

2,3-丁二醇诱导草地早熟禾抗褐斑病的生理响应研究

汤振业,马晖玲*

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃省草业工程实验室,中-美草地畜牧业可持续发展研究中心,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】探究2,3-丁二醇(2,3-BD)施用对草地早熟禾的诱导抗病效果。【方法】以草地早熟禾品种公园作为试验材料,2,3-BD为诱导剂,立枯丝核菌为接种病原菌。设置不诱导接菌(w)、诱导接菌(2,3-BD+w)、诱导不接菌(2,3-BD)处理。新型诱导剂2,3-BD进行根部诱导并以草地早熟禾褐斑病菌撒播接菌处理,研究其诱发草地早熟禾的防御反应机制。【结果】2,3-BD诱导提高苯丙烷代谢途径中酶的活性,并改变氧化还原相关酶参与2,3-BD诱导草地早熟禾抗病性的过程。苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性第1天达到最大值,且与对照差异显著。查尔酮异构酶(CHI)活性各时期均高于对照。4香豆辅酶A连接酶(4CL)活性2次升至最高且与对照差异显著($P<0.05$)。超氧化物歧化酶(SOD)活性前期高于对照,第7天受到抑制低于对照,过氧化氢酶(CAT)活性第1天受抑制,之后明显高于对照,过氧化物酶(POD)活性也相应提高。2,3-BD诱导下草地早熟禾体内次生代谢物含量增加,总酚,黄酮和木质素作为抗菌物质参与了草地早熟禾抗病过程。诱导处理草地早熟禾总酚含量在第4天达到最大,为1.12 mg/g,对照为0.94 mg/g。黄酮含量第8天与病原菌侵染相比增加了0.37 mg/g。木质素含量在第8天为0.601 D_{280}/g ,第10天为0.625 D_{280}/g 。【结论】适宜浓度2,3-BD诱导能够引发草地早熟禾抗病相关酶活性变化,产生抗菌物质引起植物抗病生理响应,抵御病原物的侵染。

关键词:草地早熟禾;褐斑病;2,3-丁二醇;诱导;生理响应

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0170-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2025.02.019



草地早熟禾为禾本科多年生根茎型草类,作为一种喜温抗寒植物,适用于运动场和公共场所的美化草种^[1]。修剪能使草坪平整美观,促进草地早熟禾生长且抑制杂草生长,增强其抗高温和耐寒特性。湿热条件下草地早熟禾易黄化萎蔫感染病菌,修剪过的草坪更易受到病原菌侵染^[2]。草地早熟禾褐斑病是由立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)引起的真菌性病害,造成

草坪草死亡形成斑秃状^[3-4]。而传统病害防治常利用化学生物杀菌剂或培育抗病品种抵抗病原物侵染,但由于培育抗病品种周期长,更新换代快,且病原菌分化速度快,易导致新型品种难以及时作出反应^[5]。

植物诱导抗病性是通过物理、化学或生物方法对植物进行刺激处理改变植物对病原菌侵染的反应^[6],使植物于原先感病部位产生系统抗性或未感病部位产生抗性^[7]。高等植物在与病原物协同进化过程中已形成自身抗病机制,但由于某种因素影响了其抗病潜能,研究者需找到合适的诱导因子,增强其抗性,使其能够抵御病原物侵害^[8]。诱导剂能使植物产生抗性,且与化学药剂相比对生态环境的影响相对较小,且作用时间长、防治效果好,对人体无害^[9]。

2,3-BD是一种重要的化工原料和染料,通常应用

收稿日期:2023-03-22;修回日期:2023-05-25

基金资助:国家自然科学基金项目(31360583)

作者简介:汤振业(1997-),男,贵州惠水人,硕士研究生。

E-mail:2973962067@qq.com

*通信作者,研究方向为草坪草种质资源及育种。

E-mail:mahl@gsau.edu.cn

于化工食品及航空领域,为无色透明液体^[10],不仅作为化工用品,还能作为诱导剂诱导植物抗病^[11],刘兴菊等^[12]用250 $\mu\text{mol/L}$ 的2,3-BD诱导匍匐剪股颖,其病情指数显著降低至21.63%。房媛媛^[13]用2,3-BD与2R,3R-BD处理匍匐剪股颖能够降低其接菌后的病叶率。有关诱导抗性研究已时间较长,应用与开发已经趋于完善。王蕊^[14]以烟草浸提液对番茄早疫病进行诱导发现烟草根、茎、叶浸提液对番茄早疫病有诱导抗性效果,烟草浸根提取液诱导番茄抗病效果最佳。焦文哲等^[15]研究水杨酸对葡萄霜霉病诱导抗性作用,得出巨峰葡萄离体叶片上浓度为1.0 mmol/L的SA诱导效果达100%,美人指葡萄离体叶片上浓度为0.5 mmol/L的SA诱导效果达97.9%。0012“多肽保”可使水稻南方黑条矮缩病发病率降低31.9%~50.2%^[16]。而尤升波^[17]用果胶酶粗酶液诱导烟草抗烟草花叶病毒(TMV),发现果胶酶诱导病斑抑制率达50%,再次诱导处理能提高烟草抗TMV效果,使果胶酶诱导烟草产生对TMV的系统获得抗性。

