

# 农药作用下的根际微生物相对丰度变化研究进展

王 兰,薛 翊,德 吉,郭小芳

(西藏大学理学院,西藏 拉萨 850000)

**摘要:**在我国农业生产中,农药残留一直是一个难以解决的问题。农药残留会给人类身体、农业用地以及其他生物类群带来不良影响。根际微生物作为植物根际土壤中物质交换和能量流动的重要生物类群,研究农药对其多样性的影响十分必要。研究发现:农药作用下的根际微生物多样性主要与农药适应性微生物的数量、农药种类、农药作用机制、农药半衰期、农药施用方式以及施用时间长短有关。此外,研究发现根际微生物还能直接或间接地应用于农残处理中。该文根据相关研究为土壤环境微生物多样性保护、农业用地保护、农产品生产及农残处理提供了新的思路。

**关键词:**根际微生物;杀菌剂;杀虫剂;除草剂;土壤污染;农药降解

中图分类号:S482

文献标志码:A

## Research Progress on the Changes of Rhizosphere Microbial Diversity Under the Action of Pesticides

WANG Lan, XUE Zhao, Deji, GUO Xiaofang

(College of Science, Tibet University, Tibet Lhasa 850000, China)

**Abstract:** In China's agricultural production, pesticide residue is always a difficult problem to solve. Pesticide residues often have adverse effects on humans themselves, agricultural land, and other living groups. As an important biological group of material exchange and energy flow in plant rhizosphere soils, rhizosphere microorganisms is very important to study the influence of pesticides on their diversity. It is found that the rhizosphere microbial diversity under the action of pesticides is mainly related to the number of pesticide adaptive microorganisms, pesticide species, pesticide mechanism of action, pesticide half-life, pesticide application mode and the length of application time. In addition, rhizosphere microorganisms can be directly or indirectly applied to disposal of agricultural residues. According to the relevant research, this paper provides new ideas for the protection of soil environment microbial diversity, agricultural land protection, agricultural production and agricultural residue treatment.

**Key Words:** rhizosphere microbes; fungicide; insecticide; herbicide; soil pollution; pesticide degradation

### 引言

农药是农业生产中能够起到防治病虫害以及调节植物生长作用的一大类化学药剂的统称,按照其作用对象不同可以分为杀虫剂、杀菌剂、除草剂、灭鼠剂、软线虫剂和杀线虫剂等<sup>[1]</sup>。我国作为农药消费大国,根据《中国农村统计年鉴》提供的数字资料显示,我国农药消费量从1990年的73.3万t增长到了2020年的131.3万t。相关实验室研究报告和流行病学证据显示,农药已经成为了严重的食品污

染物。农药给人类健康带来了很大的危害,已有研究表明某些农药会导致人类癌症<sup>[2-3]</sup>、遗传缺陷<sup>[4]</sup>、生殖障碍<sup>[5-6]</sup>以及心血管疾病的发生<sup>[7]</sup>。除了引起人类患病外,大量残留的农药还会作用于非目标植物和环境介质<sup>[8]</sup>。

农药对土壤环境的危害主要体现在其对土壤中各种酶类(水解酶类、转移酶类、氧化还原酶、过氧化氢酶、裂合酶等)活性的影响<sup>[9]</sup>。这些来自于植物根际和土壤微生物的高分子活性物质,在土壤环境中主要扮演着催化土壤中各种生化反应和消除土壤污染的角色<sup>[10]</sup>。毒死蜱是一种常用的广谱有机磷类杀虫剂、杀螨剂,王金燕等<sup>[11]</sup>在南京市紫金山进行的实验中发现,毒死蜱使土壤中蔗糖酶、

