

啶酰菌胺对酸性紫色土酶活性的影响

江 帆, 胡玉福*, 李亨伟, 舒向阳, 庞 宇, 蒋双龙, 王静雯

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘 要:通过土培实验研究了啶酰菌胺对酸性紫色土脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及脱氢酶活性的影响。结果表明,各浓度处理下在培养第 7 d 对脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及脱氢酶活性影响显著($P<0.05$)。随培养时间延长,10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下,酶活性与 CK 差异不显著,50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理下,除脱氢酶外,其余酶活性在培养期内能恢复正常水平;100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理下,亚硝酸还原酶表现出“抑制-恢复-激活”,脲酶、硝酸还原酶及脱氢酶活性在培养期内均表现出抑制;200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度处理下,四种酶在培养期内均受到显著抑制。相关分析结果表明,脲酶与硝酸还原酶活性显著正相关,与亚硝酸还原酶、脱氢酶活性极显著正相关,硝酸还原酶与脱氢酶活性极显著正相关。

关键词:啶酰菌胺;酸性紫色土;酶活性

中图分类号:S154.2 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)12-2312-06 doi:10.11654/jaes.2015.12.009

Effects of Boscalid on Enzyme Activities in Acid Purple Soil

JIANG Fan, HU Yu-fu*, LI Heng-wei, SHU Xiang-yang, PANG Yu, JIANG Shuang-long, WANG Jing-wen

(College of resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: This paper studied the effects of boscalid on urease, nitrate reductase, nitrite reductase and dehydrogenase in acid purple soil in a pot experiment. Results showed that activities of all enzymes in soil treated with boscalid ranged from 10 to 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and were significantly affected on day 7 after boscalid treatments. In 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ boscalid-treated soil, all enzyme activities were not markedly different from the control from 14–42 days. In 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ treatment, soil enzyme activities resumed normal levels during 14–42 th day, with an exception of dehydrogenase. In 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ treatment, however, nitrite reductase displayed “inhibition-recovery-stimulation”; while urease, nitrate reductase and dehydrogenase activities were inhibited during the experimental period. In 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, the activities of four enzymes were notably inhibited during the experimental period. Urease had significant and positive correlation with nitrate reductase, nitrite reductase and dehydrogenase. Significant and positive relationship was found between nitrate reductase and dehydrogenase.

Keywords: boscalid; acid purple soil; enzyme activity

近年来,随着农业、工业的迅速发展,杀虫剂、杀菌剂及除草剂等有机农药广泛应用于我国土壤。农药被认为是具有潜在毒性的化学物质,且农药有效利用率较低,相当一部分通过不同途径进入大气和土壤中,因此评估农药对土壤微环境的影响对避免农药污染有重要意义^[1-3]。啶酰菌胺作为杀菌剂自上世纪 50 年代以来,在全球 50 多个国家注册^[4-5]。适量的啶酰菌胺能有效杀死有害病菌,但过量啶酰菌胺能够抑制生

物细胞内线粒体琥珀酸酯脱氢酶活性,干扰细胞分裂及生长。研究报道表明,啶酰菌胺在蔬菜、大豆、葡萄等作物中使用时,用量在 1000~3000 $\text{L}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[6-7]。目前,啶酰菌胺在土壤中引发的环境效应研究较少,Xiong 等^[8]报道了啶酰菌胺对部分酶及土壤呼吸的影响,啶酰菌胺对土壤不同酶类的影响存在差异。诸多研究表明,农药残留会引起土壤微生物环境变化,对于啶酰菌胺所引发的生态环境效应及潜在风险不容忽视^[9-10]。

土壤酶是由土壤微生物、植物根系分泌物及动植物残体腐解过程中所释放的具有高度催化作用的蛋白质,其直接参与土壤中的物质能量转化过程,被认为是土壤生态过程的重要组成部分^[11-13]。研究表明,土

收稿日期:2015-06-08

基金项目:国家支撑计划项目(2015BAC05B01);四川省科技计划项目(2014SZ0059)