李祖明^[18]以碱性果胶酶诱导黄瓜抗病得S-4的碱性果胶酶,对茎上黑星病诱导防病效果达86.6%,说明碱性果胶酶对黄瓜黄化苗具有诱导抗病作用且效果显著。SA通过提高草莓中抗性相关酶活性和叶片FaCHI、FaGLU、FaPR1基因相对表达量增强草莓抗病性^[19]。而不同浓度 CaCl_2 诱导花生叶片,能使花生积累更多木质素和总酚抗花生叶斑病, CaCl_2 诱导并接种处理花生,叶片的PAL、PPO及POD活性显著升高^[20]。不同浓度Me/JA处理能提高草地早熟禾抗病性,增强其体内组织含水量、脯氨酸含量、叶绿素含量和可溶性糖含量以及SOD、POD、CAT、PPO与PAL活性^[21]。各种诱导剂诱导植物抗病研究均显示,其通过影响植物体内抗病酶活性变化、基因调节与表达和抗病蛋白合成来抵御病菌侵害。鉴于相关研究基础,本试验通过2,3-BD诱导草地早熟禾并接种褐斑病菌,探讨2,3-BD诱导处理后草地早熟禾苯丙烷代谢途径相关酶、氧化还原酶活性与次生代谢物质含量变化,分析2,3-BD诱导接菌后草地早熟禾植株体内PAL、CHI、4CL、SOD、POD、CAT活性与总酚、黄酮、木质素变化情况,为进一步明晰2,3-BD诱导草地早熟禾抗病机制提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试草地早熟禾种子由北京克劳沃集团提供。

供试草地早熟禾褐斑病菌为立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*),购自中国科学院菌种保存中心。

供试诱导剂2,3-BD购自Sigma。

1.2 试验方法

病原菌制备:将500 g完全湿润的麦粒进行3次灭菌,接入立枯丝核菌PDA生长物,混匀后于28 $^{\circ}\text{C}$ 下培养两周,待到麦粒均匀长满菌丝之后,将长满菌丝的麦粒倒入托盘中在通风处完全晾干后进行粉碎呈粉末状,4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱冷藏备用。

1.3 育苗处理

供试材料为早熟禾品种公园,试验设置3个处理:诱导接菌;不诱导接菌;诱导不接菌。每个处理4次重复,将筛选好的草地早熟禾种子用蒸馏水浸泡2 h,之后用75%的酒精浸泡3 min,10%次氯酸钠浸泡15 min,无菌水反复冲洗5~6次,最后室内晾干种植于灭菌花盆中(土:沙:蛭石=1:1:1),每盆种植0.35 g,保持土壤湿润,温度20~25 $^{\circ}\text{C}$,为确保草地早熟禾正常生长,光照14 h/d。

1.4 诱导与接种处理

诱导接菌:待早熟禾长出第4片真叶时,用250 $\mu\text{mol/L}$ 2,3-BD进行土壤灌根处理,2,3-BD诱导处理草地早熟禾3 d后进行病原菌接种;不诱导接菌:待早熟禾长出第4片真叶时,用蒸馏水代替进行土壤灌根处理,3 d后进行病原菌接种。诱导不接菌:待草地早熟禾长出第4片真叶时,用250 $\mu\text{mol/L}$ 2,3-BD进行土壤灌根处理。接菌之前用无菌水对草地早熟禾进行喷雾处理,使叶片保持湿润,之后对叶片均匀撒播病原菌粉末,每盆撒播0.2 g,保温盖遮盖防止各处理间产生影响,置于恒温培养室培养。

1.5 指标测定

对接菌后不同处理与对照相关酶于接菌后1、3、5、7、9 d进行采样测定,次生代谢物质含量按2、4、6、8、10 d分别采样测定。参考房媛媛^[22]方法测定苯丙氨酸解氨酶(PAL)、查尔酮异构酶(CHI)、4香豆辅酶A连接酶(4CL)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性与黄酮、木质素、总酚

含量。

1.6 数据处理

利用SPSS软件进行数据统计分析,数据用Microsoft Excel2010处理,计算标准误差(\pm SE),进行显著分析。

2 结果与分析

2.1 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾PAL活性变化

褐斑病原菌侵染草地早熟禾一定程度上提高PAL活性,诱导接菌对草地早熟禾PAL活性影响显著。草地早熟禾在诱导接菌后第1天PAL活性升至最高,第5天后再次出现上升趋势。不诱导接菌后PAL活性第1天上升后逐渐降低,第7天再次升高。诱导不接菌PAL活性除第5天,其余时间无明显变化。不诱导接菌处理PAL活性在第1天显著升高,之后逐渐下降。而诱导接菌在第1天活性达到最高,第3天再次上升。第5天诱导不接菌的PAL活性最高,但总体呈现上升趋势并不明显。除9d外诱导接菌活性均高于CK处理,于接菌后1、5、7d显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),是其1.3、1.2与1.09倍。诱导不接菌第3、5天显著高于不诱导接菌与诱导接菌($P < 0.05$),是其1.1和1.4倍(图1)。

