

# 植物-微生物联合修复化学农药污染土壤的研究进展

王新<sup>1\*</sup>, 侯佳文<sup>1</sup>, 宋磊<sup>2</sup>, 柳文睿<sup>1</sup>, 张亚楠<sup>1</sup>, 葛玲<sup>1</sup>

<sup>1</sup>沈阳工业大学环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

<sup>2</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016

**摘要:** 化学农药的高毒性、生物积累性和扩散性极易对环境及人类健康造成危害, 环境中化学农药的去除尤为重要。植物-微生物联合修复技术因其高效、环境友好和修复成本低等优点受到越来越多的关注, 植物-微生物联合修复化学农药污染土壤是一种很有前景的方法。植物为根际和内生细菌提供养分, 而细菌通过化学农药的降解和解毒来支持植物生长。本文综述了影响化学农药在植物体内吸收和转运的因素以及植物-微生物修复技术的原理, 并讨论了植物与微生物在化学农药污染土壤修复中的协同效应, 并对植物-微生物联合修复法在化学农药污染土壤修复中的应用前景进行了展望。

**关键词:** 环境污染; 植物-微生物联合修复; 植物修复; 原位修复; 化学农药



开放科学标识码  
(OSID 码)

## Research progress on plant-microbe remediation of soils contaminated by chemical pesticides

WANG Xin<sup>1\*</sup>, HOU Jiawen<sup>1</sup>, SONG Lei<sup>2</sup>, LIU Wenrui<sup>1</sup>, ZHANG Yanan<sup>1</sup>, GE Ling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

<sup>2</sup>Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

**Abstract:** The high toxicity and bioaccumulation of widely used chemical pesticides cause harm to the environment and human health. Therefore, studies on the remediation of chemical pesticides in the environment are very common. Plant-microbe remediation of chemical pesticides has increased interest as it is a highly efficient, environmentally friendly, and cheap method. Plants provide nutrients to the rhizosphere and endophytic bacteria, and bacteria support plant growth through the degradation and detoxification of chemical pesticides. This article reviews the factors affecting the absorption and transport of chemical pesticides in plants and the principles of plant-microbe remediation technology. It discusses the synergistic effects of plants and microorganisms in remediating soils contaminated by chemical pesticides. Finally, the application of the plant-microbe remediation method to soils contaminated by chemical pesticides is considered.

**Key words:** environmental pollution; plant-microbe remediation; phytoremediation; in-situ remediation; chemical pesticide

我国是农药生产和使用的大国。化学农药应用是防治病虫害和杂草, 保证农产品产量的最有效手段之一。化学农药不仅给人类带来了好处, 大量化学农药的使用也带来了许多副作用, 如害虫杂草的抗药性、农产品中化学农药的残留、环境污染和生态平衡破坏等问题 (Pan *et al.*, 2019)。化学农药进入环境后, 除少部分作用在目标害虫和目标植物之上外, 80%~90% 在环境中迁移或挥发 (Erinle *et al.*, 2016)。残留在环境中的化学农药不仅会对农

产品、农田土壤和地下水造成污染, 还会对土壤微生物、动植物和人类造成严重危害 (Feld *et al.*, 2015; Lozowicka *et al.*, 2016)。因此, 采用适当的技术修复自然环境中的化学农药污染刻不容缓。由于植物与微生物的协同作用, 联合修复技术相比单一技术更具优势 (Vergani *et al.*, 2016), 植物-微生物联合修复体系对化学农药污染的修复效果也因此引起了广泛关注。本文综述了影响化学农药在植物体内吸收和转运的因素和植物-微生物修复技

收稿日期 (Received): 2021-09-22 接受日期 (Accepted): 2021-11-30

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目 (21976124); 辽宁省教育厅科学研究项目 (LJGD2020005)

作者简介: 王新, 女, 副教授, 博士研究生。研究方向: 环境生物修复技术及污染土壤修复。

\* 通信作者 (Author for correspondence): 王新, E-mail: wangxin110870@sut.edu.cn

术的原理,并讨论了植物与微生物在化学农药污染土壤修复中的协同效应,以期对环境化学农药污染的治理提供依据。

### 1 环境中的化学农药

化学农药根据其影响的生物群体、毒性水平、化学结构和物理结构进行分类。按化学结构可分为有机氯农药、有机磷农药、氨基甲酸酯农药、三嗪类和拟除虫菊酯类等。有机氯农药已在许多国家禁用,它们的稳定性、抗降解性和亲脂性极易导致其在环境中大量积累,由于它们的半挥发性,其可能在土壤中残留 15~16 年(Koyiit *et al.*, 2020)。最常见的有机氯农药有艾氏剂、氯丹、双对氯苯基三氯乙烷及其衍生物等。双对氯苯基三氯乙烷是一种常见的持久性有机污染物,其代谢产物二氯乙烯和 1,1-二氯-2,2-二(对氯苯基)乙烷毒性不亚于双对氯苯基三氯乙

