

烟嘧磺隆、莠去津残留污染微生物修复研究进展

李 萌, 张 焯, 曹 旭, 王向向, 胡基华, 陈静宇, 刘治廷, 李 晶*

黑龙江省科学院微生物研究所, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年7月1日; 录用日期: 2022年7月30日; 发布日期: 2022年8月9日

摘 要

世界人口增长导致粮食需求量提升, 为了提高粮食产量, 农田开始使用化学农药以解决粮食供求不平衡的问题。农药主要分为除草剂、杀虫剂、杀菌剂和植物生长调节剂等, 除草剂的使用量约占农药使用量的三分之一, 随着除草剂的大量使用, 除草剂残留污染引发的相关问题引起了人们的重视, 除草剂污染修复成为研究的热点问题, 除草剂的微生物修复由于成本低、效果好、环境扰动小等优点成为近年除草剂污染修复研究的一大趋势。烟嘧磺隆、莠去津是我国北方地区常用玉米田除草剂, 可防治多种杂草, 但除草剂的使用造成的除草剂残留污染问题也会影响环境, 危害人和动物的健康。本文介绍了除草剂残留污染的修复方法, 介绍了微生物降解除草剂的方法和影响因素, 概述了烟嘧磺隆、莠去津残留的危害及其降解菌株的降解条件和效果, 最后指出除草剂残留污染微生物修复存在的问题并对未来的研究提出了展望。

关键词

除草剂污染, 微生物修复, 烟嘧磺隆, 莠去津

Research Progress on Microbial Remediation of Nicosulfuron and Atrazine Residues

Meng Li, Ye Zhang, Xu Cao, Xiangxiang Wang, Jihua Hu, Jingyu Chen, Zhiting Liu, Jing Li*

Institute of Microbiology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

Received: Jul. 1st, 2022; accepted: Jul. 30th, 2022; published: Aug. 9th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 李萌, 张焯, 曹旭, 王向向, 胡基华, 陈静宇, 刘治廷, 李晶. 烟嘧磺隆、莠去津残留污染微生物修复研究进展[J]. 农业科学, 2022, 12(8): 649-655. DOI: 10.12677/hjas.2022.128091

Abstract

In order to increase food production, farmland began to use chemical pesticides to solve the imbalance between food supply and demand. Pesticides are mainly divided into herbicides, insecticides, fungicides and plant growth regulators, etc., the use of herbicides accounts for about one-third of the use of pesticides, with the large number of herbicides used, herbicide residue pollution caused by related problems have attracted people's attention, herbicide pollution repair has become a hot issue in research, herbicide microbial repair, due to low cost, good effect, small environmental disturbance and other advantages has become a major trend in herbicide pollution repair research in recent years. Herbicides commonly used in corn field herbicides in northern China can control a variety of weeds, but the problem of herbicide residue pollution caused by the use of herbicides will also affect the environment and endanger the health of people and animals. This paper introduces the remediation method of herbicide residue pollution, introduces the method and influencing factors of microbial reduction and release of herbicide, summarizes the residual hazards of nicosulfuron and atrazine and the degradation conditions and effects of their degraded strains, and finally points out the problems of microbial remediation of herbicide residue pollution and puts forward prospects for future research.

Keywords

Herbicide Ontamination, Microbial Repair, Nicosulfuron, Atrazine

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

19 世纪末期, 人口大量增长致使粮食供应不足, 人们开始使用化学除草剂防治农田杂草, 以提高粮食作物的产量及质量[1]。从二十世纪中旬开始, 我国的除草剂使用量迅速增加, 除草剂的新品种和新剂型得到了长足的发展[2]。除草剂作为农田除草的重要措施, 以其高效便捷等特点代替了机械除草、人工除草和生物除草[3]。近年来, 我国的除草剂生产企业不断增加并且蓬勃发展, 化学除草剂的使用量呈逐年增长的趋势, 使用量约占化学农药使用量的三分之一。我国的除草剂种类繁多, 现有的除草剂种类已经超过 100 种, 主要有氯嘧磺隆、草甘膦、咪唑烟嘧磺隆、乙烟酸、百草枯、五氟磺草胺、莠去津、异噁草松、氟磺胺草醚、乙草胺等。

