

三唑类杀菌剂的生态毒理学研究进展

刘凯, 梁啸, 王新

辽宁大学药学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2023年12月12日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年1月30日

摘要

三唑类菌剂是指含有三氮唑环结构的一类杀菌剂, 绝大多数为手性化合物, 具有高效、低毒、低残留等优点。其在农林领域得到广泛应用, 在植物病害防治中发挥着重要作用。三唑类杀菌剂的大量使用引起了科研人员对其在环境中行为和生态毒性的关注。三唑类杀菌剂因其半衰期长且具有一定的水溶性, 易在土壤和水体环境中残留, 对环境生物产生不同程度的毒性和损伤。因此, 本文从三唑类杀菌剂的种类与应用、在土壤和水体环境中的归趋与降解及其对环境非靶标生物(包括土壤微生物、鱼类、水生无脊椎动物和浮萍植物)的毒性效应等方面进行了综述。同时指出, 对手性三唑类杀菌剂在对映体水平的毒性及机制研究较少, 应更多地关注其在环境行为与生物毒性的对映体选择性差异。

关键词

三唑类杀菌剂, 环境降解, 生物富集, 非靶标生物毒性, 生态毒理学

Research Progress on Ecotoxicology of Triazole Fungicides

Kai Liu, Xiao Liang, Xin Wang

School of Pharmaceutical Science, Liaoning University, Shenyang Liaoning

Received: Dec. 12th, 2023; accepted: Jan. 17th, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

Triazole fungicides refer to a class of fungicides containing a triazole ring structure, the majority of which are chiral compounds, with the advantages of high efficiency, low toxicity, and low residue. They are widely used in the agricultural and forestry fields, playing an important role in the prevention and control of plant diseases. The extensive use of triazole fungicides has raised concerns among researchers about their behavior and ecological toxicity in the environment. Due to their long half-life and certain water solubility, triazole fungicides are prone to residue in soil and

water environments, causing varying degrees of toxicity and damage to environmental organisms. Therefore, this article provides a comprehensive review of the types and applications of triazole fungicides, their fate and degradation in soil and water environments, and their toxic effects on non-target organisms in the environment, including soil microorganisms, fish, aquatic invertebrates, and floating plants. At the same time, it is pointed out that there is limited research on the toxicity and mechanisms of chiral triazole fungicides at the enantiomeric level, and more attention should be paid to the enantiomeric selectivity of their environmental behavior and biological toxicity.

Keywords

Triazole Fungicides, Environmental Degradation, Bioaccumulation, Non-Target Biological Toxicity, Ecotoxicology

Copyright © 2024 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. 三唑类杀菌剂的种类和用途

1.1. 三唑类杀菌剂的分类和结构特点

三唑类杀菌剂是一类广泛应用于农林领域的杀菌剂，通过影响真菌甾醇 14 α -去甲基化酶(CYP51 酶)的活性和功能发挥杀菌活性，具有高效、低毒、低残留等优点[1] [2] [3] [4]。其结构特点是都含有三氮唑环，这也是其发挥杀菌活性的结构基础。氮唑环中氮原子上的孤对电子可以与 CYP450 酶系中血红素辅基 Fe 通过配位键结合[5] [6]，使血红蛋白失去与氧原子结合的能力，进而阻断了底物羟基化反应，使麦角甾醇合成缺乏，使细胞膜通透性和流动性改变，影响细胞膜的功能与活性，从而抑制真菌的生长与繁殖。除三唑环外，三唑类杀菌剂通常还伴有其他官能团；根据官能团的不同，可分为三唑联芳环、三唑联醇酮、三唑联烯原子、三唑磺酰胺等类别[4]。这些官能团的不同组合和位置会影响化合物的杀菌活性和选择性，用于指导新型三唑类杀菌剂的设计与合成[7] [8] [9]。需要注意的是，绝大多数该类杀菌剂为手性化合物，已有 14 种手性三唑类杀菌剂在售卖并使用[10] [11]。对映体间尽管有相似的理化性质，但它们在环境和生物体中会有不同的活力[12]、降解行为[10]、毒性[11] (如内分泌干扰毒性、生殖毒性和神经毒性)等。

