

王梦姣, 杨国鹏, 乔 帅, 等. 植物-根际微生物协同修复有机物污染土壤的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(1): 5-8.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.01.002

植物-根际微生物协同修复有机物污染土壤的研究进展

王梦姣^{1,2,3}, 杨国鹏³, 乔 帅³, 邓百万^{2,3}, 陈文强^{2,3}

(1. 陕西理工大学陕西省资源生物重点实验室, 陕西汉中 723000; 2. 陕西理工大学陕西省食用菌工程技术研究中心, 陕西汉中 723000;
3. 陕西理工大学生物科学与工程学院, 陕西汉中 723000)

摘要:人工合成的有机化学物质具有化学性质稳定、难以降解、使用范围广、具有一定毒副作用及潜在的致畸致癌性, 给人类生产生活相关的土壤环境造成严重影响。目前各个国家都已经采取各种措施, 从污染治理等方面进行土壤修复, 以减缓对环境的伤害, 但是这些修复效果均不明显, 且成本较高, 还可能造成对环境的二次污染。植物修复技术和微生物修复技术是目前土壤污染治理较廉价和有效的手段之一, 但这两者的修复过程都存在一些限制因素。本文论述利用土壤-植物-根际微生物的共存关系进行有机物污染土壤修复的 2 种方式及其原理, 并介绍影响联合修复技术的几个因素, 讨论今后植物-微生物联合修复技术的研究重点, 以期在今后的研究及实际运用中, 利用植物-微生物联合修复技术分别发挥植物、微生物修复的优点, 达到联合彻底修复土壤、净化土壤的目的。

关键词:有机污染物; 生物修复; 协同修复; 植物; 根际微生物; 互作

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)01-0005-04

人们长时间、广泛的使用各种合成有机化学物质, 造成了严重的环境问题: 大量使用的农药大多数是有机化合物, 这些有机化合物严重威胁着农田和水体的安全, 已经禁止使用多年的有机氯杀虫剂还能够在土壤中检测出来^[1]。石油产品多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, 简称 PAHs) 来源于缺氧燃烧、垃圾焚烧和填埋、直接的交通排放, 同时伴随轮胎磨损、路面磨损产生的沥青颗粒以及道路扬尘, 大量的人类操作破坏了它们在环境中的生物降解、光解等动态降解平衡

状态, 最终经过降水等过程残留于农田土壤中, 这其中的大部分有机污染物在土壤中性质稳定、难以降解, 由于其潜在的致癌性, 严重危害农产品安全和人类健康, 严重污染了环境^[2-3]。初步统计, 当前世界范围内大约有 170 万 t 多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, 简称 PCBs) 无法降解, 直接污染土壤环境^[4]。目前, 很多国家已经从制定严格的使用规范、采取各种措施进行污染治理等方面进行土壤修复, 以期减缓污染物对环境的伤害, 但是这些修复效果都不明显且成本较高, 有的修复技术还可能造成对环境的二次污染。由此可见, 有机物污染土壤已成为国内外土壤与环境学界的重点关注对象之一^[5]。

随着技术手段的不断提高, 人们发现, 植物修复技术、微生物修复技术都能够在一定程度上清除环境中有机污染物, 且修复成本较低、修复彻底。但是这 2 种修复技术都在去除

收稿日期: 2015-11-20

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划 (编号: 15JS021); 陕西理工大学人才启动项目 (编号: SLGKYQD2-19)。

作者简介: 王梦姣 (1987—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 讲师, 主要从事根际微生物与植物互作及微生物重要功能基因研究。E-mail: amy133253@126.com。

[38] Slocombe S P, Cornah J, Pinfield-Wells H, et al. Oil accumulation in leaves directed by modification of fatty acid breakdown and lipid synthesis pathways[J]. Plant Biotechnology Journal, 2009, 7(7): 694-703.

[39] Hernández M L, Whitehead L, He Z, et al. A cytosolic acyltransferase contributes to triacylglycerol synthesis in sucrose-rescued *Arabidopsis* seed oil catabolism mutants[J]. Plant Physiology, 2012, 160(1): 215-225.

[40] Fell D A. Understanding the control of metabolism[M]. London: Portland Press, 1997.

[41] Van Erp H, Kelly A A, Menard G, et al. Multigene engineering of triacylglycerol metabolism boosts seed oil content in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology, 2014, 165(1): 30-36.