作者简介:江 帆(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤学。

E-mail:jiang007jf@qq.com

* 通信作者:胡玉福 E-mail:66433119@qq.com

壤酶对农药污染反应迅速,土壤酶活性可作为反映土壤健康及土壤质量的重要生物指标^[9,14]。目前对啮酰菌胺的研究主要集中于其在蔬菜及土壤中残留分析,由于啮酰菌胺在土壤中的半衰期较长,研究啮酰菌胺对土壤酶活性的影响对啮酰菌胺的风险评估和防控具有重要意义^[15]。本文通过土培实验研究不同浓度啮酰菌胺对酸性紫色土脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、脱氢酶活性的影响,以期为土壤环境风险评估提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为酸性紫色土,采自四川省雅安市名山区 0~20 cm 表层土壤,风干,过 2 mm 筛备用。供试土壤基础理化性质测定参考文献[16],结果见表 1。

1.2 实验方法

称取 500 g 过 2 mm 筛风干土样于塑料盆(内径 10 cm,高 15 cm)中,每盆施入不同浓度啮酰菌胺(分析纯 $\geq 95\%$)溶液,将啮酰菌胺溶液与土样充分搅拌均匀,参照 Xiong 等^[8]研究,使土壤中啮酰菌胺浓度分别达 0、10、50、100、200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,通过测定田间最大持水量,加入去离子水,使土壤含水量达田间最大持水量的 60%,在培养期内通过称重法加入蒸馏水保持田间持水量,其中 0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为对照(CK)。每个处理 3 次重复,在遮光 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下培养 42 d,在 0、7、14、28、35、42 d 分别取样测定,培养期内加入蒸馏水保持田间持水量。

1.3 测定方法

土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶及脱氢酶活性测定采用关松荫^[17-18]的方法。土壤基础理化性质测定采用鲁如坤^[16]的方法。

1.3.1 酶活性测定方法

脲酶活性采用靛酚比色法,通过测定反应产氮量计算脲酶活性,以每克干土培养 24 h 后 NH_4^+-N 的量表示其活性;硝酸还原酶活性采用酚二黄酸比色法,测定反应前后硝酸态氮与酚二黄酸作用的蓝色反应差数,用来表示硝酸还原酶活性;亚硝酸还原酶活性采用 α -萘胺比色法测定,以每克干土培养 24 h 后

NO_2^--N 的量表示其活性;脱氢酶活性采用 TTC 分光光度法,以每克土生成的 IPTF 表示。

1.3.2 土壤理化性质测定

土壤含水量采用烘干法测定;pH 值采用 2.5:1 的水土比,电位计法测定;有机质采用高温外热重铬酸钾氧化-容重法测定;全氮采用全自动定氮仪测定;全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮法;水解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用碳酸氢钠法测定;速效钾采用乙酸铵提取-火焰光度计法测定。以上分析方法见《土壤农业化学分析方法》^[16]。

1.4 数据处理

实验数据采用 SPSS 19.0 统计软件进行单因子方差分析处理,采用 Excel 2013 制作图表,当 $P<0.05$ 时认为各处理数据差异显著。

2 结果与分析

2.1 啮酰菌胺对土壤脲酶活性的影响

由图 1 可知,10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理的啮酰菌胺对土壤脲酶活性均呈现出激活-抑制-激活-恢复的趋势:在 0~7 d 内脲酶活性有显著升高($P<0.05$),相对于 CK 分别升高了 14.73%和 29.46%;在第 14 d,啮酰菌胺对脲酶活性有轻微抑制作用,分别较 CK 降低了 0.87%和 6.09%;在实验第 28、42 d,啮酰菌胺对脲酶活性有促进作用,其中第 28 d 脲酶活性较 CK 分别升高了 2.44%和 12.20%,第 42 d 脲酶