1.2. 三唑类杀菌剂在农业、林业等领域的应用

农作物和林木的健康涉及食物供应、生态平衡以及气候变化[13]。植物病害主要是由真菌侵染引起的，会导致作物叶片、茎、果实等部位出现斑点、枯萎等症状，引起作物的腐败和腐烂，导致作物无法正常生长和发育，严重影响作物的生长和产量[14] [15] [16]。三唑类杀菌剂被用于防治各类农作物和林木上常见的真菌性病害，如白粉病、锈病、褐斑病、松斑病、树木白腐病等；保证植物的正常生长和发育，从而提高作物与林木的产量和质量，保障全球粮食安全和生态系统平衡[13] [17] [18]。并且，三唑类杀菌剂与其他类别的杀菌剂不同，其引入为杀菌剂耐药性的管理提供了新的途径，可以更好地应对传统农药的耐药性的问题，为农业可持续发展提供了支持[19] [20]。此外，通过在种子表面涂覆或处理三唑类杀菌剂，可以有效地防止病原真菌的传播，提高种子的萌发率和生长势[21] [22]。三唑类杀菌剂在农林领域的应用为农业生产和林业保健提供了有力的支持，为促进粮食安全和生态平衡做出了积极贡献。

2. 三唑类杀菌剂在环境中的归趋和降解

2.1. 土壤中三唑类杀菌剂的降解途径和影响因素

土壤中三唑类杀菌剂的降解途径涉及多个环境因素，其降解主要通过微生物、化学和物理过程完成。

2.1.1. 微生物降解

土壤微生物是农药降解的主要力量，通过合成分泌降解酶参与到农药的降解过程中[23] [24]。微生物降解三唑类杀菌剂主要是通过氧化、还原和烷基化等酶促反应，将其降解成较无毒或低毒的代谢产物，最终降解成为二氧化碳和水[25]。这些代谢产物可能是更容易被土壤中微生物利用的物质。通过微生物富集驯化技术，刘苗[26]在长期施用苯醚甲环唑的土壤中筛选优化出了能够高效降解苯醚甲环唑的菌株，分别为叶杆菌属(*Phyllobacterium sp.*T-1)、气单胞菌属(*Aeromonas sp.*T-2)，48 h 后对目标农药的降解率可达75%以上。苯醚甲环唑的微生物降解过程涉及水解、羟基化和醚键断裂等反应。在三唑酮长期污染的土壤中，张曦倩[27]分离得到了霍氏肠杆菌(*Enterobacter hormaechei*)的 TY18 菌株。通过对照实验发现，在以三唑酮为唯一氮源培养下，TY18 菌株的 *rutB* 基因显著高表达，对该菌株降解三唑酮具有正调节作用。Huang, Junwei 等[28]研究发现鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas sp.* AJ-1)对手性杀菌剂丙硫菌唑的降解具有对映体选择性，S-丙硫菌唑最易被降解，降解速率是 R-丙硫菌唑的 2.54 倍。不仅在于降解微生物的筛选与优化，科研人员越来越关注杀菌剂在微生物体内的代谢路径、降解机理和对映体选择性的研究。

2.1.2. 化学降解与物理过程

一些三唑类杀菌剂可能在受到阳光照射的情况下发生光解反应，分解成较为简单的化合物[29]。土壤中的氧化还原环境也可以影响三唑类杀菌剂的降解，其中还原过程有助于分解这些化合物[30]。此外，唑类杀菌剂也可与土壤颗粒发生吸附作用，这种吸附可能会减缓其在土壤中的迁移和降解过程。

2.1.3. 影响因素

三唑类杀菌剂在土壤中的降解的主要影响因素有土壤类型、温度、湿度、氧气含量、pH 等。通常来说，有机质含量高的土壤有利于微生物生命活动[31] [32]；较高的温度有助于加速农药的降解过程[33] [34]；湿润的土壤有利于微生物的繁殖和降解活动；土壤的酸碱性对农药的降解有一定影响，适宜的 pH 范围使微生物的生命活动表现得更加活跃[35]。

