

四种除草剂对土壤微生物影响研究进展

张 焯, 李 萌, 曹 旭, 王向向, 胡基华, 陈静宇, 刘治廷, 樊 川, 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8月5日; 录用日期: 2022年9月2日; 发布日期: 2022年9月13日

摘 要

近年来由于化学除草剂过量施用所导致的土壤质量下降问题时有发生, 土壤微生物与土壤健康密切相关, 本文以氟磺胺草醚、异噁草松、烟嘧磺隆、莠去津四种寒地大豆-玉米轮作田常用除草剂品种为主, 综述近几年研究中四种除草剂对土壤微生物的影响, 展望未来研究方向, 以期防治除草剂药害提供参考。

关键词

氟磺胺草醚, 异噁草松, 烟嘧磺隆, 莠去津, 残留, 土壤微生物

Research Progress on the Effects of Four Herbicides on Soil Microorganisms

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

Institute of Microbiology Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin Heilongjiang

Received: Aug. 5th, 2022; accepted: Sep. 2nd, 2022; published: Sep. 13th, 2022

Abstract

In recent years, the problem of soil quality degradation caused by excessive application of chemical herbicides has occurred from time to time, and soil microorganisms are closely related to soil health. In this paper, four commonly used herbicides in soybean corn rotation fields in cold regions, including fomesafen, clomazone, nicosulfuron and atrazine, are mainly used. The effects of four herbicides on soil microorganisms in recent years are reviewed, and the future research direction is prospected, In order to provide reference for the control of herbicide damage.

*通讯作者。

Keywords

Fomesafen, Clomazone, Nicosulfuron, Atrazine, Residue, Soil Microorganism

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

我国是农业大国, 病害、虫害、草害等生物灾害严重危害着作物的产量和品质, 其中, 草害是影响作物产量的重要原因之一[1]。除草剂的使用能够大大减少杂草所导致的作物减产问题, 并且能够降低田间作业的成本, 是最主要的杂草防治措施。但防治草害的同时也伴随着除草剂药害的发生, 过量的除草剂不仅影响下茬作物的产量, 也危害着生态环境的平衡发展[2]。据统计, 我国每年所使用农药的 80%~90% 最终都会进入土壤环境, 导致约 87 万 hm^2 ~107 万 hm^2 的农田土壤受到农药污染[3]。除草剂残留不仅出现在土壤中, 也出现在大气、水源以及食物中, 对生态环境和人类健康形成极大威胁。

据调查, 目前普遍使用的除草剂中有 20%~70% 会长期残留于土壤中[4], 对农田土壤造成影响。土壤微生物作为农田土壤的重要组成部分, 直接参与植物获得养分和土壤养分循环两个过程, 行使着分解土壤中动、植物残体和转化有机质等重要功能, 能够反映土壤的健康状况, 与作物生长密切相关[5] [6]。土壤微生物对土壤环境变化高度敏感, 当环境发生变化, 土壤微生物能够做出迅速的反应, 发生物种数量、功能的变化, 因此被认为是评价土壤质量的关键生物指标之一[7] [8]。目前, 已有相关研究表明, 化学除草剂不仅能够影响土壤微生物的群落结构和功能多样性, 也会影响土壤微生物的活性, 不同浓度的除草剂对土壤微生物的影响存在差异。国外学者通过对不同地区土壤进行长期研究也发现, 化学除草剂长期积累会对土壤微生物的群落结构、功能等造成一定影响。一方面, 部分土壤微生物可以降解除草剂, 利用除草剂作为能源物质完成自身的生长和繁殖; 另一方面, 除草剂能够影响土壤微生物的数量、活性、繁殖。因此, 为了能够正确使用化学除草剂、并使化学除草剂发挥最大价值, 探究除草剂与土壤微生物之间关系十分必要。