烷(刘利军等,2019)。为确保化学农药的生产和使用符合法规,并确保食品安全,世卫组织和欧盟也制定了相应的监测规划(Gürsoy *et al.*, 2017)。

一般被施于土壤的化学农药,可以通过物理、化学、生物转化等方式进行降解(吴雷明等,2019),并与生物形成生态循环。残留化学农药与其代谢物沉积在土壤、水体等生态环境中,动物通过呼吸、食物摄入、皮肤接触等途径吸收化学农药,并在动物体内沉积富集。化学农药在动物体内进行循环代谢,对生理机能或器官的正常活动产生不良影响,使人或动物中毒以致死亡。因此,了解化学农药的迁移转化规律以及土壤对有毒化学农药的净化作用,对预测其变化趋势及控制土壤的化学农药污染都有重大意义。图 1 为化学农药在环境中的可能形式及其毒性动力学模型(Dar *et al.*, 2019)。

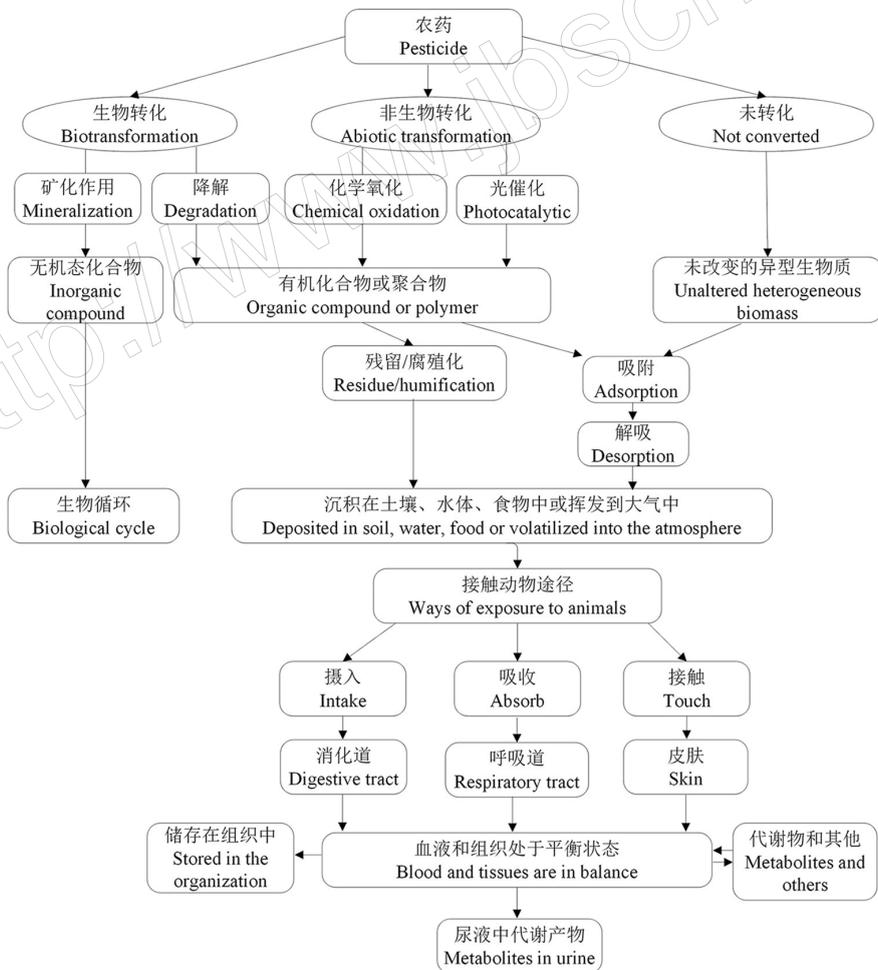


图 1 化学农药在环境中的可能形式及毒性动力学模型(修改自 Dar *et al.*, 2019)

Fig.1 Possible forms and toxicity kinetic models of chemical pesticides in the environment (Modified from Dar *et al.*, 2019)

