

杨颜熙,耿珍珍,郭伟,等.施硅对稻田稗草光合及生理特性的影响[J].江苏农业科学,2017,45(11):73-76.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.019

施硅对稻田稗草光合及生理特性的影响

杨颜熙,耿珍珍,郭伟,李晴,李亮亮

(沈阳农业大学,辽宁沈阳 110866)

摘要:以稗草为试验材料,研究不同浓度硅(60、120、180、240、300 kg/hm²,以 SiO₂ 计)处理下对稗草光合、生理特性的影响。结果表明,在分蘖期、拔节期随着施硅量的增加,稗草的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性均呈先上升后下降的趋势;在盛花期、结实期随着施硅量的增加 SOD、POD 活性呈先上升后下降的趋势,稗草叶片胞间 CO₂ 浓度(C_i)、 G_s 差异不显著;盛花期丙二醛(MDA)含量随着 Si 浓度的增加先降低后升高,结实期施硅量为 Si₅(300 kg/hm²)时稗草叶片 MDA 含量达到最大。结果说明,一定浓度的外源硅可提高稗草叶片的光合特性,增强酶活性,减缓膜脂过氧化损伤,此外稗草在 180 kg/hm² Si 浓度下长势最好,在 300 kg/hm² Si 浓度下长势最差。

关键词:硅肥;稗草;净光合速率;抗氧化酶

中图分类号:S451 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)11-0073-03

稗草(*Echinochloa crusgalli*)为禾本科稗属的一年生草本植物,被公认为全球分布最广的恶性杂草^[1-2]。由于其株型、养分需求、生育期等生物学特性与水稻极其相似,二者具有激烈的生存竞争^[3]。李海波等研究发现,水稻辽梗 9 与稗草共生后,根区土壤微生物生物量、碳含量、土壤脱氢酶活性均显著降低^[4]。已有研究表明,稗草已经成为稻田的主要杂草,若 1 m² 的水稻田中夹杂有 1 株稗草,水稻会减产 11.6%^[5]。

近年来研究表明,施硅(Si)有利于水稻籽粒中蛋白质、淀粉的形成,促使籽粒饱满^[6]。水稻田施入硅肥可以提高产量,硅能促进植株生长,能改善植株的矿质营养吸收^[7]。蔡德龙等研究发现,水稻施硅可以减小小叶夹角,叶片直立形成良好的株型,提高光能利用率,提高水稻的整体光合能力,提高剑叶光合速率^[8]。崔德杰等认为施硅可以减小冬小麦午休“谷值”,提高光合作用^[9]。谢志明研究发现,玉米施硅后在表皮细胞外壁沉积很多,气孔蒸腾降低,蒸腾速率显著低于不施硅玉米^[10]。硅可以提高植物的抗盐性,硅通过参与植物的生理生化代谢,保持细胞膜的完整性与稳定性,对钠、钾离子能选择性地吸收,以提高植物的抗盐性^[11-12]。刘慧霞等发现,盐生境下对坪用高羊茅施用一定量的硅可提高出苗时间,增加株高、分蘖数、高羊茅叶长、生物量,提高了坪用高羊茅的抗盐性^[13]。施硅可以改变盐胁迫下玉米幼苗的生理生长状况,提高玉米幼苗叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性、减少丙二醛(MDA)含量、增加抗坏血酸和叶绿素含量、增强光合速率、增加玉米幼苗的耐盐性。本试验主要从光合及生理特性层面研究施硅对稗草的影响,以此来揭示稗草对硅的适应机制,为今后稗草的研究提供生理方面的依据。

收稿日期:2016-11-25

基金项目:国家重大科技专项(编号:2014ZX07201-009-04)。

作者简介:郭伟(1973—),男,辽宁沈阳人,博士,副教授,研究方向为植物种群生态学。E-mail:guowei-233@163.com。

通信作者:李亮亮,博士,副教授,研究方向为农业环境生态研究。

E-mail:LLL204600@163.com。

1 材料与方法

1.1 试验材料

稗草种子采自沈阳地区周边稻田。土壤基本理化性质:pH 值为 6.89、有机质含量为 12.3 g/kg、全磷含量为 0.147%、全钾含量为 1.224%、全氮含量为 0.163%。