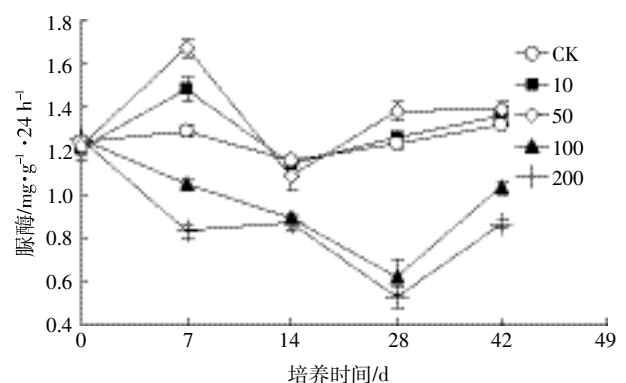


图 1 不同浓度啮酰菌胺对土壤脲酶活性影响

Figure 1 Effect of boscalid on soil urease activity

表 1 供试土壤化学性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土壤含水量 Soil moisture content/%	pH	土壤有机质 Soil organic matter/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全量养分 Total nutrients/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$			速效养分 Available nutrients/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		
			N	P	K	N	P	K
38.25	4.53	17.36	1.83	0.92	13.96	75.54	36.89	106.37

活性较 CK 分别升高了 3.03% 和 5.30%。由图 1 还可知, $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度啶酰菌胺处理下, 在整个培养期内啶酰菌胺对土壤脲酶活性始终存在显著的抑制作用 ($P < 0.05$): 在实验第 7 d, 相对于 CK 分别降低了 18.60% 和 35.66%; 在实验第 14 d, 相对于 CK 分别降低了 22.61% 和 24.35%; 在实验第 28 d, 相对于 CK 分别降低了 49.59% 和 56.91%; 在实验第 42 d, 相对于 CK 分别降低了 21.97% 和 34.85%。

随着培养时间延长, 低浓度处理下, 啶酰菌胺对土壤脲酶活性在前期有促进作用。 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的啶酰菌胺处理下, 实验第 7 d 脲酶活性较第 0 d 分别升高了 22.31% 和 36.88%, 但随着培养时间的延长, 啶酰菌胺对土壤脲酶活性的影响会逐步降低, 脲酶活性可回归正常水平。而高浓度处理下, 啶酰菌胺对脲酶活性的抑制作用在培养期内难以完全消除。

2.2 啶酰菌胺对土壤硝酸还原酶活性的影响

由图 2 可见, 在实验第 7 d, 啶酰菌胺对土壤硝酸还原酶活性存在显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 且随着浓度的升高抑制作用不断增强, 10 、 50 、 100 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下硝酸还原酶活性较 CK 分别降低了 13.95%、22.09%、27.91% 和 32.56%; 在实验第 14 d, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺浓度处理下, 硝酸还原酶活性较 CK 有所上升, 分别升高了 3.79% 和 10.13%, 而 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺浓度处理下, 硝酸还原酶活性仍呈现出抑制, 分别较 CK 下降了 5.06% 和 13.92%; 在实验第 28、42 d, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺浓度处理下, 硝酸还原酶活性与 CK 之间差异不显著, 但 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理下, 啶酰菌胺对硝酸还原酶活性仍有所抑制; 在实验第 28 d, $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理下,

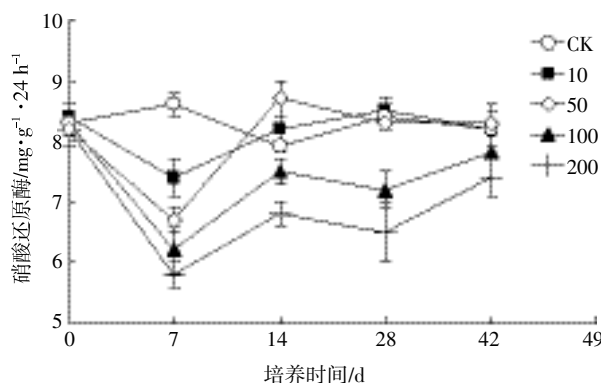


图 2 不同浓度啶酰菌胺对土壤硝酸还原酶活性影响

Figure 2 Effect of boscalid on nitrate reductase activity in soil

硝酸还原酶活性较 CK 分别降低了 14.29% 和 22.62%; 在实验第 42 d, 硝酸还原酶活性较 CK 分别降低了 4.88% 和 9.76%。可见, 随着培养时间的延长, 低浓度啶酰菌胺对硝酸还原酶活性的促进效果会有所减弱, 同时高浓度的抑制作用也会有所减弱。

