

王莹,周斌辉,于佳林,等. 莠去津和硝磺草酮对竹节草生理特性及抗氧化酶的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(9):95-99.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.021

莠去津和硝磺草酮对竹节草生理特性及抗氧化酶的影响

王莹¹, 周斌辉¹, 于佳林², Mohsin Nawaz¹, 王志勇¹

(1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. Department of Crop and Soil Sciences, The University of Georgia, Athens USA30602)

摘要:以竹节草为材料,研究莠去津、硝磺草酮及两者混合施用对竹节草色素浓度、脂质过氧化反应和抗氧化酶活性的影响。结果表明,随着硝磺草酮以及莠去津与硝磺草酮混合液浓度的增加及处理时间的增加,竹节草的损伤度表现出逐渐增强的趋势;硝磺草酮 140 g a.i./hm²、莠去津 280 g a.i./hm² 及两者混合处理后,竹节草叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量下降;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性增强,而丙二醛(MDA)含量和超氧阴离子产生速率则出现先上升后平缓的趋势;莠去津和硝磺草酮混合施用比单独施用莠去津或硝磺草酮对竹节草具有更大的伤害($P < 0.05$)。

关键词:莠去津;硝磺草酮;抗氧化酶;脂质过氧化反应;竹节草;耐受;除草剂

中图分类号: S482.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0095-04

植物在非生物胁迫(如除草剂)下会产生活性氧(ROS),导致氧化应激反应^[1]。ROS 包括羟基自由基($\cdot\text{OH}$)、过氧化氢(H_2O_2)、单线态氧($^1\text{O}_2$)和超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)等^[2]。当 ROS 水平超出防御机制所及范围,细胞就会处于氧化胁迫状态,从而引发对叶绿素、脂类、蛋白质、色素和 DNA^[1-4]的氧化反应,导致植物损伤甚至死亡。

植物体内的抗氧化系统在抵抗胁迫方面有非常重要的作用,它可以消除植物体内的 ROS,以避免 ROS 的过量积累对植物造成的伤害。抗氧化酶类主要包含抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽还原酶(GR)和超氧化物歧化酶(SOD)^[5],这些酶类可以通过与 ROS 的酶促反应,将其从植物细胞中移除。

硝磺草酮是一种芽前和苗后广谱使用的选择性除草剂^[6],能够快速被植物的根和叶片吸收,并且可以迅速地在植株体内进行代谢作用而失去活性^[7]。它通过抑制羟基丙酮酸双加氧酶(HPD)的活性来抑制类胡萝卜素的合成过程,从而有效防治主要的阔叶草和一些禾本科杂草^[8]。莠去津的特点是以根部吸收为主,并兼茎叶吸收,杀草谱较广,可防除多种 1 年生禾本杂草与阔叶杂草^[9]。苏旺苍等通过对大豆喷施不同浓度的莠去津发现,随着莠去津处理浓度的上升,大豆叶片中的叶绿素荧光参数最大光量子产量、非光化学淬灭、实际光量子产量和电子传递速率受到的抑制作用均逐步加剧^[10]。McElroy 等研究莠去津和硝磺草酮的施用对假俭草的影响发现,2 种除草剂混合后喷施确实比它们单独施用对假俭草的伤害更显著,且生物量减少的幅度也更大^[11]。

竹节草是一种属于禾本科金须茅属的多年生暖季型草种。目前,关于竹节草的研究大多集中在形态学特征^[12-13]、生物防治入侵^[14]、抗逆能力评价^[15-17]以及生态分布^[18]等方面^[19]。我国虽然是其主要分布地区之一,但关于除草剂对竹节草的应用方面的研究报道相对空白。本研究通过对竹节草施用莠去津和硝磺草酮及其交互作用,从生理变化方面研究除草剂喷施所引起的活性氧代谢的变化及除草剂胁迫对抗氧化特性的影响,以期科学施用除草剂以及如何在建植竹节草草坪过程中防除杂草提供理论依据和方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地概况 试验在中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所牧草中心大棚内进行,平均气温最高为 32 ℃,最低为 25 ℃。

