

丛枝菌根真菌对百菌清引起的旱稻 (*Oryza sativa* L.) 毒性的影响

张旭红^{1,2}, 林爱军³, 崔玉静¹

(1. 北京城市学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心土壤环境研究室, 北京 100085; 3. 北京化工大学环境科学与工程系, 北京 100029)

摘要:采用盆栽实验的方法,研究了百菌清对旱稻 (*Oryza sativa* L.) 生长和氧化胁迫的影响,以及接种丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 对百菌清污染下旱稻生长的影响和对旱稻氧化胁迫的影响. 结果表明,百菌清处理对旱稻的生长有明显的抑制作用,施加百菌清后可以使旱稻地上部的生物量由 $2.5 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 下降到 $1.0 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 以下; 地下部分的生物量在施加百菌清处理后由 $0.9 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 下降到 $0.3 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 以下. 百菌清处理下接种 AMF 能显著提高旱稻生物量,接种菌根真菌能使 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下旱稻的生物量增加 1 倍以上. 百菌清处理能显著降低旱稻对磷 (P) 营养元素的吸收,在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下旱稻地上部分 P 的吸收量由 $3200 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 下降到 $860 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,接种 AMF 能使旱稻地上部 P 的吸收量增加到 $1900 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$. 百菌清处理还可以引起旱稻体内的氧化胁迫,改变旱稻体内抗氧化酶系统的活性,而接种菌根真菌能降低百菌清对旱稻产生的氧化胁迫,从而减轻百菌清污染对旱稻的毒性作用. 总之,百菌清土壤污染能够引起旱稻体内的氧化胁迫、降低旱稻 P 的吸收量而影响植物生长,接种菌根真菌能显著改善旱稻的生长和降低百菌清对旱稻的影响.

关键词: 旱稻; 菌根真菌; 百菌清

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-1107-06

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Toxicity of Chlorothalonil on Upland Rice (*Oryza sativa* L.)

ZHANG Xu-hong^{1,2}, LIN Ai-jun³, CUI Yu-jing¹

(1. Beijing City University, Beijing 100083, China; 2. Department of Soil Environmental Sciences, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Upland rice was selected as a host plant in a greenhouse-pot-culture experiment to investigate the effects of chlorothalonil and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and oxidative damage under chlorothalonil stress. The plants were grown with three concentrations of chlorothalonil (0, 50 and $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ soil). The results suggested that chlorothalonil inhibited the growth of upland rice and reduced dry weight of upland rice shoot from $2.5 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ to $1.0 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$, and the root dry weight was reduced from $0.9 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ to $0.3 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$. However, with AMF colonization the dry weight of upland rice was increased to $2.1 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$. With $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ chlorothalonil addition, the P uptake was reduced from $3200 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ to $860 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$, but the AMF colonization could increase the P uptake to $1900 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$. Chlorothalonil induced oxidative stress indicating by the changes in activities of antioxidative enzyme and AMF colonization could alleviate the oxidative stress. These results showed that chlorothalonil induced oxidative stress and inhibited P uptake in upland rice and AMF could decrease the side effects of chlorothalonil by increasing P uptake and decreasing oxidative damages.

Key words: upland rice; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); chlorothalonil

菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是土壤微生物的重要组成部分,对维护农田生态系统的生物多样性和系统稳定性具有重要作用^[1~3]. 但是由于农用化学物质的大量频繁使用,特别是杀菌剂的大量使用,严重影响了包含菌根真菌在内的土壤微生物生态系统,不仅对植物的正常生长带来不利影响,也对土壤微生物生态系统的结构和功能都造成了不利影响^[4~6]. 因此,评价化学农药进入土壤后对植物的影响和对菌根真菌的影响都是土壤生态安全评价的重要指标之一,但是目前关于农药施用

对土壤菌根生态系统影响的研究还比较少^[7].