收稿日期:2022-12-28

作者简介:王兰(1997-),女,硕士研究生,主要从事微生物生态研究,E-mail:w\_l\_xzdx@163.com。

脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶的活性降低。万盼等<sup>[12]</sup>的研究表明,对油桐幼苗施用较高浓度的百草枯和氰戊·乐果会导致其根际土壤中脲酶、蛋白酶的活性被明显抑制。一项研究除草剂苯噻草胺对水田土壤酶活性的影响显示,该除草剂对土壤脲酶、蛋白酶的活性有负面影响<sup>[13]</sup>。除了土壤酶外,生活于土壤生态环境中的各种微生物也是评估农药对土壤环境危害的重要指标。

根际微生物作为土壤微生物中一个较大的分类单元,指的是定殖于植物根系中不同于土体本身物理、化学、生物性质微域中的微生物<sup>[14]</sup>。根际微生物能够通过硝化、反硝化及生物固氮等过程进行活跃的物质转化和能量传递,而上述这些过程会直接或间接影响植物的生长发育等生命活动<sup>[15]</sup>。根际微生物作为土壤-根系-微生物互作的关键区域,亦作为植物的第二基因组,是农业绿色发展的关键部分<sup>[16]</sup>。在以往的研究中,土壤微生物常被作为农药毒理和生态风险评估的对象<sup>[17]</sup>。本文对农药与根际微生物之间的关系进行深入探究,以期为我国土壤环境微生物多样性保护、农作物生产及农残处理提供新的思路。

## 1 根际微生物对农药施用的响应

根际微生物群落对使用农药等内在环境干扰十分敏感<sup>[16]</sup>,因此将其作为评价农药对土壤污染的指标十分合适。本文从不同农药对植物根际微生物多样性的影响入手,了解农药作用下植物根际微生物多样性的一般变化趋势。

### 1.1 根际微生物对杀虫剂施用的响应

杀虫剂是一类被广泛施用的农药,其中毒死蜱和丁硫克百威是目前市场通用的杀虫剂。香蕉田中施用毒死蜱和丁硫克百威这两种杀虫剂后,在第3、28个实验日利用微平板测试法及磷脂脂肪酸图谱分析法分别测试香蕉根际微生物的群落功能多样性和群落结构多样性,结果显示两种农药均不能使香蕉根际微生物群落功能多样性和群落结构多样性发生长期变化<sup>[17]</sup>。在另一项实验中,选用温室和露天两种不同环境中的根际土壤,研究发现在不同环境中毒死蜱对根际土壤细菌的群落组成和多样性显示出不同程度的影响。施用毒死蜱后,短期内细菌多样性明显下降,但施用后14 d细菌群落开始逐步恢复,露天土壤中细菌恢复速度更快,这种实验结果与毒死蜱在环境中的半衰期有关<sup>[18]</sup>。

### 1.2 根际微生物对杀菌剂施用的响应

杀菌剂是可以有效杀死生态系统中细菌、真菌以及藻类的化学制剂的统称。农药生产中常见的杀菌剂有百菌清、多菌灵、代森锰锌、霜霉威、异噻唑啉酮、稻瘟净等。王永强等<sup>[19]</sup>研究表明,百菌清会降低蔬菜根际微生物的相对丰度。Mohiuddin<sup>[20]</sup>指出,对胁迫下的番茄根际微生物进行研究,在施用多菌灵和2-4-D两种农药的前期,番茄根际中细菌、真菌、放线菌和有益菌群的丰度均在减少,但在施用时间达到21 d时这种抑制作用减小。据作者推测可能原因是农药在土壤中逐渐被稀释,而且微生物群落可能会逐渐耐受。甘蔗根际微生物相关研究表明,杀菌剂代森锰锌同样使细菌中的放线菌纲及真菌的丰度降低<sup>[21]</sup>。闫雷等<sup>[22]</sup>利用变性梯度凝胶电泳技术对施用了霜霉威的耕作层土壤微生物多样性进行检测,结果表明此杀菌剂会使作物根际土壤中细菌的丰度增加,并改变其种群特征。施用杀菌剂必将影响植物根际微生物的多样性,但由于施用方法、植物种类、施用时间长短不同会表现出不同的结果。

