。

关键词: 植物-微生物联合, 有机污染物, 生物降解, 环境修复

Progress in the degradation of environmental organic pollutants by plant-microorganism combination

FU Wan-Qiu XIE Xing-Guang DAI Chuan-Chao WU Qing-Qian JIA Yong*

(Jiangsu Key Laboratory for Microbes and Functional Genomics, Jiangsu Engineering and Technology Research Center for Industrialization of Microbial Resources, College of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: The excessive accumulation of organic pollutants in the environment forms great threat to ecosystem and human health. In recent years, many researches have constantly showed prominent effects of the plant-microorganism combination on the degradation of environmental organic pollutants. It has been widely accepted that the plant-microorganism combination generally exists inside the plant and in the rhizosphere, which provides precondition to degrading the organic pollutants and lays foundation for practical application of environmental remediation. In this review, we summarized the research progress based on three aspects of the plant-microorganism combination, including plant-endophyte, plant-mycorrhiza and plant-rhizospheric microorganism. We analyzed the function of the plant-microorganism combination during the process of organic pollutants biodegradation and discussed the degradation mechanisms. However, there are still

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 31300112); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

*Corresponding author: E-mail: jiayong_2001@njnu.edu.cn

Received: May 14, 2016; **Accepted:** August 31, 2016; **Published online** (www.cnki.net): September 07, 2016

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 31300112); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

*通讯作者: E-mail: jiayong_2001@njnu.edu.cn

收稿日期: 2016-05-14; 接受日期: 2016-08-31; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-09-07

challenges to the study of the plant-microorganism combination degradation of environmental organic pollutants, the underlying mechanisms and ecological effects are unclear yet. Therefore, every effort should be made to further clarify the degradation mechanisms, as well as to enhance practical application, thus contributing to the ecosystem management and sustainable development.

Keywords: Plant-microorganism combination, Organic pollutants, Biodegradation, Environmental remediation

世界经济的不断发展、人口的持续增多以及城市化现象的日益加重,使得环境污染问题愈加严重。其中,残留时间长、毒性高的有机污染物,如多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)、多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)、有机氯农药(Organochlorine pesticides, OCPs)、石油等已经成为环境中最主要的污染物^[1],并且已被欧盟纳入《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》中^[2]。有机污染物不仅在外界环境中大量存在,还可以迁移、转化进入植物体内并大量富集^[3],严重影响农产品质量,从而危害人类健康^[4-5]。目前,越来越多的研究开始关注植物与微生物建立的联合体系对有机污染物的降解修复效果^[6]。其中,内生菌^[7-9]、菌根菌^[10]以及根际微生物^[11]是与环境密切相关的三类微生物,其与植物建立的联合体系具有良好的修复有机污染的能力和促进宿主植物生长的作用。因此,本文从植物-内生菌、植物-菌根菌以及植物-根际微生物这三个层面综述植物-微生物联合作用对环境中有机污染物的降解效果、代谢机制及其生态学效应,希望为环境中有机污染的治理提供参考。

1 环境有机污染物

1.1 有机污染物的来源

有机污染物普遍存在于大气、土壤和水等外界环境中,如森林火灾、尾气排放以及化石燃料的工业燃烧等都会释放有机污染物^[12]。同时,有机污染物也可通过多种方式出现在植物体内。

1.1.1 外界环境中有机污染物的来源: 工业生产中“三废”的肆意排放,现代农业发展中农药、化肥的过量施用以及人类生活等,致使有机污染物广泛分布于环境中,无论在土壤、大气还是水体中

都能检测到有机污染物。

1.1.2 植物体内有机污染物的来源: 一方面,由于有机污染物大多具有亲脂性和疏水性,当其沉积于陆地生物系统时主要存在于土壤中^[13]。而植物会通过根系从土壤中吸收有机污染物并经蒸腾流转移到地上部分^[3]。已发现黑麦草^[14]、水稻^[15]、玉米^[16]、萝卜^[17]和白杨^[18]等植物可以吸收并在体内不同组织中积累有机污染物。此外,植物也可以吸收大气中的有机污染物^[19]。Wild 等^[20]通过观察多环芳烃菲从大气进入菠菜和玉米叶部及其在叶片内部迁移分布的过程,发现大气中的菲既能以气态形式被吸收,也可以通过颗粒沉降在叶片表面再扩散进入叶片中。另一方面,植物体自身可产生少量毒性有机物,对作物生长和土壤活性具有破坏性的影响^[21]。

1.2 有机污染物的类型及其危害

环境中的有机污染物主要可分为以下三类:(1)有机氯农药,如滴滴涕等;(2)工业化学品,包括多环芳烃和多氯联苯等;(3)废物燃烧及生产过程中产生的副产品,如二噁英等^[22]。

有机污染物具有致癌、致畸、致突变的毒性作用^[23-25],其能在全球范围内迁移,被生物体摄入后不易分解^[26]。相关研究发现,土壤中极微量的有机污染物也会影响植物的生长和代谢^[27-28],而这些污染物经食物链富集和传递,最终能够进入人体并参与到细胞的代谢活动中,其中一些有机污染物可持续停留在细胞 DNA 中并可能诱发其突变^[29],危害人类健康。

1.3 有机污染物的污染现状

大多数有机污染物能长期滞留于环境中,使大气、水、沉积物、土壤和生物体受到多种有机

污染物不同程度的危害。

大气中的持久性有机污染物(Persistent organic pollutants, POPs)以气体或者吸附在悬浮颗粒物上的形式存在,发生扩散和迁移,导致 POPs 的全球性污染^[30]。在添加汽油和柴油的汽车尾气颗粒物中存在二噁英类物质^[31]。大气颗粒物中 PCBs 含量在城市地区达到 242 pg/m³,而半农业地区为 74 pg/m³。

水及沉积物也是有机污染物聚集的重要场所。水体有机污染物从水及沉积物通过食物链发生生物富集并逐级放大。经调查,我国东海岸的闽江、九龙江和珠江 3 个出海口的沉积物中均存在 POPs,其中 PCBs 和 DDT 的总浓度都较高,而 DDT 的浓度很可能已影响至深海生物^[32-33]。