## 2 植物去除化学农药

植物可从环境中吸收化学农药,并在其不同的组织中进行转运(Ahmad *et al.*, 2012)。植物对化学农药的吸收取决于辛醇-水分配系数( $\log K_{ow}$ )、酸度常数、水溶性、辛醇溶解度和污染物浓度等特性。其中, $\log K_{ow}$ 是最重要的影响因子,它直接参与决定化合物的疏水性或亲油性(Admire *et al.*, 2014), $\log K_{ow}$ 值越低,化合物越容易被植物吸收。此外,植物对化学农药的吸收和转运还取决于植物种类、化学农药自身特性及环境条件(李晶等, 2020)。如艾氏剂、狄氏剂、七氯、氯丹、林丹、双对氯苯基三氯乙烷等化学农药会被不同的植物以不同的速率吸收(Agyekum *et al.*, 2015)。

化学农药主要通过植物根和叶的吸收和转运进入植物。化学农药是人工合成的化学物质,植物体内缺乏运输化学农药的特定转运蛋白,因此,它们被根系吸收是通过简单的扩散从细胞壁进入木质部流(Campos *et al.*, 2008)。在吸收和转运后,植物通常通过蒸发蒸腾和植物降解2种机制,避免吸收化学农药的毒性。对于大多数化学农药来说,蒸发蒸腾是植物通过叶片向大气中释放污染物的主要机制。在进化过程中,植物没有受到选择压力,故没有有机污染物的矿化途径(Gerhardt *et al.*, 2009)。

化学农药通过氧化、水解和形成环氧化物的方式被降解(Chaudhry *et al.*, 2002)。其中,氧化最为普遍,通过不同植物微粒体酶的作用发生氧化,如过氧化物酶和细胞色素 P450, 2种均属于氧化胁迫相关基因,具有防止植物细胞氧化损伤、抵御逆境胁迫的功能(王瑞莉等, 2020)。植物的微粒体酶能够降解大量的化学农药。例如,细胞色素 P450 可以通过释放原子硫作用于有机磷( $P=S \rightarrow P=O$ )杀虫剂。在玉米和高粱中,细胞色素 P450 通过这种脱硫机制催化降解甲硫磷、马拉硫磷和二嗪磷(Arslan *et al.*, 2017)。为提高植物修复的整体潜力,最近有研究人员提出了植物-微生物联合修复的方法,可显著增强包括化学农药在内的有机污染物的降解。

## 3 植物-微生物联合去除化学农药

图2为植物-微生物联合修复化学农药的示意图。植物-微生物联合修复技术是指利用植物-微生物组成的复合体系富集、固定、降解土壤中污染物的技术(傅婉秋等, 2017)。植物根际为根际微生物

提供了栖息地和能源,维持旺盛的根际微生物代谢活动(余涵霞等, 2018),微生物能分泌有利于植物生长的物质,可提高植物的抗逆性,联合修复通过发挥植物和微生物两者的优势来提高化学农药的降解率(张娜娜等, 2018)。有研究发现,植物根系微生物可以促进植物对磷酸盐等营养物质的吸收,提高过氧化氢酶的活性,进而提高植物的抗逆性(Tan *et al.*, 2013)。

在土壤环境中,许多微生物分泌有机酸、表面活性剂和酶等物质改变环境中化学农药在土壤中的存在状态,将化学农药在细胞外降解或是吸收进入微生物体内进行降解(Hussain *et al.*, 2009)。目前,植物-微生物联合修复已被应用于化学农药降解(表1)。按添加的微生物种类的区别,植物-微生物联合修复可分为内生菌-植物、根际微生物-植物和外源专性降解菌-植物3种联合修复体系。

### 3.1 根际微生物-植物联合修复技术

根际微生物是植物的根表面以及受根系直接影响的土壤区域中的微生物群落(赵佳等, 2012)。近年来,根际微生物因可以提高化学农药的降解效率受到了广泛关注。目前,已经筛选出多种可降解包括化学农药分子在内的污染物的根际微生物(Khan *et al.*, 2013)。然而,单一的根际微生物在污染环境中难以生存和繁殖。人们发现,将根际微生物与植物联合用于污染土壤修复可以更加有效地矿化和降解化学农药(Pandey *et al.*, 2009)。在联合修复中,根际微生物以包括化学农药分子在内的多种污染物为碳源来维持它的细胞功能和新陈代谢,植物通过根际分泌物、根际氧化、共代谢产物诱导、分泌  $H^+ / OH^-$  离子和有机酸及生物表面活性剂等途径来调整根际环境,从而促进根际微生物的生存和繁殖(Afzal *et al.*, 2013)。