1.1.2 试验药剂 供试药剂莠去津(380 g/L,悬浮剂)和硝磺草酮(200 g/L)由广西田园生化股份有限公司提供。

1.2 试验方法

1.2.1 竹节草种植 于 2015 年 6 月,选取带有 3~4 个节的竹节草匍匐枝,扦插到装有沙子:椰糠(80%:20%,体积分数)的塑料管中(塑料管高 20 cm,直径 5 cm,管底穿孔),每个塑料管中扦插 3 个匍匐枝茎段。每天早晚各浇 1 次水,每周施用 2 次复合肥(氮、磷、钾比例为 28:10:7),培养 1 个月左右。

1.2.2 除草剂处理 试验设置 9 个处理,分别为(0+0)、(280+0)、(560+0)、(0+140)、(0+280)、(280+140)、(280+280)、(560+140)、(560+280) g a.i./hm²(莠去津+硝磺草酮,下同),其中以不喷施除草剂为对照,4 次重复。待长出 2~3 个分蘖后选取长势一致的竹节草进行不同除草剂喷施处理。所有处理均用电动喷雾器 374 L/hm²、9504E 扇形喷头进行喷施,24 h 内不浇水。处理后,分别在第 4 天、第 8 天、第 12 天、第 16 天和第 20 天观测记录竹节草叶片的受损

收稿日期:2017-07-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:31260489)。

作者简介:王莹(1990—),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事热带草坪资源评价与利用研究。E-mail: wycandy2013@163.com。

通信作者:王志勇,博士,副教授,从事热带草坪草种质资源遗传多样性与遗传育种研究。E-mail: wangzhiyong7989@163.com。

伤程度(损伤面积占总体的百分比)。在处理 20 d 后收获地上部分,放在 60 ℃烘箱中烘干,直到获得恒质量。根据损伤度观测,选择合适浓度的除草剂进行试验,分别在处理 1、5、8 d 后采集竹节草叶片,进行生理试验测定。

1.2.3 生理指标测定方法 叶绿素含量采用丙酮法测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸比色法测定,超氧化物歧化酶活性采用氮蓝四唑光化还原法测定,过氧化物酶活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶活性采用 KMnO₄ 滴定法测定,超氧阴离子(O₂^{·-})产生速率采用羟胺氧化法测定^[20-21]。

1.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Excel 2003 软件进行数据处理和统计

分析。

2 结果与分析

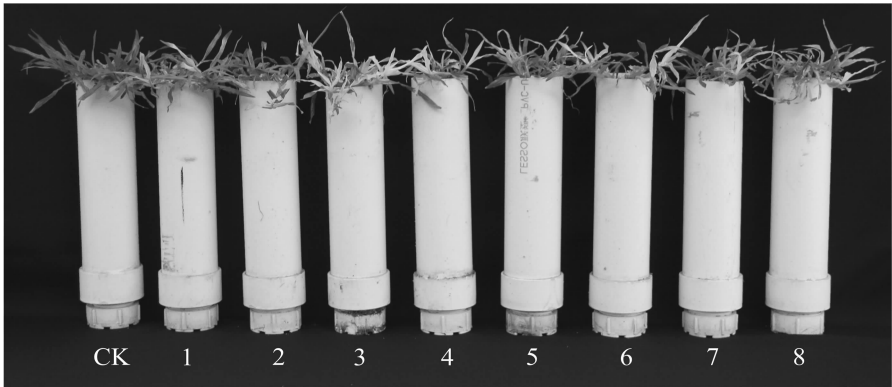
2.1 不同除草剂处理后竹节草叶片损伤度观测

竹节草用不同除草剂不同浓度梯度处理后,分别在不同处理时间观测叶片的损伤度,结果如表 1 所示。用硝磺草酮 140、280 g a. i./hm² 处理后 20 d,竹节草叶片损伤度分别达到 39%、50%。而莠去津 560 g a. i./hm² 和硝磺草酮 280 g a. i./hm² 混合施用后 20 d 时,竹节草的损伤度达到 87%,与其他处理后 20 d 差异显著($P < 0.05$)。图 1 为处理 12 d 后植株表型。

