

大豆胞囊线虫不同生理小种对大豆根内酶活力的影响

罗璇¹, 段玉玺¹, 陈立杰¹, 黄少北¹, 王媛媛², 刘大伟¹, 刘丹丹¹

(1. 沈阳农业大学 植物保护学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学 生物科学技术学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要:采用辽豆10、PI88788、PI90763, 3个品种均同时接种大豆胞囊线虫1号、3号和14号生理小种。测定了大豆胞囊线虫不同生理小种对大豆PAL、POD、PPO、SOD活力的影响, 分析不同大豆品种接种大豆胞囊线虫后保护酶活力的变化和抗性关系。结果表明:PI88788接种大豆胞囊线虫3号和14号生理小种后根系中4种酶活性显著高于对照;PI90763接种大豆胞囊线虫1号和3号生理小种后根系中4种酶活性显著高于对照。研究证实不同大豆品种对大豆胞囊线虫不同生理小种的抗病性与接种SCN不同生理小种后大豆根内PAL、POD、PPO、SOD活力的变化密切相关。

关键词:大豆胞囊线虫; 苯丙氨酸解氨酶; 过氧化物酶; 多酚氧化酶; 超氧化物歧化酶; 抗病性

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2010)03-0448-05

Effect of Different Races of Soybean Cyst Nematology on the Activities of the Enzymes in roots of Soybean

LUO Xuan¹, DUAN Yu-xi¹, CHEN Li-jie¹, HUANG Shao-bei¹, WANG Yuan-yuan², LIU Da-wei¹, LIU Dan-dan¹

(1. Department of Plant Protection, Shenyang Agricultural University; 2. Department of Biological Science and Technology, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

Abstract: Three soybean varieties ‘Liaodou 10’, ‘PI88788’ and ‘PI90763’ were inoculated with different races of *Heterodera glycine* (race 1, race 3, race 14) at the same time. The dynamic changes of activities of Phenylalanine Ammonia-lyase (PAL), Peroxidase (POD), Polyphenol (PPO) and Superoxide Dismutase (SOD) in roots were analyzed. Results showed that activities of the four enzymes in roots of soybean cultivars ‘PI88788’ colonized by *H. glycine* race 3 and race 14 were higher than those in control roots; activities of the four enzymes in roots of soybean cultivars ‘PI90763’ colonized by *H. glycine* race 1 and race 3 were higher than those in control roots. It is concluded that the activities of the four enzymes had closely related to resistance to different races of *H. glycine*.

Key words: *Heterodera glycine*; Phenylalanine Ammonialyase; Peroxidase; Polyphenol; Superoxide Dismutase; Disease resistance

大豆胞囊线虫 (*Heterodera glycines* Ichinohe) 是一种世界性的大豆病害, 一般造成产量损失 5% ~ 10%, 严重发生地块减产达 30% 以上, 每年由于大豆胞囊线虫病造成的经济损失可达数十亿美元^[1]。国内外学者在大豆胞囊线虫的致病机理、组织病理学和病理生理学等方面做了大量研究^[2-4]。近年, 许多学者研究发现小麦、大豆、黄瓜、菜豆、烟草、水稻等多种植物感染病原菌后, 体内活性氧代谢及细胞内防御酶系的活性发生改变, 并指出这些变化与植物的抗病性相关^[5-8]。但对于大豆胞囊线虫不同生理小种侵染不同品种的大豆后, 大豆根内 PAL、POD、PPO、SOD 活力的系统研究还未见报道。

大豆胞囊线虫病最经济有效的防治措施是培育抗性品种, 而对大豆胞囊线虫不同生理小种进行有针对性的抗病品种的培育、鉴定和推广是进行大豆胞囊线虫防治的难点所在。病原线虫采用东北大豆胞囊线虫的 3 个主要生理小种: 1 号、3 号、14 号; 寄主大豆采用辽豆 10 以及鉴别寄主中对以上 3 个小种有不同感抗性的 PI90763 和 PI88788。测定了大豆胞囊线虫不同生理小种对大豆 PAL、POD、PPO、SOD 活力的影响, 分析不同大豆品种接种大豆胞囊线虫不同生理小种后 PAL、POD、PPO、SOD 活力的变化和抗性关系, 以进一步揭示大豆胞囊线虫不同生理小种对大豆的致病性。