除草剂主要是人工合成的生物外源性物质, 能杀死杂草或者有害植物, 大部分种类的除草剂对人和其他生物都是有毒的, 且极易残留, 易造成环境污染。除草剂的大量使用导致除草剂产生残留, 污染水、大气和土壤, 危害人和动物的健康, 造成作物减产, 危害农田生态环境[4]。随着对环境保护以及人体健康的重视, 人们开始重视除草剂残留问题, 除草剂残留降解问题, 成为迫切需要解决的难题。

微生物修复具有经济低耗、适用范围广、无二次污染、对环境扰动性小等优点。自 20 世纪中期以来, 越来越多的除草剂降解菌被发现并分离, 对其降解代谢途径及降解条件优化的研究也取得了较大进展[5], 目前广泛应用的除草剂降解菌株主要是细菌和真菌。但实验室中培养出的微生物有些不能适应自然环境, 且大部分研究都只针对单一污染物, 降解复合污染物的研究较少。研究人员应继续加强除草剂残留污染微生物降解相关领域研究, 筛选效果好、降解谱广、成本低廉、环境友好的微生物菌株, 为环境保护和

农田土壤环境修复添砖加瓦。本文简述了除草剂烟嘧磺隆、莠去津的危害，总结了除草剂烟嘧磺隆、莠去津的微生物降解菌种资源，指出了除草剂残留污染微生物降解研究中的问题，并对未来微生物降解除草剂的研究提出了展望。

2. 除草剂残留污染修复

2.1. 除草剂污染的修复技术

目前用于修复除草剂污染的修复技术主要有物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术[6]。其中，物理修复和化学修复技术具有周期短、修复效率高等优点，但工程量大、费用高、易产生二次污染，适用于对除草剂残留浓度较高的场所进行修复。生物修复法虽然修复周期较长，但因其本身具有高效性、安全性、低成本等优点，被称为是一种环境友好替代技术，近年来该技术在国内外显现出良好的开发前景。生物修复主要包括植物修复、菌根修复和微生物修复[7]，微生物修复是能够彻底降解除草剂残留污染的有效措施之一。

2.2. 除草剂微生物降解的方式

微生物降解除草剂的方式大概分为两类。一是直接作用，主要是酶促反应，酶促反应是微生物降解除草剂的最常见方式，微生物分泌对除草剂具有降解作用的酶，将除草剂作为其能源物质，将其分解为低毒低害或无毒无害的小分子物质[8]。

二是间接修复，通过微生物活动改变了环境的物理化学性质，从而对除草剂发挥作用的过程，也被归结为非酶促反应。间接作用主要包括：生物浓缩、累积、矿化、共代谢作用、种间协同代谢作用等。自然环境下，微生物降解除草剂是多种方式共同作用的结果[9]。

2.3. 微生物修复除草剂残留污染的影响因素

2.3.1. 除草剂

微生物降解除草剂的效率受除草剂种类的影响很大。不同除草剂具有不同的分子量、结构和基团类型，一般来说，分子量越大和结构越复杂的除草剂，微生物对其降解越困难，降解速率越低[10]。现在的除草剂大多是人工合成的复杂的有机化合物，大多数微生物无法对其进行降解，可能是由于这些化合物刚刚进入到环境中，环境中的微生物还未进化出一套完整的针对新型除草剂的酶促反应体系。此外，除草剂的浓度也对微生物降解除草剂的速率和效率产生影响，不同微生物具有不同的降解特性，一般来说，除草剂污染残留浓度越高，微生物降解效率越低[11]。