表 1 不同除草剂处理对竹节草叶片损伤度的影响

除草剂浓度(g a. i./hm ²)		损伤度(%)					地上部分干质量占对照比例(%)
莠去津	硝磺草酮	第 4 天	第 8 天	第 12 天	第 16 天	第 20 天	
280	0	1 ± 1b	1 ± 1f	0 ± 0g	0 ± 0f	0 ± 0g	77 ± 6a
560	0	3 ± 1ab	3 ± 2ef	3 ± 0f	1 ± 1f	0 ± 0g	64 ± 9b
0	140	2 ± 1ab	6 ± 2de	15 ± 1e	28 ± 4e	39 ± 4f	54 ± 3c
0	280	3 ± 0ab	9 ± 2cd	21 ± 1d	36 ± 3d	50 ± 4e	48 ± 2cd
280	140	3 ± 1ab	10 ± 2bc	25 ± 3c	50 ± 2c	60 ± 4d	40 ± 5de
280	280	4 ± 1ab	13 ± 2b	27 ± 3bc	55 ± 1b	68 ± 2c	37 ± 3e
560	140	3 ± 1ab	18 ± 3a	29 ± 1b	57 ± 4b	73 ± 1b	35 ± 8e
560	280	5 ± 1a	20 ± 2a	43 ± 1a	62 ± 3a	87 ± 4a	30 ± 5f

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。



1—(280+0) g a. i./hm²; 2—(560+0) g a. i./hm²; 3—(0+140) g a. i./hm²; 4—(0+280) g a. i./hm²; 5—(280+140) g a. i./hm²; 6—(280+280) g a. i./hm²; 7—(560+140) g a. i./hm²; 8—(560+280) g a. i./hm²

图 1 不同除草剂处理 12 d 后竹节草叶片表型对比

在处理 20 d 获取地上部,烘干称质量,结果表明,单独施用莠去津 280、560 g a. i./hm²,随着莠去津施用浓度的增加,地上部干质量所占对照比例减少;单独施用硝磺草酮 140、280 g a. i./hm²,地上部干质量相比对照分别减少 46%、52%。而莠去津和硝磺草酮混合施用与莠去津单独施用相比,地上部分干质量减少差异显著($P < 0.05$)。

2.2 不同除草剂处理后竹节草叶片中叶绿素 a 含量的变化

由图 2 可知,相同除草剂处理后竹节草叶片中叶绿素 a 含量随着处理时间的增加而下降。处理后 1 d,相比对照,单独施用莠去津 280 g a. i./hm² 比单独施用硝磺草酮和两者混合施用,叶绿素 a 含量下降最少;在处理 5、8 d,竹节草叶片中叶绿素 a 含量相比于对照下降约 1 倍。单独施用硝磺草酮竹节草叶片中叶绿素 a 含量显著低于单独施用莠去津($P < 0.05$)。正如预期,硝磺草酮和莠去津混合施用能够更有效

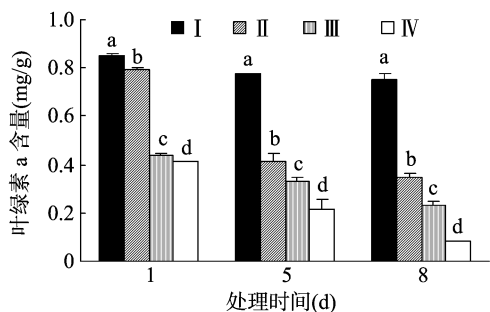
地降低竹节草叶片中叶绿素 a 含量,处理后 1、5、8 d 分别比对照减少 53%、69%、89%。