1.2 试验设计

试验场地设在沈阳农业大学后山,于 2015 年 5 月中旬播种,采用盆栽的试验方法,盆直径为 30 cm,高为 26 cm,每盆装土 14 kg,每盆 1 穴。硅肥设置 6 个处理水平(以 SiO₂ 计),分别为对照:0 kg/hm²,Si₁:60 kg/hm²,Si₂:120 kg/hm²,Si₃:180 kg/hm²,Si₄:240 kg/hm²,Si₅:300 kg/hm²,每个处理水平 3 次重复。供试硅肥为九水偏硅酸钠。施氮肥(按纯 N 量计)225.0 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)79.5 kg/hm²,钾肥(K₂O)63.0 kg/hm²。所有肥料在播种前一次性施入,采用人工浇水保证各盆施水量相同,雨天盖棚。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 光合指标测定 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)的测定利用 CIRAS-3 便携式光合仪(美国)。在阳光充足的晴天,于分蘖期、拔节期、盛花期、结实期从 9:00—11:30 随机选取完全展开的叶片,生长健康、代表性强的植株,测其离地面 2/3 高度处叶片的净光合速率[设定光强为 1 200 μmol/(m²·s),温度为 28 ℃,CO₂ 浓度为 390 μmol/mol]。

1.3.2 生理指标的测定 丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法;超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用 NBT 光化还原法测定,以 NBT 光还原被抑制 50% 所加入的酶量作为 1 个酶活性单位;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法,以 1 min 内 D_{470 nm} 变化 0.01 为 1 个酶活性单位^[14]。

1.4 数据处理与分析

试验结果均为 3 次以上平行数据的均值 ± 标准差,利用 SPSS 22.0 软件、Duncan's 新复极差法对数据进行多重比较,

不同处理下的各参数进行显著性检验, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同供硅条件下稗草光合特性的变化

由表 1 可知,在稗草的整个生长期中每个处理浓度下分蘖期、拔节期 P_n 变化幅度不大,从拔节期到结实期 P_n 表现为下降。 C_i 、 G_s 、 T_r 呈先上升后下降的趋势,结实期的 G_s 最低, T_r 的最大值出现在盛花期。分蘖期,在 Si_3 处理下的 C_i 最高,显著高于 CK、 Si_1 、 Si_2 、 Si_4 处理; P_n 呈先上升后下降的趋势,在 Si_3 处理下达到最大值,显著高于除 Si_4 处理外的其他处理, Si_5 处理下 P_n 最小且显著低于对照; G_s 随施硅量的增加呈先上升后下降的趋势, Si_3 处理下的 G_s 达到最大值,且显著高于其他处理; T_r 随施硅量的增加呈先上升后下降的趋

势, Si_3 处理下的 T_r 显著高于其他处理。拔节期不同浓度硅处理下的 C_i 差异不显著; P_n 大体上呈先增加后下降的趋势, Si_1 、 Si_3 、 Si_4 、 Si_5 处理下的 P_n 显著高于对照, Si_2 处理与对照差异不显著, Si_3 处理下的 P_n 达到最大; G_s 随施硅量的增加先升高后下降,在 Si_3 处理下达到最大并显著高于其他处理,其他各处理间差异不显著; T_r 随施硅量的增加先上升后降低, Si_1 处理下 T_r 达到最大值,显著高于 Si_3 、 Si_4 、 Si_5 ,与 Si_2 处理差异不显著。盛花期不同浓度硅处理的 C_i 、 G_s 、 T_r 差异不显著;随着施硅量的增加 P_n 整体呈先增加后下降的趋势,在 Si_3 处理下达到最大值, Si_1 、 Si_3 、 Si_4 、 Si_5 处理下叶片的 P_n 显著高于对照。结实期不同硅处理下叶片 C_i 、 G_s 之间差异不显著, Si_4 处理下的 P_n 最大且显著高于对照;施硅量达到最大时 (Si_5) 叶片的 T_r 最大,显著高于 Si_1 、 Si_2 、 Si_3 。