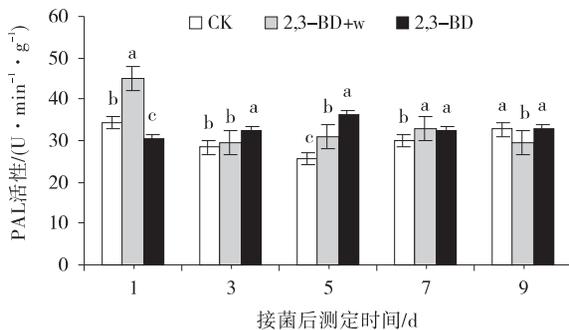


图1 草地早熟禾PAL的活性变化

Fig. 1 Changes in activity of phenylalanine ammonia-lyase in Kentucky bluegrass

注:a、b、c、代表同一时间不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾CHI活性变化

草地早熟禾接种病原菌后处理诱导接菌的CHI活性与不诱导接菌呈现先上升后逐渐下降的趋势(图2),诱导接菌CHI活性第3天达最高值,与不诱导接菌差异显著。诱导接菌CHI活性第1~7天均显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),分别为不诱导接菌的1.53倍、1.15倍、1.10倍和1.13倍,诱导接菌3、5、7d显著高

于诱导不接菌($P < 0.05$),是其1.42、1.13、1.14倍,接菌处理使酶活性增强。诱导不接菌第1天显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),是其的1.48倍,不诱导接菌第3d显著高于诱导不接菌($P < 0.05$),是其1.22倍。其余时间两组处理差异并不明显。诱导接菌的CHI活性各时期均高于不诱导接菌,而诱导不接菌的CHI活性后期变化与不诱导接菌无显著差异。

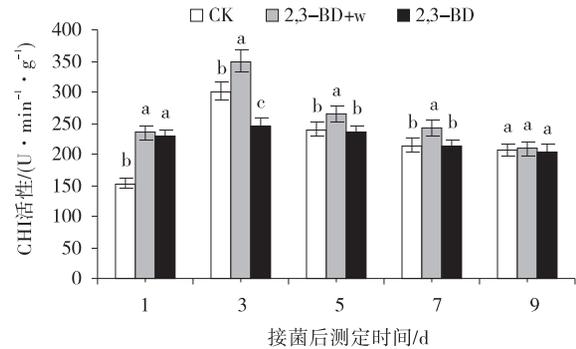


图2 草地早熟禾CHI的活性变化

Fig. 2 Changes in activity of Chalcone isomerase in Kentucky bluegrass

2.3 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾4CL活性变化

诱导剂能提高4-CL活性,草地早熟禾接菌后4CL活性明显升高参与了抗病反应。诱导接菌处理第1~3天第1次升高,7~9天再次升高。不诱导接菌4-CL活性第3天开始下降,第7天受影响再次上升,诱导接菌第3天与第9天活性最大,第3天过后出现下降趋势。诱导接菌处理在3、7、9d的活性显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),分别是其1.21倍、1.17倍与1.11倍,第1天与5天差异不显著。不诱导接菌第1天与第9天显著高于诱导不接菌($P < 0.05$),是其1.22倍与1.19倍。其余时间段差异并不显著(图3)。

2.4 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾SOD活性变化

2,3-丁二醇对草地早熟禾SOD活性影响显著。

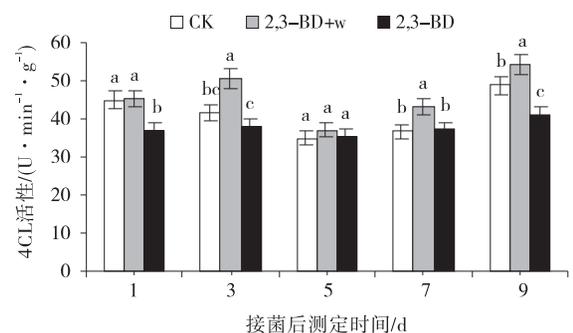


图3 草地早熟禾4CL的活性变化

Fig. 3 Changes in activity of 4 Coulinase CoA ligase in Kentucky bluegrass

诱导接菌后的草地早熟禾 SOD 活性显著升高,后逐渐平稳(图 4),SOD 活性第 1 天与第 3 天显著增强。不诱导接菌处理呈缓慢上升趋势,9 d 时达最大值,且随时间变化不明显。诱导不接菌的 SOD 活性显著低于诱导接菌与不诱导接菌($P < 0.05$),且活性趋于平稳无显著变化。诱导接菌处理第 1 天与第 3 天的 SOD 活性显著高于诱导不接菌与不诱导接菌($P < 0.05$),是不诱导接菌的 1.39 与 1.15 倍,诱导不接菌的 1.46 与 1.26 倍。不诱导接菌第 7~9 天的 SOD 活性高于诱导接菌与诱导不接菌,第 9 天显著高于诱导接菌与诱导不接菌处理($P < 0.05$),分别是其 1.15 倍和 1.19 倍,不诱导接菌 5~7 d 与诱导接菌处理无显著差异。