2.3 啶酰菌胺对土壤亚硝酸还原酶活性的影响

由图 3 可知, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的啶酰菌胺对土壤亚硝酸还原酶活性均表现出一定程度的促进作用: 在 0~7 d 内亚硝酸还原酶活性有显著升高 ($P < 0.05$), 相对于 CK 分别升高了 10.38% 和 21.70%; 在第 14 d, 啶酰菌胺对亚硝酸还原酶活性的刺激作用有所减弱, 分别较 CK 升高了 1.92% 和 8.65%; 在实验第 28 d, 亚硝酸还原酶活性较 CK 分别升高了 1.06% 和 2.13%; 在实验第 42 d, 亚硝酸还原酶活性较 CK 分别升高了 1.87% 和 8.41%。在 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺处理下, 亚硝酸还原酶活性呈现抑制-恢复-促进的变化趋势。 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺处理下, 在实验第 7 d, 亚硝酸还原酶活性有显著降低 ($P < 0.05$), 相对于 CK 降低了 10.38%; 在实验第 14 d, 亚硝酸还原酶活性有所恢复, 相对于 CK 降低了 1.92%; 在实验第 28、42 d, 亚硝酸还原酶有所上升且在 42 d 达到显著水平 ($P < 0.05$), 相对于同时期 CK 分别上升了 5.32% 和 15.89%。在 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 啶酰菌胺处理下, 亚硝酸还原酶始终呈现抑制且在实验第 7 d 最为显著 ($P < 0.05$), 相对于 CK 降低了 19.81%, 在实验第 14、28、42 d, 亚硝酸还原酶活性相对于 CK 分别降低了 8.65%、5.32% 和 13.08%。

随着培养时间的不断延长, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理条件下, 啶酰菌胺对亚硝酸还原酶活性的刺激作用减弱, 但在后期出现一定程度的升高; $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理条件下, 啶酰菌胺对亚硝酸还原酶

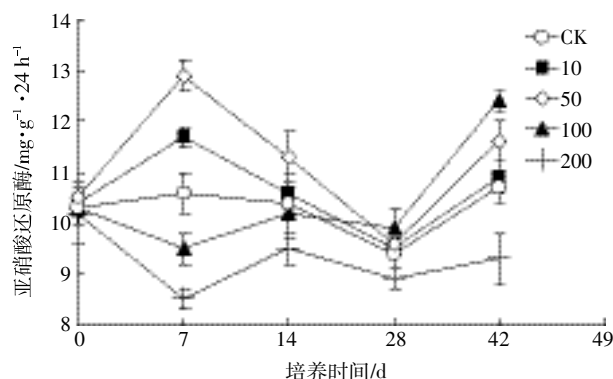


图 3 不同浓度啶酰菌胺对土壤亚硝酸还原酶活性影响

Figure 3 Effect of boscalid on nitrite reductase activity in soil

活性在前期有一定的抑制效果,但随着培养时间延长,在中期亚硝酸还原酶活性逐步回升,在后期对亚硝酸还原酶活性表现出刺激作用;200 mg·kg⁻¹ 浓度处理条件下,啞酰菌胺对亚硝酸还原酶活性始终存在显著抑制($P<0.05$),但随着培养时间的延长,抑制作用有一定程度的减弱。