研究表明, 连续在同一土壤上栽培同种作物或近缘作物会引起作物生长发育异常, 即连作障碍[9]。轮作的耕作方式能够充分利用土地资源、降低生产成本、提高农民收入, 特别是豆科作物与禾本科作物[10]。寒地大豆-玉米轮作田常用的除草剂品种为氟磺胺草醚、异噁草松、烟嘧磺隆、莠去津, 氟磺胺草醚和异噁草松用于豆田防除一年生禾本科杂草和阔叶杂草, 烟嘧磺隆和莠去津用于玉米田防除一年或多年生禾本科杂草和部分阔叶杂草。但这四种除草剂在土壤中的残效时间较长, 因此易对后茬敏感作物产生药害, 若过量施用则容易造成减产甚至绝收。本综述以氟磺胺草醚、异噁草松、烟嘧磺隆、莠去津四种化学除草剂为主, 叙述了在不同的浓度、土壤环境、施用时间等条件下, 土壤细菌、真菌和放线菌的群落结构、多样性、活性、功能和可培养微生物数量等的变化, 通过探究除草剂与土壤微生物之间的关系, 以期为合理使用除草剂提供科学依据。

2. 氟磺胺草醚对土壤微生物的影响

氟磺胺草醚(Fomesafen)是 1979 年由英国仆内门化学工业有限公司(ICI Ltd.)开发合成的一种二苯醚类

除草剂,中文别名为虎威、北极星、除豆莠,化学名称为5-(2-氯-4-三氟甲基苯氧基)-N-甲磺酰-2-硝基苯甲酰[11]。氟磺胺草醚是一种选择性触杀型除草剂,主要用于豆科植物,防除一年生禾本科杂草和阔叶杂草[12]。

氟磺胺草醚是一种长残留除草剂[13],其在土壤中的半衰期因受环境因素的影响而在45~360 d不等[14]。研究表明,一定浓度的氟磺胺草醚会对土壤中微生物群落结构和功能等造成影响。2014年黄亚楠等对喷洒推荐用量氟磺胺草醚的大豆连作田土壤微生物进行研究,结果显示,低浓度的氟磺胺草醚对土壤中细菌和真菌数量有明显的刺激作用,高浓度的氟磺胺草醚对土壤中细菌和真菌数量有明显的抑制作用,此外,施加氟磺胺草醚后PLFA总量最高可以降低28%,这表明氟磺胺草醚显著改变了土壤微生物的群落结构、并降低了土壤微生态的稳定性[15]。同年6月,吴小虎对粉砂质壤土和黑土两种土样施加氟磺胺草醚以探究土壤微生物的变化,双因素方差分析结果表明,施加氟磺胺草醚能显著抑制微生物量碳和呼吸作用、而对代谢熵有显著的刺激作用,且高浓度下(374 mg/kg)作用更显著。此外,随着施药时间的增加,总PLFAs含量明显下降、GN/GP显著增加、细菌/真菌显著下降。这些实验结果表明氟磺胺草醚能够明显抑制土壤微生物总体活性,并显著改变土壤微生物的群落结构[16]。2018年,周世雄等采用模拟栽培试验,探究不同浓度的氟磺胺草醚对大豆根际土壤可培养微生物数量的影响,真菌和放线菌数量在高浓度(18.75 mg/kg)下增加、低浓度(3.75 mg/kg)下减少,中浓度(7.5 mg/kg)下真菌数量先减少后增加再减少、放线菌数量先增加后减少再增加,但没有显著变化。细菌数量在低浓度和中浓度下减少,高浓度下除第28天显著增加外其他时期变化不明显[17]。综上,氟磺胺草醚对土壤微生物的影响与浓度有关,且细菌、真菌和放线菌之间的变化并不一致。

3. 异噁草松对土壤微生物的影响

异噁草松(Clomazone)是1983年由美国FMC公司研制开发的一种噁唑酮类除草剂[18],中文别名为广灭灵、异恶草酮,化学名称为2-(2-氯苄基)-4,4-二甲基异噁唑-3-酮。苗前除草剂,用于大豆、花生、油菜等作物田,防除一年生禾本科杂草和阔叶杂草[19]。异噁草松在土壤中降解缓慢,半衰期达10~137 d,为长残留性除草剂,易对后茬作物造成影响,严重影响了大豆产区种植业结构的调整[20]。