[42] Xu C, Shanklin J. Triacylglycerol metabolism, function, and accumulation in plant vegetative tissues[J]. Plant Biology, 2016, 67(67):

1311-1328.

[43] Vanhercke T, Petrie J R, Singh S P. Energy densification in vegetative biomass through metabolic engineering[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2014, 3(1): 75-80.

[44] Wu H Y, Liu C, Li M C, et al. Effects of monogalactoglycerolipid deficiency and diacylglycerol acyltransferase overexpression on oil accumulation in transgenic tobacco[J]. Plant Molecular Biology Reporter, 2013, 31(5): 1077-1088.

[45] Vanhercke T, El Tahchy A, Liu Q, et al. Metabolic engineering of biomass for high energy density: oilseed-like triacylglycerol yields from plant leaves[J]. Plant Biotechnology Journal, 2014, 12(2): 231-239.

[46] Zale J, Jung J H, Kim J Y, et al. Metabolic engineering of sugarcane to accumulate energy-dense triacylglycerols in vegetative biomass[J]. Plant Biotechnology Journal, 2016, 14(2): 661-669.

或者降解有机污染物时存在一定的缺陷:植物修复容易受到植物生长速度的限制,修复时间较长,植物生长还会受到土壤类型、环境温度等条件影响,修复效率比较低,大约为 10% ~ 20%^[6];微生物修复污染的主要方式是将污染物分解成自身及植物可以利用的小分子物质来加以利用,但单独用微生物进行修复时,单一菌种的修复效果不显著,复合菌落修复又要考虑到菌落共生问题,此外,微生物对环境条件有较强的选择性,如果加入外源微生物进入待修复土壤中,还可能导致外源微生物与土著菌株竞争,进而影响微生物修复效果。

近年来,用植物-微生物联合修复有机污染的土壤逐渐成为目前生物修复领域的研究热点,这种修复方法利用土壤-植物-根际微生物的共存关系,分别发挥植物、微生物修复的优点,达到联合彻底修复土壤和净化土壤的目的。

1 有机污染土壤的植物-根际微生物联合修复的形式

1.1 植物与专性菌株的联合修复

一般情况下,有机物污染会导致土壤微生物量的减少和种类的改变,但是相应污染地区的微生物代谢活性没有明显变化^[7],这就说明在污染区的土壤中极有可能存在能够耐受有机污染物的微生物,可以利用这些耐受菌来协助植物进行修复。Lin 等用柴油污染区土壤中分离得到的微生物添加到种植了沙打旺(*Astragalus adsurgens*)的柴油污染区土壤中,通过研究发现,该土壤的柴油含量比单一种植沙打旺的污染土壤的柴油含量显著下降^[8]。

土壤中许多细菌在修复污染土壤的同时还能通过直接或间接的转化作用促进植物生长。有的可以分解有机物中的氮元素,并将其转化为植物可以利用的氮素形式被植物吸收。有的细菌可以利用自身的生化反应将有机物分解,最终转化成氨基环丙烷羧酸盐脱氨酶[1-aminocyclopropane-1-carboxylate (简称 ACC deaminase)],被植物吸收后可提高植物乙烯含量^[9]。王京秀等筛选高效石油降解菌后,通过植物-微生物联合修复石油污染土壤的室内试验发现,菌株与植物进行的植物-微生物修复污染土壤效率最高可达 73.47%,由于细菌的固氮作用,土壤含氮量提高,植物生物量显著增加^[10]。

某些在人工培养基上培养的细菌具有较强的降解污染物的能力,但将其转移到被有机物污染的土壤中时,由于受到周围环境及土壤中其他微生物的拮抗作用,这种细菌的分解有机污染物的效率显著下降。此时就必须将该细菌中具有重要分解功能的酶对应的基因克隆,并转移到工程菌中,以实现该基因的表达,达到与植物协同修复污染土壤的目的。比如, Cao 等将 1 株鼠李糖诱导菌株 *Pseudomonas aeruginosa* BSFD5 进行了分离和鉴定,发现菌株的 *ABRI* 基因具有鼠李糖脂合成的功能,他们将该基因转入工程菌小型黄丝藻(*Pseudomonas putida*) KT2440-rh*ABRI* 后投入到种有修复植物的菰污染的土壤中发现,*ABRI* 基因成功表达并与植物协同修复菰污染的土壤^[11]。