2.4 啞酰菌胺对土壤脱氢酶活性的影响

由图 4 可见,在实验第 7 d,啞酰菌胺对土壤脱氢酶活性存在显著的抑制作用($P<0.05$),且随着浓度的升高抑制作用不断增强,10、50、100、200 mg·kg⁻¹ 啞酰菌胺处理下脱氢酶活性相对于 CK 分别降低了 10.51%、16.24%、21.34%和 28.34%;在实验第 14 d,除 10 mg·kg⁻¹ 浓度处理对脱氢酶活性表现出刺激作用外,其余各浓度处理下脱氢酶活性均受到显著抑制($P<0.05$),分别相对于 CK 降低了 6.27%、11.22%和 28.05%;在实验第 28 d,10 mg·kg⁻¹ 浓度处理下对脱氢酶活性有轻微刺激效果,其余各浓度对脱氢酶呈现出显著抑制($P<0.05$),且随着浓度的升高抑制作用不断增强,在 200 mg·kg⁻¹ 浓度下达到培养期内最小值,各浓度脱氢酶活性相对于 CK 分别降低了 20.20%、37.37%和 45.46%;在实验第 42 d,10 mg·kg⁻¹ 浓度处理对脱氢酶活性无影响,其余各浓度对脱氢酶活性仍存在抑制作用,分别相对于 CK 降低了 8.61%、17.88%和 30.79%。可见,低浓度条件下啞酰菌胺对脱氢酶有抑制作用,但随着培养时间延长会逐步减弱,而高浓度条件下啞酰菌胺对脱氢酶的抑制作用在短期内难以消除。

2.5 酶活性相关分析

啞酰菌胺对土壤酶活性的相关分析结果(表 2)表明,脲酶活性与硝酸还原酶活性显著正相关,与亚硝酸还原酶活性、脱氢酶活性呈现出极显著正相关。硝酸还原酶活性与亚硝酸还原酶活性无显著相关,与

表 2 酶活性相关分析

Table 2 Correlation analysis of soil enzyme activities

	脲酶 Urease	硝酸 还原酶 NR	亚硝酸 还原酶 NIR	脱氢酶 Dehydrogenase
脲酶 Urease	1			
硝酸还原酶 NR	0.479*	1		
亚硝酸还原酶 NIR	0.609**	0.286	1	
脱氢酶 Dehydrogenase	0.709**	0.720**	0.367	1

注:** 代表差异极显著($P<0.01$);* 代表差异显著($P<0.05$)。

Note:** significant level at $P<0.01$; * significant level at $P<0.05$.

脱氢酶活性极显著相关。亚硝酸还原酶活性与脱氢酶活性无显著相关。

3 讨论

土壤酶是主要由土壤微生物、动植物残体分泌的具有高度催化作用的蛋白质,其直接参与土壤有机物质分解等重要过程。土壤酶活性高低能够反映土壤微生物活性,同时能够影响土壤养分形成和转化等过程^[19-21]。研究表明,土壤酶对土壤微环境变化响应迅速,因此常作为评价土壤污染的重要生物指标^[22-23]。土壤脲酶作用下能够将施入土壤的尿素经由氨基甲酸水解成 NH₃,再经质子转化成为 NH₄⁺^[24]。土壤脲酶活性高低能够影响土壤中有效氮含量,同时其水解尿素所生成的 NH₄⁺是植物氮素的主要来源之一。研究表明,脲酶活性高低可作为环境监测的重要指标,同时也用于农药对土壤环境的影响评估^[25]。吴可虎等^[1]报道了 5 种除草剂对土壤脲酶活性的影响,结果表明除草剂对脲酶活性影响较大,在培养期内呈现出抑制-激活-恢复的波动趋势。本文研究发现,低浓度啞酰菌胺对脲酶有激活作用,而高浓度处理下表现为抑制作用,其原因可能是低浓度处理下刺激土壤微生物生长,而高浓度处理下对土壤中微生物环境造成破坏,从而使得分泌脲酶的微生物活性降低。低浓度处理半衰期时间较短,能够在较短时间内消除对土壤的影响,而高浓度处理下对微生物抑制作用在短期内难以消除,导致脲酶活性在培养期内表现出抑制。

土壤硝酸还原酶被认为与土壤反硝化作用有紧密关系。有学者认为,在土壤嫌气条件下硝酸还原酶是参与土壤反硝化过程的重要酶类之一,在好气条件下,硝酸还原酶则能够催化土壤中硝酸盐还原成为亚硝酸盐^[26-27]。目前,关于农药对土壤硝酸还原酶活性影响的研究未见报道。本文研究表明,啞酰菌胺在前期对硝酸还原酶具有抑制作用,低浓度处理在后期酶活性回升至正常水平,但高浓度处理后酶活性始终处于