2.3 不同除草剂处理后竹节草叶片中叶绿素 b 含量的变化

由图 3 可知,和叶绿素 a 含量一样,喷施除草剂的竹节草叶片中叶绿素 b 含量相比对照随着处理时间的增加而减少。处理后 8 d,单独施用莠去津 280 g a. i./hm² 使竹节草叶片中叶绿素 b 含量比对照减少 45%,单独施用硝磺草酮 140 g a. i./hm² 使其含量比对照减少 57%。2 种除草剂的混合施用使竹节草叶片中叶绿素 b 含量减少得最明显。

2.4 不同除草剂处理后类胡萝卜素含量的变化

由图 4 可知,竹节草叶片中类胡萝卜素的含量相比于对照随着除草剂处理时间的增加而逐渐减少。单独施用硝磺草酮 140 g a. i./hm² 比单独施用莠去津 280 g a. i./hm² 能更有效地降低竹节草叶片中类胡萝卜素含量。莠去津和硝磺草酮



I—CK; II—莠去津 280 g a.i./hm²; III—硝磺草酮 140 g a.i./hm²; IV—莠去津 280 g a.i./hm²+硝磺草酮 140 g a.i./hm²。每组数据上不同小写字母表示不同处理在处理相同时间内, 叶绿素 a 含量在 0.05 水平上显著差异, 下同

图2 不同除草剂处理后竹节草叶绿素 a 含量的变化

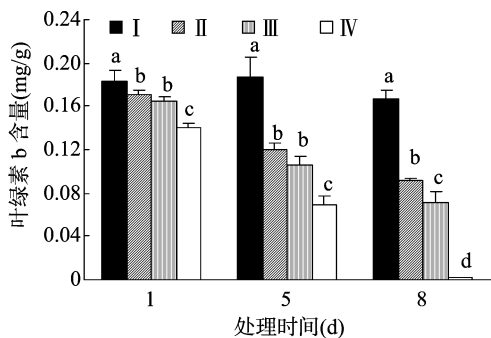


图3 不同除草剂处理后竹节草叶片中叶绿素 b 含量的变化

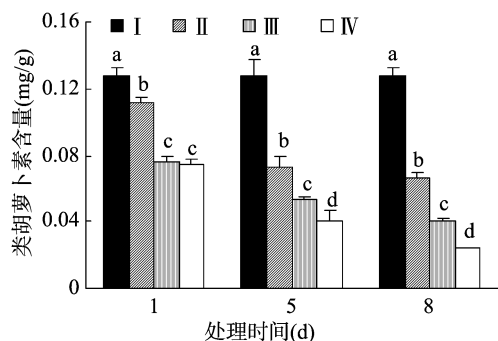


图4 不同除草剂处理后竹节草叶片中类胡萝卜素含量的变化

混合施用减少竹节草叶片中类胡萝卜素含量更为明显, 处理后 8 d, 竹节草叶片中类胡萝卜素含量为 0.024 mg/g。

2.5 不同除草剂处理后竹节草叶片中 MDA 含量的变化

由图 5 可知, 除草剂处理后 MDA 含量相比对照均明显增加。单独施用莠去津 280 g a.i./hm², MDA 含量比对照在处理 1、5 d 时分别增加 5%、32%。处理后 8 d, 单独施用硝磺草酮 140 g a.i./hm² 和单独施用莠去津 280 g a.i./hm² MDA 含量相似, 相比对照分别增加了 15% 和 13%。莠去津和硝磺草酮混合施用处理后竹节草的 MDA 含量显著高于单独施用莠去津时的 MDA 含量。

2.6 不同除草剂处理后竹节草叶片中超氧阴离子 (O₂⁻) 产生速率的变化

由图 6 可知, 单独施用莠去津 280 g a.i./hm² 和单独施用硝磺草酮 140 g a.i./hm², 竹节草叶片中超氧阴离子产生速率相近。与对照相比, 莠去津和硝磺草酮混合施用后 5、8 d, 超氧阴离子产生速率相比对照分别增加 41%、37%, 2 种