### 1.3 根际微生物对除草剂施用的响应

除草剂的施用对植物根际土壤微生物多样性的影响也有相关报道。以最常见的除草剂草甘膦为例,在大多数研究中均提到施用草甘膦会导致植物根际微生物的多样性短期内降低,但随着时间流逝,这种胁迫作用则逐渐被减弱<sup>[23-24]</sup>。而在针对板栗根际微生物的研究中发现,短时间内草甘膦对板栗根际细菌的多样性并无明显影响,但能够在一定程度上改变细菌中某些门类的丰度;而对于真菌而言,草甘膦则明显改变了其多样性和群落结构,而且这种改变与处理时间相关<sup>[25]</sup>。在草甘膦对药用植物党参根际微生物多样性的研究中则发现,与对照组相比,施用草甘膦对根际微生物的 $\alpha$ 多样性、 $\beta$ 多样性及群落组成均无影响<sup>[26]</sup>。对于上述不同的实验结果,周晓果等<sup>[27]</sup>提出除草剂对根际微生物多样性的影响并不是直接的,而是通过生长于土壤上方的植物及土壤本身的性质对根际微生物产生影响。Qu等<sup>[28]</sup>研究表明,除草剂异丙甲草胺对小麦根际细菌多样性的影响是短期的,但十分明显地改变了根际细菌的群落组成,尤其是一些有益细菌的丰度。

### 1.4 农药胁迫下根际微生物多样性变化的一般趋势

根际微生物对农药的响应主要表现在两个不同的水平上:个体微生物及微生物群落。对于个体微生物而言,这种响应主要包括丰度的变化及生长模式的改变。对于微生物群落而言,这种响应主要集中于多样性的改变、物种丰度的变化。根际微生物对农药的响应主要取决于农药的种类和剂量。对于微生物本身而言,这种响应主要与微生物群落中对农药具有适应性的微生物数量有关。此外,地上作物的种类也与这种响应相关,不同作物施用同一种农药,其根际微生物多样性变化趋势会表现出不同的规律。施用草甘膦的板栗根际和党参根际表现出不同的结果,草甘膦会改变板栗根际真菌的多样性,而对党参根际微生物毫无影响<sup>[25-26]</sup>。

## 2 农药影响根际微生物的途径

### 2.1 农药对根际微生物的直接影响

农药通过被植物叶片或者根系吸收、农药残留的方式直接影响根际微生物的群落结构和功能<sup>[29]</sup>。大豆叶片施用除草剂草甘膦后,草甘膦被吸收并持续转移到大豆根部释放,而后导致根系酶促反应和呼吸速率有限增加,进而增加了根际微生物的活性<sup>[30]</sup>。在另外一项研究中,提出用阿特拉津直接处理土壤会使玉米根际细菌群落中的盐芽孢杆菌属未分类种、脱色芽孢杆菌的相对丰度显著增加<sup>[31]</sup>。

### 2.2 农药对根际微生物的间接影响

农药主要是通过改变根系分泌物间接改变根际微生物的多样性和群落特征。根际微生物会由于根系分泌物的选择作用改变其多样性及群落特征。植物根系分泌物一般是指植物在其生长发育过程中向根部释放的糖类、有机酸、脂肪酸、氨基酸、酚酸类、生长因子及胞外酶等有机化合物的总称<sup>[32]</sup>。这些化合物可以为生活于植物根际中的各种微生物提供碳源、氮源及其他养分,农药会改变植物根系分泌物的种类或含量,进而改变根际微生物的多样性和群落特征。例如对小麦幼苗施用除草剂精异丙甲草胺后,其根系分泌物中的有机酸、木糖醇及吡唑含量显著增加,从而造成根瘤菌和伯克霍尔德菌的相对丰度升高<sup>[33]</sup>。李小青<sup>[34]</sup>证明了吡虫啉处理后,根际微生物的多样性与多种根系分泌物显著相关,此结果也说明根际微生物在吡虫啉胁迫下多样性和群落特征的变化规律与根系分泌