表 1 不同供硅条件下稗草的光合性能

| 时期 | 浓度 | 净光合速率(P_n) [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] | 气孔导度(G_s) [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] | 蒸腾速率(T_r) [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] | 胞间 CO_2 浓度(C_i) ($\mu\text{mol}/\text{mol}$) |
|-----|--------|---|--|--|--|
| 分蘖期 | CK | 31.26 \pm 1.63c | 258.33 \pm 45.65b | 3.15 \pm 0.24b | 167.00 \pm 4.04bc |
| | Si_1 | 33.83 \pm 0.16bc | 309.33 \pm 5.69b | 3.27 \pm 0.02b | 163.33 \pm 2.02c |
| | Si_2 | 36.36 \pm 1.41bc | 363.00 \pm 50.24b | 3.45 \pm 0.33b | 171.00 \pm 18.00abc |
| | Si_3 | 39.90 \pm 1.51a | 529.00 \pm 32.25a | 4.53 \pm 0.22a | 209.00 \pm 4.16a |
| | Si_4 | 35.83 \pm 2.43abc | 336.66 \pm 14.14b | 3.73 \pm 0.27b | 165.60 \pm 15.55bc |
| | Si_5 | 25.63 \pm 0.68d | 291.66 \pm 40.30b | 3.04 \pm 0.25b | 205.00 \pm 15.87ab |
| 拔节期 | CK | 31.70 \pm 0.10c | 420.67 \pm 19.53b | 4.15 \pm 0.10c | 220.00 \pm 5.03a |
| | Si_1 | 33.23 \pm 1.05ab | 449.00 \pm 51.47b | 5.66 \pm 0.23a | 215.00 \pm 19.39a |
| | Si_2 | 31.60 \pm 0.83c | 557.33 \pm 39.87b | 5.13 \pm 0.16ab | 249.33 \pm 5.81a |
| | Si_3 | 40.93 \pm 0.88a | 973.33 \pm 127.92a | 5.01 \pm 0.10b | 233.33 \pm 6.96a |
| | Si_4 | 34.70 \pm 1.02b | 458.00 \pm 37.52b | 4.36 \pm 0.33c | 206.67 \pm 14.72a |
| | Si_5 | 32.47 \pm 0.99ab | 380.33 \pm 16.57b | 3.52 \pm 0.08d | 216.00 \pm 34.53a |
| 盛花期 | CK | 22.10 \pm 1.87b | 563.33 \pm 173.95a | 6.15 \pm 0.87a | 275.33 \pm 13.33a |
| | Si_1 | 26.83 \pm 1.22a | 549.33 \pm 40.62a | 6.32 \pm 0.34a | 261.33 \pm 14.81a |
| | Si_2 | 26.26 \pm 0.72ab | 423.66 \pm 42.21a | 5.64 \pm 0.20a | 244.33 \pm 11.56a |
| | Si_3 | 30.66 \pm 1.93a | 729.66 \pm 149.46a | 6.82 \pm 0.54a | 270.00 \pm 7.02a |
| | Si_4 | 30.43 \pm 1.56a | 547.66 \pm 114.04a | 7.05 \pm 0.98a | 265.00 \pm 7.00a |
| | Si_5 | 28.60 \pm 1.00a | 602.66 \pm 22.19a | 6.79 \pm 0.18a | 276.33 \pm 7.83a |
| 结实期 | CK | 12.93 \pm 0.83b | 193.33 \pm 8.74a | 4.56 \pm 0.19ab | 251.33 \pm 6.56a |
| | Si_1 | 14.53 \pm 0.78ab | 200.33 \pm 4.97a | 4.21 \pm 0.95b | 242.66 \pm 5.20a |
| | Si_2 | 13.26 \pm 1.26ab | 199.33 \pm 11.68a | 4.21 \pm 0.23b | 254.66 \pm 9.33a |
| | Si_3 | 12.80 \pm 0.90b | 197.66 \pm 16.49a | 4.07 \pm 0.26b | 258.33 \pm 1.33a |
| | Si_4 | 16.50 \pm 1.13a | 204.66 \pm 50.09a | 4.69 \pm 0.79ab | 247.00 \pm 11.26a |
| | Si_5 | 13.20 \pm 1.06ab | 259.33 \pm 41.95a | 6.05 \pm 0.74a | 270.00 \pm 17.50a |