2.3.2. 微生物

微生物的种类、数量、代谢强弱以及对环境的适应能力都直接对微生物降解除草剂的效率产生影响。不同微生物或同一种微生物的不同菌株，甚至是同一菌株的不同生长阶段对同种除草剂的降解效率大不相同[12]，微生物菌群的协同或拮抗作用也会影响微生物降解除草剂的效率。

2.3.3. 环境因素的影响

环境因素主要包括温度、湿度、pH 值、氧气含量以及碳氮比等。环境条件影响微生物的生长繁殖速度和代谢类型，对微生物降解除草剂的速率产生重要的影响[11]。

3. 微生物降解烟嘧磺隆、莠去津的研究进展

3.1. 烟嘧磺隆、莠去津残留危害

除草剂混剂因其具有物联化、互联化和智能化的优点成为国内除草剂行业的新型趋势，烟嘧磺隆·莠

去津是国内玉米田常用五大除草剂混剂之一，不仅可以有效防治多种一年生杂草，而且可以防治多年生禾本科杂草和莎草科杂草。

烟嘧磺隆(Nicosulfuron)的分子式为 $C_{15}H_{18}N_6O_6S$ ，易溶于水，属于磺酰胺类除草剂，是 20 世纪 80 年代末开发的新型磺酰胺类除草剂[6]。常用的剂型为 40 g/L 可分散油悬浮剂，能防除一年生和多年生禾本科杂草、部分阔叶杂草，对抗乙草胺、莠去津的杂草有明显的防除效果。烟嘧磺隆因具有杀草谱广、低毒、高效而被大量使用，常防除玉米田中的杂草，会对后茬大豆、甜菜、菠菜、白菜、黄瓜等作物产生药害。该药剂在偏酸性条件下易光解和水解，半衰期较短，一般为 15~20 d，在中性和偏碱性条件下正相反，不易发生降解，半衰期一般为 190~250 d，根据 pH 值不同，半衰期长短不同[13]。烟嘧磺隆本身显弱酸性，且易附着在土壤颗粒表面，通过雨水冲刷，使得该除草剂进入到水体环境中，污染水质和危害水体中的水生生物[7]，有报道称烟嘧磺隆对藻类和浮游植物具有不利影响[14]。

莠去津(Atrazine)分子式为 $C_8H_{14}ClN_5$ ，属三嗪类化合物[15]。莠去津是一种高选择性内吸传导型除草剂[16]，常被用于甘蔗、茶园、玉米、高粱、林地、果园、红松苗圃等，可以防除一年生禾本科杂草和阔叶杂草。莠去津除草效果好、成本低，在世界各国农田除草中广泛使用，但由于其矿化困难，在环境中半衰期可长达 30~400 d，易造成土壤和水体环境的严重污染。莠去津具有生物毒性，长期低剂量暴露会干扰生物的内分泌系统，易对后茬敏感作物如大豆、水稻、油菜、甜菜、甜瓜、西瓜、亚麻、大麦、小麦、蔬菜等造成危害。莠去津还具有潜在的致癌和致畸性，已被列为国际环境优先控制污染物，并在欧盟国家禁止使用[17] [18]。

3.2. 烟嘧磺隆、莠去津降解菌株

随着对环境保护的重视，针对于农药降解的研究加大了力度，尤其是微生物对农药降解作用的研究，国内外很多专家学者陆续发现并分离了除草剂降解菌[10]。常见的能够降解烟嘧磺隆、莠去津的微生物主要有芽胞杆菌、假单胞菌、产碱杆菌、无色杆菌、大肠杆菌、棒状杆菌、黄杆菌、诺卡氏菌、霉菌等[19]。不同被除草剂烟嘧磺隆、莠去津污染的环境样品中均可以分离出烟嘧磺隆、莠去津降解菌株，不同菌株的分离介质、最适底物浓度、培养时间和降解效率均不相同。