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30871546)。

第一作者简介: 罗璇 (1980-), 女, 在读博士, 研究方向为植物线虫学。E-mail: luoxuannema@163.com。

通讯作者: 段玉玺, 教授, 博士生导师。E-mail: duanyx6407@163.com。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

1.1.1 线虫来源 大豆胞囊线虫1号、3号、14号。在已经鉴定并确定生理小种的实验地取土样,采用淘洗过筛法分离胞囊。收集3个大豆胞囊线虫3个不同生理小种色泽、大小均一的胞囊,4℃条件下保存备用(保存时间不宜超过7d)。

1.1.2 大豆品种 辽豆10、PI90763和PI88788。处理分别为:(CK)对照,不接种SCN;(T1)接种SCN1号生理小种;(T2)接种SCN3号生理小种;(T3)接种SCN14号生理小种。

1.2 试验设计

试验于2009年在沈阳农业大学北方线虫研究所温室大棚中进行。取无大豆胞囊线虫的土和沙(160℃干热灭菌6h以上),以沙:土为1:2的比例将沙和土混匀,装入直径为10cm的塑料钵中。将大豆种子催芽长至2cm后,播于塑料钵中,每钵3株,每钵接种单一大豆胞囊生理小种的胞囊20粒,每个品种分别接种3个大豆胞囊线虫生理小种,不同品种均设对照(不接种线虫),5次重复。

分别于接种线虫后6、12、18、24和30d取样,每次接种大豆胞囊线虫不同生理小种的每个品种及对照均随机取苗3株,将根和叶片用自来水洗净,再用蒸馏水冲洗,放在滤纸上吸干,记录好各品种的名称及处理、对照标签,-20℃保存备用。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 酶粗提液的提取 参照Moerschbacher等的方法^[9],略有改动。准确称取1g大豆根系样品,放入预冷的研钵中,加入1.5mL硼酸缓冲液(0.2mol·L⁻¹pH=8.8的硼酸缓冲液含1×10⁻³mol·L⁻¹EDTA、5mmol·L⁻¹二硫苏糖醇)冰浴充分研磨后,转移至预冷的离心管中,用1.5mL上述缓冲液冲洗2次,合并倒入5mL离心管中,10000r·min⁻¹,4℃离心20min,上清液即为酶粗提液。将酶粗提液迅速倒出,放入-20℃冰箱中保存待用。

1.3.2 PAL活性测定 参照刘凤全等的方法^[10],略有改动。6mL0.05mol·L⁻¹pH8.8硼酸缓冲液,0.1mL0.01mol·L⁻¹苯丙氨酸溶液,40μL酶液,加入4mL水,对照加入40μL0.2mol·L⁻¹pH8.8提取缓冲液代替酶液,其它相同,混匀,在40℃水浴中反应15min后,于冰浴中终止反应,在290nm处测吸光值,重复测量3次,取平均值。在上述条件下,每小时使OD值变化0.01的酶量定为1个酶活单位,计算酶活性及比活力。

1.3.3 POD活性测定 测定参照Hammerschmidt的愈创木酚法^[11]进行。取1mL酶提取液,与2mL10mmol·L⁻¹的磷酸缓冲液,1mL0.25%愈创木酚,1mL0.1mol·L⁻¹的过氧化氢,在室温下反应2min后测定470nm吸光值。加入4mL的10mmol·L⁻¹磷酸缓冲液代替底物(愈创木酚和过氧化氢)与上述酶液进行反应作为对照。3次重复。

1.3.4 PPO活性测定 测定参照李靖等方法测定^[12],略有改进。取3mL0.1mol·L⁻¹pH6.8的含0.02mol·L⁻¹邻苯二酚的磷酸缓冲液,加入40μL酶液,混合均匀,于30℃水浴中反应2min,测量398nm波长下吸光值的变化,以不加酶液而加相同体积提取液的磷酸缓冲液为空白对照,以每分钟OD₃₉₈值变化0.01为1个酶活单位,计算酶比活力。