注:同一时期同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同供硅条件下的稗草 MDA 含量变化

从图 1 可以看出,分蘖期、拔节期不同供硅条件下稗草叶片中 MDA 含量差异不显著。盛花期随着施硅浓度的增加稗草叶片 MDA 含量的变化趋势为先下降后上升, Si_4 处理下稗草叶片的 MDA 含量最小, Si_5 处理下稗草叶片的 MDA 含量最大且显著高于 Si_3 、 Si_4 处理。结实期 Si_1 、 Si_2 、 Si_3 、 Si_4 处理下稗草叶片的 MDA 含量与对照差异不显著, Si_5 处理下稗草叶片的 MDA 含量最大且显著高于对照。

2.3 不同供硅条件下 SOD 活性变化

从图 2 可以看出,随着生长期的延长整体上稗草叶片 SOD 活性呈先上升后下降的趋势,结实期 SOD 活性最低。结实期植物叶片衰老,超氧阴离子自由基积累加大了对细胞的伤害,清除超氧阴离子自由基的能力减弱。分蘖期 Si_4 处理下稗草叶片的 SOD 活性最高, Si_2 、 Si_5 处理下 SOD 活性显著

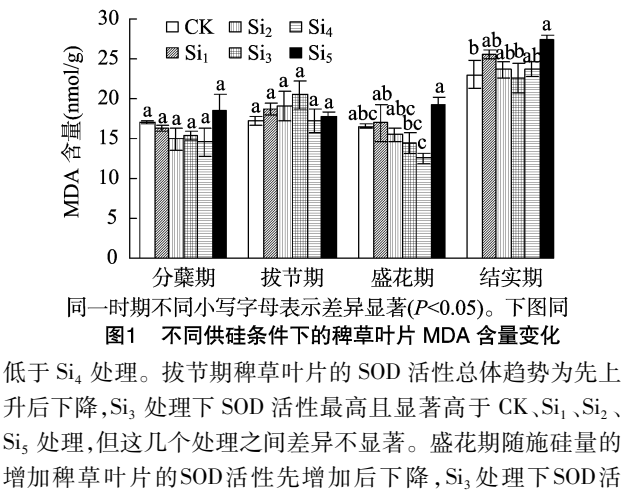


图 1 不同供硅条件下的稗草叶片 MDA 含量变化

低于 Si_4 处理。拔节期稗草叶片的 SOD 活性总体趋势为先上升后下降, Si_3 处理下 SOD 活性最高且显著高于 CK、 Si_1 、 Si_2 、 Si_5 处理,但这几个处理之间差异不显著。盛花期随施硅量的增加稗草叶片的 SOD 活性先增加后下降, Si_3 处理下 SOD 活

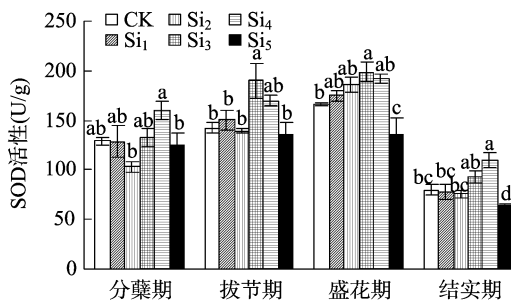


图2 不同供硅条件下稗草叶片 SOD 活性变化

性最高且显著高于对照, Si_5 处理下最低且显著低于其他处理。结实期随着施硅量的增加 SOD 活性整体呈先上升后下降的趋势, Si_4 处理下 SOD 活性最高, 显著高于除 Si_3 处理外的其他处理, Si_5 处理下的 SOD 活性显著低于其他处理。