Table 1. Nicosulfuron degrade strains

表 1. 烟嘧磺隆降解菌株

菌株	样品来源	降解时间/降解率(%)	底物浓度	研究人员及参考文献
<i>Aspergillus niger</i> YF1	污水	5 d/50.31	2 mg/kg	杨亚君[20]
<i>Bacillus</i> YB1	污水	5 d/71.78	2 mg/kg	杨亚君[20]
<i>Serratia marcescens</i> N80	工业废水污泥	96 h/93.6	10 mg/L	Zhang [21]
<i>Oceanisphaera</i> LAM-WHM-ZC	海洋沉积物	5 d/73.7	20 mg/kg	周珊[22]
<i>Pseudomonas</i> YN-8	废水活性淤泥	7 d/65.40	100 mg/L	代鹏飞[23]
<i>Talaromyces flavus</i> LZM1	活性污泥	5 d/100	100 mg/L	Song [24]
<i>Penicillium oxalicum</i> YC-WM1	活性污泥	6 d/100	100 mg/L	Feng [25]
<i>Penicillium decumbens</i> YC-WC1	农田土壤	6 d/100	100 mg/L	卫正[26]
<i>Pseudomonas fluorescens</i> SG-1	农田土壤	1 d/77.5	412 mg/L	Louis Carles [27]
<i>Alcaligenes faecalis</i> ZWS11	农田土壤	6 d/80.56	500 mg/L	Zhao [28]

如表 1 所知, 大部分菌株对于低浓度(100 mg/L 以下)的烟嘧磺隆具有良好的降解作用, Zhang [21]等分离出的粘质沙雷菌(*Serratia marcescens*) N80 可 96 h 降解 10 mg/L 烟嘧磺隆 90%以上, Song、Feng 和卫正等[24] [25] [26]人分离出的黄色篮状菌(*Talaromyces flavus*) LZM1、草酸青霉(*Penicillium oxalicum*) YC-WM1、斜卧青霉(*Penicillium decumbens*) YC-WC1 可完全降解 100 mg/L 底物浓度的烟嘧磺隆。就目前研究结果表明, 在烟嘧磺隆降解菌株库中, 细菌的种类数量更多, 细菌的环境适应能力更强, 更易使用分子生物学手段进行基因修饰, 因而其在烟嘧磺隆降解菌株中占主要地位。

Table 2. Atrazine degrade strains

表 2. 莠去津降解菌株

菌株	来源	降解时间/降解率(%)	底物浓度	研究人员及参考文献
<i>Corynebacterium freneyi</i> N34	农田土壤	96 h/90.39	600 µg/L	刘限[29]
<i>Agrobacterium radiobacter</i> J14A	农田土壤	72 h/94	5 µg/mL	Struthers J K [30]
<i>Arthrobacter</i> C2	农田土壤	3 d/90	10 µg/mL	徐昊昱[31]
<i>Citricoccus</i> TT3	农药厂污水排放口 土壤	66 h/100	50 mg/L	Yang [32]
<i>Shewanella</i> YJY4	农田土壤	36 h/100	100 mg/L	Ye [33]
<i>Arthrobacter</i> HB-5	工业废水	24 h/100	100 mg/L	Wang [34]
<i>Bacillus subtilis</i> HB-6	工业废水	14 h/100	100 mg/L	Wang [35]
<i>Arthrobacter</i> AD26	工业废水	72 h/95	500 mg/L	Li [36]

根据表 2 可知, 现有报道的莠去津高效降解菌株大部分为在土壤和含有莠去津的工业废水中分离出的细菌, 大多数菌株更适宜低浓度的莠去津底物, Ye、Wang 等人筛选出的希瓦氏菌(*Shewanella*) YJY4、节杆菌属(*Arthrobacter*) HB-5、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) HB-6 可完全降解低浓度(100 mg/L 以下)莠去津, 当高浓度莠去津作为底物时, Li [36]等人筛选出的节杆菌(*Arthrobacter*) AD26 72 h 可降解 500 mg/L 莠去津 95%以上, 目前研究结果表明, 莠去津高效降解菌株大部分为细菌, 真菌的降解效果不理想。