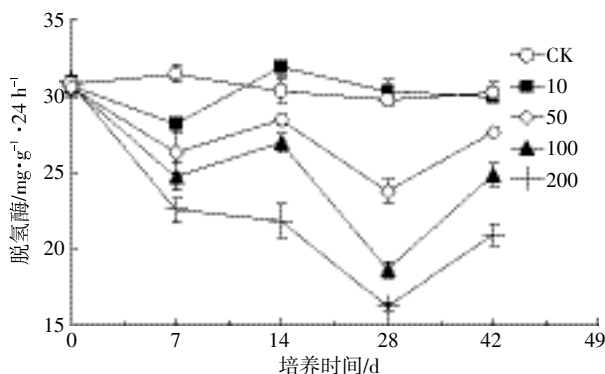


图 4 不同浓度啞酰菌胺对土壤脱氢酶活性影响

Figure 4 Effect of boscalid on dehydrogenase activity in soil

抑制状态。啶酰菌胺对硝酸还原酶的抑制可能会阻碍土壤中硝酸根离子向亚硝酸根离子的转化。

土壤亚硝酸还原酶是由土壤反硝化细菌分泌的重要还原酶类,在嫌气条件下可将 NO_2^- 还原成 NO ,而 NO 在酶作用下会被还原为温室气体 N_2O 。研究表明,土壤反硝化作用是土壤氮素损失的主要途径,而土壤亚硝酸还原酶是土壤反硝化作用的关键酶^[28]。本文研究表明:低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度啶酰菌胺处理下,啶酰菌胺对土壤亚硝酸还原酶活性有激活作用,但随着培养时间延长有所减弱; $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度啶酰菌胺处理下,亚硝酸还原酶活性呈现出抑制-恢复-激活的波动趋势; $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度啶酰菌胺处理下,亚硝酸还原酶活性始终受到抑制。

土壤脱氢酶是仅存于土壤微生物细胞的重要氧化还原酶类,因此其活性强弱是评价土壤微生物活性的重要指标^[29]。研究表明,脱氢酶直接参与氧化土壤有机物,与土壤微生物在土壤中呼吸类型密切相关^[30]。本文研究表明,啶酰菌胺对土壤脱氢酶有极强的抑制作用,且抑制强度会随着浓度的升高不断增强。其原因可能是啶酰菌胺抑制土壤微生物细胞内线粒体琥珀酸酯脱氢酶活性,阻碍三羧酸循环,使细胞内氨基酸及糖类缺乏,能量减弱,干扰细胞分裂及生长,从而导致微生物死亡^[6]。Xiong 等^[8]研究啶酰菌胺对土壤呼吸影响表明,啶酰菌胺对土壤呼吸的抑制作用明显,且随着浓度升高抑制作用增强。

土壤酶对土壤物质能量交换起着关键作用,脲酶活性可反映土壤有效氮代谢水平,硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性可以反映硝态氮在土壤中的转化速率,脱氢酶活性可反映土壤微生物活性,均是衡量土壤肥力与微生物活性的重要生物指标^[31-33]。根据啶酰菌胺对上述土壤酶活性的影响可以推测,啶酰菌胺可能会影响土壤的氮素代谢功能。

4 结论

(1)啶酰菌胺对土壤脲酶、硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、脱氢酶均有影响。当啶酰菌胺浓度低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,在第 7 d,脲酶和亚硝酸还原酶有显著刺激,对硝酸还原酶和脱氢酶有抑制作用,之后除脱氢酶在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下难以恢复外,其余酶活性在啶酰菌胺低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下均能恢复正常水平;当啶酰菌胺浓度达 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,除亚硝酸还原酶活性在第 7 d 后能恢复正常水平外,对其余酶活性均有显著抑制作用;啶酰菌胺浓度达 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,脲酶、硝