以往有关异噁草松对土壤微生物影响的研究,多数在实验室条件下进行。2010年刘亚光探究异噁草松对土壤微生物影响,采用显微计数法测定细菌、真菌和放线菌有效活菌数量,结果显示施加异噁草松后放线菌的数量变化呈先增加再减少的规律、但变化较小,而细菌和真菌数量有所增加、且存在随异噁草松浓度升高而增加的规律,这表明一定浓度的异噁草松能够促进微生物的生长繁殖[21]。2018年Du等通过室内试验研究异噁草松对低粉砂质壤土和黑土两种土壤中土壤微生物的影响,高通量测序结果显示,异噁草松能明显影响土壤细菌群落,且两种土壤中高剂量(80 mg/kg)的异噁草松导致不同门类的细菌之间变化趋势并不相同[22],这表明异噁草松对细菌的影响存在种群差异。2020年张盈等在温室条件下探究连续两年施用推荐剂量的异噁草松后土壤微生物群落的响应,高通量测序分析结果显示,连续两次施用异噁草松后,细菌含量虽然在第15天被显著抑制,但群落多样性和均匀度显著增加。此外,通过分子生态网络分析也发现,与CK相比,实验组节点数、连接数、平均度以及平均路径长度更高、关键节点明显不同,这表明连续施加异噁草松导致微生物群落结构改变,土壤微生物间网络结构趋向复杂,且为维持群落的稳定而形成了新的关键微生物种群[20]。2021年Rong等在温室试验下,研究异噁草松的施用剂量和施用时间对土壤微生物的影响,对Illumina测序结果进行分析,发现中剂量(10倍推荐用量)以下对细菌多样性影响不显著,低剂量(推荐用量)和高剂量(100倍推荐用量)的异噁草松仅在第7天显著降低了真菌的多样性、随后又恢复,这表明异噁草松对土壤中细菌和真菌群落虽然有一定的影响,但影响有限,会随时间延长而恢复[23]。

4. 烟嘧磺隆对土壤微生物的影响

烟嘧磺隆(Nicosulfuron)是 20 世纪 80 年代末由日本石原产业株式会社与美国杜邦公司联合开发的一种磺酰脲类除草剂,主要用于玉米田苗后除草。烟嘧磺隆活性高、选择性强、杀草谱广,是目前中国北方玉米田用量最大的化学除草剂[24]。但由于具有挥发性低和长残留的特性,易对土壤及地下水造成污染,并且易对后茬敏感作物造成药害,大量使用后所造成的残留叠加效应对整个环境存在潜在的威胁。

部分土壤微生物能够利用除草剂作为碳源,因此当施加一定浓度的烟嘧磺隆后,也会对土壤微生物产生正向刺激。2013 年付艳艳等对林地、玉米田、生地分别施用高(100 $\mu\text{g/g}$)、中(1 $\mu\text{g/g}$)、低(0.1 $\mu\text{g/g}$)三种剂量的烟嘧磺隆,探究烟嘧磺隆对土壤微生物群落结构的影响,采用稀释平板法测定微生物数量,结果显示,林地土壤中的细菌数量在低剂量下先增长再恢复至对照水平、在推荐施用剂量下先减少再恢复至对照水平;玉米田土壤中的细菌数量在任何剂量下都可以恢复至对照水平,且在推荐剂量下恢复的最快;生地土壤中的细菌数量受影响最大,只有在低剂量下才能恢复[25]。这说明烟嘧磺隆对土壤微生物的影响不仅与浓度有关,也与土壤环境有关。2018 年 ŠANTRIC 的实验结果同样能说明烟嘧磺隆对土壤微生物的影响与土壤环境有关,他们选择壤土和砂土两种土壤类型在实验室条件下探究微生物活性的变化,实验结果显示烟嘧磺隆对壤土中的微生物生物量碳有刺激作用,而对沙土中的微生物生物量碳有负影响,而两种土壤中的脱氢酶和脲酶活性都有显著提高[26]。2019 年 Vasic 等对森林土壤施加烟嘧磺隆探究其对土壤微生物数量的影响,发现施用烟嘧磺隆后细菌数量显著减少、真菌和放线菌数量显著增加,此外研究人员还发现烟嘧磺隆处理的土壤样品中固氮菌的数量高于对照样品中的数量,这表明一定浓度的烟嘧磺隆对固氮菌属有促进作用,但整体来看,除草剂的大量持续施用依旧会造成森林土壤中微生物之间的平衡紊乱[27]。2020 年 Zhang 等在温室条件下探究烟嘧磺隆对小麦根际土壤微生物多样性影响,16S RNA 测序结果显示,施用烟嘧磺隆并未导致细菌数量有较大变化,但各细菌种群的丰度发生了不同的变化,具体表现为变形菌门和放线菌门丰度增加、酸杆菌门丰度下降、厚壁菌门丰度无明显变化[28],这表明烟嘧磺隆对土壤中不同细菌菌门丰度的影响不同。