有机污染物一般水溶性较差,辛醇-水分配系数高。当进入到土壤当中的有机污染物超过其自净能力时可产生显著积累被植物吸收,从而成为植物体内有机污染物。一方面,越来越多的农田土壤受到有机污染物的影响。长江三角洲地区的主要土壤表层中约 15 种 PAHs 的总量可高达 3 881 μg/kg,近一半的农田土壤 PAHs 污染高于 200 μg/kg^[34]。另一方面,植物体也直接受到有机污染物的污染。在农业生产中,大量使用的 POPs 类农药,极易进入农作物内部且不易分解,造成其在植物体内的过量积累。

1.4 有机污染物的修复

1.4.1 环境中有机污染物的常见修复手段: 常见的治理有机污染的方法包括物理修复、化学修复和生物修复。相较于物理修复和化学修复,生物修复^[35]具有诸多优点,如成本低、效果显著、不易产生二次污染等,是一种集低耗、高效和环境安全为一体的生物技术,具有良好的发展潜力。目前,在有机污染物生物修复领域应用较为广泛的是植物修复、微生物修复和植物-微生物联合修复。但是,单独的植物修复和微生物修复由于存在许多缺陷而受到实际应用的限制。其中,植物对污染物的降解主要是通过广谱酶的偶然代谢^[36],由于植物生长周期长以

及植物自身对有机污染物降解能力差等因素,植物修复在短期内很难见效。对于单一的微生物修复,各种环境因素如水分、温度、pH 等均可影响微生物活性并进一步影响微生物的修复效果。此外,微生物降解污染物主要是为了将污染物同化吸收作为必要的能源与营养物质^[36],此修复过程复杂,需要寻找到高效特定的降解菌,修复效率低且易产生次生污染^[37],使其仍处于起步阶段。

1.4.2 植物-微生物联合修复: 植物-微生物联合修复是生物修复研究的新领域,由于其具有高效、低耗、可安全用于大范围污染治理等优点而受到广泛关注。

植物-微生物联合体系中微生物与植物互利共生,利用土壤-植物-微生物组成的复合体系来共同降解有机污染物,清除环境污染。一方面,植物生长过程中通过根系为微生物生长提供生活场所^[34];另一方面,微生物在植物体内或根际旺盛生长,可提高植物对极端温度、水分、营养条件及病原体侵染等外部胁迫的抵抗力,进而增强植物对污染物的降解,促使植物有更加优越的生长空间。这样的植物-微生物联合体系促进了污染物的快速降解、矿化^[37]。

植物-微生物联合体系包括植物-内生菌共生体系、植物-菌根菌联合体系和植物-根际微生物联合体系。如表 1 所示,不同植物-微生物联合体系在有机污染物的降解方面发挥重要作用。

2 植物-内生菌对有机污染物的降解

植物内生菌是指存活于健康植物组织内部,而又不引发宿主植物表现出明显感染症状的微生物类群^[47]。现已报道可与植物建立共生体系的内生细菌中有多个菌属,其中芽孢杆菌属(*Bacillus* sp.)、假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)和不动杆菌属(*Acinetobacter* sp.)等具有降解柴油^[48-49]、苯酚^[50]、蒽^[51]等有机污染物的能力;此外,内生真菌中的拟茎点霉属(*Phomopsis* sp.)^[52]等,对阿魏酸^[7]、肉桂酸^[8]和芥子酸^[9]等有机污染物也具有很好的降解效

表 1 不同植物-微生物联合体系对有机污染物的降解能力
Table 1 The degradation of environmental organic pollutants by different plant-microorganism combinations

植物-微生物联合体系 Plant-microorganism combination	有机污染物 Organic pollutants	试验现象及结论 Phenomenon and conclusion	文献 Reference
柳树和禾本科植物-假单胞菌属 PD1 Willow and grasses- <i>Pseudomonas putida</i> PD1	菲	菲降解率增加 25%–40%	[38]
水稻-拟茎点霉属内生真菌 B3 Rice- <i>Phomopsis liquidambari</i> B3	菲	30 d 后菲残留浓度仅为无菌对照组的 8.40%	[39]
香根草-无色杆菌 F3B Vetiver grass- <i>Achromobacter xylosoxidans</i> F3B	Phenanthrene	污染物毒性减少且蒸散率下降 30%	[40]
柳枝稷- <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Switchgrass- <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400	芳香族化合物	种植柳枝稷的土壤接种 LB400 后总 PCBs 去除率达到 47.30%±1.22%	[41]
紫花苜蓿-苜蓿根瘤菌 <i>Medicago sativa</i> L.- <i>Rhizobium meliloti</i>	多氯联苯	接种根瘤菌的紫花苜蓿根际土壤中 PCBs 去除率显著高于其他处理, 达到 42.6%	[42]
柳枝稷、荻和狼尾草-土壤混合菌 <i>Panicum virgatum</i> , <i>Triarrhena sacchariflora</i> and <i>Pennisetum alopecuroides</i> -Mixed bacteria in soil	石油	经过 150 d 温室降解, 柳枝稷加菌降解率最高为 73.47%, 荻 67.82%, 狼尾草为 68.01%	[43]
白花草木樨-丛枝菌根真菌 <i>Melilotus albus</i> -Arbuscular Mycorrhizal fungi	柴油	柴油毒性减少, 植物生物量和养分含量提高, 抗氧化能力增强	[44]
紫花苜蓿-根际土壤细菌和真菌 <i>Medicago sativa</i> L.-Bacteria and fungus in the rhizosphere	芘	根际芘的平均去除率比非根际高 6%	[45]
牵牛花-菌群 <i>Pharbitis nil</i> L.-Microbial community	石油	石油降解率比无植被时显著增加, 最高为 67.42%	[46]

果。这些内生菌与植物建立联合体系, 通过降解或固定土壤及植物体内有机污染物的方式, 减少植物毒性, 促进植物生长, 从而增强对环境中有机污染的修复^[53]。

2.1 植物-内生菌共生体系对有机污染物的修复潜力

经研究证明, 环境中的有机污染物经植物-内生菌共生体系降解后表现出的修复效果更加显著。近年来, 从不同植物中分离出的内生菌多数都表现出降解污染物以及促进植物生长的特点^[19], 并且植物-内生菌共生体系所表现出的修复潜力比单独应用内生菌进行污染物降解和促进生长都占优势^[54]。据 Khan 等^[38]报道假单胞菌属 PD1 (*Pseudomonas putida* PD1)可改善柳树及禾本科植物体内 PAHs 的降解, 且显示出促进根系和地上部生长以及防止植物受到菲毒性作用的效果。Germaine 等^[55]研究发现接种恶臭假单胞菌 VM1441 (*Pseudomonas putida* VM1441)的植物暴露于萘后, 无论是种子发芽和