百菌清是一种非内吸性广谱杀菌剂,广泛应用于蔬菜、果树、经济作物和豆类、水稻、小麦等热带作物以及森林等植物的真菌病害防治,百菌清在土壤中的转化、降解和对土壤酶的影响等已经有了较为

收稿日期: 2006-07-30; 修订日期: 2006-11-10

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB410808); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-19); 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 张旭红 (1975 ~), 女, 博士, 主要研究方向为环境污染的生物风险评价, E-mail: zhangxuhong_w@126.com

广泛的研究^[8],但是还鲜见有对土壤菌根真菌的影响研究以及引起植物氧化胁迫的报道,本研究选择典型杀菌剂百菌清的施用对植物的氧化胁迫和对土壤菌根真菌的影响进行研究,探讨了百菌清的使用对“旱稻-菌根真菌”共生体系的影响,以了解百菌清对植物和菌根真菌可能的毒性,以期为百菌清的安全使用和生态影响评价提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自浙江湖州多年水稻田,未有百菌清施用的历史,采集 0~20 cm 表层土样带回实验室风干,过 2 mm 筛,并于 121℃ 下湿热灭菌 2 h 以消除土著菌根真菌的影响。灭菌前土壤 pH 为 6.3,土壤中速效磷含量为 11.75 mg·kg⁻¹。

1.2 供试植物和菌根真菌

供试植物为旱稻 277(*Oryza sativa* cv.277),由中国农业大学惠赠,旱稻种子经 10% H₂O₂ 溶液表面消毒 10 min,去离子水冲洗浸泡 10 h 后,置于 25℃ 生化培养箱内于黑暗中催芽。供试菌根真菌为 *Glomus mosseae* 93,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所惠赠。

1.3 实验设计

实验设置接种 AMF *Glomus mosseae* 的处理(GM)和不接种 AMF 的处理(NM)。在接种处理中将 460 g 土壤和 40 g *Glomus mosseae* 菌剂充分混合,在不接种处理中将 460 g 土壤和 40 g 灭菌的 *Glomus mosseae* 菌剂充分混合。在 GM 处理下,又设置 3 个百菌清处理,即将百菌清的丙酮溶解溶液加入土壤中使得土壤中百菌清浓度达到 0、50、100 mg·kg⁻¹,分别以 GM-0、GM-50 和 GM-100 表示;同样 NM 处理下,也设置 3 个百菌清浓度为 0、50、100 mg·kg⁻¹,并分别以 NM-0、NM-50 和 NM-100 表示,则本实验共 6 个处理,每个处理设 4 个重复。百菌清加入土壤后暴露晾干一定时间使丙酮充分挥发,然后将各个处理下的土壤分装于植物种植容器,并将上述已经露白的旱稻种子播入各个处理的土壤中,采用称重法浇水维持土壤水分含量为田间最大持水量的 70%,每隔一定时间,重新随机排列各培养容器在温室中的位置,温室光照时间为 14 h,光强 280 μmol·(m²·s)⁻¹,植物生长 8 周后收获。

1.4 植株生物量与根段侵染率的测定

植物收获时,将地上部分和地下部分分别收获,以自来水充分冲洗后再以去离子水冲洗,以滤纸擦

干。随机选取约 1.0 g 根系按照文献^[9]所述方法测定根系菌根侵染率,剩余的植物地上部分和根系分别记录鲜重,并各自分为 2 份,1 份立刻用于植物组织酶活性的测定,1 份在 105℃ 下杀青 30 min,在 70℃ 下烘干 72 h 至恒重,并称重。

1.5 植物地上部分、地下部分磷含量测定

地上部分吸磷量采用钼钒黄比色法,地下部分吸磷量采用钼蓝比色法^[10]。

1.6 植物酶提取和测定

根据 Cord 等的方法提取旱稻地上部分和地下部分酶^[11]:称取植物鲜样 500 mg 左右加 10 mL pH = 7.8 的酶提取液于 4℃ 下研磨,悬浮液经过滤后在 4 000 r·min⁻¹ 下 4℃ 离心 10 min,上清液即为粗酶提取液,于 4℃ 下静置 15 min 待用。