根际微生物和植物联合修复的优势主要有3点:一是可提高根际土壤中化学农药分解代谢基因的丰度和表达程度,从而促进化学农药分子的矿化、降解和稳定(Jha *et al.*, 2015);二是根际微生物有保障植物的健康、提高植物的生物量的作用,从而为根际微生物的生长提供了更加适宜定植的根表面,提高了化学农药的降解效率(陆涛等, 2019);三是根际分泌的植物萜烯、黄酮类化合物和水杨酸等物质,可促进化学农药的共代谢作用,进而使化学农药达到降解的目的(Singer *et al.*, 2003)。

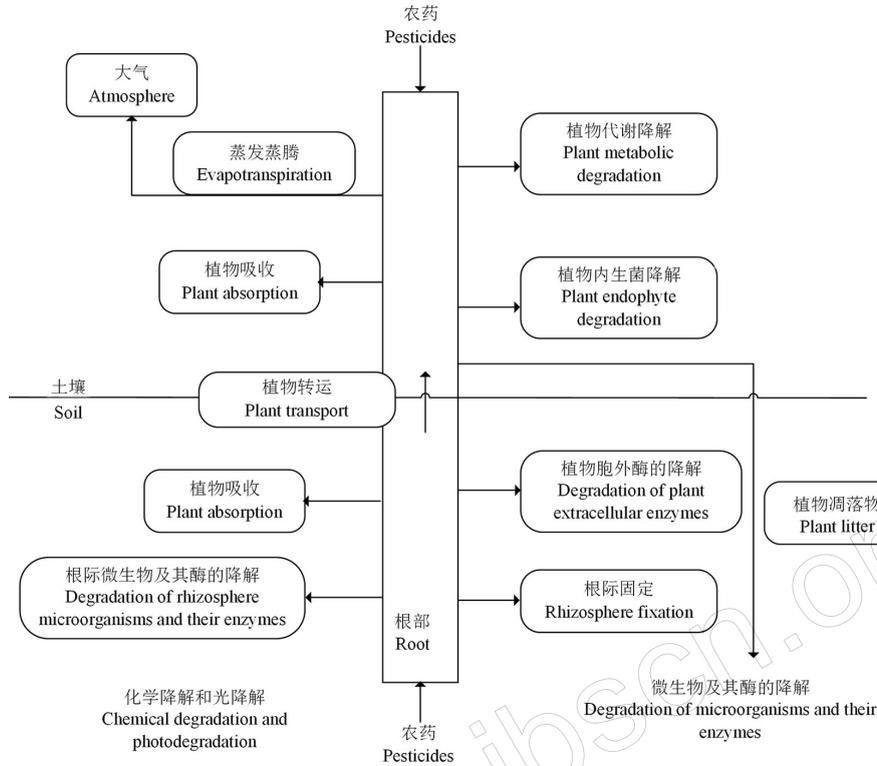


图 2 植物-微生物联合修复示意图 (修改自 Eevers *et al.*, 2017)

Fig.2 Schematic diagram of plant-microbe remediation (Modified from Eevers *et al.*, 2017)

表 1 不同植物-微生物联合修复体系对化学农药的降解能力

Table 1 Degradability of chemical pesticides by different plant-microbe remediation systems