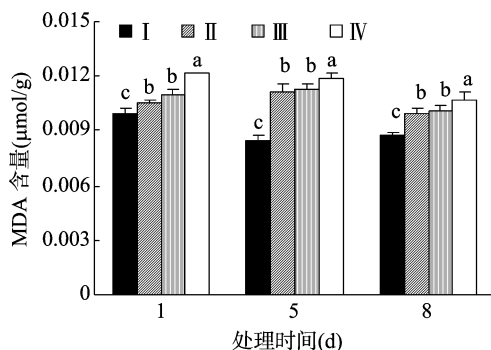


图5 不同除草剂处理后竹节草叶片中 MDA 含量的变化

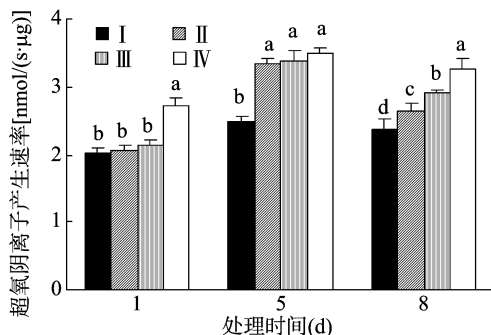


图6 不同除草剂处理后竹节草叶片中超氧阴离子产生速率的变化

除草剂混合施用效果最为明显。

2.7 不同除草剂处理后 POD 活性的变化

除草剂处理后, 竹节草叶片中 POD 活性相比于对照随着处理时间的增加而逐渐增强。处理后 1 d, 莠去津 280 g a.i./hm² 和硝磺草酮 140 g a.i./hm² 混合施用使竹节草叶片中 POD 活性显著增强, 比对照增加 52%。处理后 8 d, 莠去津、硝磺草酮及其混合施用使竹节草叶片中 POD 活性分别增加 50%、53%、60%。莠去津和硝磺草酮混合施用使竹节草叶片中的 POD 活性显著高于单独施用莠去津或硝磺草酮 ($P < 0.05$, 图 7)。

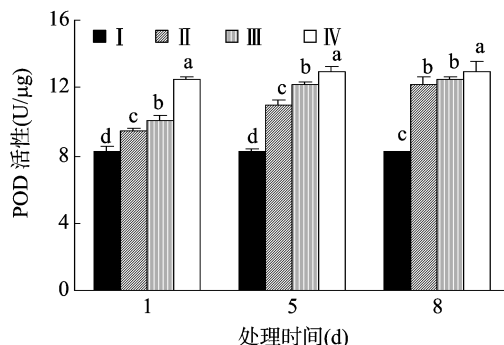


图7 不同除草剂处理后竹节草叶片中 POD 活性的变化

2.8 不同除草剂处理后竹节草叶片中 SOD 活性的变化

由图 8 可知, 除草剂处理后竹节草叶片中 SOD 活性都高于对照。随着处理时间的延长, 未处理竹节草叶片中 SOD 活性保持基本稳定, 除草剂处理后竹节草叶片中 SOD 活性随之增强。处理后 8 d, 莠去津、硝磺草酮及其混合施用使竹节草叶片中的 SOD 活性分别增加 44%、55%、63%, 且 SOD 活性从大到小为莠去津和硝磺草酮混合施用 > 硝磺草酮单独施用 > 莠去津单独施用 ($P < 0.05$)。

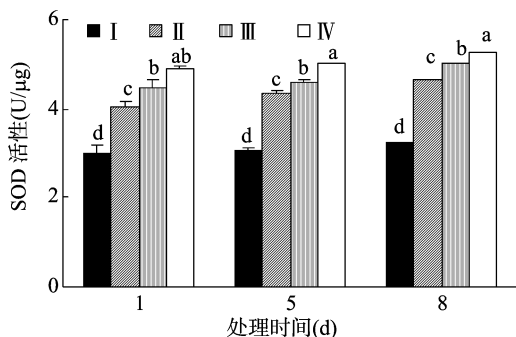


图8 不同除草剂处理后竹节草叶片中 SOD 活性的变化

2.9 不同除草剂处理后竹节草叶片中 CAT 活性的变化

由图 9 可知,单独施用莠去津或者硝磺草酮没有引起竹节草叶片中 CAT 活性的显著变化。处理后 1、5、8 d,莠去津和硝磺草酮混合施用使竹节草叶片中 CAT 活性分别增加 26%、21%、16%。