植物蒸腾速率均高于未接种的对照组, 且萘的降解速率提高 40%。Sessitsch 等^[56]通过宏基因组分析发现, 从水稻根部分离的内生细菌具有与植物形成共生体系并降解脂肪族和芳香族烃类的潜力。内生真菌也已被证明是一种具有多环芳烃降解能力的新重要微生物资源。Dai 等^[57]研究发现内生真菌角担子菌 B6 (*Ceratobasidium stevensii* B6)在 10 d 内对浓度为 100 mg/L 的菲的降解效率为 89.51%。田林双^[39]研究发现拟茎点霉属(*Phomopsis liquidambari*)内生真菌 B3 与非宿主植物水稻建立共生关系, 可促进水稻生长且对水稻体内多环芳烃菲的降解率高达 95%。

2.2 植物-内生菌共生体系对有机污染物的降解机理

内生菌与植物对有机污染物的降解表现出协同作用。一方面, 定殖于植物各组织如根、茎、叶、花、果实内部的内生菌和植物形成共生作用, 产生特定的酶来降解不能单独转化的有机污染物; 另一方面, 植物为内生菌提供生存场所及

转移氧, 促进内生菌的生长繁殖, 加速有机污染物的降解。

2.2.1 内生菌在植物体内的生长代谢: 内生菌可将环境中的有机污染物作为碳源和能源加以分解和利用。原因有两个: 一是某种内生菌可代谢对应的化学组成和分子结构适合的有机污染物; 二是内生菌的生存环境中缺乏适合利用的碳源物质^[58]。宋歌等^[59]从宿主植物中筛选出能够以多氯联苯和多溴联苯醚为碳源和能源生长的内生菌, 并且这两种污染物对其生长表现出协同作用。Ho 等^[40]研究得到无色杆菌 F3B (*Achromobacter xylosoxidans* F3B) 可利用芳香族化合物为碳源且能够提高共生植物的生物量。内生菌利用植物中有机污染物作为碳源和能源, 不仅增强植物耐受有机污染物的能力, 促进植物在污染环境中的生长, 同时也为内生菌的生长提供原料, 维持其基本的生存条件。

2.2.2 内生菌在植物体内的共代谢: 一般情况下, 高分子量的有机化合物由于复杂的化学结构和低溶解度, 难以被微生物直接降解。通过许多已有研究推测, 内生菌对植物体内的有机污染物可能进行共代谢^[58,60]。Jensen 将共代谢定义为: 微生物可改变某些难降解有机物的化学结构, 但不能将其用作碳源和能源, 它必需从其它底物获取大部分或全部的碳源和能源, 这样的代谢过程称为共代谢^[61]。一种可能性是植物体内存在大量的糖类、淀粉等有机营养物质, 可作为共代谢的初级底物供给内生菌的正常生长, 同时可以产生将目标污染物转化的诱导酶, 促使环境中的有机污染物进行有效降解。另一种可能性是代谢植物体内目标污染物的内生菌利用初级底物或目标污染物的中间产物作为必需营养物质, 这利于促进内生菌生长并增强活性, 从而促使内生菌分泌足够量且高效的活性酶应用于有机污染物的降解^[62-63]。

2.2.3 内生菌产生特定的酶对有机污染物进行逐步降解: 内生菌定殖于植物组织内部, 可产生多种特异性的酶对有机污染物进行降解。Ning 等^[64]证明黄孢原毛平革菌在代谢菲的过程中产生细胞

色素 P450 和锰过氧化物酶, 并且提高锰过氧化物酶活力可增强菲的降解。Corrêa 等^[65]发现内生真菌拥有两种必要的胞外酶系统进行降解: 一是负责多糖降解的水解系统, 主要是木聚糖酶和纤维素酶; 二是独特的木质素氧化系统, 可以打开苯环, 降解木质素, 主要包括漆酶、木质素酶和过氧化物酶。Ambrose 等^[66]的研究表明内生菌表达的水杨酸羟化酶可降解植物体内产生的水杨酸, 使进入宿主的内生菌不至于被宿主攻击而能够稳定定殖于宿主植物各组织内部, 继而产生其他酶发挥降解有机污染物的作用。通常, 可利用加氧酶在 PAHs 苯环内加入氧原子进行环的断裂, 又因为 PAHs 的结构大多有相似性, 使得其代谢的中间产物结构也存在一定的相似性, 因此可推测在一系列能降解 PAHs 的微生物中存在着功能类似的酶^[67]。

内生菌可通过底物诱导产生酶, 使许多难降解有机污染物的中间产物变成易于降解的物质, 且这些中间产物有可能被内生菌作为碳源或能源利用以促进生长, 从而加速有机污染物的降解。在芳香族化合物降解过程中, 顺式二氢二醇是多种芳香烃和相关化合物的细菌代谢中间体, 在内生菌需氧降解芳香烃的代谢途径中需要脱氢酶将其两个氢原子脱去, 形成含两个羟基的中间体, 随后即可被双加氧酶裂解, 最后逐渐降解为能进入基础代谢途径中的化合物。

3 植物-菌根菌对有机污染物的降解

菌根是菌根真菌和高等植物的营养根系产生互惠互利作用形成的一种联合共生体^[68]。菌根真菌指能引起植物形成菌根的真菌, 多属于担子菌亚门, 少部分属子囊菌亚门。常见的有丛枝菌根真菌 (*Arbuscular mycorrhiza*, AM) 的幼套球囊霉 (*Glomus etunicatum*) 和摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*)。