| 化学农药<br>Pesticides                            | 植物<br>Plant                                     | 微生物<br>Microorganism                                 | 浓度<br>Concentration/<br>( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) | 降解天数<br>Days of<br>Degradation/d | 降解率<br>Degradation<br>rate/% | 参考文献<br>References           |
|---|---|--|--|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 阿特拉津<br>Atrazine                              | 狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i>             | 节杆菌 (DNS10)<br><i>Arthrobacter</i> sp.               | 19.5   | 30                               | 98.1                         | Zhang <i>et al.</i> , 2014   |
|   | 多花黑麦草<br><i>Lolium multiflorum</i>              | 内生根瘤菌 (HN3)<br><i>Mesorhizobium</i> sp.              | 50.0   | 45                               | 100.0                        | Jabeen <i>et al.</i> , 2016  |
|   | 高丹草 <i>Sorghum bicolor</i> × <i>S.sudanense</i> | 节杆菌 (DSP-A)<br><i>Arthrobacter</i> sp.               | 200.0  | 30                               | 96.4                         | 林瑾和 尤民生, 2009                |
| 双对氯苯基三氯乙烷<br>Dip-chlorophenyl trichloroethane | 黑麦草<br><i>Lolium perenne</i>                    | 寡养单胞菌 (DXZ9)<br><i>Stenotrophomonas</i> sp.          | 2.0  | 210                              | 81.0                         | Xie <i>et al.</i> , 2018     |
|   | 双草醚<br>Bispyribac sodium                        | 小麦<br><i>Triticum aestivum</i>                       | 降解菌群 (BDAM)<br>Bacterial consortium                          | 5.0                              | 45                           | 100.0                        |
| 林丹<br>Lindane                                 | 甘蔗 <i>Saccharum officinarum</i>                 | 假丝酵母菌 (VITJzN04)<br><i>Candida</i> sp.               | 100.0  | 30                               | 87.0                         | Salam <i>et al.</i> , 2017   |
|   | 玉米<br><i>Zea mays</i>                           | 链霉菌 (M7, A5, A2, A11)<br><i>Streptomyces</i> strains | 2.0  | 21                               | 61.6                         | Alvarez <i>et al.</i> , 2015 |
| 噻草酮<br>Metribuzin                             | 玉米<br><i>Zea mays</i>                           | 副球菌 (QCT6)<br><i>Paracoccus</i>                      | 50.0   | 20                               | 75.7                         | Huang <i>et al.</i> , 2018   |
| 苄嘧磺隆<br>Bensulfuron methyl                    | 大麦<br><i>Hordeum vulgare</i>                    | 复合菌剂<br>Complex bacteria                             | 2.0  | 25                               | 79.0                         | 宋磊, 2021                     |

在植物根际区域中,微生物种类多,与植物联合修复化学农药效果显著,其中丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza, AMF)可与世界上大多数陆生植物根系建立共生关系。AMF 可以增强植物对化

学农药等多种污染物的抗性,减轻污染物对植物的毒害作用(Dong *et al.*, 2016)。Fan *et al.* (2018)选择紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.作为丛枝菌根真菌的寄主植物来修复阿特拉津污染土壤,发现在接种丛

枝菌根真菌后,阿特拉津对紫花苜蓿的叶绿体结构和功能的毒性作用减轻,使植物在光合作用过程中能更好地利用光能。

### 3.2 植物内生菌-植物联合修复技术

植物内生菌是指存活于健康植物组织内部,又不引发宿主植物表现出感染症状的微生物类群,内生菌与植物是互利共生关系(姚领爱等,2010)。一方面,植物内生菌能够产生降解酶类直接代谢化学农药;另一方面,内生菌参与调控植物代谢有机污染物。当内生菌定植于植物体时会分泌一些植物激素、铁载体、脱氨酶等物质,促进植物根系生长,提高植物生物量,增强植物抗逆境能力,从而增强植物体内化学农药的代谢能力(黄俊伟等,2017)。在修复容易被植物吸收的化学农药时,植物与内生菌联合修复比植物与根际微生物联合修复更具优势,对于具有亲脂性且在根际区域停留较短的化学农药,根际微生物能发挥的作用微弱,而植物内生菌可以通过胞内作用分泌双加氧酶来降解化学农药(Afzal *et al.*, 2014)。内生菌生活在植物组织内部,与根际微生物受到土著微生物的竞争相比,面临较少的生存空间和营养物质的竞争(Doty, 2008)。

Feng *et al.* (2017) 将从韭菜 *Allium tuberosum* Rottl. ex Spreng. 中分离得到的降解毒死蜱的内生菌株 *Sphingomonas* sp. HJY 接种于韭菜,该菌在韭菜体内成功定殖,可降解韭菜的叶和根中 70% 和 66% 的毒死蜱,可降解种植接种内生菌株韭菜土壤中 75% 的毒死蜱,在有效去除土壤中毒死蜱的同时保障了韭菜的食品安全。Eevers *et al.* (2018) 从多种植物中筛选了促进植物生长的内生菌株 *Sphingomonas taxi* UH1、*Methylobacterium radiotolerans* UH1 和 *Enterobacter aerogenes* UH1, 将这 3 株菌株混合后接种于可以积累高浓度二氯乙烯的西葫芦 *Cucurbita pepo* L. 上,西葫芦的根、枝芽的质量增加,西葫芦植物修复效果提高了 46%。

### 3.3 专性降解菌-植物的联合修复技术

专性降解菌包括从化学农药污染土壤、污水厂排污口和植物根际等经筛选得到的高效降解菌株或经过改造的基因工程菌株。将专性降解菌直接投加到自然环境后,因其与土著微生物的竞争作用以及环境的影响,专性降解菌的实际降解效果与实验室结果相差较大。故人们将专性降解菌与植物的联合用于化学农药污染的土壤修复,由植物给微