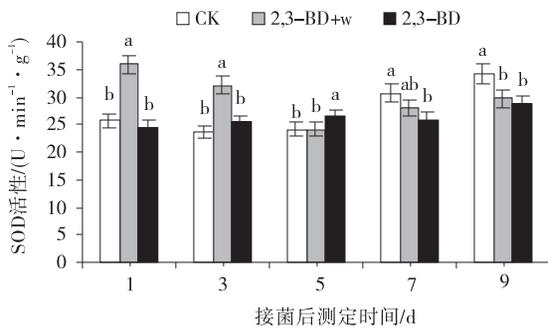


图 4 草地早熟禾 SOD 的活性变化

Fig. 4 Changes in activity of superoxide dismutase in Kentucky bluegrass

2.5 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾 POD 活性变化

病原菌侵染提高了 POD 活性,2,3-BD 对草地早熟禾 POD 活性影响显著。草地早熟禾 POD 活性接菌后迅速上升后又逐渐下降(图 5)。诱导接菌 POD 活性第 1 天升至最高,第 7~9 天下降至平稳状态。不诱导接菌后第 1 天 POD 活性最高,之后逐渐下降,POD 活性下降较诱导接菌处理快。诱导不接菌的 POD 活性呈缓慢下降趋势。诱导接菌处理除第 7 天与诱导不接菌处理无显著差异,其余各时期诱导接菌的 POD 活性均显著高于不诱导接菌与诱导不接菌($P < 0.05$),是不诱导接菌的 1.22、1.05、1.33、1.31、1.18 倍。是诱导不接菌处理的 1.64、1.32、1.22、1.21 倍。不诱导接菌第 1 天与第 3 天显著高于诱导不接菌($P < 0.05$),是其 1.34、1.26 倍。诱导不接菌处理第 5~7 d 显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),是其 1.05、1.29 倍。

2.6 2,3-丁二醇诱导草地早熟禾 CAT 活性变化

草地早熟禾 CAT 活性接菌后快速上升后下降,之后再次呈上升趋势,2,3-BD 能够影响草地早熟禾

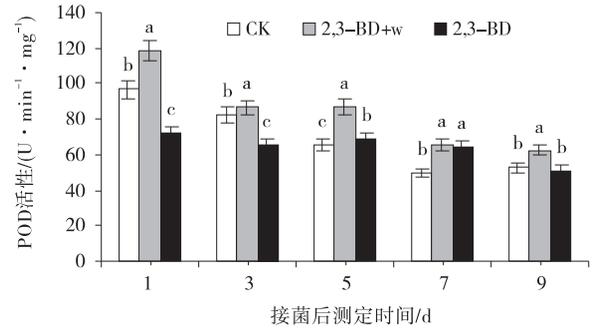


图 5 草地早熟禾 POD 的活性变化

Fig. 5 Changes in activity of peroxidase in Kentucky bluegrass

CAT 活性参与抗病(图 6)。诱导接菌与不诱导接菌的 CAT 活性第 1 d 上升至最高,诱导不接菌处理活性变化不明显出现小幅度升高后下降。不诱导接菌第 1 天显著高于诱导接菌与诱导不接菌处理($P < 0.05$),分别为诱导接菌的 1.55 倍与诱导不接菌处理的 1.66 倍。诱导接菌活性则是诱导不接菌的 1.44 倍,接菌与不接菌活性变化明显。3、5、7、9 d 诱导接菌显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),是其 2.14 倍 1.53 倍 1.31 倍和 1.33 倍。诱导不接菌处理除第 1 天与第 9 天低于不诱导接菌外,3、5、7 d 均显著高于不诱导接菌处理($P < 0.05$),是不诱导接菌的 4.11 倍、1.82 倍和 1.27 倍。

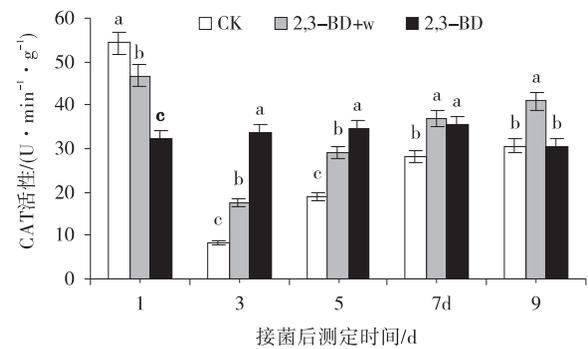


图 6 草地早熟禾 CAT 的活性变化

Fig. 6 Changes in activity of Catalase in Kentucky bluegrass

2.7 2,3-丁二醇对草地早熟禾黄酮含量影响

接菌第 8 天早熟禾体内黄酮含量呈现上升趋势,第 10 天达最大值,第 8 天与第 10 天诱导接菌与诱导不接菌处理差异显著,接菌后黄酮含量呈上升趋势(图 7)。诱导接菌第 10 天与不诱导接菌差异显著($P < 0.05$),诱导接菌黄酮含量是 CK 的 1.11 倍。第 8 天诱导接菌与诱导不接菌差异显著($P < 0.05$),为诱导不接菌的 1.09 倍。第 2 天诱导不接菌处理黄酮含量低