过氧化物酶(peroxidase, POD)活性测定:POD 活性用愈创木酚法测定,25℃ 时在 H₂O₂ 存在下,POD 催化愈创木酚转化成为棕色物质,该棕色物质在 470 nm 下有最大吸收,通过测定 470 nm 吸光度的变化可以测定 POD 的活性。酶反应液由 33 mmol·L⁻¹ 愈创木酚,0.3 mmol·L⁻¹ 的 H₂O₂ 和 100 mmol·L⁻¹ pH = 6.0 的磷酸缓冲液组成^[12]。过氧化氢酶(catalase, CAT)活性测定根据 Chance 等^[13]的方法进行。取 0.2 mL 酶上清液加入到已经盛有 3 mL CAT 反应液(50 mmol·L⁻¹ 磷酸缓冲液, pH = 7.0; 19 mmol·L⁻¹ H₂O₂)的比色杯中,摇匀后于 240 nm 下测定单位时间内吸光率的变化,并根据吸光度的变化和 H₂O₂ 的消光系数计算单位时间内 H₂O₂ 的减少量。抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性,根据 Asada^[14]的方法于 290 nm 下测定抗坏血酸的氧化率。以上比色采用仪器均为 U-3010 型紫外分光光度计(Hitachi Co. Japan)。

1.7 数据处理

实验结果以各个处理下 4 个重复的平均值来表示,并以 SAS 统计软件进行处理间的多重比较。

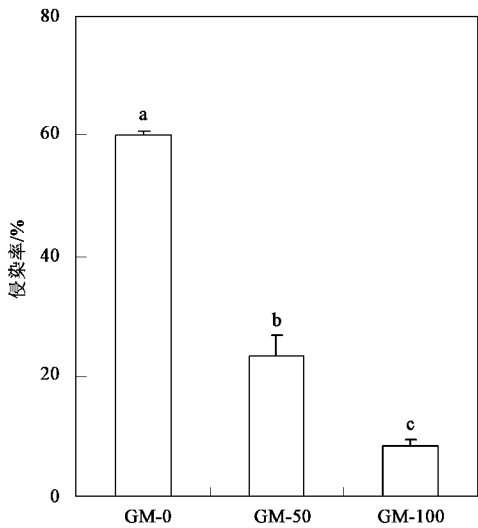
2 结果与分析

2.1 百菌清对旱稻菌根真菌侵染率的影响

接种处理土壤中不同浓度百菌清对旱稻菌根侵染率的影响如图 1 所示。从图 1 中可以看出,随着土壤中百菌清处理浓度的提高,旱稻的菌根侵染率显著下降($p < 0.05$),这表明作为 1 种杀菌剂,百菌清严重抑制了 *Glomus mosseae* 侵染旱稻根系。

2.2 百菌清对旱稻生长的影响

百菌清和菌根真菌处理对旱稻生长的影响如图



图中柱形上方标注不同字母表示 5% 显著水平下 LSD 多重比较平均值差异显著,下同

图 1 不同百菌清处理下早稻的菌根侵染率

Fig.1 Root colonization of upland rice with different chlorothalonil treatments (n = 4)

2 所示.从图 2 中可以看出,无论是否接种菌根真菌,百菌清严重抑制了早稻的生长,随着百菌清浓度增高,早稻的地上部分和地下部分的生物量都显著降低 ($p < 0.05$).从图 2 中还可以看出,在同一浓度百菌清处理下,接种 *Glomus mosseae* 可以提高早稻地上部分和地下部分的生物量,尤其是在 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下,地上部分和地下部分的干重较未接种处理显著增加 ($p < 0.05$),这表明百菌清对早稻的生长有一定的抑制作用,接种菌根真菌处理可以减轻百菌清对早稻的毒性,提高早稻的生物量.

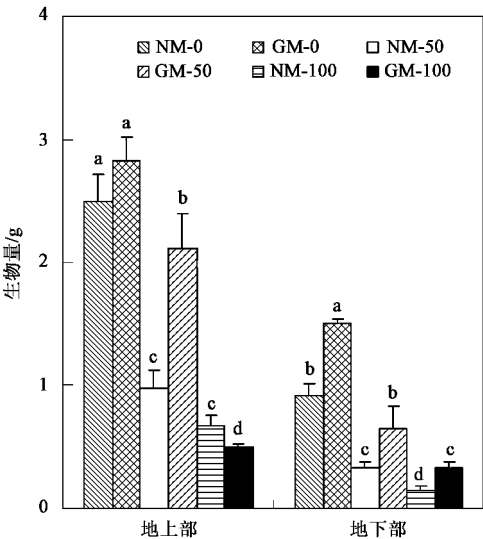


图 2 不同百菌清处理下早稻的生物量

Fig.2 Biomass of upland rice with different chlorothalonil treatments (n = 4)