2.2. 水体中三唑类杀菌剂的分布和归趋

水体中三唑类杀菌剂的分布和归趋受到多种因素的影响，包括化学性质、环境条件和人为活动。

2.2.1. 分布与富集

三唑类杀菌剂具有一定的水溶性，通过灌溉、农田径流、雨水冲刷等方式进入河流、湖泊等地表水体，也可通过渗透或径流进入地下水[22]。水生生物可能通过鳃、体表等结构吸附三唑类杀菌剂，导致在水生生物体内富集[36] [37]。部分三唑类杀菌剂可能吸附在水体底泥中，从而长时间存在。

2.2.2. 降解与去除

水体中的微生物、藻类可以参与三唑类杀菌剂的降解过程，受水体温度、pH 值等环境因素调节，能影响三唑类杀菌剂的分解和降解速度[38]。此外，水体中光降解、氧化还原和其他化学反应也可能促使三唑类杀菌剂的分解[39]。谢易文[38]在对丙硫菌唑及其代谢物在水体中的降解行为研究中，发现蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)能够促进丙硫菌唑的降解，并且会使 S-丙硫菌唑优先降解，具有对映体选择性差异，此外，通过光暗对照实验发现，光照条件对丙硫菌唑在水体中的降解具有显著促进作用，约为

黑暗条件的 1.5 倍。总体而言, 水体中三唑类杀菌剂的分布和归趋是一个复杂的过程, 受到多种因素的相互影响。了解这些因素对水体中三唑类杀菌剂的行为有助于科学评估其对水环境的潜在影响, 并采取相应的管理措施以减少可能的风险。

3. 三唑类杀菌剂对非靶生物的毒性效应

3.1. 对土壤微生物的影响

土壤功能与土壤微生物之间存在密切的关系, 土壤微生物是维持土壤生态系统功能的关键组成部分[40]。土壤微生物通过参与养分循环、有机质分解、抗生素产生等过程, 为植物的生长提供所需的营养物质并维持土壤的生态平衡[41] [42]。此外, 它们对土壤结构形成、重金属毒性抵抗等方面产生直接影响, 促进土壤功能的发挥。农药的过度使用导致微生物群落结构变化和生态功能损失, 对土壤健康和生态平衡带来潜在威胁。杀菌剂通过直接毒性和选择性毒性, 抑制土壤中的原有微生物生长和活性, 诱导产生新的种群, 导致土壤微生物群落结构和多样性的改变[24] [43] [44]。薛鹏飞[45]等通过非靶向代谢组学, 研究了土壤微生物对手性杀菌剂氟环唑的对映体选择性响应。结果表明, 氟环唑的暴露改变了土壤中细菌和真菌的组成, 导致土壤代谢组发生变化; 其中, (+)-氟环唑对土壤微生物及其代谢功能的影响最为显著。Bizhang Dong [46]对戊唑醇的土壤微生物毒性进行了整理论述。结果发现, 戊唑醇能够引起细菌群落多样性和结构的变化, 抑制脲酶和过氧化氢酶活性, 并增强磷酸酶和脱氢酶的活性。此外, 戊唑醇对土壤微生物的影响存在对映体选择性, 具体表现为 R-戊唑醇比 S-戊唑醇更易促进土壤中放线杆菌、泉古菌和绿弯菌的生长。

3.2. 对水生生物的毒性效应

三唑类杀菌剂具有显著的水生毒性, 其毒性强度取决于剂量、暴露时间、水体环境以及生物种类和生命阶段。高浓度的三唑类杀菌剂暴露可能导致鱼类出现行为异常、呼吸困难以及生长受阻, 甚至引发死亡。水生昆虫的幼虫期和蛹期可能受到抑制, 而浮游植物和藻类的生长也可能受到影响, 影响整个水体的生态平衡。

3.2.1. 鱼类

鱼类在水生生物多样性中扮演重要角色, 它们可以作为水体健康和生态系统稳定性的指示物种。三唑类杀菌剂在水体中的分布严重影响着鱼类健康, 可导致鱼类氧化应激、生殖毒性、发育毒性、神经毒性和免疫毒性[47]。以腈苯唑为例, 其对斑马鱼有发育毒性, 不仅造成线粒体损伤、抑制线粒体呼吸过程[48]; 还能导致心脏发育和功能缺陷, 引起心功能紊乱[49]。同时, 腈苯唑影响斑马鱼的生殖过程, 通过靶向性腺抑制配子发育[50]。