由此可见,向土壤中接种专性菌株或经过改造的工程菌株协同植物进行有机物的修复工作,具有提高修复效率和植物生物量的作用。因此,研究具有有机物耐性的促植物生长的专性菌株是植物-微生物联合修复有机污染土壤的重要

方向之一。

1.2 植物与菌根联合修复

菌根是指土壤中某些真菌与植物根共生的营养体。菌根的作用主要是扩大根系吸收面积,增强对原根毛吸收范围外的元素(特别是磷)的吸收能力。菌根真菌菌丝体既向根周土壤扩展,又与寄主植物组织相通,一方面从寄主植物中吸收糖类等有机物质作为自己的营养,另一方面又从土壤中吸收养分、水分供给植物。作为植物根系和土壤之间的桥梁,菌根在与植物共同作用下促进有机物降解和转化等方面具有积极作用。一般情况下,菌根与植物互作修复有机污染土壤分为 2 种情况,分别是外生菌根与植物互作、内生菌根协助植物修复。

外生菌根可以实现纯培养,因此关于外生菌根与植物互作修复有机污染土壤的研究都集中在筛选具有良好降解有机污染能力的真菌后,接种植物进行有机污染物的修复方面。Volante 等用 4 种丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza,简称 AM)进行纯培养后侵染植物根系,再将植物菌根接种在含有 BTEX[苯(benzene)、甲苯(toluene)、乙基苯(ethylbenzene)3 种二甲基苯异构体的合称]的培养基中^[12],结果表明,在被 AM 菌根侵染的植物根系培养基中 BTEX 浓度显著降低。周妍等采用温室盆栽试验,在种植紫花苜蓿的同时,分别施加不同的菌根菌剂,结果表明,紫花苜蓿-根瘤菌联合作用对 PAHs 污染土壤的修复效果最优,其降解率达 60% 以上^[13]。Wu 等将接种了菌根真菌的苜蓿根际与未接种的苜蓿根际进行核磁共振试验发现,菌根真菌使植物根组织发生变化,接种处理的根芳香碳含量高,改变了植物吸收污染物的特性^[14]。

与外生菌根不同,内生菌根[泡囊-丛枝菌根(vesicular-arbuscular,简称 VA)]与植物具有高度的专一性,迄今尚未分离获得纯培养体,因此对该菌根目前无法直接进行体外纯培养体的筛选和研究工作,一般研究主要集中在针对植物的生长状况、对有机物污染的降解效率等方面。研究表明,丛枝菌根促进植物修复有机污染主要是通过固定化有机污染物、促进植物吸收和固定化以及改变根际微生物组成等 3 个方面来协同植物进行有机污染物修复^[15]。Gao 等对比了与黑麦草共生的 2 种丛枝菌根菌的土壤及单独种植黑麦草土壤中的菲、芴,发现共生丛枝菌根菌的黑麦草根系固定了大量的有机污染物^[16]。此外,相关研究表明,石油污染的土壤中丛枝菌根菌[缟球囊霉(*Glomus constrictum*)]侵染三叶草根系后,显著促进了三叶草的生长^[17]。

由以上研究可以看出,菌根化植物的适应能力、抗逆能力、降解能力都比较强,但不容易获得,且研究难度大。因此,建立良好的菌根与植物修复体系也是有机污染土壤修复的重要研究方向。

2 有机污染土壤植物-根际微生物修复技术的影响因素

2.1 污染土壤的结构、特性及有机物的特性

土壤结构,即土壤颗粒的排列与组合形式,不同的土壤结构对土壤颗粒的比表面积影响不同,对有机污染物的吸附程度也不同,进而影响有机污染物的可利用性。研究表明,黏土等腐殖质含量较高、土壤黏性较大的土壤对有机污染物的吸附能力强,可利用性低^[18]。

土壤的 pH 值、水分、温度等都对植物-根际微生物修复有显著影响。植物、微生物的生存都要处一定的 pH 值、水分、温度范围内,超出或者低于这个范围都会影响植物和微生物的生存。例如,当 pH 值小于 5.0 时,植物和微生物的生物活性都会受到阻碍^[19];在不同温度条件下微生物对 PAHs 的降解有着明显的差异,低温条件下微生物活性会受到抑制,致使微生物对 PAHs 的降解能力下降;高温条件下酶会因结构被破坏而失去活性,微生物存活率降低也会使微生物对 PAHs 的降解能力下降^[20]。