2.3 百菌清对早稻磷吸收的影响

不同百菌清处理下早稻吸磷量如图 3 所示.从图 3 中可知,未接种处理下,百菌清显著抑制早稻对磷的吸收 ($p < 0.05$),而且随百菌清浓度的增加,抑制程度增加.接种处理下,百菌清也是显著降低早稻对 P 的吸收.和未接种处理相比,不施加百菌清时接种菌根真菌对早稻吸收 P 的影响不大,但是当百菌清的处理浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,接种处理显著增加早稻对 P 的吸收,而当百菌清的浓度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,接种 *Glomus mosseae* 虽然能显著提高早稻地下部分磷吸收量,但对地上部分 P 含量没有显著影响.

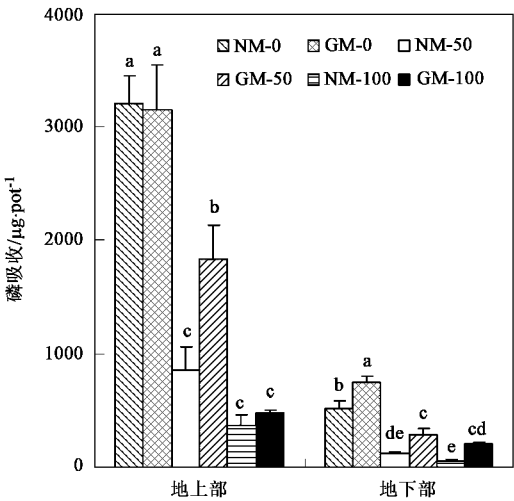


图 3 不同百菌清处理下早稻的磷吸收量

Fig.3 Phosphorus uptake of upland rice with different chlorothalonil treatments

2.4 百菌清对早稻过氧化物酶活性的影响

不同百菌清处理下早稻地上部分和地下部分 POD 活性如图 4 所示.从图 4 中可以看出,不接种处理下和不施加百菌清的处理相比较, $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的百菌清处理显著降低早稻地上部分 POD 的活性,而 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的百菌清处理对早稻地上部分 POD 的活性没有明显影响;地下部分随百菌清浓度的增加,POD 活性也显著增加 ($p < 0.05$).和未接种菌根真菌的处理相比较,在所有百菌清处理下接种菌根真菌都显著降低了早稻地上部分和地下部分 POD 活性.

不同百菌清处理下早稻地上部分和地下部分 APX 活性如图 5 所示.从图 5 中可以看出,不接种菌根真菌时,随百菌清处理浓度的增加,早稻地上部 APX 的活性先增加后降低,接种菌根真菌降低了 0 和 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下早稻地上部分 APX 的

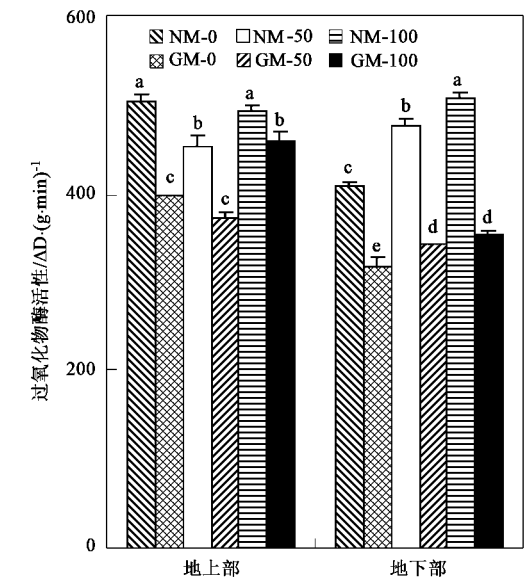


图 4 不同百菌清处理下旱稻地上部分和地下部分过氧化物酶活性
Fig.4 Peroxidase activities in the shoots and roots of upland rice with different chlorothalonil treatments

活性.百菌清对旱稻地下部 APX 活性的影响和地上部不同,不接种处理下和不施加百菌清的处理相比,施加 50 和 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清显著增加了旱稻地下部 APX 的活性.和不接种菌根真菌的处理相比,施加百菌清时接种菌根真菌能显著降低旱稻地下部 APX 的活性.