3.2.2. 水生无脊椎动物

水生无脊椎动物在水生生态系统中扮演着重要的角色, 它们是食物链的关键成员, 参与水体有机质的分解, 对水体生态平衡和生态系统的稳定性具有重要影响。三唑类杀菌剂对水生甲壳类动物和昆虫可能产生毒性作用。Michele Gottardi 等[51]研究了三唑类杀菌剂对甲壳类动物(大水蚤, *Daphnia magna*)和昆虫幼虫(岸溪摇蚊, *Chironomus riparius*)的抑制作用。结果表明, 三唑类杀菌剂(n = 9~11)增强了 α -氯氰菊酯对大水蚤的毒性, 并且不同程度抑制了大水蚤和岸溪摇蚊的细胞色素 P450 活性。

3.2.3. 浮游植物

浮萍植物与水生态系统之间存在密切关系。作为水生植物, 浮萍通过光合作用释放氧气、吸收养分, 有效改善水质, 水中生物提供食物来源, 维护水体的生态平衡。三唑类杀菌剂在水中的分布影响浮萍植

物的生命活动。Rui Liu 等[52]研究了灭菌唑对小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)毒性,发现其毒性存在对映体选择性。具体表现为 R-(-)-灭菌唑能够破坏细胞完整性和叶绿体结构,使藻类细胞和叶绿体受到严重损伤。R-(-)-灭菌唑选择性地影响藻类细胞的光合系统、抗氧化系统和脂质合成,从而引起对小球藻的对映选择性毒性作用。此外, Chunguang Liu 等[53]研究发现,烯效唑能够诱导浮萍草(*Lemna minor*)催化生产乙酰丙酸和乙酰丙酸乙酯,利用浮游植物生产增值化学品。

4. 三唑类杀菌剂的生态毒理学研究展望

未来的研究可以更深入地探究三唑类杀菌剂对水生和陆生生物多样性的影响,包括不同层级的生态系统中的物种和群落反应。这有助于全面了解这些化合物在生态链条中的影响,特别是对于一些关键物种的生存和繁殖的潜在影响。同时,需要深入研究三唑类杀菌剂的毒性机制,包括对生物分子和生态过程的具体影响。这有助于更好地理解它们可能对生态系统产生的潜在危害,从而为制定更有效的监管政策提供科学依据。此外,需要研发和应用污染治理技术,针对水体和土壤中三唑类杀菌剂的累积问题提供解决方案[26][27]。这可能包括吸附剂、生物修复、和其他物理化学手段,以减轻其对生态系统的不利影响[54]。

需要注意的是,绝大多数三唑类杀菌剂为手性化合物,有着一对或几对对映异构体,它们在生物体内往往表现出不同的生物活性、毒性效应[11]。在对映体水平研究三唑类杀菌剂不仅有助于深刻理解不同对映体之间的毒性差异,为更精准的毒理学评估提供依据,也能揭示在环境中它们的行为差异,有助于更准确地预测其在土壤和水体中的分布和归趋。此外,对映体水平的研究还能为农业可持续性提供指导,优化农药使用,确保农业生产的高效性同时最小化对生态系统的潜在危害。

基金项目

辽宁省科技厅面上项目: 2022-MS-172;