酸还原酶、亚硝酸还原酶和脱氢酶活性均在培养期内受到显著抑制。

(2)酶活性相关分析表明,脲酶与硝酸还原酶呈显著正相关,与脱氢酶极显著正相关;硝酸还原酶与脱氢酶极显著正相关。啶酰菌胺对亚硝酸还原酶活性的刺激可能会导致土壤中氮素损失;啶酰菌胺对脱氢酶活性的抑制可能会导致土壤微生物环境遭到破坏,导致土壤质量下降。

参考文献:

- [1] 吴小虎,徐军,董丰收,等. 5 种除草剂对土壤蔗糖酶和脲酶活性的影响[J]. 农药学报, 2015, 17(2): 179-184.
WU Xiao-hu, XU Jun, DONG Feng-shou, et al. Effects of five herbicides on activities of soil invertase and urease[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2015, 17(2): 179-184.
- [2] 郑景瑶,王百慧,岳中辉,等. 氟磺胺草醚对黑土微生物数量及酶活性的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(5): 468-472.
ZHENG Jing-yao, WANG Bai-hui, YUE Zhong-hui, et al. Effects of fomesafen on microorganism quantity and enzyme activities in black soil[J]. *Acta Phytophylacica Sinic*, 2013, 40(5): 468-472.
- [3] Gevaio B, Semple K T, Jones K C. Bound pesticide residues in soils: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 108(1): 3-14.
- [4] 禹凯,岳刚,关登仕,等. pH 值对啶酰菌胺晶型的影响[J]. 精细化工中间体, 2015, 45(1): 24-27.
YU Kai, YUE Gang, GUAN Deng-shi. The study of the effect of pH value on boscalid crystalline form[J]. *Fine Chemical Intermediates*, 2015, 45(1): 24-27.
- [5] 郑尊涛,孙建鹏,简秋,等. 啶酰菌胺在番茄和土壤中的残留及消解动态[J]. 农药, 2012, 51(9): 672-674.
ZHEN Zun-tao, SUN Jian-peng, JIAN Qiu, et al. The Residues and dissipation of boscalid in tomato and soil[J]. *Agrochemicals*, 2012, 51(9): 672-674.
- [6] 颜范勇,刘冬青,司马利锋,等. 新型烟酰胺类杀菌剂—啶酰菌胺[J]. 农药, 2008, 47(2): 8-10.
YAN Fan-yong, LIU Dong-qing, SIMA Li-feng, et al. Boscalid: A novel carboxamide aka anilide class of fungicides[J]. *Agrochemicals*, 2008, 47(2): 8-10.
- [7] 唐俊,汤锋,操海群,等. 啶酰菌胺在黄瓜和土壤中残留分析方法研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(4): 550-554.
TANG Jun, TANG Feng, CAO Hai-qun, et al. Analytical method of boscalid residue in cucumber and soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2008, 35(4): 550-554.
- [8] Xiong D, Li Y, Xiong Y, et al. Influence of boscalid on the activities of soil enzymes and soil respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61: 1-5.
- [9] Riah W, Laval K, Laroche-Ajzenberg E, et al. Effects of pesticides on soil enzymes: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2014, 12(2): 257-273.
- [10] 谢勇波,周清明,龚道新. 不同化学农药对土壤脲酶活性的影响[J].