百菌清和接种菌根真菌对旱稻 CAT 酶活性的影响如图 6 所示.从图 6 中可以看出,未接种菌根真菌时,百菌清处理显著增加了旱稻地上部 CAT 的活性,但是在所有百菌清处理下,接种菌根真菌都显著降低了地上部 CAT 的活性.接种对旱稻地下部 CAT 活性的影响和地上部类似,即接种菌根真菌降低了旱稻地下部 CAT 的活性.

3 讨论

百菌清对旱稻的生长具有一定的抑制作用,长期大量使用该类杀菌剂虽然能有效防治田间植物病害,但是也能对农田生态系统中的非靶标生物造成一定的影响,影响植物的正常生长和农田生态系统的稳定,因此有必要加强对此类农用化学物质的环境影响研究,以全面、合理评价其对农田生态系统的影响.除了植物之外,土壤微生物也是土壤农田生态系统的重要组成部分,所以土壤微生物对农药施用的响应也是农药环境毒理学的一个重要研究内容.虽然已经有一些研究表明百菌清的施用能影响一些

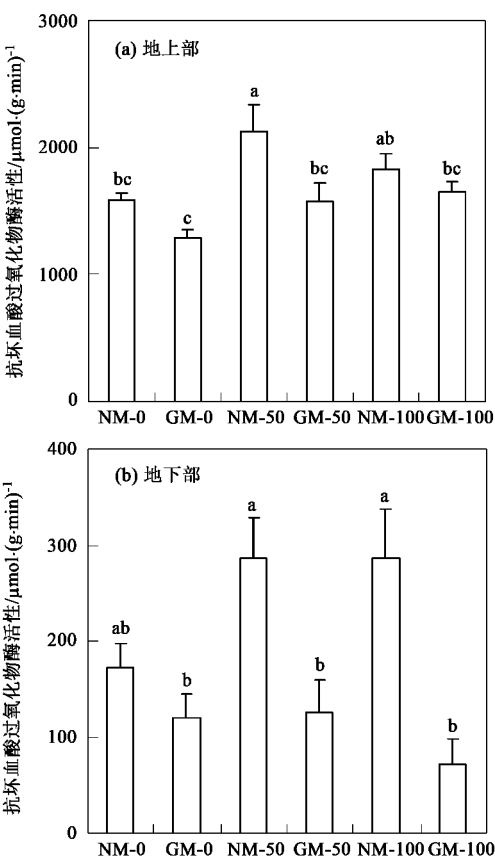


图 5 不同百菌清处理下旱稻地上部分和地下部分 APX 酶活性

Fig.5 Ascorbate peroxidase activities of shoots and roots of upland rice with different chlorothalonil treatments

土壤微生物的生长,降低土壤中一些关键酶的活性,但是鲜有文献报道百菌清对土壤中菌根真菌的影响.本研究结果表明土壤中施加百菌清后能降低百菌清对宿主植物旱稻的侵染,必将对菌根真菌的正常生长产生不利的影响.

虽然本研究结果表明百菌清的施用降低了菌根真菌对旱稻的侵染,但是在百菌清处理下接种菌根真菌能显著提高旱稻的生物量,尤其是在 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下,接种菌根真菌使旱稻地上部分和地下部分的干重显著增加,说明接种菌根真菌处理可以减轻百菌清对旱稻的毒性,提高旱稻的生物量.而在 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下,菌根真菌对旱稻生长的促进作用不如 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下显著,分析其原因可能在于百菌清作为一种杀真菌剂,对菌根真菌有较强的抑制作用,在高浓度下使菌根真菌的生长和对植物的侵染率都大大降低(图 1),所以对植物生长的促进作用也减弱.