5. 莠去津对土壤微生物的影响

莠去津(Atrazine)是 1952 年由 Geigy 公司研发的三嗪类除草剂,别称阿特拉津[29],是一种高选择性内吸传导型除草剂。因其具有杀草谱广、应用时期灵活、且对玉米安全的特点,因此常在玉米田间使用,莠去津持效期较长,容易对后茬敏感作物如大豆、小麦、水稻等产生药害[30] [31]。莠去津生产成本低廉,除草效果好,是目前世界上产量最大的除草剂,但具有生物毒性和潜在的致癌、致畸性,在欧盟国家已经禁止使用[29]。

莠去津进入土壤后,一部分会发生挥发、淋溶、降解等行为[32],导致土壤中除草剂的含量会随时间推移而改变,因而对土壤微生物的影响也会发生变化。2008 年姚斌等采用熏蒸-提取法测定土壤微生物生物量碳、生物量氮,发现莠去津进入土壤后的前 20 d,微生物生物量碳和生物量氮显著降低,但这种抑制作用会随着时间变化而减弱,20 d 后莠去津对微生物的影响减弱[33]。2020 年 Liu 等以长期施用莠去津的土壤为实验对象,研究莠去津对土壤微生物的影响,结果显示长期施用莠去津改变了土壤细菌群落结构,并会显著增加放线菌的丰富度[34]。同年 7 月 Fernandes 等发表了关于莠去津对巴西热带红壤中微生物群落影响的文章,研究人员采集第 1、2、3、4、8 和 12 周土样进行 qPCR 和 16S rRNA 测序,结果显示莠去津使土壤中莠去津降解基因的数量暂时增加,而土壤细菌群落结构未发生显著和长期的改变[35]。2021 年黄潇等对谷子种植区土壤喷洒不同浓度的莠去津,分析莠去津胁迫下土壤微生物群落结构变化,Illumina Hiseq 高通量测序结果显示,未施用莠去津土壤的细菌和真菌的 Shannon 指数、ACE 指数、

Chao1 指数均高于施加除草剂的三组,且浓度最高的一组中三项指数最低。这表明,莠去津降低了土壤微生物的丰富度和群落多样性,且浓度越高,对丰富度和多样性抑制作用越明显[36]。这与江雪飞等的研究结论一致[37],当莠去津的浓度过高时,对土壤微生物会产生较大影响。

6. 总结与展望

土壤微生物与土壤密切相关,是土壤的健康状况和肥力的指标,通过检测土壤中微生物群落多样性、微生物量等可以反映土壤的健康状况和肥力。通过总结以往研究中氟磺胺草醚、异噁草松、烟嘧磺隆、莠去津对土壤微生物的影响,可以发现这四类除草剂对土壤微生物的作用受除草剂类别、施加浓度、土壤环境、时间等多方面因素的影响,而存在或显著刺激、或显著抑制、或微弱影响的不同,但这种作用总体上表现为短暂抑制或刺激后减弱。

由于化学除草剂成本低、效果好,所以是实际生产中最主要的杂草防治措施,目前来看,完全禁用化学除草剂是无法实现的,只能通过科学研究来寻找化学除草剂的合理使用方式。因此,通过探究除草剂和土壤微生物的作用关系,来探寻除草剂对土壤微生物的影响规律,从而能够为合理使用除草剂提供科学依据,这对目前的实际作物生产有重要意义。