从以上的研究报道可以看出, 目前专家学者对于烟嘧磺隆、莠去津降解菌株的研究主要在单一除草剂降解菌株研究方向, 对于烟嘧磺隆、莠去津及其复合除草剂污染降解菌株的研究较少。今后应加强对烟嘧磺隆、莠去津及其复合除草剂污染降解菌株的研究, 筛选具有高效降解多种污染物能力的菌株, 进一步扩大菌株的应用范围, 丰富除草剂污染高效降解菌株资源库。

4. 除草剂残留污染微生物修复存在的问题及展望

目前除草剂残留污染微生物修复在实验室阶段取得了一些成果, 但也有一些问题尚未解决。首先, 实验室中培养出的降解除草剂的微生物菌株有些不能适应自然环境[8]。自然环境下往往是多种菌株共同生活形成群落结构, 有些实验室中筛选出的除草剂降解菌在与土著微生物的竞争中处于劣势, 致使降解菌株数量减少, 影响除草剂降解效率。其次, 自然环境不是一成不变的, 环境的温度、湿度等理化指标会随着季节的更替以及其周围环境的变化发生改变[37], 微生物受环境因素影响很大, 环境的改变, 对微生物的降解作用也会产生影响。此外, 一些场所不能使用微生物进行污染修复, 使除草剂污染的微生物修复受到很大的局限。科研工作者需要不停地探索完善除草剂残留污染微生物修复技术, 发现高效、低成本、无毒安全、环境适应性高的微生物菌株[38]。

5. 总结与展望

微生物种类数量繁多及其代谢类型的多样性使微生物修复在除草剂残留污染修复领域占有显著的优势[5], 随着对环境保护的重视, 越来越多的除草剂降解菌株资源被开发利用。本文简要介绍了具有代表性的烟嘧磺隆、莠去津降解菌株资源, 其中主要是细菌和真菌, 多数菌株对除草剂降解有显著作用, 部分菌株对低浓度(100 mg/L 以下)除草剂降解效率为 100%, 但现有的大部分菌株可降解污染物相对单一, 对于微生物降解复合型污染研究的较少。

除草剂的使用方式日益趋向于除草剂之间、除草剂和其他农药之间混合使用, 这样能扩大杀草谱, 提高和延长药效, 减少除草剂残留污染, 减少对后茬作物的影响。未来修复除草剂残留污染的微生物菌剂的发展趋势是多种复合型菌剂, 它更符合自然环境条件下的多种微生物共同生存的情况, 能够提升降解微生物菌群对环境的适应性, 提高微生物降解除草剂的效率, 增加可修复污染物种类。由于微生物生长代谢的复杂性及易受环境因素影响特性, 直接引入降解菌株及技术会遇到外源微生物竞争不过土著微生物或受各种生物和非生物因素影响, 而出现修复效果不稳定等问题, 因此仍需要开展针对相应污染区域的微生物修复研究。此外, 利用分子生物学手段在微生物中导入高效降解除草剂的基因片段也是微生物修复技术的发展方向之一[19]。随着对微生物修复机理的深入了解以及生物工程技术的不断发展, 微生物修复技术会有更深层次的进展, 微生物修复技术在污染物修复方面会占有举足轻重的地位[39]。