沈阳市中青年科技人才支持计划项目: RC210464。

参考文献

- [1] Kazeminejad, Z., Marzi, M., Shiroudi, A., et al. (2022) Novel 1,2,4-Triazoles as Antifungal Agents. *BioMed Research International*, **2022**, Article ID: 4584846. <https://doi.org/10.1155/2022/4584846>
- [2] 王悦. 三唑类杀菌剂的健康效应及毒理机制研究[D]: [博士学位论文]. 太原: 山西大学, 2023.
- [3] Martínez-Matías, N. and Rodríguez-Medina, J.R. (2018) Fundamental Concepts of Azole Compounds and Triazole Antifungals: A Beginner's Review. *Puerto Rico Health Sciences Journal*, **37**, 135-142.
- [4] 刘晓玲, 刘然, 邢立国, 等. 三唑类杀菌剂主要品种登记管理现状及健康安全评价[J]. *现代农药*, 2023, 22(4): 44-50.
- [5] Guo, D., He, R., Su, W., et al. (2021) Stereochemistry of Chiral Pesticide Uniconazole and Enantioselective Metabolism in Rat Liver Microsomes. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **179**, Article ID: 104964. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2021.104964>
- [6] Monk, B.C., Sagatova, A.A., Hosseini, P., et al. (2020) Fungal Lanosterol 14 α -Demethylase: A Target for Next-Generation Antifungal Design. *Biochimica et Biophysica Acta—Proteins and Proteomics*, **1868**, Article ID: 140206. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2019.02.008>
- [7] Liu, C., Fei, Q., Pan, N., et al. (2022) Design, Synthesis, and Antifungal Activity of Novel 1,2,4-Triazolo[4,3-c]trifluoromethylpyrimidine Derivatives Bearing the Thioether Moiety. *Frontiers in Chemistry*, **10**, Article ID: 939644. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.939644>
- [8] Guzel, E., Acar Cevik, U., Evren, A.E., et al. (2023) Synthesis of Benzimidazole-1,2,4-triazole Derivatives as Potential Antifungal Agents Targeting 14 α -Demethylase. *ACS Omega*, **8**, 4369-4384. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07755>
- [9] Xu, R., Chen, K., Han, X., et al. (2023) Design and Synthesis of Antifungal Candidates Containing Triazole Scaffold from