2.4 不同供硅条件下过氧化物酶 (POD) 活性变化

从图 3 可以看出, 随着生长期的延长不同供硅条件下稗草叶片的 POD 活性整体呈先上升后下降的趋势, 盛花期稗草叶片的 POD 活性达到最大, 结实期 POD 活性快速下降小于其他各个时期。分蘖期随着施硅量的增加稗草叶片的 POD 活性先增加后下降, Si_4 处理下达到最大, Si_5 处理下稗草叶片的 POD 活性最低, 二者之间差异显著。拔节期随着施硅量的增加稗草叶片的 POD 活性先增加后下降, Si_4 处理下达到最大, Si_5 处理下最小, 二者之间差异显著, 但施硅处理和对照相比差异不显著, 这一时期施硅对稗草叶片的 POD 活性影响不显著。盛花期随着硅浓度的提高, 稗草叶片的 POD 活性先增加后下降, Si_4 处理下的 POD 活性达到最大, Si_5 处理下最小, 显著低于其他处理。结实期随着施硅量的增加稗草叶片的 POD 活性呈先增加后下降的趋势, Si_2 、 Si_3 、 Si_4 处理下的 POD 活性显著高于其他处理, Si_4 处理下达到最大, Si_5 处理最小。

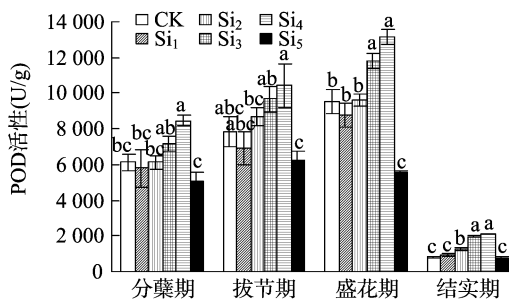


图3 不同供硅条件下稗草叶片的 POD 活性变化

3 结论与讨论

分蘖期, 中浓度的硅有助于增加稗草叶片的 P_n 、 T_n 、 G_s 、 C_i , 高浓度的硅降低了叶片的 P_n ; 拔节期, 中浓度的硅显著增加了稗草叶片的 P_n 、 G_s 。盛花期, 中浓度的硅显著增加了稗草叶片的 P_n 。

在生殖生长期, 中浓度的硅对稗草叶片的 MDA 含量影响不显著, 稗草生长进入结实期, 高浓度的硅增加了稗草叶片的 MDA 含量。稗草进入生殖生长期, 中浓度的硅能明显增加稗草叶片的 SOD 活性; 盛花期、结实期, 高浓度的硅显著降低了稗草叶片的 SOD 活性。在稗草的整个生长时期, 随着施硅量的增加稗草叶片的 POD 活性呈先增加后下降的趋势; 生

殖生长期, 中浓度的硅显著增加了稗草叶片的 POD 活性, 盛花期高浓度的硅显著降低了稗草叶片的 POD 活性。

稗草营养生长期, 中浓度的硅能显著提高稗草叶片的 P_n 、 G_s ; 盛花期, 中浓度的硅能增加稗草叶片的 P_n 。这可能是由于中浓度的硅减小了稗草的叶夹角使叶片直立, 光能利用率提高, 光合速率提高。谢志明研究发现, 在黑土、冲积土中施用硅肥能提高玉米叶片的 P_n 、 G_s [10]。高臣等通过研究硅对水稻叶片光合特性的影响也发现, 施硅能显著提高水稻叶片的 P_n 、 G_s [15], 本研究结果与之相类似。

植物器官衰老或在逆境条件下遭受伤害, 往往伴随膜脂过氧化作用, 其结果是细胞质膜透性增强, 电解质外渗物增多, MDA 含量提高。因此许多研究者常用 MDA 含量评价植物叶片细胞膜发生脂质过氧化作用的强弱。稗草生长前施硅对稗草叶片的 MDA 含量影响不显著, 这与谢志明的研究结果 [10] 一致, 玉米生长前期施硅不能影响玉米叶片的 MDA 含量。结实期, 高浓度的硅显著增加了稗草叶片的 MDA 含量; 结实期, 稗草叶片逐渐衰老, 高浓度的硅加剧了稗草叶片的膜脂过氧化程度和膜系统的伤害程度, 使稗草快速转向衰老。而胡瑞芝等在研究硅对杂交水稻生理指标的影响时发现, 一定量的硅能降低水稻剑叶的 MDA 含量 [16]。