基金项目

黑龙江省科学院院预研项目(YY2021SW01)“寒地玉米大豆轮作田常用除草剂降解菌株的筛选研究”课题的支持。

参考文献

- [1] 王磊. 烟嘧磺隆、莠去津降解菌的筛选及降解特性研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [2] 周文冠, 孟永杰, 陈锋, 等. 除草剂研发及其复混使用的现状与展望[J]. 草业科学, 2018, 35(1): 93-105.
- [3] 马卫芳. 农田杂草发生特点及防治技术[J]. 现代农村科技, 2020(9): 43.
- [4] Seghers, D., Verthé, K., Reheul, D., *et al.* (2003) Effect of Long-Term Herbicide Applications on the Bacterial Community Structure and Function in an Agricultural Soil. *FEMS Microbiology Ecology*, **46**, 139-146. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(03\)00205-8](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(03)00205-8)
- [5] 褚翠伟, 阮志勇, 姚利, 等. 除草剂的微生物降解研究进展[J]. 生物资源, 2018, 40(2): 93-100.
- [6] 李彩丽, 乔利, 王守宝, 等. 烟嘧磺隆在玉米上的药害原因及预防补救措施[J]. 福建农业科技, 2010(4): 60-61.
- [7] Xavier, S.T.R., Wei, O., Xiang, G., *et al.* (2021) Typical Herbicide Residues, Trophic Transfer, Bioconcentration, and Health Risk of Marine Organisms. *Environment International*, **152**, Article ID: 106500. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106500>
- [8] 卢美名, 尹雯悦, 刘传龙, 等. 除草剂微生物降解的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(3): 5-8.
- [9] 赵卫松. 烟嘧磺隆和噻吩磺隆微生物降解研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [10] Yu, Y., Zhang, H.J. and Zhou, Q.X. (2011) Using Soil Available P and Activities of Soil Dehydrogenase and Phosphatase as Indicators for Biodegradation of Organophosphorus Pesticide Methamidophos and Glyphosate. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **20**, 688-701. <https://doi.org/10.1080/15320383.2011.594110>
- [11] 焦美娟, 林文星, 马鹏生, 等. 农药残留生物降解剂的研究进展[J]. 北方园艺, 2021(13): 141-147.
- [12] Verhagen, P., Destino, C., Boon, N., *et al.* (2015) Spatial Heterogeneity in Degradation Characteristics and Microbial Community Composition of Pesticide Biopurification Systems. *Journal of Applied Microbiology*, **118**, 368-378. <https://doi.org/10.1111/jam.12716>
- [13] 张国民. 降解烟嘧磺隆光合细菌的分离、鉴定及降解特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [14] 苏少泉. 烟嘧磺隆在我国的开发[J]. 农药, 2003(7): 5-8.
- [15] 李绍峰, 朱静, 李铁晶. 阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3214-3219.