生物提供生存场所和营养,以促进污染物的快速降解和矿化(程国玲等,2003)。

专性降解菌与化学农药抗性植物联合用于土壤修复,可缓解化学农药对敏感作物的毒性。姚梦琴(2017)研究发现,30 d 内玉米-微生物联合修复克百威较微生物单独修复降解率提高了 19%,玉米-微生物联合修复毒死蜱较微生物单独修复降解率提高了 18%。专性降解菌株与植物联合修复技术为已筛选出的降解化学农药的微生物资源应用提供了有效思路。

## 4 结论与展望

植物-微生物联合为修复化学农药污染的土壤提供了有效途径。在微生物辅助植物修复土壤中化学农药时,根际细菌和内生细菌具有适合化学农药降解、转化和矿化的基因,可以减轻对植物的毒性。虽然许多研究发现,土壤中残留的化学农药可以通过植物-微生物联合作用降解,但这一努力仍然面临很大的挑战,主要的限制因素是这些降解微生物的活性易受到复杂的环境条件影响。为了使联合修复被更广泛、更有效地应用,应该更好地了解植物和微生物对化学农药的耐受机制、微生物在化学农药环境中的存活以及不同植物-微生物组合的最大降解作用等相关特性。此外,进一步筛选新菌种以及利用基因工程提高已有菌种的活性和构建多功能高效降解菌以及了解微生物的代谢活动及其多样性,并研究其在环境中的适应机制使其更加适应土壤环境,可以进一步帮助研究人员设计可持续发展的联合修复的策略。

## 参考文献

- 程国玲,李培军,王凤友,周启星,台培东,韩桂云,张海荣,2003. 多环芳烃污染土壤的植物与微生物修复研究进展. 环境工程学报, 4(6): 30-36.
- 傅婉秋,谢星光,戴传超,吴清倩,贾永,2017. 植物-微生物联合对环境有机污染物降解的研究进展. 微生物学通报, 44(4): 929-939.
- 黄俊伟,闯绍闯,陈凯,凌婉婷,唐翔宇,蒋建东,2017. 有机污染物的植物-微生物联合修复技术研究进展. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 43(6): 757-765.
- 李晶,郭亮,崔海信,崔博,刘国强,2020. 纳米农药在植物中的吸收转运研究进展. 植物学报, 55(4): 513-528.
- 林瑾,尤民生,2009. 植物-微生物联合修复毒死蜱污染的