植物在生长过程中会自然生成超氧阴离子自由基 O_2^- , 它是活性氧的一种, 具有超强的氧化能力, 它的积累会对植物细胞造成伤害, 增加膜脂过氧化产物, 使生理生化代谢紊乱, SOD 是天然存在的超氧自由基清除因子, 它通过催化超氧自由基 O_2^- 发生歧化反应生成过氧化氢, 防止膜脂过氧化从而使植物细胞膜免受伤害。盛花期、结实期, 中浓度的硅显著提高了稗草叶片的 SOD 活性; 高浓度的硅, 抑制了稗草叶片的 SOD 活性。在硅对杂交水稻 SOD 活性的影响研究中也发现类似的情况, 一定范围内随着硅浓度的增加水稻叶片的 SOD 活性上升, 超过一定范围 SOD 活性下降 [16]。这可能是由于中浓度的硅使叶片的 SOD 活性增强, 活性氧的清除能力增强, 使稗草叶片的膜结构较长时间内保存完整, 延迟叶片衰老; 高浓度的硅损害了叶片的防御系统, SOD 活性降低。但也有研究表明, 硅对 SOD 活性的影响不显著 [17]。

POD 广泛分布于植物的各个组织器官中, 能够清除活性氧化物代谢中活性氧的积累。POD 能通过分解 H_2O_2 避免细胞膜的过氧化伤害。本试验研究发现, 稗草生殖生长期, 中浓度的硅可以显著提高稗草叶片的 POD 活性, 高浓度的硅显著降低了叶片的 POD 活性。这可能是由于稗草生殖生长期, 中浓度的硅增强了稗草体内的防御体制, 增加了稗草体内的代谢活动, POD 活性增强, 而高浓度的硅造成了防御系统的损害。一些研究也发现施硅能提高作物的 POD 活性, 刘媛等研究发现, 施硅能提高盐胁迫下黄瓜幼苗体内的 POD 活性 [18]。薛高峰等在硅对水稻叶片接种白叶枯病菌的影响研究中发现, 施硅处理下的水稻叶片 SOD 活性高于不施硅处理 [19]。

参考文献:

- [1] 张纪利, 吴 尚, 李保同, 等. 江西省稻田稗草对丁草胺和二氯喹啉酸的抗药性测定[J]. 杂草科学, 2015, 33(3): 29–33.
- [2] 温广月, 钱振官, 李 涛, 等. 上海地区稻田无芒稗对丁草胺抗药性的测定[J]. 杂草科学, 2015, 33(3): 34–36.

王国君,陈利军,熊建伟,等. 对茶树炭疽病病菌具拮抗作用根际促生细菌的分离、筛选及鉴定[J]. 江苏农业科学,2017,45(11):76-78.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.11.020

对茶树炭疽病病菌具拮抗作用根际促生细菌的分离、筛选及鉴定

王国君^{1,2,3}, 陈利军^{1,2}, 熊建伟^{1,2}, 智亚楠¹

(1. 信阳农林学院,河南信阳 464000; 2. 豫南植物有害生物绿色防控院士工作站,河南信阳 464000;

3. 河南省茶产品质量安全控制工程技术研究中心,河南信阳 464000)

摘要:为了筛选出对茶树炭疽病病菌具有拮抗作用的根际促生细菌,从河南省信阳市茶园采集 85 份土样,分离得到 23 株具有拮抗作用的细菌,利用平板对峙法筛选出对胶孢炭疽菌具有较强拮抗作用的 7 株细菌菌株,且其代谢产物对茶树炭疽病病菌的平均抑制率达到 53.20%。依据生理生化特征经初步鉴定,7 株拮抗菌株均隶属于芽孢杆菌属。试验结果为进一步构建多功能植物根际促生菌广适菌群提供菌株资源。

关键词:茶树;炭疽病病菌;拮抗作用;根际促生细菌;筛选

中图分类号: S435.711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)11-0076-03

茶树炭疽病是一种由真菌侵染引起的病害,是常见的茶树叶部病害之一,在我国各产茶区均有发生,山区茶园尤为普遍^[1],该病发病严重时可导致茶树大量落叶,并造成茶树树势衰落和茶叶产量与品质降低,还影响翌年春季茶叶的产量。