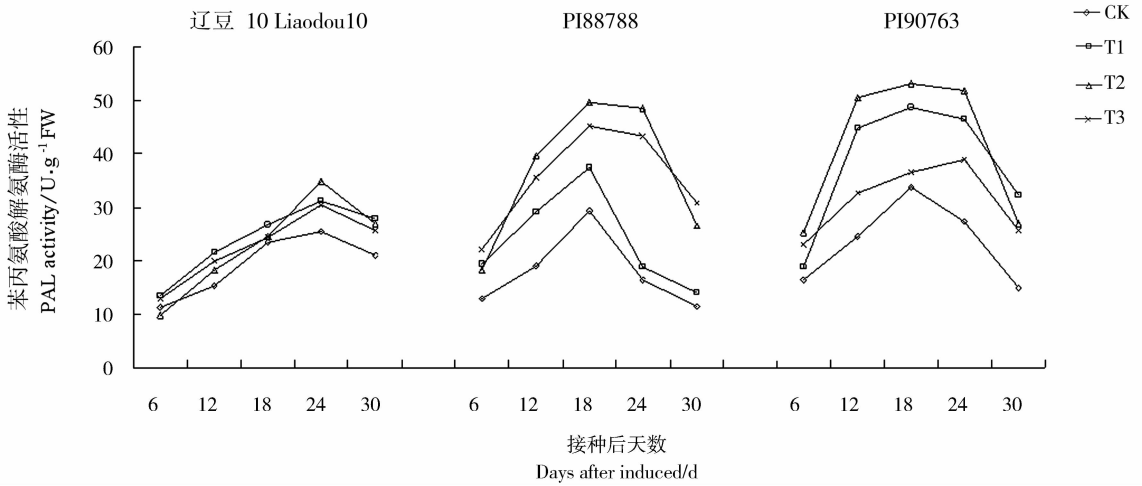
1.3.5 SOD活性测定 按照Beauchamp和Fridovich所建立的方法^[13],进行测定。反应体系中含50mmol·L⁻¹pH7.8的磷酸钠缓冲液、13mmol·L⁻¹蛋氨酸、75μmol·L⁻¹氮蓝四唑(NBT)、2μmol·L⁻¹核黄素和0.1mol·L⁻¹EDTA。加酶液后置于25℃,4000lx日光灯下进行光化学反应10min,然后黑暗中止反应,测定OD₅₆₀。3次重复。以抑制氮蓝四唑(NBT)在光照下被还原50%的酶量为1个酶活性单位。

2 结果与分析

2.1 接种大豆胞囊线虫不同生理小种前后不同品种大豆根内PAL活性变化

与对照相比,各品种接种大豆胞囊线虫不同小种后的PAL均有明显增加的趋势(图1)。辽豆10接种大豆胞囊线虫1号、3号和14号生理小种后,PAL活性增加的幅度不大,其中增幅最大的是在接种大豆胞囊线虫3号生理小种后第24天,其根内PAL活性高出对照9.4U·g⁻¹FW。PI88788和PI90763接种大豆胞囊线虫后PAL的活性升高幅度明显大于辽豆10,且PI88788接种大豆胞囊线虫3号和14号生理小种后PAL增加量远大于接种大豆胞囊线虫1号生理小种,在接种后第24天PAL活性分别为48.4U·g⁻¹FW和50.6U·g⁻¹FW,显著高于对照(16.5U·g⁻¹FW)和接种1号生理小种(18.8U·g⁻¹FW)。PI90763接种大豆胞囊线虫1号和3号生理小种后PAL增加量远大于接种大豆胞囊线虫14号生理小种,在接种后24dPAL活性分别为46.5U·g⁻¹FW和55.9U·g⁻¹FW,显著高于对照(27.3U·g⁻¹FW)和接种14号生理小种(38.9U·g⁻¹FW)。说明PI88788接种SCN3号和14号生理小种与PI90763接

< (/ . & „ i \$ „ g à M < Y ^- Qÿ n Ž • " Š! ¢ Ö { Ž t Š Q n ! (/ . & „ g à M < j ^0% \$ ô Ö • ï " İ t ° n % (/ . & „ g à M < j ^000-00ô { Ž t Š Q n &