研究表明,长期连作不仅会严重影响作物产量,也会对土壤造成一定伤害。轮作能够提升土壤肥力、改善农田生态环境、促进农业可持续发展,因此是一种重要的农业措施[38][39]。然而,在实施耕地轮作制度的过程中,长残留除草剂的药害成为了最大问题[40],这些长残留除草剂长期残留于农田土壤中,在严重影响下茬敏感作物产量的同时,还会对生态环境、食品安全造成威胁,因此轮作田除草剂的药害问题亟待解决,探究轮作田除草剂的科学使用方法已然迫在眉睫。综上,探究轮作田中除草剂与土壤微生物之间的关系有其必要性。然而,在以往研究中,学者们多选择室内试验或在连作田中进行实验,对于轮作田的研究少之又少。由于除草剂对土壤微生物的影响与除草剂种类和土壤环境等都有影响,因此有必要对实施轮作制度的农田进行单独研究。轮作田中除草剂对土壤微生物的影响不容忽视,在日后的研究中,应该加强对轮作田的研究,以期能为轮作田合理使用除草剂提供更多科学依据。

基金项目

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

参考文献

- [1] 张伟,王进军,张志明,等. 烟嘧磺隆在土壤中的吸附及与土壤性质的相关性研究[J]. 农药学报, 2006, 8(3): 265-271.
- [2] 高世光. 大豆除草剂减量试验效果初探[J]. 农业开发与装备, 2018(6): 108+106.
- [3] 赵玲,滕应,骆永明. 中国农田土壤农药污染现状和防控对策[J]. 土壤, 2017, 49(3): 417-427.
- [4] 张辉,唐国强. 除草剂产生危害的原因及其防控措施[J]. 现代农业科技, 2011(17): 174-175.
- [5] Melina, L.-M., Gabriela, S.-J., et al. (2021) Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in *Stevia rebaudiana* Increases Trichome Development, Flavonoid and Phenolic Compound Accumulation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **31**, Article ID: 101889. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101889>
- [6] Ortega, U., et al. (2004) Effectiveness of Mycorrhizal Inoculation in the Nursery on Growth and Water Relations of *Pinus radiata* in Different Water Regimes. *Tree Physiology*, **24**, 65-73. <https://doi.org/10.1093/treephys/24.1.65>
- [7] 陆玉芳,施卫明. 根际化学信号物质与土壤养分转化[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 14-24.
- [8] 朱永官,彭静静,韦中,等. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学:生命科学, 2021, 51(1): 1-11.
- [9] 姚钦. 黑土区轮作方式下土壤微生物多样性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [10] 张阳,张春宇,张明聪,等. 黑龙江大豆-玉米轮作体系氮磷调控的产量效应与养分平衡[J]. 中国土壤与肥料,