- 湖南农业科学, 2010(2):63-65.
- XIE Yong-bo, ZHOU Qing-ming, GONG Dao-xin. Effects of different chemical pesticides on activity of soil urease[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2010(2):63-65.
- [11] Burns R G, Deforest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58(2):216-234.
- [12] Burns R G. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1982, 14(82):423-427.
- [13] Burns R G, Dick R P. Enzymes in the environment: Activity, ecology and applications[J]. *Crc Press*, 2002, 84(2):106-107.
- [14] 闫雷, 李晓亮, 秦智伟, 等. 农药对土壤酶活性影响的研究进展[J]. 农机化研究, 2009(11):223-226.
- YAN Lei, LI Xiao-liang, QIN Zhi-wei, et al. Research advance of influence of pesticides on enzyme activities in soil[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(11):223-226.
- [15] 张玉婷, 郭永泽, 刘磊, 等. 啉酰菌胺在葡萄及土壤中的残留动态[J]. 农药, 2011, 50(1):51-52.
- ZHANG Yu-ting, GUO Yong-ze, LIU Lei, et al. The residues dynamics of boscalid in grape and soil[J]. *Agrochemicals*, 2011, 50(1):51-52.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- GUAN Song-yin. Soil enzyme and study method[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [18] 周礼恺, 张志明. 土壤酶活性的测定方法[J]. 土壤通报, 1980, 5(1):37-38.
- ZHOU Li-kan, ZHANG Zhi-ming. Method of the soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1980, 5(1):37-38.
- [19] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21):1-7.
- LIU Shan-jiang, XIA Xue, CHEN Gui-mei, et al. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 27(21):1-7.
- [20] 万忠梅, 宋长春. 土壤酶活性对生态环境的响应研究进展[J]. 土壤通报, 2009(4):951-956.
- WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun. Advance on response of soil enzyme activity to ecological environment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009(4):951-956.
- [21] 唐玉姝, 魏朝富, 颜廷梅, 等. 土壤质量生物学指标研究进展[J]. 土壤, 2007, 39(2):157-163.
- TANG Yu-shu, WEI Chao-fu, YAN Ting-mei, et al. Biological indicator of soil quality: A review[J]. *Soils*, 2007, 39(2):157-163.
- [22] Rasool N, Reshi Z A, Shah M A. Effect of butachlor(G) on soil enzyme activity[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 61:94-100.
- [23] Yang Z, Liu S, Zheng D, et al. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(6):1135-1141.
- [24] 陈利军, 武志杰, 姜勇, 等. 与氮转化有关的土壤酶活性对抑制剂施用的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1099-1103.
- CHEN Li-jun, WU Zhi-jie, JIANG Yong, et al. Response of N transformation related soil enzyme activities to inhibitor applications[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9):1099-1103.
- [25] Cloutier-Hurteau B, Sauvé S, Courchesne F. Influence of microorganisms on Cu speciation in the rhizosphere of forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2441-2451.
- [26] Dendooven L, Anderson J M. Dynamics of reduction enzymes involved in the denitrification process in pasture soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(11):1501-1506.
- [27] Griffiths R P, Homann P S, Riley R. Denitrification enzyme activity of Douglas-fir and red alder forest soils of the Pacific Northwest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(8):1147-1157.
- [28] 李昌满, 许明惠. 苯甲酸钠对土壤亚硝酸还原酶动力学参数的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1):97-99.
- LI Chang-man, XU Ming-hui. The effect of sodium benzoate on soil nitrite reductase kinetic parameters[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(1):97-99.
- [29] Makoi J H J R, Ndakidemi P A. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2008, 7(3):181-191.
- [30] 胡玉福, 舒向阳, 马可雅, 等. 外源镧对茶园紫色土酶活性的影响[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(2):223-230.
- HU Yu-fu, SHU Xiang-yang, MA Ke-ya, et al. Effects of exogenous lanthanum on enzyme activity in tea garden purple soil[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2015, 33(2):223-230.
- [31] 陈强, 孙红文, 王兵, 等. 邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)对土壤中微生物和动物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1156-1159.
- CHEN Qiang, SUN Hong-wen, WANG Bing, et al. Impacts of dimethyl phthalate contamination on respiratory rates and enzyme activities in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1156-1159.
- [32] 安宁宁, 范伟国, 谭秋平, 等. 不同配比土壤对平邑甜茶苗木生长和土壤微生物及土壤硝酸还原酶的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(6):1022-1026.
- AN Ning-ning, FAN Wei-guo, TAN Qiu-ping, et al. Effects of different cultivating media on growth of *Malus hupehensis* seedlings, microorganism and nitrate reductase in soil[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, 18(6):1022-1026.
- [33] 秦华, 林先贵, 陈瑞蕊, 等. DEHP对土壤脱氢酶活性及微生物功能多样性的影响[J]. 土壤学报, 2006, 42(5):829-834.
- QIN Hua, LIN Xian-gui, CHEN Rui-rui, et al. Effects of DEHP on dehydrogenase activity and microbial functional diversity in soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 42(5):829-834.