- Natural Rosin against Valsa Mali for Crop Protection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **71**, 9718-9727. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c02002>
- [10] Bielska, L., Hale, S.E. and Skulcova, L. (2021) A Review on the Stereospecific Fate and Effects of Chiral Conazole Fungicides. *Science of the Total Environment*, **750**, Article ID: 141600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141600>
- [11] Ji, C., Song, Z., Tian, Z., et al. (2023) Enantioselectivity in the Toxicological Effects of Chiral Pesticides: A Review. *Science of the Total Environment*, **857**, Article ID: 159656. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159656>
- [12] 郭浩铭. 手性农药选择性生物活性与毒性效应研究进展[J]. 农药学报, 2022, 24(5): 1108-1124.
- [13] Laine, A.L. (2023) Plant Disease Risk Is Modified by Multiple Global Change Drivers. *Current Biology*, **33**, R574-R583. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.075>
- [14] Mohammad-Razdari, A., Rousseau, D., Bakhshipour, A., et al. (2022) Recent Advances in E-Monitoring of Plant Diseases. *Biosensors and Bioelectronics*, **201**, Article ID: 113953. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113953>
- [15] Bollmann-Giolai, A., Malone, J.G. and Arora, S. (2022) Diversity, Detection and Exploitation: Linking Soil Fungi and Plant Disease. *Current Opinion in Microbiology*, **70**, Article ID: 102199. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102199>
- [16] Li, L., Zhu, X.M., Zhang, Y.R., et al. (2022) Research on the Molecular Interaction Mechanism between Plants and Pathogenic Fungi. *International Journal of Molecular Sciences*, **23**, Article No. 4658. <https://doi.org/10.3390/ijms23094658>
- [17] Steinberg, G. and Gurr, S.J. (2020) Fungi, Fungicide Discovery and Global Food Security. *Fungal Genetics and Biology*, **144**, Article ID: 103476. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2020.103476>
- [18] 黄世文, 刘连盟, 赵可菡, 等. 三唑类杀菌剂对水稻药害机理及解决方案[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 107-113.
- [19] Yin, Y., Miao, J., Shao, W., et al. (2023) Fungicide Resistance: Progress in Understanding Mechanism, Monitoring, and Management. *Phytopathology*, **113**, 707-718. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-10-22-0370-KD>
- [20] 潘夏艳, 朱凤, 周晨, 等. 2020-2021 年江苏省稻曲病菌对三唑类杀菌剂的抗药性监测[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(5): 134-138.
- [21] 史建荣王, 方中达. 三唑酮、三唑醇种子处理对小麦根围丝核菌群体数量的影响[J]. 江苏农业学报, 1991(2): 22-26.
- [22] Albers, C.N., Bollmann, U.E., Badawi, N., et al. (2022) Leaching of 1,2,4-Triazole from Commercial Barley Seeds Coated with Tebuconazole and Prothioconazole. *Chemosphere*, **286**, Article ID: 131819. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131819>
- [23] 陈冬梅, 关俊杰, 张桂柯, 等. 农药的微生物降解研究现状[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2020, 48(5): 39-46.
- [24] Bacmaga, M., Wyszowska, J., Borowik, A., et al. (2022) Effects of Tebuconazole Application on Soil Microbiota and Enzymes. *Molecules*, **27**, Article No. 7501. <https://doi.org/10.3390/molecules27217501>
- [25] Ahmad, S., Ahmad, H.W. and Bhatt, P. (2022) Microbial Adaptation and Impact into the Pesticide's Degradation. *Archives of Microbiology*, **204**, Article No. 288. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02899-6>
- [26] 刘苗. 苯醚甲环唑高效降解菌株的筛选及降解机制研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2022.
- [27] 张曦倩. 三唑酮降解菌株 *Enterobacter hormaechei* TY18 的转录组测序分析及降解基因 *rutB* 的克隆[D]: [硕士学位论文]. 晋中: 山西农业大学, 2022.
- [28] Huang, J., Li, M., Jin, F., et al. (2022) Isolation of Sphingomonas sp. AJ-1 and Its Enantioselective S-Methylation of the Triazole Fungicide Prothioconazole. *Science of the Total Environment*, **851**, Article ID: 158220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158220>
- [29] Carena, L., Scozzaro, A., Romagnoli, M., et al. (2022) Phototransformation of the Fungicide Tebuconazole, and Its Predicted Fate in Sunlit Surface Freshwaters. *Chemosphere*, **303**, Article ID: 134895. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134895>
- [30] Man, Y., Stenrod, M., Wu, C., et al. (2021) Degradation of Difenconazole in Water and Soil: Kinetics, Degradation Pathways, Transformation Products Identification and Ecotoxicity Assessment. *Journal of Hazardous Materials*, **418**, Article ID: 126303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126303>
- [31] Wu, H., Cui, H., Fu, C., et al. (2024) Unveiling the Crucial Role of Soil Microorganisms in Carbon Cycling: A Review. *Science of the Total Environment*, **909**, Article ID: 168627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627>
- [32] Wang, R., Li, D., Deng, F., et al. (2024) Production of Artificial Humic Acid from Rice Straw for Fertilizer Production and Soil Improvement. *Science of the Total Environment*, **906**, Article ID: 167548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167548>