- [16] Xu, L.J., Chu, W. and Graham, N. (2014) Atrazine Degradation Using Chemical-Free Process of USUV: Analysis of the Micro-Heterogeneous Environments and the Degradation Mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, **275**, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.007>
- [17] Safe, S. (2005) Clinical Correlates of Environmental Endocrine Disruptors. *Trends in Endocrinology and Metabolism: TEM*, **16**, 139-144. <https://doi.org/10.1016/j.tem.2005.03.004>
- [18] Hayes, T., Haston, K., Tsui, M., et al. (2003) Atrazine-Induced Hermaphroditism at 0.1 ppb in American Leopard Frogs (*Rana pipiens*): Laboratory and Field Evidence. *Environmental Health Perspectives*, **111**, 568-575. <https://doi.org/10.1289/ehp.5932>
- [19] Yuan, S.F., Li, C.J., Hang, Y., et al. (2021) Screening of Lactic Acid Bacteria for Degrading Organophosphorus Pesticides and Their Potential Protective Effects against Pesticide Toxicity. *LWT*, **147**, Article ID: 111672. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111672>
- [20] 杨亚君, 刘顺, 武丽芬, 等. 可降解水体中烟嘧磺隆微生物的分离与筛选[J]. 农药学报, 2007, 9(3): 275-279.
- [21] Zhang, H., Mu, W.H., Hou, Z.G., et al. (2012) Biodegradation of Nicosulfuron by the Bacterium *Serratia marcescens* N80. *Journal of Environmental Science Health B*, **47**, 153-160. <https://doi.org/10.1080/03601234.2012.632249>
- [22] 周珊. 烟嘧磺隆降解菌的分离鉴定及降解特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华中农业大学, 2015.
- [23] 代鹏飞, 蔡天明, 汪林, 等. 一株烟嘧磺隆降解菌的分离鉴定及其降解特性与途径[J]. 环境科技, 2015, 28(4): 12-17+21.
- [24] Song, J.L., Gu, J.G., Zhai, Y., et al. (2013) Biodegradation of Nicosulfuron by a *Talaromyces flavus* LZM1. *Biore-source Technology*, **140**, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.086>
- [25] Feng, W.M., Wei, Z., Song, J.L., et al. (2017) Hydrolysis of Nicosulfuron under Acidic Environment Caused by Oxalate Secretion of a Novel *Penicillium oxalicum* Strain YC-WM1. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 647. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00228-2>
- [26] 卫正. 烟嘧磺隆降解菌的筛选与代谢组学检测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [27] Carles, L., Joly, M., Bonnemoy, F., et al. (2017) Identification of Sulfonylurea Biodegradation Pathways Enabled by a Novel Nicosulfuron-Transforming Strain *Pseudomonas fluorescens* SG-1: Toxicity Assessment and Effect of Formulation. *Journal of Hazardous Materials*, **324**, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.048>
- [28] Zhao, W.S., Wang, C., Xu, L., et al. (2015) Biodegradation of Nicosulfuron by a Novel *Alcaligenes faecalis* Strain ZWS11. *Journal of Environmental Sciences (China)*, **35**, 151-162. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.022>
- [29] 刘限, 李安, 高增贵, 等. 除草剂莠去津降解菌的筛选及降解效果[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(22): 286-290.
- [30] Struthers, J., Jayachandran, K. and Moorman, T. (1998) Biodegradation of Atrazine by *Agrobacterium radiobacter* J14a and Use of This Strain in Bioremediation of Contaminated Soil. *Applied and Environmental Microbiology*, **64**, 3368-3375. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.9.3368-3375.1998>
- [31] 徐昊昱. 阿特拉津降解菌 *Arthrobacter* sp. C2 的分离鉴定、降解特性和机理[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [32] Yang, X.Y., Wei, H.Y., Zhu, C.X., et al. (2018) Biodegradation of Atrazine by the Novel *Citricoccus* sp. Strain TT3. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **147**, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.046>
- [33] Ye, J.Y., Zhang, J.B., Gao, J.G., et al. (2016) Isolation and Characterization of Atrazine-Degrading Strain *Shewanella* sp. YJY4 from Cornfield Soil. *Letters in Applied Microbiology*, **63**, 45-52. <https://doi.org/10.1111/lam.12584>
- [34] Wang, J.H., Zhu, L.S., Liu, A.J., et al. (2011) Isolation and Characterization of an *Arthrobacter* sp. Strain HB-5 That Transforms Atrazine. *Environmental Geochemistry and Health*, **33**, 259-266. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9337-3>
- [35] Wang, J.H., Zhu, L.S., Wang, Q., et al. (2014) Isolation and Characterization of Atrazine Mineralizing *Bacillus subtilis* Strain HB-6. *PLOS ONE*, **9**, e107270. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107270>
- [36] Li, Q.Y., Li, Y., Zhu, X.K., Cai, B.L. (2008) Isolation and Characterization of Atrazine-Degrading *Arthrobacter* sp. AD26 and Use of This Strain in Bioremediation of Contaminated Soil. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 1226-1230. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62213-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62213-5)
- [37] 王新, 孙诗雨, 张惠文. 微生物降解磺酰脲类除草剂的研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3449-3457.
- [38] Zhao, S.M., Xu, W., Zhang, W.L., et al. (2021) In-Depth Biochemical Identification of a Novel Methyl Parathion Hydrolase from *Azohydromonas australica* and Its High Effectiveness in the Degradation of Various Organophosphorus Pesticides. *Bioresource Technology*, **323**, Article ID: 124641. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124641>
- [39] Louis, C., Fabrice, M.-L., Marion, D., et al. (2021) Potential of Preventive Bioremediation to Reduce Environmental Contamination by Pesticides in an Agricultural Context: A Case Study with the Herbicide 2,4-D. *Journal of Hazardous Materials*, **416**, Article ID: 125740. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125740>