- 2021(1): 44-52.
- [11] 张清明. 除草剂氟磺胺草醚对土壤酶、微生物与蚯蚓的生态毒理研究[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [12] 季磊, 马晓健, 曲悠扬, 等. 高效液相色谱法测定甘草、黄芪和葛根中除草剂氟磺胺草醚和氯嘧磺隆的残留量[J]. 农药科学与管理, 2020, 41(9): 37-42+64.
- [13] Cui, N., Wang, S., Khorram, M.S., *et al.* (2018) Microbial Degradation of Fomesafen and Detoxification of Fomesafen-Contaminated Soil by the Newly Isolated Strain *Bacillus* sp. FE-1 via a Proposed Biochemical Degradation Pathway. *Science of the Total Environment*, **616-617**, 1612-1619. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.151>
- [14] 杨峰山, 王颜波, 孙丛, 等. 高效降解细菌对氟磺胺草醚污染土壤修复效果探究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(15): 68-73.
- [15] 黄亚楠. 寒地黑土氟磺胺草醚残留动态及对土壤微生物群落影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2014.
- [16] 吴小虎. 氟磺胺草醚对土壤微生物多样性的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [17] 周世雄, 魏朝俊, 胡海燕, 等. 氟磺胺草醚对大豆根际土壤微生物和酶活性的影响及其在根际的降解[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 203-211.
- [18] 李晓南. 异噁草酮降解菌 W2 产酶条件及降解酶降解效果的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [19] 阚晓丽, 张茜, 曹磊, 等. 70%异丙甲草胺·异噁草松·2,4-滴异辛酯乳油中有效成分含量测定[J]. 生物化工, 2021, 7(1): 107-110.
- [20] 张盈, 吴小虎, 李晓刚, 等. 土壤微生物对异噁草酮连续施用的响应[J]. 生物技术通报, 2020, 36(12): 64-74.
- [21] 刘亚光, 李洁, 唐广顺. 异噁草酮对土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 植物保护, 2010, 36(3): 85-88.
- [22] Du, P., Wu, X., Xu, J., *et al.* (2018) Clomazone Influence Soil Microbial Community and Soil Nitrogen Cycling. *Science of the Total Environment*, **644**, 475-485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.214>
- [23] Rong, L.L., *et al.* (2021) Clomazone Improves the Interactions between Soil Microbes and Affects C and N Cycling Functions. *Science of the Total Environment*, **770**, Article ID: 144730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144730>
- [24] 张建华, 白文斌, 张一中, 等. 烟嘧磺隆残留对下茬作物高粱生长发育及生理代谢的影响[J]. 农药, 2021, 60(9): 663-667+673.
- [25] 付艳艳. 苄嘧磺隆和烟嘧磺隆对土壤中微生物活性的影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [26] Šantric, L., *et al.* (2018) The Effects of Nicosulfuron and Glyphosate on Microbial Activity of Different Soils. *Planta Daninha*, **36**, 1-8. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582018360100103>
- [27] Vasic V., Djuric, S., Jafari-Hajnal, T., *et al.* (2019) The Microbiological Response of Forest Soils after Application of Nicosulfuron, Imazamox and Cycloxydim. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **16**, 2305-2312. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1862-0>
- [28] Zhang, Z., Yang, D., Si, H., *et al.* (2020) Biotransformation of the Herbicide Nicosulfuron Residues in Soil and Seven Sulfonylurea Herbicides by *Bacillus subtilis* YB1: A Climate Chamber Study. *Environmental Pollution*, **263**, Article ID: 114492. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114492>
- [29] 邓世杰. 烟嘧磺隆对 *Arthrobacter* sp. DNS10 生长及阿特拉津降解能力的影响与机制[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [30] 李慧冬. 莠去津等多种农药残留风险评估及莠去津在水/沉积物体系中降解研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
- [31] 岳建超. 莠去津和特丁津在土壤中的淋溶特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [32] 董士嘉. 玉米田除草剂土壤归趋的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [33] 姚斌, 张超兰. 除草剂对土壤微生物生物量碳、氮及呼吸的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 580-583.
- [34] Liu, Y., Fan, X., Zhang, T., *et al.* (2020) Effects of the Long-Term Application of Atrazine on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure in Farmlands in China. *Environmental Pollution*, **262**, Article ID: 114264. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114264>
- [35] Tonelli, F.A.F., Ping, W., Christopher, S., *et al.* (2020) Impact of Atrazine Exposure on the Microbial Community Structure in a Brazilian Tropical Latosol Soil. *Microbes and Environments*, **35**, ME19143. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME19143>
- [36] 黄潇, 蔡颖慧, 赵小珍. 莠去津对谷子农田土壤微生物群落结构的影响[J]. 南京: 江苏农业科学, 2021, 49(16):

210-214.

- [37] 江雪飞. 除草剂阿特拉津和氯磺隆对土壤微生物多样性和活性的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [38] 林海. 玉米-大豆轮作田间杂草群落结构特征及大豆田除草剂配方的筛选[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- [39] 王琦琪. 东北黑土区玉米大豆轮作模式及比价研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [40] 黄春艳, 郭玉莲, 王宇. 黑龙江省耕地轮作休耕中的除草剂相关问题[J]. 黑龙江农业科学, 2017(6): 124-126.