污染土壤的有机物种类众多,比如单环芳烃类(monoaromatic hydrocarbons,简称 BTEX)、多环芳烃、多氯联苯等^[21-23],由于其化学结构不同,对其进行分解或修饰所需要发生的反应也不尽相同。比如,一些厌氧微生物能够发生还原性脱氯作用来降解多氯联苯^[24],但一些植物的内生菌也能氧化多氯联苯^[25]。石油污染土壤由于其本身多环芳烃物质较多,需要根际促生菌(*Serratia marcescens*)BC-3 和丛枝菌根菌(*Glomus intraradices*)的作用,以改善植物生理状况,与植物协同进行污染修复^[26]。

2.2 植物自身的生理生化特性

作为植物与微生物互作进行有机物污染修复的主体部分,富集植物一般要有一定要求:植物根系发达、保水能力强,植物生长速度快,种植在有机物污染的土壤中易存活,并且能够有稳定的生理状态;植物或者可以在不同污染物浓度条件下富集有机污染物;当植物自身不能很好地富集有机污染物时,可以与微生物互作进而降低有机污染物在土壤中的含量;植物根系能够分泌一些酶类降解有机污染物。如果该植物能够同时累积多种有机污染物,且能与微生物互作进行有机污染物富集,则该植物会成为植物-根际微生物互作的首选植物。

目前常用来修复有机物污染的植物主要集中在单子叶植物中(如水稻、黑麦草、玉米等^[27-29]),单子叶植物根的比表面积大,更易吸收或降解有机污染物,且其根际圈内存在许多可以降解有机污染物的酶,这些酶对有机污染物的降解过程有促进作用^[30]。随着植物育种和转基因技术的发展,人们已经逐渐将转基因技术运用到筛选修复有机物污染土壤植物的研究中,目前已经选育出一些生长速度快、生物量大、可以与微生物互作、具有较强的有机物污染修复作用的转基因植物,但是还属于试验阶段,将逐渐运用到实际中^[31]。

2.3 根际微生物的特性

根际微生物是土壤物质循环的主要动力,能够为植物的生长发育提供必备因素。植物根系分泌物可以为土壤微生物提供生长必需的营养元素和生长必需因子,改变植物根际土壤微环境,促进根际微生物的多样性,显著影响根际微生物的生存状态。同时,根际微生物还会产生一些植物激素促进植物的生长发育。因此,在有机污染物胁迫下,微生物自身受到其毒害,或者植物受到有机物胁迫后根系分泌物发生变化,会导致微生物活性受到影响。有机污染物被微生物降解主要依靠 2 种方式:(1)利用微生物分泌的胞外酶降解;(2)污染物被微生物吸收到细胞内,由胞内酶降解。吸收污染物的方式主要有被动扩散、促进扩散、主动运输、基团转位及胞饮作用等^[20,32-33],这就是说,我们可以直接利用根际微生物进行有

机污染物的分解,改善土壤状况和植物生长条件,从而为下一步的植物-根际微生物联合修复做准备。

2.4 微生物与植物根系的互作关系

微生物与植物之间的动态互作关系是植物-微生物协同修复有机污染的研究重点,好的互作关系可以克服许多修复过程中的不利因素。根际周围的微生物活动为土壤结构的变化和土壤化学物质的分解提供了一个良好的环境^[34-35]。大部分微生物对有机污染物的分解主要目的在于降低它们对自身的毒害性,这个过程很可能需要植物根系提供根系分泌物帮助微生物完成对有机污染物的分解,但同时也能刺激植物释放更多的根系分泌物,还能为植物提供生长所必需的一些营养物质和有机污染物含量较低的土壤环境^[36]。某些根际微生物也会分泌一些生物表面活性剂,促进植物对有机污染物的吸收,降低有机污染物对植物的毒害^[37-38]。这就是说,建立良好的植物-根际微生物互作关系,对植物-根际微生物协同修复有机污染具有重要意义。