大量研究已经表明,菌根真菌促进植物生长的

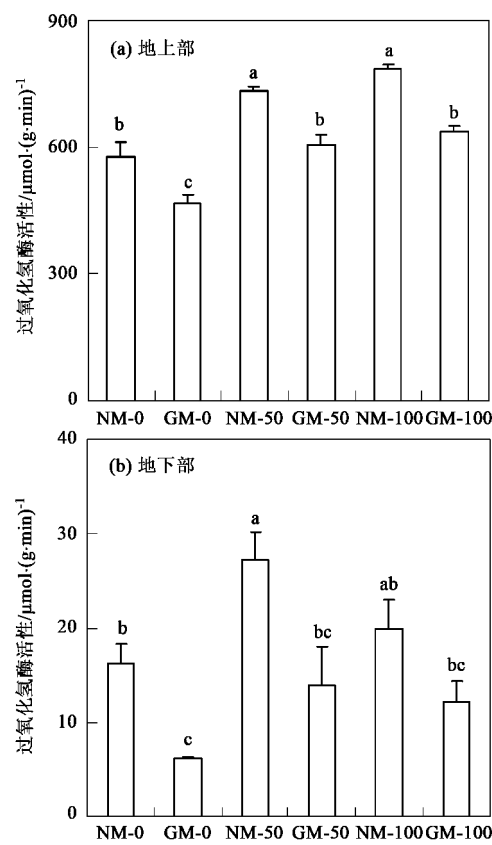


图 6 不同百菌清处理下早稻地上部分和地下部分过氧化氢酶活性

Fig. 6 Catalase activities in the shoots and roots of upland rice with different chlorothalonil treatments

一个重要机制是改善植物对 P 的吸收^[1,15], 在本研究中百菌清显著抑制早稻对磷的吸收, 而且随百菌清浓度的增加, P 吸收降低的程度增加, 说明降低植物对 P 的吸收是百菌清影响植物生长的原因之一. 不施加百菌清时接种菌根真菌对早稻 P 吸收的影响不明显, 和该处理下接种对早稻的生物量影响一致; 而 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下接种处理显著增加早稻对 P 的吸收, 和该处理下接种处理显著增加早稻的生物量一致, 由此可以看出, 改善植物 P 的吸收, 缓解百菌清对植物营养元素吸收的影响是菌根真菌增加植物对百菌清的抗性、促进植物生长的原因之一.

植物在生长过程中不可避免地会产生一些活性氧, 它们的存在会引起生物大分子如类脂、蛋白质、DNA 等的损伤, 进而导致植物生长方式的改变, 而植物在正常的生长过程中形成了活性氧清除的酶促系统和非酶促系统, 其中植物体内的抗氧化酶类, 如超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、CAT、APX、POD 等是植物体内活性氧的清除酶系统的主

要组成部分, 由这些抗氧化酶类所形成的抗氧化机制, 对于维持植物的正常生长具有重要的作用^[16~19]. 多种环境污染物可以改变植物体内活性氧的代谢过程, 引起植物的氧化胁迫, 这是环境污染引起生物体损伤的重要作用机制之一^[20,21]. 本研究结果表明, 除 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 百菌清处理下早稻地上部分 POD 的活性下降以外, 施加百菌清处理后早稻地上部分和地下部分的 POD、CAT 和 APX 活性均明显提高, 说明百菌清处理后早稻体内活性氧浓度增加, 引起了早稻体内的氧化胁迫, 进而引发了植物体内抗氧化酶系统的活性增加. 接种菌根真菌能显著降低早稻体内 POD、APX 和 CAT 的活性, 可能是由于菌根真菌和植物的共生体系降低了百菌清引起的活性氧的产生, 说明接种菌根真菌降低了百菌清引起的对早稻的氧化胁迫, 减轻百菌清对早稻的毒性, 这一方面可能在于菌根真菌对多种有机污染物都具有降解作用^[22,23], 在土壤或植物体内菌根真菌或许能够利用百菌清作为生长碳源, 进而降解百菌清. 另外大量研究表明, 菌根真菌能促进植物对 P 的吸收, 提高植物的生长量产生组织稀释作用, 也能在一定程度上减轻污染物对宿主植物的毒性^[24], 在本研究中也观察到百菌清处理下菌根真菌能显著增加早稻的生物量, 所以菌根引起的组织稀释作用可能也是菌根真菌提高早稻对百菌清抗性的机制之一.

4 结论

百菌清即使是在正常施用剂量下 ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 百菌清处理), 也能对农田生态系统中的非靶标生物产生一定的负面影响, 引起植物生长的抑制和土壤微生物活性的降低. 菌根真菌在一定程度上可以减轻百菌清对植物生长的影响, 其作用机制可能在于改善植物对 P 等营养元素的吸收, 提高植物的生长并产生组织稀释效应, 另外菌根真菌还能减轻百菌清引起的早稻体内的氧化胁迫, 减轻百菌清对早稻的毒性作用.