物有关。根系分泌物对根际微生物的塑造具有特异性。例如香蕉根际分泌物富马酸与根际微生物中的枯草芽孢杆菌有关<sup>[35]</sup>,西瓜根际分泌物苹果酸和柠檬酸与根际微生物中的多粘类芽孢杆菌有关<sup>[36]</sup>。

## 3 根类植物与根际微生物之间的相互作用

根际微生物可以降低优势植物种的竞争力,或提高稀有植物物种的竞争力,从而影响植物群落的多样性<sup>[37]</sup>。这种现象称为植物-土壤反馈作用,这种相互作用可能涉及共生体、病原体、食草动物和其他分解者<sup>[38]</sup>。虽有研究将植物多样性与根际微生物联系起来,但大多数的研究主要集中于根际微生物对植物生产力的影响方面<sup>[39-40]</sup>。其他研究指出这种多样性效应具有较强的环境依赖性<sup>[41]</sup>。

## 4 根际微生物在农残处理中的应用

### 4.1 根际微生物在农药污染修复中的应用

在农业生产中,处理农残的方法可以分为污染后修复和从根源上减少农药施用。利用根际微生物对农药进行降解就是一种污染后修复。根际促生微生物指的是存在于植物根系中保护植物免受多种病原体和昆虫食草动物危害的有益微生物<sup>[42]</sup>。研究显示,一些根际促生菌可以降解土壤中残留的农药,例如分离培养的嗜盐固氮菌就能100%降解除草剂除芽通<sup>[43]</sup>。除此之外,大肠杆菌、醋酸杆菌等则可以降解草甘膦<sup>[44]</sup>。研究也发现放线菌和丛枝菌根真菌可以降解除草剂阿特拉津<sup>[45]</sup>。对农药具有降解作用的微生物如表1所示。

表1 对农药具有降解作用的微生物<sup>[46]</sup>

农药类别	农药名称	微生物种类
除草剂	氯三嗪类除草剂 (Chloro-s-triazine herbicides)	<i>Nocardioides sp.</i>
除草剂	麦草畏(dicamba)	<i>Pseudomonas maltophilia</i>
除草剂	异丙隆(Isoproturon)	<i>Luciliacuprina</i>
除草剂	草甘膦(Glyphosate)	<i>Agrobacterium strain T10</i>
除草剂	利谷隆(Linuron)	<i>Pseudomonas putida</i>
杀虫剂	硫丹(Endosulfan)	<i>Arthrobacter sp.</i>

续表

农药类别	农药名称	微生物种类
杀虫剂	六氯环己烷(Hexachlorocyclohexane)	<i>Sphingobium</i> sp.
杀虫剂	艾氏剂(Aldrin)	<i>Arthrobacter</i> sp.
杀虫剂	马拉息昂(Malathion)	<i>Arthrobacter</i> sp.
杀虫剂	拟除虫菊酯 (Synthetic pyrethroids)	<i>Luciliacuprina</i>

研究发现<sup>[47]</sup>,微生物-植物联用技术是一种根际微生物利用污染物作为其碳源,通过植物分泌物调整根际环境向有利于根际微生物生存繁殖趋势发展的环境联合修复途径。Jabeen等<sup>[48]</sup>研究表明,在 *Mesorhizobium* sp-多花黑麦草联合修复下能够在45 d内完全降解除草剂阿特拉津。Salam等<sup>[49]</sup>研究表明, *Candida* sp-甘蔗联合修复是通过菌种降解根际土壤中不溶性磷酸盐的机制来降解杀虫剂林丹,这种方法是传统修复策略的有效替代方案。Huang等<sup>[50]</sup>研究发现,副球菌 QCT6能够在玉米根际良好地定殖,在根灌后能够将玉米根际中的除草剂噻草酮降解到原来的24.3%。微生物-植物联用技术具有提高根际土壤自身化学农药分解代谢基因的丰度和表达<sup>[51]</sup>、植物为根际微生物提供更有利于其生长的环境<sup>[29]</sup>、植物根际分泌物促进农药共代谢<sup>[52]</sup>等明显优点,改善和增加了降解有益微生物种群环境,提高农药降解效率的作用。