收稿日期:2016-08-24

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200905);河南省教育厅高等学校重点科研项目(编号:15A210014);信阳市科技攻关项目(编号:150003)。

作者简介:王国君(1982—),男,辽宁大连人,硕士,讲师,主要从事生物农药的开发与应用。Tel:(0376)6698026;E-mail:wanguojun339@126.com。

通信作者:熊建伟,副教授,主要从事茶树病虫害教学与防治工作。Tel:(0376)6698026;E-mail:xiongjianwei5789@163.com。

目前,茶园主要利用化学药剂防治茶树炭疽病,但长期使用化学药剂会导致病原菌抗药性增强,并可造成农药残留、环境污染等一系列问题。在化肥农药零增长的大背景下,如何开发生物制剂来防治茶树炭疽病尤为重要。植物根际促生菌(plant growth-promoting rhizobacteria,简称 PGPR)指生存于植物根际、根表,并能直接或间接地促进或调节植物生长的微生物^[2],它能够通过多种机制促进植物的生长,目前人们普遍认同的生物学功能主要有拮抗病原菌、诱导系统抗性、改善根际微生态环境等^[3]。国外研究人员已从水稻、小麦、玉米、甘蔗和棉花等作物根际分离筛选出许多高效、优良的促生菌株,并且部分菌株已实现商业化^[4-6]。陈波等分离筛选出对樱桃生长有明显促进作用的假单胞菌属(*Pseudomonas* sp.)^[7];史国英等分离得到 1 株对甘蔗具有促生作用的细菌,

[3]张纪利,吴尚,石绪根,等. 稗草对双季稻生长的影响及其防除经济阈值研究[J]. 草业学报,2015,24(8):44-52.

[4]李海波,孔垂华. 水稻和稗草共生土壤微生物生物量碳及酶活性的变化[J]. 应用生态学报,2008,19(10):2234-2238.

[5]姜敏,郝楠,郭延玲,等. 中国北方水稻与无芒稗化感作用研究[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(4):478-482.

[6]陈刚,罗志祥,施伏芝,等. 一种新型硅肥在两系杂交水稻上的增产效果研究[J]. 中国土壤与肥料,2016,18(2):109-113.

[7]Ma J F, Yama J N. Silicon take and accumulation in higher plants[J]. Trend in Plant Science,2006,11(8):392-397.

[8]蔡德龙,李继明,周敬波,等. 硅肥在杂交水稻上的肥效研究[J]. 地域研究与开发,2002,21(3):75-77.

[9]崔德杰,王月福,刘彦军,等. 冬小麦硅钾肥施用效应的研究[J]. 土壤通报,1999,30(3):121-122.

[10]谢志明. 硅对吉林省不同类型土壤条件下玉米生理特性及产量的影响[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2014.

[11]徐呈祥,刘兆普,刘友良,等. 硅在植物中的生理功能[J]. 植物生理学通讯,2004,40(6):753-757.

[12]束良佐,刘英慧. 硅对盐胁迫下玉米幼苗生长的影响[J]. 作物学报,1999,25(2):172-189.

[13]刘慧霞,郭兴华,郭正刚,等. 盐生境下硅对坪用高羊茅生物学特性的影响[J]. 生态学报,2011,31(23):7039-7046.

[14]邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[15]高臣,刘俊渤,常海波,等. 硅对水稻叶片光合特性和超微结构的影响[J]. 吉林农业大学学报,2011,33(1):1-4.

[16]胡瑞芝,方水娇,陈桂秋,等. 硅对杂交水稻生理指标及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2001,27(5):335-338.

[17]杨艳芳,梁永超,娄运生,等. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及与抗白粉病的关系[J]. 中国农业科学,2003,36(7):813-817.

[18]刘媛,王仕稳,殷俐娜,等. 硅提高黄瓜幼苗抗盐能力的生理机制研究[J]. 西北植物学报,2014,34(5):988-994.

[19]薛高峰,宋阿琳,孙万春,等. 硅对水稻叶片抗氧化酶活性的影响及其与白叶枯病抗性的关系[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(3):591-597.