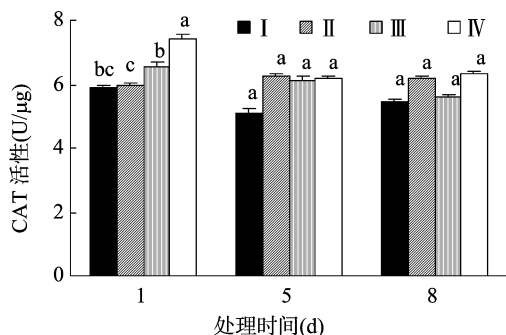


图9 不同除草剂处理后竹节草叶片中 CAT 活性的变化

3 结论与讨论

在竹节草旺盛生长时期,喷施莠去津对其生长状态影响不大,硝磺草酮比莠去津对竹节草的伤害更大。在用硝磺草酮处理后,竹节草叶片中的叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量比用莠去津处理后减少的幅度更大,这可能与缺少了类胡萝卜素保护植物抵御 ROS 有关。叶绿素 a 含量的减少可能与光系统 II (PS II) 反应中心的 D1 蛋白被 ROS 破坏相关。ROS 通常能够被 α -生育酚、类胡萝卜素和抗氧化酶抑制^[22]。 α -生育酚是最有效的抗氧化剂,能够迅速地 ROS 包括单线态氧与脂质过氧化自由基产生反应^[23]。 β -胡萝卜素是除了单线态氧之外的三线态叶绿素有效淬灭剂^[1]。然而,硝磺草酮阻碍了这些保护物质的生成^[24],导致脂质过氧化作用的发生及色素和蛋白质被降解。

由于总类胡萝卜素含量的减少,过多的能量不能被有效地驱散,结果会产生三线态叶绿素,而电子被转移到分子氧上,从而生成 ROS。相反,ROS 会攻击类囊体膜和原生质体膜,导致脂质过氧化作用和细胞膜损伤^[1]。细胞膜特别是类囊体膜,很容易发生脂质过氧化反应,因为它们含有高浓度的不饱和脂肪酸^[22],而不饱和脂肪酸能够被完全降解为乙烷和 MDA。因此,MDA 可以作为细胞膜结构完整性的良好标志^[23]。在本研究中,脂质过氧化反应水平与除草剂处理后竹节草的敏感性是一致的。在以前的研究中,意大利黑麦草在用莠去津处理后,其嫩枝中的 MDA 含量显著增加,而在小麦

中 MDA 含量则没有增加^[25]。

SOD 是细胞内清除 ROS 系统中的重要酶,对维持植物体内活性氧产生和清除的动态平衡起着重要的作用,从而使植物细胞免受伤害^[26]。POD 可有效地清除各种逆境胁迫下植物体内产生的过氧化产物,以降低其对植物自身的毒害,保证植物能够进行正常的生长代谢。CAT 是调控 H_2O_2 含量最重要的酶^[27],而用硝磺草酮处理后的竹节草抗氧化活性(CAT、SOD 和 POD)还没有被报道过。笔者所在课题组的研究结果显示,莠去津与硝磺草酮处理影响了这些酶的活性。在温室试验中,内源性酶的活性通常表现出与植物损伤度相反的关系,表明抗氧化酶被激活,以抵消除草剂处理后的氧化胁迫。然而,严重的细胞损伤仍然会发生,因为 ROS 的形成超过了抗氧化防御系统的抵御能力。

硝磺草酮属于对 HPPD 抑制剂类除草剂,莠去津和硝磺草酮混合施用能够显著增加竹节草的损伤度,说明莠去津对 HPPD 抑制剂有增效作用。竹节草对莠去津耐受,但是对硝磺草酮敏感,因此可以选择莠去津来去除竹节草草坪中对莠去津敏感的杂草。