#### 4.2 根际微生物在减少农药施用中的应用

利用根际微生物同样可以从根源上减少农药的施用。研究发现生防细菌<sup>[53]</sup>、生防真菌<sup>[54]</sup>、生防放线菌<sup>[55]</sup>及复合菌系<sup>[56]</sup>已经在农业生产中被应用于防治西红柿枯萎病<sup>[57]</sup>、马铃薯晚疫病<sup>[58]</sup>、棕榈茎基腐病<sup>[59]</sup>、草莓炭疽病和根腐病<sup>[60]</sup>等。但根际微生物减少农药施用的机制并不清楚。张伟珍等<sup>[61]</sup>研究发现,根际微生物丛枝菌根真菌会在植物根际形成一种共生体,这种共生体会增加植物本身对于病原菌的抵抗力,间接减少农药的施用。陆景倩等<sup>[62]</sup>研究发现,生防菌解淀粉芽孢杆菌能够通过产生激发诱导植物抗性的活性代谢物,对能够引起植物病害的潜在病原物产生抗性。此外,施用生防菌后原始根际微生物的数量发生变化,使作物根际微生物群落向有利于作物生存的条件发生变化。

## 5 总结与展望

多种农药对根际微生物的多样性都有影响,其机制是:①农药通过被植物叶片或者根系吸收、农药残留的方式直接影响根际微生物的群落结构和功能。②农药通过改变根系分泌物来间接改变根际微生物的多样性和群落特征。在根际土壤中某些微生物种类对农药具有降解作用,这使农药残留问题得到一定程度的解决。

根际微生物对农药残留处理也有影响。诸多实验结果表明,某些根际微生物或根际微生物与植物联用后能够降解农药。相较于污染后的修复,减少农药的施用量是一种一劳永逸的方法。其机制是:①根际微生物与植物共生提高其对病原菌的抗性。②根际微生物通过产生次级代谢产物改变土壤性质,使得土壤环境更有利于植物生长和土传病原菌的防治。③改变植物根际环境中源微生物群落,使其群落特征更有利于植物生存与病害防治。以上这3种机制,都是根际微生物减少农药处理的间接机制。最近的研究发现,根际微生物也可直接抑制病原菌的生存繁殖<sup>[63]</sup>。

随着科学技术的发展,微生物研究进入了组学时代。目前,关于农药对根际微生物影响的研究主要集中于农药对根际微生物群落多样性的影响方面。而农药对根际微生物遗传多样性和功能多样性的研究仍存在明显空缺。在组学技术的加持下,农药对根际微生物的其他影响机制将被揭示,为土壤环境微生物多样性保护提供了新的方法。根际微生物在农残处理中的应用已经被证实,但其中的具体机制并不清楚。在未来的研究中应当深入探索其机制,为农作物生产和农残处理提供新的思路。

#### 参考文献:

- [1] BERNARDES M, PAZIN M. Impact of Pesticides on Environmental and Human Health[J]. 2015, DOI: 10.5772/59710.
- [2] SHUKLA V K, RASTOGI A N, ADUKIA T K, et al. Organochlorine pesticides in carcinoma of the gallbladder: a case-control study[J]. European Journal of Cancer Prevention, 2001, 10(2): 153-156.
- [3] FRITSCHI L. Occupational Exposure to Pesticides and Risk of Non-Hodgkins Lymphoma[J]. American Journal of Epidemiology, 2005, 162(9): 849-857.
- [4] YOUNG J G, ESKENAZI B, GLADSTONE E A, et al. Association between in utero organophosphate pesticide exposure and abnormal reflexes in neonates[J]. Neurotoxicology, 2005, 26(2): 199-209.
- [5] CZEIZEL A E. Phenotypic and cytogenetic studies in self-poisoned patients[J]. Mutation Research, 1994, 313(2/3): 175.