- 土壤. 生物安全学报, 18(2): 81-87.
- 刘利军, 李颖异, 刘永杰, 谢莹, 张雷, 韩强, 史晓凯, 2019. 表面活性剂强化植物-微生物联合修复双对氯苯基三氯乙烷污染土壤研究. 环境污染与防治, 41(10): 1193-1197.
- 陆涛, 李燕, 傅正伟, 钱海丰, 2019. 农药对根际微生物群落的影响及潜在风险. 农药学学报, 21(5/6): 865-870.
- 宋磊, 2021. 作物与复合菌剂联合修复除草剂污染土壤研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳工业大学.
- 吴雷明, 韩光明, 王守红, 张家宏, 寇祥明, 毕建花, 王桂良, 唐鹤军, 李兵, 徐荣, 朱凌宇, 2019. 3 种酰胺类稻田除草剂对克氏原螯虾的急性毒性. 生物安全学报, 28(4): 301-305.
- 王瑞莉, 王刘艳, 叶桑, 郜欢欢, 雷维, 吴家怡, 袁芳, 孟丽姣, 唐章林, 李加纳, 周清元, 崔翠, 2020. 铝毒胁迫下甘蓝型油菜种子萌发期相关性状的 QTL 定位. 作物学报, 46(6): 29-40.
- 姚领爱, 胡之璧, 王莉莉, 周吉燕, 黎万奎, 2010. 植物内生菌与宿主关系研究进展. 生态环境学报, 19(7): 1750-1754.
- 姚梦琴, 2017. 植物-微生物联合修复农药污染土壤的技术研究. 硕士学位论文. 沈阳: 沈阳工业大学.
- 余涵霞, 王家宜, 万方浩, 周小燕, 蔡敏玲, 欧巧菁, 李伟华, 2018. 植物凋落物影响土壤有机质分解的研究进展. 生物安全学报, 27(2): 88-94.
- 张娜娜, 姜博, 邢奕, 连路宁, 陈亚婷, 2018. 有机磷农药污染土壤的微生物降解研究进展. 土壤, 50(4): 645-655.
- 赵佳, 孙毅, 梁宏, 黄静, 杜建中, 2012. 现代生物技术根际微生物群落研究中的应用. 生物技术通报(12): 71-76.
- ADMIRE B, LIAN B, YALKOWSKY S H, 2014. Estimating the physicochemical properties of polyhalogenated aromatic and aliphatic compounds using UPPER: Part 2. Aqueous solubility, octanol solubility and octanol-water partition coefficient. *Chemosphere*, 119(12): 1441-1446.
- AFZAL M, KHAN Q M, SESSITSCH A, 2014. Endophytic bacteria: prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. *Chemosphere*, 117: 232-242.
- AFZAL M, KHAN S, IQBAL S, MIRZA M S, KHAN Q M, 2013. Inoculation method affects colonization and activity of burkholderia phytofirmans PsJN during phytoremediation of diesel-contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85: 331-336.
- AGYEKUM A A, AYERNOR G S, SAALIA F K, AMOA B B, 2015. Translocation of pesticide residues in tomato, mango and pineapple fruits. *Journal of Food Science and Engineering*, 5: 142-149.
- AHMAD F, ASHRAF N, ZHOU R B, YIN D C, 2019. Enhanced remediation of bispyribac sodium by wheat (*Triticum aestivum*) and a bispyribac sodium degrading bacterial consortium (BDAM). *Journal of Environmental Management*, 244: 383-390.
- AHMAD F, IQBAL S, ANWAR S, AFZAL M, ISLAM E, MUSTAFA T, KHAN Q M, 2012. Enhanced remediation of chlorpyrifos from soil using ryegrass (*Lolium multiflorum*) and chlorpyrifos-degrading bacterium *Bacillus pumilus* C2A1. *Journal of Hazardous Materials*, 237/238: 110-115.
- ALVAREZ A, BENIMELI C S, SAEZ J M, GIULIANO A, AMOROSO M J, 2015. Lindane removal using streptomyces strains and maize plants: a biological system for reducing pesticides in soils. *Plant and Soil*, 395(1/2): 401-413.
- ARSLAN M, IMRAN A, KHAN Q M, AFZAL M, 2017. Plant-bacteria partnerships for the remediation of persistent organic pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5): 4322-4336.
- CAMPOS V M, MERINO I, CASADO R, PACIOS L F, GÓMEZ L, 2008. Review. Phytoremediation of organic pollutants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 6: 38-47.
- CHAUDHRY Q, SCHRODER P, WERCK-REICHHART D, GRAJEK W, MARECIK R, 2002. Prospects and limitations of phytoremediation for the removal of persistent pesticides in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 9: 4-17.
- DAR M A, KAUSHIK G, VILLARREAL-CHIU J F, 2019. Pollution status and bioremediation of chlorpyrifos in environmental matrices by the application of bacterial communities: a review. *Journal of Environmental Management*, 239: 124-136.
- DONG J, WANG L, MA F, YANG J X, 2016. Effects of funnelliformis mosseae inoculation on alleviating atrazine damage in *Canna indica* L. var. *flavaroxyb*. *International Journal of Phytoremediation*, 19: 46-55.
- DOTY S L, 2008. Enhancing phytoremediation through the use of transgenics and endophytes. *New Phytologist*, 179(2): 318-333.
- EEVERS N, HAWTHORNE J R, WHITE J C, VANGRONSEVELD J, 2018. Endophyte-enhanced phytoremediation of DDE-contaminated using cucurbita pepo: a field trial. *International Journal of Phytoremediation*, 20(4): 301-310.
- ERINLE K O, JIANG Z, MA B B, LI G M, CHEN Y K, URREHMAN K, SHAHLA A, ZHANG Y, 2016. Exogenous calcium induces tolerance to atrazine stress in pennisetum seedlings and promotes photosynthetic activity, antioxidant enzymes and *psbA* gene transcripts. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 132: 403-412.