参考文献:

- [1] 张怡,路铁刚. 植物中的活性氧研究概述[J]. 生物技术进展, 2011,1(4):242-248.
- [2] 刘家忠,龚明. 植物抗氧化系统研究进展[J]. 云南师范大学学报,1999,19(6):1-11.
- [3] Lascano H R, Melchiorre M N, Luna C M, et al. Effect of photooxidative stress induced by paraquat in two wheat cultivars with differential tolerance to water stress[J]. Plant Science, 2003, 164(5):841-848.
- [4] McCord J M. Superoxide radical: controversies, contradictions, and paradoxes[J]. Experimental Biology and Medicine, 1995, 209(2): 112-117.
- [5] 胡国霞,马莲菊,陈强,等. 植物抗氧化系统对水分胁迫及复水响应研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1278-1280.
- [6] 张一宾. HPPD 抑制剂类除草剂及其市场开发进展[J]. 现代农药, 2013, 12(5): 5-8.
- [7] 杨娜,孙健,吴翠霞,等. 除草剂新作用靶标——HPPD 综述[J]. 农药研究与应用, 2009, 13(2): 13-16.
- [8] 赵李霞,叶非. HPPD 抑制剂的机理与应用进展[J]. 植物保护, 2008, 34(5): 12-16.
- [9] 袁传卫,姜兴印. 光合作用抑制性除草剂的研究[J]. 农药科学与管理, 2014, 35(4): 23-27.
- [10] 苏旺苍,孙兰兰,吴仁海,等. 中国植物保护学会学术年会论文集[C]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2014: 306-313.
- [11] McElroy J S, Walker R H. Effect of atrazine and mesotrione on centipede grass growth, photochemical efficiency, and establishment[J]. Weed Technology, 2009, 23(1): 67-72.
- [12] Stone B C. The flora of Guam[M]. Micronesica; University of Guam, 1970.
- [13] Wagner W L, Herbst D R, Sohmer S H. Manual of the flowering plants of Hawaii[M]. Honolulu: University of Hawaii Press, 1999.
- [14] Space J C, Flynn T. Observations on invasive plant species in American Samoa[M]. Honolulu: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Institute of Pacific Islands Forestry, 2000.

杨 威, 闫海霞, 张贝贝, 等. 施用微生物菌肥“宁盾”对辣椒根围细菌多样性及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 99–103. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.09.022

施用微生物菌肥“宁盾”对辣椒根围细菌多样性及土壤酶活性的影响

杨 威¹, 闫海霞², 张贝贝¹, 张温馨¹, 郭坚华³, 罗玉明¹

(1. 淮阴师范学院生命科学院/江苏省环洪泽湖生态农业生物技术重点实验室, 江苏淮安 223300;

2. 江苏省淮安市农业技术推广中心, 江苏淮安 223300; 3. 南京农业大学植物保护学院, 江苏南京 210095)

摘要:根据本地区设施种植特点, 选择红优 4 号、马六、好农 50、苏椒 5 号等 4 个辣椒品种, 检测微生物菌肥“宁盾”的使用对辣椒根围细菌多样性及根围土壤主要土壤酶活性和土壤养分的变化情况。发现“宁盾”中主要成分芽孢杆菌能够稳定定殖, 且随着生长期的延长, 处理组与对照组中根围细菌的多样性逐渐呈现差异化; 与对照组相比, 处理组在 3 个采样时间点, 土壤脲酶活性、磷酸酶活性、纤维素酶活性、过氧化氢酶活性均高于对照组; 水解性氮含量、速效磷含量、速效钾含量及有机质含量均高于对照组, 且随着生长期的延长几种主要养分含量的提高幅度基本呈上升趋势。土壤酶活性及土壤中养分含量变化在不同辣椒品种之间差异不明显。