于不诱导接菌处理,不诱导接菌与诱导接菌任何时间无显著差异。

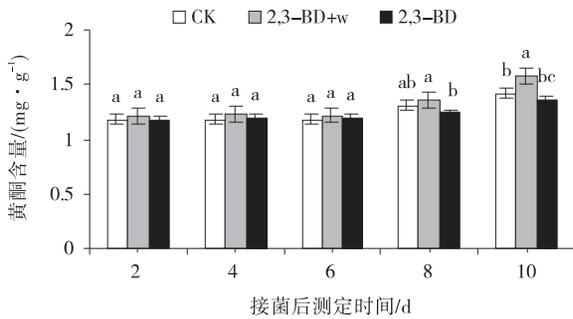


图7 草地早熟禾黄酮的含量变化

Fig. 7 Changes of flavonoid content in Kentucky bluegrass

2.8 2,3-丁二醇对草地早熟禾总酚含量影响

接菌后草地早熟禾总酚含量呈现先上升后下降趋势(图8)。诱导剂对草地早熟禾总酚含量有显著影响。诱导接菌处理总酚含量第2 d最大,各时间段总酚含量均高于不诱导接菌,诱导接菌第10天总酚含量高于不诱导接菌但差异并不明显。诱导接菌第4、6、8天总酚含量显著高于不诱导接菌($P < 0.05$),分别是其1.19、1.21、1.18倍。2、4、6、8 d显著高于诱导不接菌处理($P < 0.05$),是其1.13、1.30、1.14倍、1.2倍。不诱导接菌处理除第6天外,各时间段均高于诱导不接菌处理。

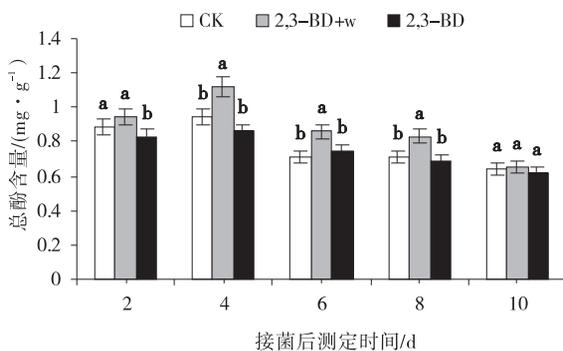


图8 草地早熟禾总酚的含量变化

Fig. 8 Changes of Total phenol content in Kentucky bluegrass

2.9 2,3-丁二醇对草地早熟禾木质素含量影响

诱导剂诱导接菌影响木质素含量变化,经2,3-BD诱导接菌后草地早熟禾木质素含量呈上升趋势(图9)。木质素含量诱导接菌处理比不诱导接菌升高变化快,诱导不接菌处理木质素含量变化不大。接菌后任何时间段诱导接菌木质素含量均高于不诱导接菌($P < 0.05$),第6、8、10天分别为不诱导接菌的1.18、

1.25、1.21倍。诱导接菌处理除第2天均显著高于诱导不接菌($P < 0.05$),分别为1.18、1.28、1.33、1.24倍。不诱导接菌与诱导不接菌处理差异不显著。

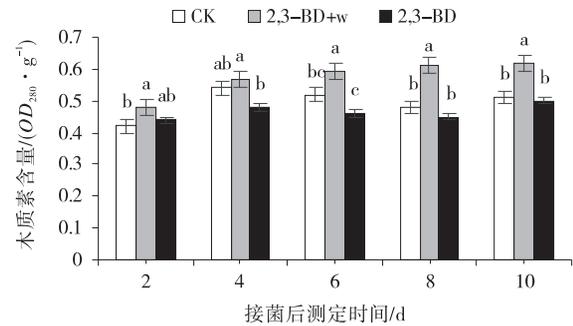


图9 草地早熟禾木质素的含量变化

Fig. 9 Changes of lignin content in Kentucky bluegrass

3 讨论

3.1 2,3-BD对草地早熟禾4CL、CHI、PAL活性的影响

苯丙烷代谢途径作为植物重要次级代谢途径之一,其代谢产物有黄酮、总酚、木质素、孢粉素、花青素和有机酸等^[23],这些代谢产物在调控植物适应性生长过程中发挥了重要功能^[24],植物在代谢途径中相关酶的活性变化使植物产生抗病反应^[25]。苯丙烷代谢途径产生的一些次级代谢产物还能由植物外根分泌到周际土壤中,改变植物根系微生物菌群生态,影响植物生长,抵抗生物或非生物胁迫的能力。而通过采用叶片喷雾方式研究葡萄霜霉病抗性诱导作用,得到诱抗剂能增强其PAL活性抵抗霜霉病侵染^[26]。本次试验中苯丙烷代谢途径PAL与CHI活性在接种病原菌短时间内均得到明显提高,4CL活性与不诱导接菌处理相比也相应升高。表明适宜浓度2,3-BD溶液能够促使草地早熟禾抗病相关酶活性变化使其抗褐斑病侵染,接种病原菌后PAL、CHI、4CL活性显著升高表明其在抗病中发挥作用,而诱导不接菌处理相关酶出现相应上浮波动但变化不明显,其活性一直低于诱导接菌处理。

如灰霉菌激活蛋白诱导处理番茄种子后PAL活性达到最大,通过增加番茄相关酶活性使番茄抗病性增强^[27]。苯丙烷代谢途径第一关键酶PAL在本次试验接菌前期活性大幅上升,促进合成次生代谢产物参与草地早熟禾抗病过程,4CL是苯丙烷代谢最后一步反应关键酶,草地早熟禾接菌第3 d活性最大催化酚