3.1 植物-菌根菌体系对有机污染物的修复潜力

近年来, 生物修复对环境污染的缓解起到有效作用, 而其中植物-菌根菌的互惠作用因在修复有机污染方面表现出诸多独特优势, 使得该体系

对有机污染物的降解越来越受到重视, 相关研究也有很多报道。由于植物体内外微生物种类丰富, 可通过多种微生物协同作用, 菌根真菌与其他微生物如内生菌、根际微生物等形成联合体系^[69], 共同降解环境中的有机污染物, 菌根的某些分泌物也可成为降解污染物的共代谢底物。宋福强等^[70]发现丛枝菌根真菌可修复化学除草剂阿特拉津对环境的影响, 并且接种 AM 真菌的宿主植物根际土壤中微生物数量多于不接种处理, 说明 AM 真菌能促进根际微生物的繁殖, 增强有机污染物的降解。秦华等^[10]通过建立摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和美国南瓜的联合体系对土壤中 PCBs 污染进行研究, 发现菌丝通过影响根际土壤微生物群落结构及生物量, 促进三氯及四氯联苯降解, 从而提高土壤 PCBs 修复效率。菌根真菌不仅通过自身活动为植物生长提供必需但不能主动吸收的营养元素并增加生物量^[68], 还能增强植物的抗逆性与抗病性, 提高其在有机污染环境中的存活率。Leyval 等^[71]研究韭葱、玉米、黑麦草和三叶草接种菌根菌后对多环芳烃的降解, 提出了菌根菌不仅能够增加宿主植物对营养和水的吸收, 而且可以增加多环芳烃的生物可利用性, 提高矿化率和降解率。Kuo 等^[72]报道接种菌根真菌的植物可以增强高浓度重油污染土壤的植物修复效率。Yu 等^[73]研究得到菌根菌-黑麦草在较低菲和芘浓度下可显著提高土壤中芘的消耗以及土壤过氧化物酶活性。

3.2 植物-菌根菌联合降解机理

菌根真菌是异养微生物, 可通过有机污染物提供外源碳, 在维持菌根真菌基本生长的同时达到降解有机污染物的目的, 而对难降解的有机污染物一般进行共代谢。

然而, 在植物-菌根菌联合降解中最具特征的是菌根际作用^[74]。植物生长幼期阶段, 菌根真菌侵染到植物根部, 随着植物的生长, 菌根真菌的菌丝逐渐深入土壤中, 极大增加根系表面积, 提高植物对有机污染物的吸收率, 有利于增强植物修复效率; 此外, 菌根真菌本身也具有分解有机污

染物的潜力, 可直接降解有机污染物。因此, 菌根真菌可与植物根系、根际微生物形成特有的结构进行相互作用, 发挥菌根际效应^[75]。

菌根真菌侵染植物根系可以形成大量的根外菌丝, 产生的菌丝可直接与有机污染物反应, 并且可促进植物有效吸收和代谢有机污染物。Huang 等^[76]建立了玉米与丛枝菌根真菌幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)的联合体系, 通过分室培养比较菌根室和菌丝室中阿特拉津降解的不同, 发现在较低浓度污染下, 菌丝室中阿特拉津降解较多, 且菌丝室中磷酸酶和脱氢酶活力增加。这说明与菌根相比, 菌丝体在阿特拉津的降解过程中发挥较大作用。

根系分泌物对菌根真菌具有刺激强化的作用。植物生长过程中经根系释放一些物质到根区土壤, 增强周围微生物活性, 并且这些根系分泌物还有可能成为难降解有机污染物的共代谢底物, 从而有利于土壤中有机污染物的降解^[37]。

具有降解活性的菌根菌能够利用植物根际提供的生活场所和氧气进行快速增殖^[75], 这也间接促进有机污染物的降解及其在植物根际的矿化作用。

植物根区的菌根真菌与植物形成联合体系后可促进许多酶的活性, 常见的如过氧化物酶、氧化还原酶和多酚氧化酶等。肖敏等^[77]研究发现在菲芘复合污染的土壤中, 三叶草接种摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和幼套球囊霉(*Glomus etunicatum*)后, 提高了根际土壤酸性磷酸酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶活性。有研究发现, 将丛枝菌根真菌与植物生长促进细菌联合接种到植物中, 可显著增加超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活力, 增强植物对有机污染物的耐受性, 同时还可以增强土壤酶如脲酶、蔗糖酶和脱氢酶的活性来改善土壤质量^[78]。

4 植物-根际微生物对有机污染物的降解

根际是指受植物根系紧密影响同时确保植物根系进行正常生长发育的区域, 该场所可进行植物与外界环境的能量与物质交换, 也可与多种微

生物共同构成复杂的生态区系进行环境中有机污染物的降解^[79]。根际具有丰富的微生物多样性, 主要包括假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)、黄杆菌属(*Flavobacterium* sp.)、产碱菌属(*Alcaligenes* sp.)和土壤杆菌属(*Agrobacterium* sp.), 也具有强烈的根际效应^[80]。植物根际土壤中微生物数量和种类显著多于根围土壤中^[81], 有研究表明, 根际细菌种类比根外土壤中多 1.5–3.0 倍^[82], 这种多样的数量和种类构成了较为复杂的生物链和巨大的污染物降解群体, 有助于有机污染物的降解^[83]。

4.1 植物-根际微生物联合降解效果

植物-根际微生物对环境中的有机污染物存在联合降解的作用。焦海华等^[11]探讨了棉花及其根际微生物的联合与石油烃降解的相关关系, 发现与未栽种棉花的对照相比, 栽种棉花的污染土壤中石油烃的降解率在整个生育期提高了 44.0%, 而棉花根际微生物的种类和生物量在棉花各生育期都有显著增加。Liang 等^[41]比较污染土壤中不种植柳枝稷、种植柳枝稷以及种植柳枝稷同时接菌的 PCBs 降解情况, 发现 PCBs 降解率最高的是种植有柳枝稷且其根际处接种了细菌 *Burkholderia xenovorans* LB400 的污染土壤。

在根际混合微生物区系中, 由于微生物种类多、数量大, 其与植物的联合降解作用更加显著。邓振山等^[84]选择多种根际微生物如根瘤菌、石油烃降解菌、根际促生菌与扁豆组合为联合体系对土壤石油污染物的降解进行初步研究。发现扁豆与根际微生物联合降解率达到 83.05%, 比单独种植扁豆的土壤中石油的降解率高出一倍左右, 也比单独加入微生物的土壤石油降解率高出 12.48%。Shahsavari 等^[85]发现存在于小麦根际的细菌和真菌群落可与小麦联合对有机污染物进行降解, 与没有种植小麦的污染土壤相比, 种植小麦的污染土壤中苡降解率高出 50%。