- [6] PADUNGTOD, CHANTANA, LASLEY, et al. Reproductive Hormone Profile Among Pesticide Factory Workers [J]. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 1998, 40(12): 1038-1038.
- [7] 杨惠芳, 温棚农药暴露致心血管疾病风险的队列研究[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2018.
- [8] HAYES T B, HANSEN M, KAPUSCINSKI A R, et al. From silent spring to silent night: Agrochemicals and the anthropocene. *Elem Sci Anth*, 2017, 5, 1-24.
- [9] 焦 扬. 轴及伴生重金属对富集植物根际土壤酶活的影响研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- [10] 刘 晶. 稻瘟灵对中华水韭生理特性及根际土壤微生物群落的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018.
- [11] 王金燕, 孙华忠, 卜元卿, 等. 毒死蜱对紫金山森林土壤酶活力及微生物毒性影响研究[J]. *生态毒理学报*, 2017, 12(4): 210-218.
- [12] 万 盼, 黄小辉, 熊兴政, 等. 农药施用浓度对油桐幼苗生长及土壤酶活性、有效养分含量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(1): 73-80.
- [13] 叶央芳, 闵 航, 周湘池. 苯噻草胺对水田土壤呼吸强度和酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 14(1): 93-96.
- [14] 张瑞福. 根际微生物: 农业绿色发展中大有所为的植物第二基因组[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(9): 1-2.
- [15] 杨 露, 辛建攀, 田如男. 根际微生物对植物重金属胁迫的缓解作用及其机理研究进展[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(3): 213-225.
- [16] Shahid M, Zaidi A, Ehtram A, et al. In vitro investigation to explore the toxicity of different groups of pesticides for an agronomically important rhizosphere isolate *Azotobacter vinelandii* [J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2019, 157: 33-44.
- [17] 赵志强. 毒死蜱和丁硫克百威对香蕉根际土壤微生物的影响及其降解特征的研究[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [18] 陈 星. 毒死蜱对温室土壤中微生物多样性的影响以及厌氧条件下 *Shewamellaoneidensis* MR-1 生物转化 2,4-二硝基甲苯的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- [19] 王永强, 李英东, 郭正红, 等. 臭氧水对土壤微生物群落的影响[J]. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 47(6): 688-696.
- [20] MOHIUDDIN M. Influence of fungicide (Carbendazim) and herbicides (2,4-D and Metribuzin) on non-target beneficial soil microorganisms of Rhizospheric Soil of Tomato Crop [J]. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 2013, 5(1): 47-50.
- [21] VUYURU M, SANDHU H S, MCCRAY J M, Raid RN. Effects of Soil-Applied Fungicides on Sugarcane Root and Shoot Growth, Rhizosphere Microbial Communities, and Nutrient Uptake [J]. *Agronomy*. 2018, 8(10): 223.
- [22] 闫 雷, 于 淼, 张景欣, 等. 三种杀菌剂对土壤细菌群落多样性影响[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(8): 29-33.
- [23] 邓 晓, 李雅琦. 草甘膦对土壤微生物影响的研究[J]. *农药*, 2005(2): 59-62.