3 小结与展望

植物-根际微生物互作进行有机污染物的修复工作,能够发挥植物修复和微生物修复的优点,是修复效率高、廉价、可循环利用、不产生二次污染的生物修复技术。由于该技术的影响因素较多,目前还没有得到大范围的应用,在今后发展中可以考虑以下几个方向:(1)继续寻找具有有机污染物修复能力的植物和微生物,研究修复机制,探索不同植物-根际微生物修复组合,提高协同修复效率。(2)某些激素对植物生长具有显著促进作用^[39-40],可能参与有机污染物的降解^[41],比如油菜素内酯(brassinosteroid,简称 BR)参与有机农药残留的降解过程。通过转基因或突变体筛选技术,筛选出具有高效表达油菜素内酯的植物与微生物协同进行有机污染物的降解过程。(3)加强理论机制的建立。目前虽然有大量关于植物、微生物、植物-根际微生物修复有机污染物的试验性研究,但是对于具体修复机制方面的研究较少,修复机制的建立是更好地运用生物进行有机污染物修复的前提。(4)加强实际试验与检验。以往的试验性研究大部分都是在实验室内部模拟污染土壤环境进行的,将试验结果运用到实际污染土壤修复中还面临许多环境问题,比如本土植物和微生物的竞争、污染土壤环境的不可控性等。因此,在实验室内部的研究结果依然要进行实际环境的修复效果试验,这样才能真正体现研究植物-根际微生物修复的意义。

参考文献:

- [1] Chaudhry Q, Schröder P, Werck-Reichhart D, et al. Prospects and limitations of phytoremediation for the removal of persistent pesticides in the environment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2002, 9(1): 4-17.
- [2] Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S K, et al. Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2005, 12(1): 34-48.
- [3] Antizar-Ladislao B, Lopez-Real J, Beck A J. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in an aged coal-tar-contaminated soil using different in-vessel composting approaches [J].

- Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(3): 1583–1588.
- [4] Seeger M, Pieper D. Genetics of biphenyl biodegradation and co-metabolism of PCBs [M]//Handbook of hydrocarbon and lipid microbiology. United Kingdom: Springer-Verlag, 2010: 1179–1199.
 - [5] 许超, 夏北成. 土壤多环芳烃污染根际修复研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(1): 216–222.
 - [6] Parrish Z D, Banks M K, Schwab A P. Effectiveness of phytoremediation as a secondary treatment for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in composted soil[J]. International Journal of Phytoremediation, 2004, 6(2): 119–137.
 - [7] Farwell A J, Vesely S, Nero V, et al. Tolerance of transgenic canola (*Brassica napus*) amended with ACC deaminase-containing plant growth-promoting bacteria to flooding stress at a metal-contaminated field site[J]. Environ Pollut, 2007, 147(3): 540–5.
 - [8] Lin X, Li X J, Li P J, et al. Evaluation of plant-microorganism synergy for the remediation of diesel fuel contaminated soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008, 81(1): 19–24.
 - [9] Glick B R. Using soil bacteria to facilitate phytoremediation[J]. Biotechnology Advances, 2010, 28(3): 367–374.
 - [10] 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.
 - [11] Cao L, Wang Q, Zhang J, et al. Construction of a stable genetically engineered rhamnolipid-producing microorganism for remediation of pyrene-contaminated soil[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(9): 2783–2790.
 - [12] Volante A, Lingua G, Cesaro P, et al. Influence of three species of arbuscular mycorrhizal fungi on the persistence of aromatic hydrocarbons in contaminated substrates[J]. Mycorrhiza, 2005, 16(1): 43–50.
 - [13] 周妍, 滕应, 姚伦芳, 等. 植物-微生物联合对土壤不同粒径组分中 PAHs 的修复作用[J]. 土壤, 2015, 47(4): 711–718.
 - [14] Wu N Y, Huang H L, Zhang S Z, et al. Phenanthrene uptake by *Medicago sativa* L. under the influence of an arbuscular mycorrhizal fungus[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1613–1618.
 - [15] 周笑白, 周集体, 项学敏, 等. 丛枝菌根真菌在有机污染物污染土壤植物修复中的应用[J]. 辽宁化工, 2011, 40(8): 860–863.
 - [16] Gao Y Z, Cheng Z X, Ling W T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae contribute to the uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant roots[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(18): 6895–6901.
 - [17] 田蜜, 陈应龙, 李敏, 等. 丛枝菌根结构与功能研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2369–2376.
 - [18] 林道辉, 朱利中, 高彦征. 土壤有机污染植物修复的机理与影响因素[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1799–1803.
 - [19] 单胜道, 俞劲炎, 于伟. 酸雨与土壤生态系统[J]. 生态农业研究, 2000, 8(2): 20–23.
 - [20] 侯梅芳, 潘栋宇, 黄赛花, 等. 微生物修复土壤多环芳烃污染的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1233–1238.
 - [21] Boyajian G E, Carreira L H. Phytoremediation: a clean transition from laboratory to marketplace[J]. Nature Biotechnology, 1997, 15(2): 127–128.
 - [22] Mielke H W, Wang G, Gonzales C R, et al. PAH and metal mixtures in New Orleans soils and sediments[J]. Science of the Total Environment, 2001, 281(1/2/3): 217–227.
 - [23] Joynt J, Bischoff M, Turco R, et al. Microbial community analysis of soils contaminated with lead, chromium and petroleum hydrocarbons[J]. Microbial Ecology, 2006, 51(2): 209–219.
 - [24] Furukawa K, Fujihara H. Microbial degradation of polychlorinated biphenyls: biochemical and molecular features[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, 105(5): 433–449.
 - [25] Pieper D, Seeger M. Bacterial metabolism of polychlorinated biphenyls[J]. J Mol Microbiol Biotechnol, 2008, 15: 121–138.
 - [26] Dong R, Gu L J, Guo C H, et al. Effect of PGPR *Serratia marcescens* BC-3 and AMF *Glomus intraradices* on phytoremediation of petroleum contaminated soil[J]. Ecotoxicology, 2014, 23(4): 674–680.
 - [27] 焦杏春, 陈素华, 沈伟然, 等. 水稻根系对多环芳烃的吸着与吸收[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 760–764.
 - [28] 高彦征, 凌婉婷, 朱利中, 等. 黑麦草对多环芳烃污染土壤的修复作用及机制[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 498–502.
 - [29] 刘晓冰, 邢宝山, 周克琴, 等. 污染土壤植物修复技术及其机理研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(1): 134–138.
 - [30] 董社琴, 李冰雯, 周健. 植物修复有机污染土壤机理的分析[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(3): 189–190.
 - [31] 陈梅, 唐运来. 用于植物修复的转基因植物研究进展[J]. 生物技术通报, 2013(6): 7–11.
 - [32] 顾平, 张倩茹, 周启星, 等. 一株苯并[a]芘高效降解真菌的筛选与降解特性[J]. 环境科学学报, 2010, 30(2): 354–360.
 - [33] 周际海, 袁颖红, 朱志保, 等. 土壤有机污染物生物修复技术研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 343–351.
 - [34] Walton B T, Anderson T A. Microbial degradation of trichloroethylene in the rhizosphere: potential application to biological remediation of waste sites[J]. Appl Environ Microbiol, 1990, 56(4): 1012–1016.
 - [35] Shann J R. The role of plants and plant/microbial systems in the reduction of exposure[J]. Environ Health Perspect, 1995, 103(s5): 13–15.
 - [36] El-Shatnawi M K J, Makhadmeh I M. Ecophysiology of the plant-rhizosphere system[J]. J Agron Crop Sci, 2001, 187(1): 1–9.
 - [37] Lafrance P, Lapointe M. Mobilization and co-transport of pyrene in the presence of *Pseudomonas aeruginosa* UG2 biosurfactants in sandy soil columns[J]. Ground Water Monit Remediat, 1998, 18(4): 139–147.
 - [38] Sandrin T R, Chech A M, Maier R M. A rhamnolipid biosurfactant reduces cadmium toxicity during naphthalene biodegradation[J]. Appl Environ Microbiol, 2000, 66(10): 4585–4588.
 - [39] Wang M J, Liu X Y, Wang R, et al. Overexpression of a putative *Arabidopsis* BAHD acyltransferase causes dwarfism that can be rescued by brassinosteroid[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(16): 5787–5801.
 - [40] 王梦蛟, 邓百万, 杨国鹏. 拟南芥油菜素内酯的合成、修饰、信号转导及其在农作物育种中的应用研究进展[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 1–6.
 - [41] 王梦蛟, 李新生, 杨国鹏. 油菜素内酯的生理效应及其参与残留农药降解的研究进展[J]. 北方园艺, 2015(3): 168–170.