4.2 植物-根际微生物联合降解机制

有机污染物进入土壤后, 随着与土壤接触时间的延长, 有机污染物会与土壤颗粒或者其他有

机物紧密结合在一起而难以被利用或者降解^[37], 使得有机污染物的生物利用度降低, 发生老化现象, 继而增加降解代谢的难度^[83], 所以提高有机污染物的生物利用度对后续的高效降解是必要的。由于植物生长所释放的根系分泌物不仅刺激根际微生物的活性、影响繁殖^[86], 还会对土壤中有机污染物产生活化作用^[87]。所以可利用根系分泌物提高有机污染物降解能力。根系分泌物可使根际产生浓度较高的碳水化合物、氨基酸、维生素及其他生长因子, 将土壤中锁定的有机污染物从土壤表面分离^[37], 进而便于植物-根际微生物联合对老化的有机污染物进行有效降解。Muratova 等^[88]研究发现紫花苜蓿与 4 种根际微生物建立联合体系后产生的根系分泌物在多环芳烃菲污染降解中发挥积极作用。

根际微生物的新陈代谢和增殖可依赖于植物输送到根部的营养物质及氧气, 同时植物根系还能作为根际微生物的共代谢提供代谢底物, 促进诸如多元苯环、多氯联苯、表面活性剂以及农药等难降解有机污染物的降解^[83]。另外, 当植物根-土壤界面受到有机污染物的影响而产生胁迫时, 植物通常会直接释放出特异性的根系分泌物, 并在体外建立抗衡模式, 从而增强根际微生物群落转化, 降低污染物毒性^[81]。将 3 种不同的植物种在 PCBs 长期污染的土壤上, 6 个月后土壤中 PCBs 含量显著降低, 且发现根际土壤细菌总数显著升高, 而植物根系附近 PCBs 降解菌的数量、种类和活性也明显增加^[89]。

5 问题与展望

植物-微生物联合体系在环境污染修复领域的研究有着非常广阔的前景, 具有降解效率高、修复彻底以及提高植物对有机污染物的耐受性等优点。但是, 由于诸多外界因素的影响, 植物-微生物联合体系去除有机污染物仍存在许多问题。首先, 在植物-微生物联合体系中, 对于植物与微生物之间是如何通过相互作用来降解有机污染物的认识仍是有限的, 比如在植物根际或者内部接种内生菌后其定殖、转移及其持久性, 植物代谢产

物对微生物去除污染物的刺激机制,以及在植物和微生物内部,污染物降解基因的表达以及水平基因的转移等方面仍有待于进一步研究^[90]。其次,在有机污染物去除过程中,其降解的彻底性以及是否会产生二次污染物仍是研究者面临的一个棘手问题,并且目前尚缺乏高可信度的检测方法^[91]。再者,在大多数情况下,有机污染物的降解往往是通过一组微生物联合进行的,对这些微生物组合是如何在根际以及植物内部进行空间分布并联合代谢有待于深入研究^[92]。此外,由于植物-微生物联合降解有机污染物的进行受到土壤、气候、养分等难以控制的环境条件影响较大,对于自然环境中利用此修复方法进行实际应用仍存在难点。

基于存在的问题,对有机污染物治理的研究可以从以下方面继续展开:探究植物-微生物联合体系,包括植物-内生菌、植物-菌根菌、植物-根际微生物中植物与微生物相互作用的机理。由于植物体中微生物类群极其丰富,植物同时形成多种共生情况是普遍的,研究多种植物-微生物联合能够更加真实地反映环境中植物的微生态系统,同时,探明植物是如何同时与不同的微生物建立联合体系并从中找到平衡点对实际的应用具有指导性意义^[93];研究植物-微生物联合降解有机污染物的机理,包括降解途径,降解中间产物的性质,降解过程中酶的变化以及降解有机污染物过程中吸收、代谢或者转移污染物的特定基因等;探寻自然环境中具有有机污染物降解能力的微生物以及筛选合适高效的植株;在自然环境中利用植物-微生物联合体系降解有机污染物,对其所需的特定环境条件进行研究;解决微生物与宿主植物的协调共存问题,研究土著微生物群落与联合微生物之间的关系,从而最大限度地发挥联合体系在规避植物有机污染风险上的能力。

随着研究手段的不断发展以及基础研究的不断深入,可以对植物-微生物共生体系降解有机污染物的探索更进一步,同时应当致力于将植物-微生物联合去除有机污染物运用于生产实践当中,为环境污染的治理开拓一条新型可行的道路。

参考文献

- [1] Sun HX. Review on persistent organic pollutants (POPs)[J]. Experiment Teaching & Instrument, 2014, 31(10): 21-23 (in Chinese)
孙海霞. 关于持久性有机污染物的研究[J]. 实验教学与仪器, 2014, 31(10): 21-23
- [2] Zheng MH. Review of persistent organic pollutants (POPs)[J]. Scientia Sinica Chimica, 2013, 43(3): 253-254 (in Chinese)
郑明辉. 持久性有机污染物研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2013, 43(3): 253-254
- [3] Lin QQ, Cai XD, Wang SZ, et al. Uptake, translocation and metabolism of organic pollutants by plants: mechanisms and affecting factors[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(4): 661-667 (in Chinese)
林庆祺, 蔡信德, 王诗忠, 等. 植物吸收、迁移和代谢有机污染物的机理及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 661-667
- [4] Bansal V, Kim KH. Review of PAH contamination in food products and their health hazards[J]. Environment International, 2015, 84: 26-38
- [5] Petrik J, Drobna B, Pavuk M, et al. Serum PCBs and organochlorine pesticides in Slovakia: age, gender, and residence as determinants of organochlorine concentrations[J]. Chemosphere, 2006, 65(3): 410-418
- [6] Wani ZA, Ashraf N, Mohiuddin T, et al. Plant-endophyte symbiosis, an ecological perspective[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(7): 2955-2965
- [7] Xie XG, Dai CC. Degradation of a model pollutant ferulic acid by the endophytic fungus *Phomopsis liquidambari*[J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 35-42
- [8] Xie XG, Dai CC. Biodegradation of a model allelochemical cinnamic acid by a novel endophytic fungus *Phomopsis liquidambari*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 104: 498-507
- [9] Xie XG, Huang CY, Fu WQ, et al. Potential of endophytic fungus *Phomopsis liquidambari* for transformation and degradation of recalcitrant pollutant sinapic acid[J]. Fungal Biology, 2016, 120(3): 402-413
- [10] Qin H, Bai JF, Xu QF, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae on soil microbial community composition and polychlorinated biphenyls degradation[J]. Soils, 2015, 47(4): 704-710 (in Chinese)
秦华, 白建峰, 徐秋芳, 等. 丛枝菌根真菌菌丝对土壤微生物群落结构及多氯联苯降解的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 704-710
- [11] Jiao HH, Bian GP, Cui BJ, et al. Correlation between rhizosphere microbial community of *Gossypium* spp. and petroleum hydrocarbon degradation in the petroleum contaminated saline-alkali soil[J]. Microbiology China, 2015, 42(8): 1501-1511 (in Chinese)
焦海华, 边高鹏, 崔丙健, 等. 石油污染盐碱土壤棉花根际微生物与石油烃降解关系[J]. 微生物学通报, 2015, 42(8): 1501-1511
- [12] Gan S, Lau EV, Ng HK. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(2/3): 532-549
- [13] Kim KH, Jahan SA, Kabir E, et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects[J]. Environment International, 2013, 60: 71-80
- [14] Ahmad F, Iqbal S, Anwar S, et al. Enhanced remediation of chlorpyrifos from soil using ryegrass (*Lolium multiflorum*) and chlorpyrifos-degrading bacterium *Bacillus pumilus* C2A1[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 237-238: 110-115
- [15] Li QL, Wang Y, Luo CL, et al. Characterization and risk assessment of polychlorinated biphenyls in soils and rice tissues