酸单体转化成相应的酚酸-CoA,为木质素合成途径提供底物。在4CL催化作用下,苯丙烷代谢分别向各次生代谢分支途径转折,生成次生代谢物质抗病^[28]。在接菌1~3 d CHI活性增强显著高于不诱导接菌。CHI作为苯丙烷代谢第2步反应关键酶与次生代谢物质黄酮合成息息相关,其参与合成黄酮前体物质,其含量升高直接影响黄酮含量积累,在植物体内清除氧自由基参与植物抗病。2,3-BD诱导草地早熟禾抗病性结果表明:病原菌侵染早期PAL活性显著上升,CHI与4CL活性第3 d升至最高,苯丙烷代谢途径中的酶影响植物抗病过程。

3.2 2,3-BD对草地早熟禾SOD、CAT、POD活性的影响

胁迫处理下叶片PAL基因表达呈上升趋势SOD、CAT活性呈先上升后下降共同协作提高植物抗逆能力,活性氧在植物抗逆过程中发挥重要作用^[29]。活性氧在植物中作为一种强氧化性物质,当植物在遭受到逆境胁迫时植物体内活性氧会过量积累,导致植物体内发生氧化性胁迫,所以必须依靠抗氧化酶系统对抗胁迫反应^[30]。在正常生理条件下植物体氧化损伤和抗氧化一直保持动态平衡,活性氧消除酶与抗氧化剂等组成了植物抗氧化防御系统^[31]。CAT在植物体中主要存在于过氧化物酶体和乙醛酸循环体中,CAT催化反应活性氧^[32],消除植物体内氧化胁迫。

本次研究表明接种褐斑病原菌后SOD活性短期内增强,第1~3天其活性显著高于不诱导接菌处理,前期活性快速上升将活性氧清除,生成H₂O₂,第5天后受抑制。相同时间内POD活性增强,而CAT活性与SOD活性相反,以第3天为时间点,前后SOD活性增强CAT活性受抑制。由于CAT是以H₂O₂为电子受体催化底物氧化的酶,催化H₂O₂直接氧化酚类或胺类化合物,具有消除H₂O₂与酚类和胺类毒性双重作用^[33],随H₂O₂消耗活性降低。

自由基清除过程中SOD在植物体中参与O²⁻歧化反应,具有清除O²⁻保护细胞功能,在植物中清除系统能力强、SOD活性高,能有效减轻逆境胁迫对植物体伤害^[34]。与本次试验结果相同。POD活性诱导接菌处理1~5 d显著高于不诱导接菌,草地早熟禾抗病前期POD以H₂O₂为电子受体催化底物缓解体内活性

氧的氧化作用,因为SOD具有清除O²⁻作用,而CAT清除H₂O₂。SOD与CAT具有协同作用维持植物细胞内活性氧代谢平衡^[35]。

3.3 2,3-BD对草地早熟禾总酚和黄酮含量的影响

植物受到病原物刺激启动植物防御反应并产生一系列相关性物质防止病原物入侵称为植物抗病性反应。植物产生次生代谢物质主要途径之一为苯丙烷代谢途径,该途径能产生抗菌物质酚类物质、黄酮、木质素、植保素等,次生代谢物决定植物的颜色气味和味道,在植物生长发育与防御等生理过程及生命过程中发挥重要作用,能够有效避免病虫害侵染。次生代谢物质酚类对病原菌具有很强毒性,还能氧化为毒性更强的醌类物质杀死病原菌^[36]。如CaCl₂诱导处理花生叶片后接种花生叶斑病,花生叶片能够积累大量木质素与总酚抵御叶斑病侵染^[37]。而Me/JA处理能促进梨果实中总酚含量提升。植物抗病原微生物侵染与黄酮类物质含量相关,也与微生物相互识别和相互协作相关^[38],总酚与黄酮含量越高其抗病性越强。

本次研究结果表明2,3-BD诱导后草地早熟禾体内木质素、黄酮和总酚含量与不诱导接菌、诱导不接菌处理相比均明显提高,黄酮含量第10天明显高于不诱导接菌处理,总酚含量除第10天均高于不诱导接菌且第4、6、8天与不诱导接菌处理相比差异显著,说明草地早熟禾叶片内PAL与CHI活性升高影响苯丙烷代谢途径效率促进次生代谢物质合成,次生代谢质总酚与黄酮也随之增加,大概2,3-BD是通过诱导草地早熟禾代谢产物总酚与黄酮含量累积是其用以抵抗病原菌侵染途径之一。

3.4 2,3-BD对草地早熟禾木质素含量的影响

木质素作为植物生长发育中一种次生代谢物质,在植物生长发育与抗性方面具有重要功能^[39]。其通过影响细胞壁木质化过程加大细胞壁硬度,增强细胞机械支持力,加大植物抗压强度,促进植物机械组织形成^[40]。2,3-BD诱导草地早熟禾后木质素含量增加,诱导接菌处理从接菌开始木质素含量随着时间延长累积呈上升趋势。由此可推断草地早熟禾通过木质化加大细胞壁硬度,阻止病原菌侵染。与研究内生菌与根际细菌在灭菌土与非灭菌土中对棉花处理相似,木质素含量均有不同程度提高^[41]。而木质素前体酚类物质的合成能够降低病原物膜、酶与毒素的生物活