- EEVERS N, WHITE X J C, VANGRONSVELD J, WEYENS N, 2017. Bio- and phytoremediation of pesticide-contaminated environments; a review. *Advances in Botanical Research*, 83: 278–318.
- FAN X X, CHANG W, FENG F J, SONG F Q, 2018. Responses of photosynthesis-related parameters and chloroplast ultrastructure to atrazine in alfalfa (*Medicago sativa* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 166: 102–108.
- FELD L, HJELMSO M H, NIELSEN M S, JACOBSEN A D, RONN R, EKELUND F, KROGH P H, STROBEL B W, JACOBSEN C S, 2015. Pesticide side effects in an agricultural soil ecosystem as measured by *amoA* expression quantification and bacterial diversity changes. *PLoS ONE*, 10(5): e0126080.
- FENG F Y, GE J, LI Y S, CHENG J J, ZHONG J F, YU X Y, 2017. Isolation, colonization, and chlorpyrifos degradation mediation of the endophytic bacterium sphingomonas strain HJY in chinese chives (*Allium tuberosum*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(6): 1131–1138.
- GERHARDT K E, HUANG X D, GLICK B R, GREENBERG B M, 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: potential and challenges. *Plant Science*, 176(1): 20–30.
- GÜRSOY Ş S, GÜRSOY O, 2017. Acetylcholinesterase inhibition-based biosensors developed by using conducting polymers for pesticide analyses. *Akademik Gıda*, 15(4): 426–435.
- HUANG X, ZHANG H, CHEN F, SONG M, 2018. Colonization of *Paracoccus* sp. QCT6 and enhancement of metribuzin degradation in maize rhizosphere soil. *Current Microbiology*, 75(2): 156–162.
- HUSSAIN S, SIDDIQUE T, ARSHAD M, SALEEM M, 2009. Bioremediation and phytoremediation of pesticides: recent advances. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(10): 843–907.
- JABEEN H, IQBAL S, AHMAD F, AFZAL M, FIRDOUS S, 2016. Enhanced remediation of chlorpyrifos by ryegrass (*Lolium multiflorum*) and a chlorpyrifos degrading bacterial endophyte *Mezorhizobium* sp. HN3. *International Journal of Phytoremediation*, 18(2): 126–133.
- JHA P, JHA P N, 2015. Plant-microbe partnerships for enhanced biodegradation of polychlorinated biphenyls // *Plant microbes symbiosis: applied facets*. New Delhi: Arora N: 95–110.
- KHAN S, AFZAL M, IQBAL S, KHAN Q M, 2013. Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. *Chemosphere*, 90(4): 1317–1332.
- KOCYIGIT H, SINANOGLU F, 2020. Method validation for the analysis of pesticide residue in aqueous environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1–13.
- LOZOWICKA B, JANKOWSKA M, HRYNKO I, KACZYNSKI P, 2016. Removal of 16 pesticide residues from strawberries by washing with tap and ozone water, ultrasonic cleaning and boiling. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188: 1–19.
- PAN X L, DONG F S, WU X H, XU J, LIU X G, ZHENG Y Q, 2019. Progress of the discovery, application, and control technologies of chemical pesticides in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(4): 840–853.
- PANDEY J, CHAUHAN A, JAIN R K, 2009. Integrative approaches for assessing the ecological sustainability of in situ bioremediation. *Fems Microbiology Reviews*, 33(2): 324–375.
- SALAM J A, HATHA M A A, DAS N, 2017. Microbial-enhanced lindane removal by sugarcane (*Saccharum officinarum*) in doped soil-applications in phytoremediation and bioaugmentation. *Journal of Environmental Management*, 193: 394–399.
- SINGER A C, CROWLEY D E, THOMPSON L P, 2003. Secondary plant metabolites in phytoremediation and biotransformation. *Trends in Biotechnology*, 21(3): 123–130.
- TAN S Y, YANG C L, MEI X L, SHEN S Y, RAZA W, SHEN Q R, XU Y C, 2013. The effect of organic acids from tomato root exudates on rhizosphere colonization of *Bacillus amyloliquefaciens* T-5. *Applied Soil Ecology*, 64(1): 15–22.
- VERGANI L, MAPELLI F, ZANARDINI E, TERZAGHI E, BORIN S, 2016. Phyto-rhizoremediation of polychlorinated biphenyl contaminated soils: an outlook on plant-microbe beneficial interactions. *Science of the Total Environment*, 575: 1395–1406.
- XIE H, ZHU L S, WANG J, 2018. Combined treatment of contaminated soil with a bacterial *Stenotrophomonas* strain DXZ9 and ryegrass (*Lolium perenne*) enhances DDT and DDE remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(32): 31895–31905.
- ZHANG Y, GE S, JIANG M, JIANG Z, WANG Z, MA B, 2014. Combined bioremediation of atrazine-contaminated soil by *Pennisetum* and *Arthrobacter* sp. strain DNS10. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(9): 6234–6238.