关键词:微生物菌肥; “宁盾”; 根围细菌多样性; 土壤酶活性; 土壤养分; 营养指标测定

中图分类号: S154.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)09-0099-05

淮安红椒产自我国地理南北分界线特定的江苏省淮安市辖区内, 已有近 30 年的发展历史, 先后荣获“国家地理标志证明商标”“江苏省名牌农产品”等殊荣。近年来, 淮安红椒生产呈现出快速发展的态势, 截至 2010 年, 淮安市大棚红椒种植面积达 1.4 万 hm^2 , 占全市设施蔬菜面积的 36.2%。全

市年产红椒 45 万 t 以上, 年销售收入超过 23 亿元^[1-2]。在快速发展的同时, 淮安红椒在种植过程中也存在一系列问题。如规模经营比例较小、无公害标准化生产技术难以推广以及滥用农药现象较多, 产品质量存在安全隐患。其中, 特别是在病虫害的防治过程中, 化学农药的大量使用, 对食品安全, 品牌效应的提升等产生了严重的阻碍。其中, 在淮安红椒的生产过程中, 尤以疫病的发生最为严重。辣椒疫病是由辣椒疫霉 (*Phytophthora capsici* Leon) 引起的一种毁灭性病害, 一般田间发病率为 5%~65%, 平均发病率达 24.4%, 发病严重的可减产 40%~70%, 甚至绝收^[3]。对辣椒疫病的防治方法主要包括种植抗病品种、农业防治、化学防治、生物防治。抗病品种使用较少, 最常使用的防治方法是化学防治, 主要药剂包括

收稿日期: 2016-12-03

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(编号: BE2015364)。

作者简介: 杨 威(1983—), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 主要从事生物防治研究。E-mail: yangw107@gmail.com。

通信作者: 罗玉明, 教授, 主要从事设施连作障碍研究。Tel: (0517) 83525128; E-mail: yumingluo@163.com。

[15] 廖 丽, 张 静, 吴东德, 等. 竹节草种质资源耐盐性初步评价[J]. 热带作物学报, 2014, 35(10): 1905–1911.

[16] 张 静, 廖 丽, 张欣怡, 等. 竹节草对铝胁迫响应及临界浓度筛选[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1498–1502.

[17] 廖 丽, 蒋仁娇, 刘建秀, 等. 竹节草种质资源抗寒性初步评价研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 234–240.

[18] Smith A C. Flora vitiensis nova; a new flora of Fiji[M]. Hawaii: National Tropical Botanical Garden, 1979.

[19] 郑玉忠, 席嘉宾, 杨中艺. 中国竹节草野生种质资源调查及生物学特性研究[J]. 草业学报, 2005, 14(3): 117–122.

[20] 李合生. 植物生理生化实验技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 123–212.

[21] 周祖富, 黎兆安. 植物生理学实验指导[M]. 南宁: 广西大学, 2005: 102–117.

[22] Zhang F, Yu J, Johnston C R, et al. Seed priming with polyethylene glycol induces physiological changes in *Sorghum* (*Sorghum bicolor* L. Moench) seedlings under suboptimal soil moisture environments [J]. PLoS One, 2015, 10(10): 1–15.

[23] Dan H F. Light-dependent herbicides: an overview [J]. Weed Science, 2000, 48(2): 160–170.

[24] Triantaphylides C, Havaux M. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling [J]. Trends in Plant Science, 2009, 14(4): 219–228.

[25] Del B D, Ioli G, Nasini L, et al. A comparative study on the interference of two herbicides in wheat and Italian ryegrass and on their antioxidant activities and detoxification rates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(22): 12109–12115.

[26] Rubinstein A, Colantonio L, Bardach A, et al. Estimation of the burden of cardiovascular disease attributable to modifiable risk factors and cost-effectiveness analysis of preventative interventions to reduce this burden in Argentina [J]. BMC Public Health, 2010, 10(1): 627.

[27] Peixoto F P, Gomes-Laranjo J, Vicentet J A, et al. Comparative effects of the herbicides dicamba, 2,4-D and paraquat on non-green potato tuber calli [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(11): 1125–1133.