性^[42],在植物参与抗病中发挥作用。

4 结论

2,3-BD 诱导处理草地早熟禾后,诱导剂诱导并接种褐斑病菌后其体内相关抗病酶活性发生变化,氧化还原性酶 SOD、CAT 与 POD 活性呈现出不同程度上升,苯丙烷代谢途径中 PAL、CHI、4CL 活性与对照相比明显提高,同时也促进苯丙烷代谢途径的次生代谢物产生与积累,抗菌物质木质素、酚类物质与黄酮含量合成显著上升,由此可见,2,3-BD 诱导草地早熟禾后影响其氧化还原酶活性的变化,调节活性氧积累,并增强了苯丙烷代谢途径相关性酶的活性及代谢产物总酚,黄酮与木质素等的合成。

参考文献:

- [1] 肖文一,洪锐民,张守明. 优良草坪草—草地早熟禾[J]. 中国草原,1986(4):63—66.
- [2] 吴陆山. 草地早熟禾草坪的养护[J]. 花木盆景(花卉园艺),1997(3):23.
- [3] 曹涤环,刘建武. 冷季型草坪褐斑病防治[J]. 林业与生态,2020(11):40.
- [4] 李海霞. 草坪褐斑病的研究进展[C]//北京园林学会. 2008北京奥运园林绿化的理论与实践. 北京:中国林业出版社,2009:4.
- [5] 吴翔,马晖玲,赵小强,等. 几种匍匐翦股颖品种植株再生的研究[J]. 草业科学,2009,26(4):134—138.
- [6] 张鹏翀,胡增辉,沈应柏. 植物诱导抗性的研究进展[J]. 现代农业科学,2008(9):22—23.
- [7] 杜建玲. 植物诱导抗性的理论及其应用前景[J]. 北京林业大学学报,1994(2):83—88.
- [8] 张晓燕,芦春莲,田志喜. 植物诱导抗病性[J]. 保定师专学报,2001(4):9—12.
- [9] 张金花,何静,张小彦,等. 马铃薯糖苷生物碱对枸杞根腐病的诱抗效应及抗性相关酶活性的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2022,57(1):123—130.
- [10] 戴建英,孙亚琴,孙丽慧,等. 生物基化学品 2,3-丁二醇的研究进展[J]. 过程工程学报,2010,10(1):200—208.
- [11] 马源. 2,3-丁二醇诱导匍匐翦股颖对褐斑病的防御生理机制研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.
- [12] 刘兴菊,马源,马晖玲,等. 2,3-丁二醇诱导下匍匐翦股颖叶片细胞结构变化及抗病相关性分析[J]. 草业学报,2017,26(12):170—178.
- [13] 房媛媛,马晖玲. AsA-GSH 循环参与 2,3-丁二醇、2R,3R-丁二醇诱导后匍匐翦股颖的抗病反应[J]. 草业学报,2015,24(11):82—90.
- [14] 王蕊,刘娜,刘杰才,等. 烟草浸提液对番茄早疫病诱导抗性的研究[J]. 中国瓜菜,2023,36(1):90—96.
- [15] 焦文哲,杜兴兰,申红妙,等. 水杨酸诱导葡萄抗霜霉病研究[J]. 河北林果研究,2016,31(1):43—48.
- [16] 李永川,韦加贵,黄奎,等. 青霉菌灭活菌丝体诱导水稻抗病增产效果研究[J]. 云南农业科技,2014,278(4):35—37.
- [17] 尤升波,游银伟. 草酸青霉菌果胶酶诱导烟草抗 TMV 的研究[J]. 山东农业科学,2014,46(5):102—106.
- [18] 李祖明,范海延,白志辉,等. 碱性果胶酶诱导黄瓜抗病机理的初步研究[J]. 植物保护,2008,196(5):52—57.
- [19] 贾思振,谢浩举. 水杨酸诱导草莓叶片灰霉病抗性机理的研究[J]. 科技通报,2021,37(10):19—23.
- [20] 孟丹娜. 外源化学物质对花生叶斑病诱导抗性及其机理研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [21] 赵泽花,马祥,董文科,等. 外源茉莉酸甲酯诱导草地早熟禾对白粉病抗性的研究[J]. 草原与草坪,2020,40(2):59—66.
- [22] 房媛媛,马晖玲. AsA-GSH 循环参与 2,3-丁二醇、2R,3R-丁二醇诱导后匍匐翦股颖的抗病反应[J]. 草业学报,2015,24(11):82—90.
- [23] 陈勇辉,殷瑞雪,万园,等. 植物激活蛋白提高植物抗病性的机制研究进展[J]. 生物化工,2022,8(6):193—195.
- [24] 王玲平. 黄瓜感染枯萎病菌后生理生化变化及其与抗病性关系的研究[D]. 太原:山西农业大学,2001.
- [25] 袁庆华,桂枝,张文淑. 苜蓿抗感褐斑病品种内超氧化物歧化酶、过氧化物酶和多酚氧化酶活性的比较[J]. 草业学报,2002,11(2):100—104.
- [26] 王晓琳,吴琴燕,彭燕琼,等. 2种生物诱抗剂对葡萄霜霉病的诱导抗病作用[J]. 中国农学通报,2021,37(32):127—131.
- [27] 麦麦提艾力·热合曼,海利力·库尔班,郭立华,等. 灰霉菌激活蛋白诱导抗病相关的酶活性提高番茄抗病性[J]. 中国生物防治学报,2014,30(6):780—786.
- [28] 张志鹏,谭芸秀,李宝军,等. 采后外源脱落酸处理对雾培微型马铃薯周皮木栓化的影响及其机理[J]. 中国农业科学,2023,56(6):1154—1167.
- [29] 乔枫,贺杰,耿贵工,等. 胁迫下青稞幼苗生理指标和苯丙氨酸解氨酶基因表达的变化[J]. 分子植物育种,2020,18(24):8255—8266.