参考文献:

[1] 梁宇, 郭良栋, 马克平. 菌根真菌在生态系统中的作用[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 739 ~ 745.

[2] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J]. New Phytol, 2006, 171(1): 41 ~ 53.

[3] Vogelsang K M, Reynolds H L, Bever J D. Mycorrhizal fungal identity and richness determine the diversity and productivity of a tallgrass prairie system[J]. New Phytol, 2006, 172(3): 554 ~ 562.

[4] Bary F, Gange A C, Crane M, et al. Fungicide levels and arbuscular mycorrhizal fungi in golf putting greens[J]. J Appl Ecol, 2005, 42(1): 171 ~ 180.

- [5] Menon P, Gopal M, Prasad R. Influence of two insecticides, chlorpyrifos and quinalphos, on arginine ammonification and mineralizable nitrogen in two tropical soil types[J]. J Agric Food Chem, 2004, **52**: 7370 ~ 7376.
- [6] Waliszewski S M, Carvajal O, Infanzon R M, *et al.* Levels of organochlorine pesticides in soils and rye plant tissues in a field study[J]. J Agric Food Chem, 2004, **52**: 7045 ~ 7050.
- [7] Laatikainen T, Heinonen-Tanski H. Mycorrhizal growth in pure cultures in the presence of pesticides[J]. Microbiol Res, 2002, **157** (2): 127 ~ 137.
- [8] 冯波, 单敏, 方华, 等. 百菌清对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**: 674 ~ 677.
- [9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Trans Br Mycol Soc, 1970, **55**: 158 ~ 161.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 312 ~ 314.
- [11] Cord J M M C, Fridovich I. Superoxide Dismutase. An enzymatic function for erythrocuprein (hemocuprein)[J]. J Biol Chem, 1969, **222**: 6049 ~ 6055.
- [12] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 164 ~ 165.
- [13] Chance B, Maehly A C. Assay of catalases and peroxidases[J]. Methods Enzymol, 1955, **2**: 764 ~ 880.
- [14] Asada K. Ascorbate peroxidase: a hydrogen peroxide scavenging enzyme in plants[J]. Plant Physiol, 1992, **85**: 235 ~ 241.
- [15] 金棵, 赵洪, 李博. 我国菌根研究进展及展望[J]. 应用与环境生物学报, 2004, **10**(4): 515 ~ 520.
- [16] Sinha S, Saxena R, Singh S. Chromium induced lipid peroxidation in the plants of *Pistia stratiotes* L.: role of antioxidants and antioxidant enzymes[J]. Chemosphere, 2005, **58**: 595 ~ 604.
- [17] 林冬, 朱诚, 孙宗修. 镉敏感水稻突变体在镉胁迫下活性氧代谢的变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 561 ~ 566.
- [18] Mascher R, Lippmann B, Holzinger S, *et al.* Arsenate toxicity: effects on oxidative stress response molecules and enzymes in red clover plants[J]. Plant Sci, 2002, **163**: 961 ~ 969.
- [19] Mittler M. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. Trends Plant Sci, 2002, **7**: 405 ~ 410.
- [20] Suzuki T, Nijiri H, Isono H, *et al.* Oxidative damages in isolated rat hepatocytes treated with the organochlorine fungicides captan, dichlofluanid and chlorothalonil[J]. Toxicology, 2004, **204**: 97 ~ 107.
- [21] Chen S K, Edwards C A, Subler S. Effects of the fungicides benomyl, captan and chlorothalonil on soil microbial activity and nitrogen dynamics in laboratory incubations[J]. Soil Biol Biochem, 2001, **33**: 1971 ~ 1980.
- [22] Meharg A A, Cairney J W G. Ecotomycorrhizas-extending the capabilities of rhizosphere remediation[J]. Soil Biol Biochem, 2000, **32**: 1475 ~ 1484.
- [23] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 菌根真菌对土壤中有有机污染物的修复研究[J]. 地球科学进展, 2004, **19**(2): 197 ~ 203.
- [24] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001. 193 ~ 203.