- in a suburban paddy field of the Pearl River Delta, South China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(15): 11626-11633
- [16] Liao CJ, Liang XJ, Lu GN, et al. Effect of surfactant amendment to PAHs-contaminated soil for phytoremediation by maize (*Zea mays* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 112: 1-6
- [17] Mikes O, Cupr P, Trapp S, et al. Uptake of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides from soil and air into radishes (*Raphanus sativus*)[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(2): 488-496
- [18] Chen ZX, Ni HG, Jing X, et al. Plant uptake, translocation, and return of polycyclic aromatic hydrocarbons via fine root branch orders in a subtropical forest ecosystem[J]. Chemosphere, 2015, 131: 192-200
- [19] Afzal M, Khan QM, Sessitsch A. Endophytic bacteria: prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants[J]. Chemosphere, 2014, 117: 232-242
- [20] Wild E, Dent J, Thomas GO, et al. Visualizing the air-to-leaf transfer and within-leaf movement and distribution of phenanthrene: further studies utilizing two-photon excitation microscopy[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 907-916
- [21] Xie XG, Chen Y, Bu YQ, et al. A review of allelopathic researches on phenolic acids[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6417-6428 (in Chinese)
谢星光, 陈晏, 卜元卿, 等. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428
- [22] Wang CH, Wu SH, Zhou SL, et al. A review on spatial distribution and environmental behavior of typical persistent organic pollutants in soil[J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(11): 1828-1840 (in Chinese)
王春辉, 吴绍华, 周生路, 等. 典型土壤持久性有机污染物空间分布特征及环境行为研究进展[J]. 环境化学, 2014, 33(11): 1828-1840
- [23] Mahanty B, Pakshirajan K, Dasu VV. Understanding the complexity and strategic evolution in PAH remediation research[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41(19): 1697-1746
- [24] Guo H, Yao J, Cai MM, et al. Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic activity and urease activity[J]. Chemosphere, 2012, 87(11): 1273-1280
- [25] Havelcová M, Melegy A, Rapant S. Geochemical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and sediments of El-Tabbin, Egypt[J]. Chemosphere, 2014, 95: 63-74
- [26] Li X. Study on persistent organic pollutants (POPs)[J]. China Science & Technology Panorama Magazine, 2010(13): 129-130 (in Chinese)
李欣. 持久性有机污染物(POPs)的研究[J]. 中国科技纵横, 2010(13): 129-130
- [27] Sun JL, Zeng H, Ni HG. Halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment[J]. Chemosphere, 2012, 90(6): 1751-1759
- [28] MacKinnon G, Duncan HJ. Phytotoxicity of branched cyclohexanes found in the volatile fraction of diesel fuel on germination of selected grass species[J]. Chemosphere, 2013, 90(3): 952-957
- [29] Phillips DH. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the diet[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 1999, 443(1/2): 139-147
- [30] Xie WM, Hu YY, Liu HB, et al. Environmental issue and study progress of persistent organic pollutants (POPs)[J]. Environmental Monitoring in China, 2004, 20(2): 58-61 (in Chinese)
谢武明, 胡勇有, 刘焕彬, 等. 持久性有机污染物(POPs)的环境问题与研究进展[J]. 中国环境监测, 2004, 20(2): 58-61
- [31] Miyabara Y, Hashimoto S, Sagai M, et al. PCDDs and PCDFs in vehicle exhaust particles in Japan[J]. Chemosphere, 1999, 39(1): 143-150
- [32] Zhang ZL, Hong HS, Yu G. Preliminary study on persistent organic pollutants (POPs)-PCBs in multi-phase matrices in Minjiang River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(6): 788-791 (in Chinese)
张祖麟, 洪华生, 余刚. 闽江口持久性有机污染物—多氯联苯的研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 788-791
- [33] Yuan DX, Yang DN, Wade TL, et al. Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China[J]. Environmental Pollutant, 2001, 114(1): 101-111
- [34] Cheng GL, Li PJ, Wang FY, et al. Enhanced bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil[J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(6): 1-6 (in Chinese)
程国玲, 李培军, 王凤友, 等. 多环芳烃污染土壤生物修复的强化方法[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(6): 1-6
- [35] Huang QC, Huang MS, Chi JP, et al. Development and prospect of bioremediation for persistent organic pollutants in sediments[J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, 34(2): 36-40, 50 (in Chinese)
黄勤超, 黄民生, 池金萍, 等. 沉积物中持久性有机污染物生物修复的现状与展望[J]. 三峡环境与生态, 2012, 34(2): 36-40, 50
- [36] Fenner K, Canonica S, Wackett LP, et al. Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities[J]. Science, 2013, 341(6147): 752-758
- [37] Yang H, Wang HX, Li XJ, et al. Research progress on the bioremediation technology of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 1427-1429, 1431 (in Chinese)
杨辉, 王海霞, 李晓军, 等. 多环芳烃污染土壤生物修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1427-1429, 1431
- [38] Khan Z, Roman D, Kintz T, et al. Degradation, phytoprotection and phytoremediation of phenanthrene by endophyte *Pseudomonas putida*, PD1[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 12221-12228
- [39] Tian LS. The study on the degradation of phenanthrene by endophytic fungus[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing Normal University, 2007 (in Chinese)
田林双. 内生真菌降解多环芳烃菲研究[D]. 南京: 南京师范大学硕士学位论文, 2007
- [40] Ho YN, Hsieh JL, Huang CC. Construction of a plant-microbe phytoremediation system: combination of vetiver grass with a functional endophytic bacterium, *Achromobacter xylosoxidans* F3B, for aromatic pollutants removal[J]. Bioresource Technology, 2013, 145: 43-47
- [41] Liang Y, Meggo R, Hu DF, et al. Enhanced polychlorinated biphenyl removal in a switchgrass rhizosphere by bioaugmentation with *Burkholderia xenovorans* LB400[J]. Ecological Engineering, 2014, 71: 215-222
- [42] Xu L, Teng Y, Zhang XL, et al. Combined remediation of PCBs polluted soil by plant and microorganism in a field trial[J]. China Environmental Science, 2008, 28(7): 646-650 (in Chinese)
徐莉, 滕应, 张雪莲, 等. 多氯联苯污染土壤的植物-微生物联合田间原位修复[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 646-650
- [43] Wang JX, Zhang ZY, Wan YY, et al. Experimental study on plant-microbial remediation of oil-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(8): 3454-3460 (in Chinese)
王京秀, 张志勇, 万云洋, 等. 植物-微生物联合修复石油污染土壤的实验研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(8): 3454-3460
- [44] Hernández-Ortega HA, Alarcón A, Ferrera-Cerrato R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, nutrient status, and total antioxidant activity of *Melilotus albus* during phytoremediation of