- [30] 武孔焕,陈奇,李昆志,等. 铝胁迫对黑大豆膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(3):511—517.
- [31] 郭小境,王锦莹,任潇茜,等. 水稻根系抗氧化酶及其同工酶对酸雨胁迫的响应[J]. 环境化学, 2019, 38(2): 377—384.
- [32] 梁甜甜,张艳军,李燕,等. 褪黑素缓解植物涝渍胁迫的生理和分子机制[J]. 植物生理学报, 2023, 59(1): 44—54.
- [33] 张贵民,王馨仪,王涛,等. 阿维菌素对杨树幼苗抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(10):2956—2957.
- [34] 陈佳,韩杰,郑佳梦,等. 外源柠檬酸对铝胁迫枯萎抗氧化酶系及根尖铝积累的影响[J]. 贵州农业科学, 2018, 46(2):120—123.
- [35] 陈招芳,黎思辰,杨镰聪,等. 不同砧木对塔罗科血橙果实抗氧化能力的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(3):447—454.
- [36] 吴浩然,张从合,王慧,等. 水稻愈伤组织褐化的机理及影响因素研究进展[J]. 现代农业科技, 2023(5): 21—25.
- [37] 孟丹娜. 外源化学物质对花生叶斑病诱导抗性及其机理研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2018.
- [38] 赵显阳. 外源茉莉酸甲酯(Me/JA)对梨果实抗青霉病及其保鲜作用的研究[D]. 南昌:江西农业大学, 2020.
- [39] 位欣欣,兰海燕. 植物MYB转录因子调控次生代谢及逆境响应的研究进展[J]. 生物技术通报, 2022, 38(8): 12—23.
- [40] 丁霄,曹彩荣,李朋波,等. 植物木质素的合成与调控研究进展[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9):1406—1411.
- [41] 佐长庚,王静怡,牛新湘,等. 内生菌与根际细菌对棉花的促生与诱导抗病作用[J]. 西南农业学报, 2022, 35(4):757—763.
- [42] 程琴,午紫阳,马艳,等. 木质纤维水热液化研究进展[J]. 生物质化学工程, 2023, 57(1):84—98.

Physiological response of anti-brown patch induction in kentucky bluegrass with 2,3-butanediol

TANG Zhen-ye, MA Hui-ling*

(*Partacultural college, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Lanzhou 730070, China; 3. Sino U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China*)

Abstract: 【Objective】 The purpose of this experiment was to explore the induced disease resistance effect of 2, 3-butanediol (2, 3-BD) application on Kentucky bluegrass. 【Method】 Kentucky bluegrass (park) was used as the test material, 2, 3-BD was used as the inducer, and *Rhizoctonia regussiana* was used as the inoculator to set up the induced non-inoculant bacteria (w), induced non-inoculant bacteria (2, 3-BD+w) and induced non-inoculant bacteria (2, 3-BD). A new type of inducer, 2, 3-BD was used to induce roots and inoculated with Kentucky bluegrass brown patch by seeding method, and the mechanism of defense response induced by the new inducer was discussed. 【Result】 The results showed that 2, 3-BD induced increased the enzyme activity in the metabolic pathway of phenylpropane, and changed the activity of REDOX related enzymes involved in the improvement of disease resistance of Kentucky bluegrass induced by 2, 3-BD. The activity of phenylalanine aminolyase (PAL) reached the maximum on the 1th day, and the difference was significant compared with the contrast. The activity of chalcone isomerase (CHI) was higher than that of the contrast. 4 Coumadin coA ligase (4CL) activity increased to the highest twice and the difference was significant compared with the contrast. The activity of superoxide dismutase (SOD) in the early stage was higher than that of the control group, and the activity of catalase (CAT) was lower than that of the control group, and the ac-

tivity of peroxidase (POD) was higher than that of the control group. These results indicated that REDOX enzymes Participate in the early Kentucky bluegrass internal were involved in the improvement of disease resistance induced by 2,3-BD through dynamic balance with active oxygen species in Kentucky bluegrass. The content of secondary metabolites in Kentucky bluegrass increased under 2,3-BD induction. Total phenols, flavonoids and lignin participated in the disease resistance process of Kentucky bluegrass as antibacterial substances. The maximum content of total phenol in induction treatment was 1.12 mg/g on the 4th day, while that in control was 0.94 mg/g. Flavonoid content increased by 0.37 mg/g compared with that of pathogen infection on day 8. The lignin content was 0.601 D_{280} /g on the 8th day and 0.625 D_{280} /g on the 10th day. **【Conclusion】**It was concluded that induction of appropriate concentration of 2,3-BD could induce changes in enzyme activity related to disease resistance of Kentucky bluegrass and produce antibacterial substances to induce physiological response to disease resistance and resist infection of pathogen.

Key words: kentucky bluegrass; brown patch; 2,3-butanediol; induction; physiological response

(责任编辑:新奇峰)