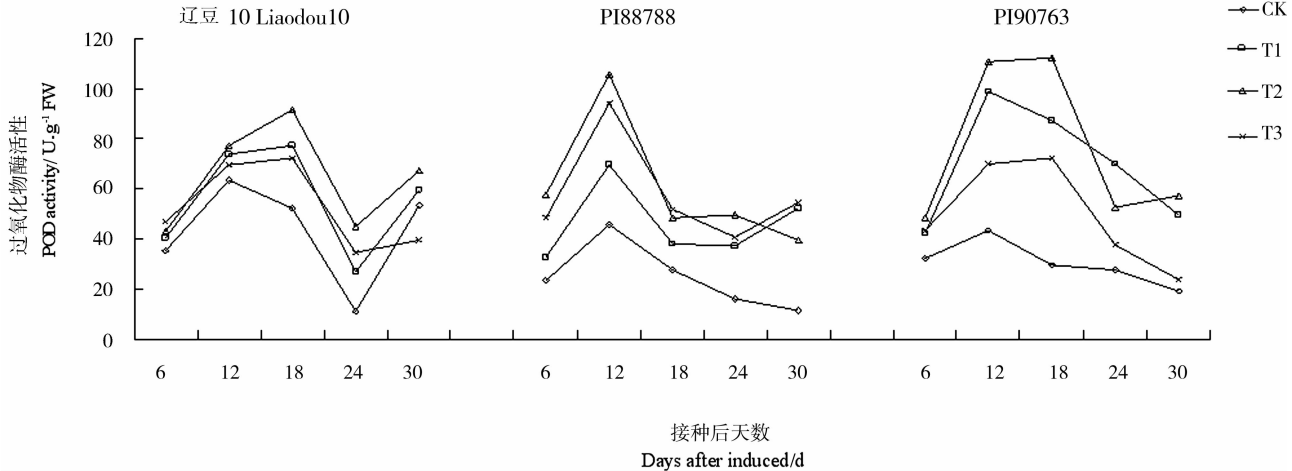
L &# (/ . (° μ ú í ç o X - (° Ü ç CE ð ô æ à P ā â L U ' " v

A(5? &# ! B%45* . / H2= %') (9 (4 ' B* - (/ * & ' 4' & . (' % ' . " 97* % 4 ; ; : () % & " " . % * & (4 " ; ; : % (" 4 79 - (/ * & ' 4' & % * . " / 5 . 0% () * 6

!4# ò ç ! " \$ ï ð ñ (° μ ú í ç ó - (° Ü ç ! " CE ð ^) N U ' " v

® Ñ ! j ^) N ÿ n t - İ | } ¢ μ ! & h < ç & ' l , ² R o ‡ M < P à Y t ^) N ÿ n ÿ z ‡ # t j Ý Ö " • t Û G ! ^ % 0 ^ 000-00 i ^ 0 % \$ ç < & ' l , ² R Y ^) N t ÿ n Û G ¼ w μ " & - T ' & % ^ 000-00 ç < & ' l , ² R \$ „ i & „ g à M < Y ^) N - a Ð ü & - ç < & ' l , ² R & „ g à M < ! ~ ç < Y ! & • ^) N ÿ n £ / G Ò ! ' L ^ & % 0 4 ' j " > S + I 1 & ^ < ü ü G - j Ý

" > 94 O S + I 1 & ^ < # i ç < & „ g à M < " " 4 " S + I 1 & ^ < # & ^ 0 % \$ ç < & ' l , ² R & „ i \$ „ g à M < Y ^) N - a Ð ü & - ç < & ' l , ² R & „ g à M < ! ~ ç < Y & L ^) N ÿ n ' L ^ " 0 4 = j & % 4 " S + I 1 & ^ < ü ü G - j Ý " > 4 > S + I 1 & ^ < # i ç < & „ g à M < " " 4 " S + I 1 & ^ < # & ^) N ÿ n t ' Â Ž • j ^ - Q ÿ n t ' Â Ž • T ~ " Š ! ^ % 0 Q h < ^) N ÿ n Ž • F ^ - Q t ÿ n Ž • &