- a diesel-contaminated substrate[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 95 Suppl: S319-S324
- [45] Fan SX, Li PJ, Gong ZQ, et al. Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. Chemosphere, 2008, 71(8): 1593-1598
- [46] Zhang ZN, Zhou QX, Peng SW, et al. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil* L. and its microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(22): 5600-5605
- [47] Yao LA, Hu ZB, Wang LL, et al. Research development of the relationship between plant endophyte and host[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1750-1754 (in Chinese)
姚领爱, 胡之璧, 王莉莉, 等. 植物内生菌与宿主关系研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1750-1754
- [48] Zhang ZZ, Hou ZW, Yang CY, et al. Degradation of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in petroleum by a newly isolated *Pseudomonas aeruginosa* DQ8[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(5): 4111-4116
- [49] Zhang XY, Liu XY, Wang Q, et al. Diesel degradation potential of endophytic bacteria isolated from *Scirpus triquetus*[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 87: 99-105
- [50] Ontañón OM, González PS, Agostini E. Biochemical and molecular mechanisms involved in simultaneous phenol and Cr(VI) removal by *Acinetobacter guillouiae* SFC 500-1A[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(17): 13014-13023
- [51] Sun K, Liu J, Jin L, et al. Utilizing pyrene-degrading endophytic bacteria to reduce the risk of plant pyrene contamination[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 251-262
- [52] Tian LS, Dai CC, Zhao YT, et al. The degradation of phenanthrene by endophytic fungi *Phomopsis* sp. single and co-cultured with rice[J]. China Environmental Science, 2007, 27(6): 757-762 (in Chinese)
田林双, 戴传超, 赵玉婷, 等. 一株内生真菌单独及与水稻联合降解菲的研究[J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 757-762
- [53] Li HY, Wei DQ, Shen M, et al. Endophytes and their role in phytoremediation[J]. Fungal Diversity, 2012, 54(1): 11-18
- [54] Glick BR. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(3): 367-374
- [55] Germaine KJ, Keogh E, Ryan D, et al. Bacterial endophyte-mediated naphthalene phytoprotection and phytoremediation[J]. FEMS Microbiology Letters, 2009, 296(2): 226-234
- [56] Sessitsch A, Hardoim P, Döring J, et al. Functional characteristics of an endophyte community colonizing rice roots as revealed by metagenomic analysis[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2012, 25(1): 28-36
- [57] Dai CC, Tian LS, Zhao YT, et al. Degradation of phenanthrene by the endophytic fungus *Ceratobasidium stevensii* found in *Bischofia polycarpa*[J]. Biodegradation, 2010, 21(2): 245-255
- [58] Shi CC. Review of the biodegradation cometabolism and kinetics of the organic contaminant[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2010(7): 164-167, 121 (in Chinese)
石成春. 有机污染物微生物共代谢降解及其动力学研究[J]. 化学工程与装备, 2010(7): 164-167, 121
- [59] Song G, Cai M, Li YL, et al. Isolation and identification of plant endophytic bacteria survived in polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(6): 1127-1133 (in Chinese)
宋歌, 才满, 李燕玲, 等. 几种可利用多氯联苯和多溴联苯醚植物内生菌的分离及初步鉴定[J]. 环境化学, 2015, 34(6): 1127-1133
- [60] Guo JB, Chen W, Ma F, et al. Microbial co-metabolism of the refractory organic pollutants in the environmental pollution control[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(6): 223-227 (in Chinese)
郭静波, 陈微, 马放, 等. 环境污染治理中难降解有机污染物的生物共代谢[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 223-227
- [61] Jensen HL. Carbon nutrition of some microorganisms decomposing halogen-substituted aliphatic acids[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 1963, 13(4): 404-412
- [62] Stumpe B, Marschner B. Factors controlling the biodegradation of 17 β -estradiol, estrone and 17 α -ethinylestradiol in different natural soils[J]. Chemosphere, 2009, 74(4): 556-562
- [63] Subramanyam R, Mishra IM. Biodegradation of catechol (2-hydroxy phenol) bearing wastewater in an UASB reactor[J]. Chemosphere, 2007, 69(5): 816-824
- [64] Ning DL, Wang H, Ding C, et al. Novel evidence of cytochrome P450-catalyzed oxidation of phenanthrene in *Phanerochaete chrysosporium* under ligninolytic conditions[J]. Biodegradation, 2010, 21(6): 889-901
- [65] Corrêa RCG, Rhoden SA, Mota TR, et al. Endophytic fungi: expanding the arsenal of industrial enzyme producers[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2014, 41(10): 1467-1478
- [66] Ambrose KV, Tian ZP, Wang YF, et al. Functional characterization of salicylate hydroxylase from the fungal endophyte *Epichloë festucae*[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10939
- [67] Liu SL, Luo YM, Cao ZH, et al. Progress in study on bioremediation of PAHs-contaminated soil using soil microorganisms combined with plant[J]. Soils, 2002, 34(5): 257-265 (in Chinese)
刘世亮, 骆永明, 曹志洪, 等. 多环芳烃污染土壤的微生物与植物联合修复研究进展[J]. 土壤, 2002, 34(5): 257-265
- [68] Zou DX, Luo YM, Xu FH, et al. Microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil environment and combined bioremediation of PAHs contaminated soils[J]. Soils, 2007, 39(3): 334-340 (in Chinese)
邹德勋, 骆永明, 徐凤花, 等. 土壤环境中多环芳烃的微生物降解及联合生物修复[J]. 土壤, 2007, 39(3): 334-340
- [69] Jia Y, Song FQ. The chemotaxis of arbuscular mycorrhizal to rhizobia[J]. Microbiology China, 2008, 35(5): 743-747 (in Chinese)
贾永, 宋福强. 丛枝菌根(AM)对根瘤菌趋化作用研究[J]. 微生物学通报, 2008, 35(5): 743-747
- [70] Song FQ, Ding ML, Dong AR, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on atrazine degradation in soil planted sorghum[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 189-193 (in Chinese)
宋福强, 丁明玲, 董爱荣, 等. 丛枝菌根(AM)真菌对土壤中阿特拉津降解的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 189-193
- [71] Leyval C, Binet P. Effect of polyaromatic hydrocarbons in soil on arbuscular mycorrhizal plants[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(2): 402-407
- [72] Kuo HC, Juang DF, Yang L, et al. Phytoremediation of soil contaminated by heavy oil with plants colonized by mycorrhizal fungi[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014, 11(6): 1661-1668
- [73] Yu XZ, Wu SC, Wu FY, et al. Enhanced dissipation of PAHs from soil using mycorrhizal ryegrass and PAH-degrading bacteria[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(2/3): 1206-1217
- [74] Robertson SJ, Kennedy NM, Massicotte HB, et al. Enhanced biodegradation of petroleum hydrocarbons in the mycorrhizosphere of sub-boreal forest soils[J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, 2(4): 587-593
- [75] Wu NY, Gao W, Huang HL, et al. Progress of study on degradation mechanism of mycorrhizal fungi to organic pollutants of soil[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(1): 31-34 (in Chinese)