- [33] Zhao, J., Xie, X., Jiang, Y., *et al.* (2024) Effects of Simulated Warming on soil Microbial Community Diversity and Composition Across Diverse Ecosystems. *Science of the Total Environment*, **911**, Article ID: 168793. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168793>
- [34] Fu, F., Li, Y., Zhang, B., *et al.* (2024) Differences in Soil Microbial Community Structure and Assembly Processes under Warming and Cooling Conditions in an Alpine Forest Ecosystem. *Science of the Total Environment*, **907**, Article ID: 167809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167809>
- [35] Shu, X., Liu, W., Huang, H., *et al.* (2023) Meta-Analysis of Organic Fertilization Effects on Soil Bacterial Diversity and Community Composition in Agroecosystems. *Plants*, **12**, Article No. 3801. <https://doi.org/10.3390/plants12223801>
- [36] 张书莹, 傅志强, 陈景文. 苯并三唑类紫外线稳定剂在斑马鱼体内的富集、生物转化和生理毒代动力学模型研究[C]//第四次全国计算毒理学学术会议暨国家自然科学基金委员会化学科学部学科战略研讨会. 西安: 人工智能与人类健康论文摘要集, 2021: 2.
- [37] Barbi, A., Goessens, T., Strubbe, D., *et al.* (2023) Widespread Triazole Pesticide Use Affects Infection Dynamics of a Global Amphibian Pathogen. *Ecology Letters*, **26**, 313-322. <https://doi.org/10.1111/ele.14154>
- [38] 谢易文. 手性三唑类杀菌剂丙硫菌唑及其代谢物在水中的降解[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- [39] Zhang, Z., Xie, Y., Ye, Y., *et al.* (2022) Toxication Metabolism and Treatment Strategy of the Chiral Triazole Fungicide Prothioconazole in Water. *Journal of Hazardous Materials*, **432**, Article ID: 128650. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128650>
- [40] 赵慧英, 王海燕. 土壤多功能性及其驱动因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023: 1-12.
- [41] 赵志敏. 施用微生物菌肥对小麦和油菜种植的影响[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2023.
- [42] 朱文娟, 任月梅, 杨忠, 等. 谷子土壤微生物群落结构及功能预测分析[J]. 作物杂志, 2023(5): 170-178.
- [43] Roman, D.L., Voiculescu, D.I., Matica, M.A., *et al.* (2022) Assessment of the Effects of Triticonazole on Soil and Human Health. *Molecules*, **27**, Article No. 6554. <https://doi.org/10.3390/molecules27196554>
- [44] Vasilchenko, A.V., Poshvina, D.V., Semenov, M.V., *et al.* (2023) Triazoles and Strobilurin Mixture Affects Soil Microbial Community and Incidences of Wheat Diseases. *Plants (Basel)*, **12**, Article No. 660. <https://doi.org/10.3390/plants12030660>
- [45] 薛鹏飞, 刘潇威, 赵刘清, 等. 手性三唑类杀菌剂氟环唑对土壤微生物的立体选择性影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1284-1295+1391.
- [46] Dong, B. (2024) A Comprehensive Review on Toxicological Mechanisms and Transformation Products of Tebuconazole: Insights on Pesticide Management. *Science of the Total Environment*, **908**, Article ID: 168264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168264>
- [47] Bhagat, J., Singh, N., Nishimura, N., *et al.* (2021) A Comprehensive Review on Environmental Toxicity of Azole Compounds to Fish. *Chemosphere*, **262**, Article ID: 128335. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128335>
- [48] Qin, Y., Wang, X., Yan, X., *et al.* (2022) Developmental Toxicity of Fenbuconazole in Zebrafish: Effects on Mitochondrial Respiration and Locomotor Behavior. *Toxicology*, **470**, Article ID: 153137. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153137>
- [49] Wu, Y., Yang, Q., Chen, M., *et al.* (2018) Fenbuconazole Exposure Impacts the Development of Zebrafish Embryos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **158**, 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.04.048>
- [50] Zhang, Y., Guo, J., Chen, Y., *et al.* (2021) Embryonic Exposure to Fenbuconazole Inhibits Gametogenesis in Adult Zebrafish by Targeting Gonads Not Brain. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **228**, Article ID: 112967. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112967>
- [51] Gottardi, M. and Cedergreen, N. (2019) The Synergistic Potential of Azole Fungicides Does Not Directly Correlate to the Inhibition of Cytochrome P450 Activity in Aquatic Invertebrates. *Aquatic Toxicology*, **207**, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2018.12.010>
- [52] Liu, R., Deng, Y., Zhang, W., *et al.* (2019) Enantioselective Mechanism of Toxic Effects of Triticonazole against *Chlorella pyrenoidosa*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **185**, Article ID: 109691. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109691>
- [53] Liu, C., Feng, Q., Yang, J., *et al.* (2018) Catalytic Production of Levulinic Acid and Ethyl Levulinate from Uniconazole-Induced Duckweed (*Lemna minor*). *Bioresource Technology*, **255**, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.087>
- [54] Shahid, M., Khan, M.S. and Singh, U.B. (2023) Pesticide-Tolerant Microbial Consortia: Potential Candidates for Remediation/Clean-Up of Pesticide-Contaminated Agricultural Soil. *Environmental Research*, **236**, Article ID: 116724. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116724>