L ! # ð (/ . (° μ ú í ç o X - (° Ü ç CE ð £ > v î L U ' " v

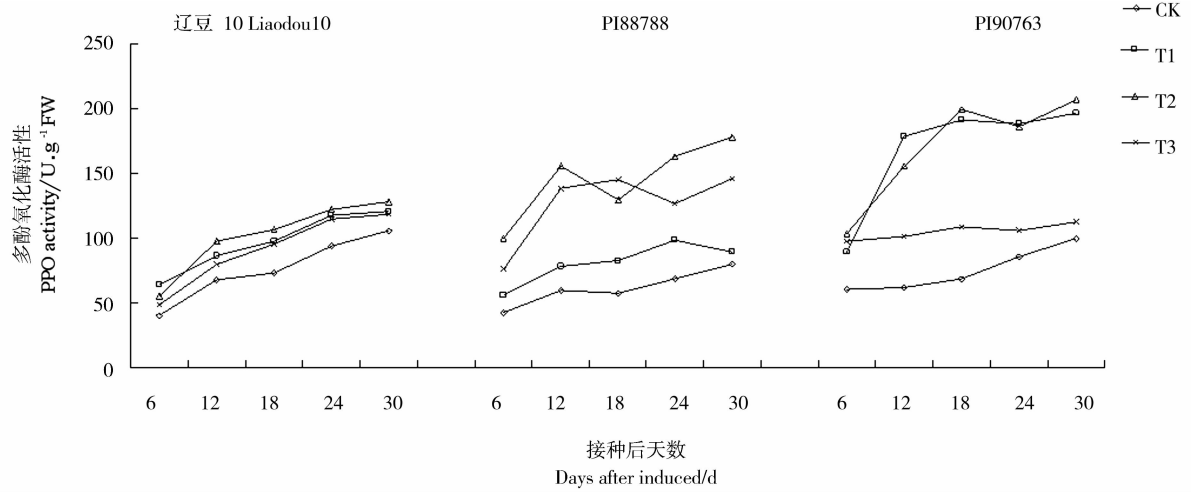
A(5? ! # ! B%45* . / H P F %') (9 (4 ' B* - (/ * & ' 4' & . (' % ' . " 97* % 4 ; ; : () % & " " . % * & (4 " ; ; : % (" 4 79 - (/ * & ' 4' & % * . " / 5 . 0% () * 6

!4\$# ò ç ! " \$ ï ð ñ (° μ ú í ç ó - (° Ü ç ! " CE ð ^) U ' " v

Ñ \$ ¥ ^) ÿ n t - İ | } & ~ Û ç < (/ . t Ó Ó % ! Ê G Ñ ¶ ß t g „ J _ ! > E h < ™ , t

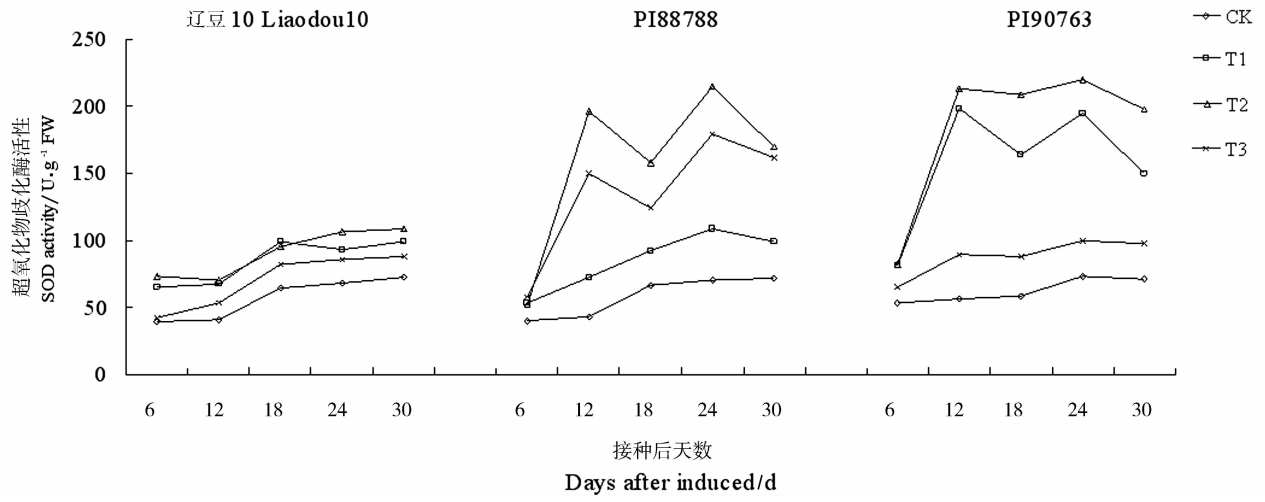
^) ÿ n € ÷ ā m Ä Û § ½ & ç < (/ . P à Y ! ^) ÿ n J g < μ " t Ž • & " ' Ä ú & , h < ÿ n € z j Ý Ö 0) G ! „ ^ 000-00 i ^ 0 % \$ 3 (/ . P à Y ^) ÿ n - a © μ " G - T ' & % ^ 000-00 ç <