- 武耐英, 高伟, 黄红林, 等. 菌根真菌影响土壤有机污染物降解机理的研究进展[J]. 中国水土保持, 2010(1): 31-34
- [76] Huang HL, Zhang SZ, Wu NY, et al. Influence of *Glomus etunicatum*/*Zea mays* mycorrhiza on atrazine degradation, soil phosphatase and dehydrogenase activities, and soil microbial community structure[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(4): 726-734
- [77] Xiao M. Effects of arbuscular mycorrhiza on enzyme in soils contaminated by polycyclic aromatic hydrocarbons[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- 肖敏. 丛枝菌根修复多环芳烃污染土壤的几种酶活性研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2009
- [78] Xun FF, Xie BM, Liu SS, et al. Effect of plant growth-promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on oats in saline-alkali soil contaminated by petroleum to enhance phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 22(1): 598-608
- [79] Anderson TA, Guthrie EA, Walton BT. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(13): 2630-2636
- [80] Guo H, Mao ZQ, Liu XL. Research progress of interaction between plant and microorganism[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9): 28-33 (in Chinese)
- 国辉, 毛志泉, 刘训理. 植物与微生物互作研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9): 28-33
- [81] Cui S, Xiao MY, Li P. Research progress in sustainability organic pollutants rhizosphere micro-interface chemical processes[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(9): 1843-1845, 1849 (in Chinese)
- 崔爽, 肖明月, 李萍. 可持续性有机污染物根际微界面化学过程的研究进展[J]. 当代化工, 2014, 43(9): 1843-1845, 1849
- [82] Wei SM, Wu XP, Li RZ. Phytoremediation of organic pollutants[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(5): 384-388 (in Chinese)
- 卫士美, 武小平, 李润植. 有机污染物的植物修复[J]. 生态农业科学, 2006, 22(5): 384-388
- [83] Dai QS, Han XR, Huang H, et al. Bioremediation status quo and development of organic pollutants by using rhizosphere microorganisms[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 27(1): 71-74 (in Chinese)
- 戴青松, 韩锡荣, 黄浩, 等. 根际微生物对土壤有机物修复现状和发展[J]. 环境科技, 2014, 27(1): 71-74
- [84] Deng ZS, Wang AZ, Sun ZH, et al. Remediation experiments of utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms on petroleum-contaminated soil[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2014, 44(2): 241-247 (in Chinese)
- 邓振山, 王阿芝, 孙志宏, 等. 利用植物-根际菌协同作用修复石油污染土壤[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2014, 44(2): 241-247
- [85] Shahsavari E, Adetutu EM, Taha M, et al. Rhizoremediation of phenanthrene and pyrene contaminated soil using wheat[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 155: 171-176
- [86] He H, Wang ZW, Hu D, et al. Progress on interactions between root exudates and rhizosphere microorganisms[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(3): 69-73 (in Chinese)
- 何欢, 王占武, 胡栋, 等. 根系分泌物与根际微生物互作研究进展[J]. 河北农业科学, 2011, 15(3): 69-73
- [87] Rentz JA, Alvarez PJJ, Schnoor JL. Benzo[a]pyrene co-metabolism in the presence of plant root extracts and exudates: implications for phytoremediation[J]. Environmental Pollution, 2005, 136(3): 477-484
- [88] Muratova A, Dubrovskaya E, Golubev S, et al. The coupling of the plant and microbial catabolisms of phenanthrene in the rhizosphere of *Medicago sativa*[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 188: 1-8
- [89] Chen BL, Yuan MX, Liu H. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous solution using plant residue materials as a biosorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 188(1/3): 436-442
- [90] Segura A, Ramos JL. Plant-bacteria interactions in the removal of pollutants[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2013, 24(3): 467-473
- [91] Chen J, Huang W, Han J, et al. The characterization and application of biological remediation technology for organic contaminants[J]. International Journal of Environmental Research, 2011, 5(2): 515-530
- [92] Zhang YX, Tao S. Global atmospheric emission inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) for 2004[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(4): 812-819
- [93] Yuan ZL, Zhang CL, Lin FC. Recent advances on physiological and molecular basis of fungal endophyte-plant interactions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4430-4439 (in Chinese)
- 袁志林, 章初龙, 林福呈. 植物与内生真菌互作的生理与分子机制研究进展[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4430-4439