- [24] 陈隆升, 陈永忠, 彭映赫, 等. 草甘膦对油茶林土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *湖南林业科技*, 2015, 42(4): 32-35.
- [25] 吴 静, 陈岩岩, 叶项宇, 等. 除草剂草甘膦对板栗根际土壤微生物多样性的影响[J]. *经济林研究*, 2019, 37(3): 161-167.
- [26] 杨姗姗, 仲彩萍, 王 仪, 等. 草甘膦对党参生长根腐病及根际土壤微生物的影响[J]. *中国现代中药*, 2022, 24(10): 1932-1938.
- [27] 周晓果, 左晓庆, 温远光, 等. 除草剂对桉树人工林下植物及土壤微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6749-6763.
- [28] QU Q, LI Y, ZHANG Z, et al. Effects of S-metolachlor on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling root exudates and the rhizosphere microbiome [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125137.
- [29] 陆 涛, 李 燕, 傅正伟, 等. 农药对根际微生物群落的影响及潜在风险[J]. *农药学学报*, 2019, 21(Z1): 865-870.
- [30] MEANS N E, KREMER R J. Effects of glyphosate and foliar amendments on activity of microorganisms in the soybean rhizosphere [J]. *Journal of Environmental Science & Health Part B*, 2007, 42(2): 125-132.
- [31] XU X, ZARECKI R, MEDINA S, et al. Modeling microbial communities from atrazine contaminated soils promotes the development of biostimulation solutions [J]. *The ISME Journal*, 2019, 13(2): 494-508.
- [32] 丁 娜, 林 华, 张学洪, 等. 植物根系分泌物与根际微生物交互作用机制研究进展[J/OL]. *土壤通报*, 2022, 53(5): 1212-1219.
- [33] 曲 乾. 精异丙甲草胺对小麦幼苗根系分泌物及共生微生物的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [34] 李小青. 化学农药对青菜及其根际微环境的影响机制研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
- [35] ZHANG N, WANG D, LIU Y, et al. Effects of different plant root exudates and their organic acid components on chemotaxis, biofilm formation and colonization by beneficial rhizosphere-associated bacterial strains [J]. *Plant & Soil*, 2014, 374(1/2): 689-700.
- [36] NEAL A L, AHMAD S, GORDON-WEEKS R, et al. Benzoxazinoids in root exudates of maize attract *Pseudomonas putida* to the rhizosphere [J]. *PLoS One*, 2012, 7(4): e35498.
- [37] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [38] VAN DER HEIJDEN M G A, KLIRONOMOS J N, URSIC M, et al. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity [J]. *Nature*, 1998, 396(6706): 69-72.
- [39] LAAKSO J, SETÄLÄ H. Sensitivity of primary production to changes in the architecture of belowground food webs [J]. *Oikos*, 1999, 87(1): 57-64.
- [40] WAGG C, JANSÁ J, SCHMID B, et al. Belowground biodiversity effects of plant symbionts support aboveground productivity [J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(10): 1001-1009.
- [41] PHILIPPOT L, RAAIJMAKERS J M, LEMANCEAU P, et al. Go-

- ing back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11(11): 789–799.
- [42] 接伟光, 姚延轩, 张颖智, 等. 根际促生微生物对作物农残影响的研究进展[J]. *生物技术*, 2019, 29(4): 398–403, 397.
- [43] CHENNAPPA G, SREENIVASA M Y, NAGARAJA H. Azotobacter salinestrans: A Novel Pesticide-Degrading and Prominent Biocontrol PGPR Bacteria//[M]. *Microorganisms for Green Revolution*. Singapore: Springer, 2018.
- [44] CHENNAPPA G, ADKAR-PURUSHOTHAMA C R, UMDALE SURAJ, et al. Pesticide tolerant Azotobacter isolates from paddy growing areas of northern Karnataka, India[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2014, 30(1): 1–7.
- [45] HATCH K M, LERCH R N, KREMER R J, et al. Evaluating phytochemical and microbial contributions to atrazine degradation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115840.
- [46] ORTIZ-HERNANDEZ M L, SANCHEZ-SALINAS E, DANTAN-GONZALEZ E, et al. Pesticide Biodegradation: Mechanisms, Genetics and Strategies to Enhance the Process//[M]. *Biodegradation—Life of Science*. InTech, 2013.
- [47] AFZAL M, KHAN S, IQBAL S, et al. Inoculation method affects colonization and activity of Burkholderia phytofirmans PsJN during phytoremediation of diesel-contaminated soil [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85: 331–336.
- [48] JABEEN H, IQBAL S, AHMAD F, et al. Enhanced remediation of chlorpyrifos by ryegrass (*Lolium multiflorum*) and a chlorpyrifos degrading bacterial endophyte *Mezorhizobium* sp. HN3 [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(2): 126–133.
- [49] SALAM J A, HATHA M A A, DAS N. Microbial-enhanced lindane removal by sugarcane (*Saccharum officinarum*) in doped soil—applications in phytoremediation and bioaugmentation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 394–399.
- [50] HUANG X, ZHANG H, CHEN F, et al. Colonization of *Paracoccus* sp. QCT6 and enhancement of metribuzin degradation in maize rhizosphere soil [J]. *Current Microbiology*, 2018, 75(2): 156–162.
- [51] JHA P, JHA P N. Plant-microbe partnerships for enhanced biodegradation of polychlorinated biphenyls [J]. *Plant Microbes Symbiosis: Applied Facets*, 2015: 95–110.
- [52] SINGER A C, CROWLEY D E, THOMPSON I P. Secondary plant metabolites in phytoremediation and biotransformation [J]. *TRENDS in Biotechnology*, 2003, 21(3): 123–130.
- [53] SUN Z, YANG L, HAN M, et al. Biological control ginseng grey mold and plant colonization by antagonistic bacteria isolated from rhizospheric soil of *Panax ginseng* Meyer [J]. *Biological Control*, 2019, 138: 104048.
- [54] PRASAD R D, CHANDRIKA K, GODBOLE V. A novel chitosan biopolymer based *Trichoderma* delivery system: Storage stability, persistence and bio efficacy against seed and soil borne diseases of oilseed crops [J]. *Microbiological Research*, 2020, 237: 126487.
- [55] NGUYEN P A, STRUB C, DURAND N, et al. Biocontrol of *Fusarium verticillioides* using organic amendments and their actinomycete isolates [J]. *Biological Control*, 2018, 118: 55–66.
- [56] 卯婷婷, 陶刚, 赵兴丽, 等. 4种微生物菌剂对辣椒主要病害的生物防治作用[J]. *中国生物防治学报*, 2020, 36(2): 258.
- [57] 李兴龙, 李彦忠. 土传病害生物防治研究进展[J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 204–212.
- [58] WHARTON P S, KIRK W W, SCHAFER R L, et al. Evaluation of biological seed treatments in combination with management practices for the control of seed-borne late blight in potato [J]. *Biological Control*, 2012, 63(3): 326–332.
- [59] SUJARIT K, PATHOM-AREE W, MORI M, et al. *Streptomyces palmae* CMU-AB204T, an antifungal producing actinomycete, as a potential biocontrol agent to protect palm oil producing trees from basal stem rot disease fungus, *Ganoderma boninense* [J]. *Biological Control*, 2020, 148: 104307.
- [60] 杨振华. EM菌剂对设施草莓生长及生理特性的影响[J]. *贵州农业科学*, 2019, 47(7): 122–126.
- [61] 张伟珍, 古丽君, 段廷玉. AM真菌提高植物抗逆性的机制[J]. *草业科学*, 2018, 35(3): 491–507.
- [62] 陆景倩, 郎剑锋, 杨秋侠, 石明旺. 解淀粉芽孢杆菌对植物土传病害的作用机制[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(12): 5–10.
- [63] ZHAO Q, BILAL M, YUE S, et al. Identification of biphenyl 2, 3-dioxygenase and its catabolic role for phenazine degradation in *Sphingobium yanokuyae* B1 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 494–501.