& ' l , 2 R \$ „ i & „ g à M < Y ^ ^) - a Đ ü , 2 R & „ g à M < ! ~ ¿ < Y ! & • ^ ^) ÿ n
 & - ¿ < & ' l , 2 R & „ g à M < ! ~ ¿ < Y ! & ' L ^ & - O > j 8994' S + I ^{1&} < ! ” • G - j Ý
 • ^ ^) ÿ n ' L ^ 8994' i & S O 4 \$ S + I ^{1&} < ! ” • " ! ! 4 & S + I ^{1&} < # i ¿ < & „ g à M < " & % & 4 > S
 G - j Ý " 9 ' 4 O S + I ^{1&} < # i ¿ < & „ g à M < + I ^{1&} < # & ¿ < (/ . o † g à M < Y o † h < &
 " = 4 O S + I ^{1&} < # & ^ O % ' \$ ¿ < & ' l , 2 R & ' T M , ^ ^) t ÿ n ' Â Ž • ; ^ - Q ^) N t ÿ n '
 „ i \$ „ g à M < Y ^ ^) - a Đ ü & - ¿ < & ' l Â Ž • T ~ " Š &



L \$ # ò (/ . (° ¢ ú í ¿ o X - (° Ü ¿ œ ð Æ é › v L U ' " v
 A(5? \$ # ! B%45* . / HHP % ') (' 9 (4 ' B* - (/ * & ' 4' & * . (' % ' . " 97*% 4 ; ; : ') % & " ' . % ' * & (4 " ; ; : % (" 4 79 - (/ * & ' 4' & % * .
 " / 5 . 0 % () * 6

! 4 > # ò ¿ ! " \$ ï ð ñ (° ¢ ú í ¿ ó - (° Ü ¥ † # j Ý t \$ 4 % Ê j ! 49 > Ê % ^ 000-00 ¿ <
 ¿ ! " œ ð () N U ' " v (/ . & „ g à M < Y ~ ! & • j ! ! > • Ö () N Ö
 b h < t j Ý | } ¥ ú ! G Ñ ô É È ” " l N (} ' L ^ † # j Ý t & 4 ' Ê j & 4 \$ O Ê & ^ O % ' \$
 # t ± Y # ! & , h < t () N ÿ n ÿ ÷ ã m Ä Û t ¿ < (/ . & „ i \$ „ g à M < Y t ! & • ' ! ! > •
 \$ ½ ! „ h < T M t œ L o & " Ñ > # & ¿ < (/ . p à () N Ö ' L i • ! Ô G Ò ! ! & • Ö ' L ¥ ¥ † #
 Y ! T ' & % ; j Ý † z Ž • o & ! ã ^ 000-00 j j Ý t \$ 4 > " Ê j \$ 4 = " Ê ! ! > • Ö ' L ¥ † # j
 ^ O % ' \$ ~ ¿ < p à Y () N ÿ n ¢ ”) G & Ý t ! 4 9 Ê j ! 4 " O Ê % ^ 000-00 ¿ < (/ . & „
 ^ 000-00 ¿ < (/ . \$ „ i & „ g à M < Y t ! & g à M < Y ~ ! & • j ! ! > • Ö () N Ö } ' L ^
 • ' ! ! > • () N Ö ' L i • ` Ô G Ò ! ! & • Ö ' † # j Ý t & 49 = Ê j & 4 \$ ' Ê &
 L ¥ † # j Ý t > 4 > " Ê j \$ 4 > " Ê ! ! > • Ö ' L



L > # (/ . (° ¢ ú í ¿ o X - (° Ü ¿ œ ð ¥ › v í è v L U ' " v
 A(5? > # ! B%45* . / +PF % ') (' 9 (4 ' B* - (/ * & ' 4' & * . (' % ' . " 97*% 4 ; ; : ') % & " ' . % ' * & (4 " ; ; : % (" 4 79 - (/ * & ' 4' & % * .
 / 15 . 0 % () * 6

3 讨论

大量研究表明,与植物抗性代谢关系较大的酶类主要有苯丙氨酸解氨酶、过氧化物酶、多酚氧化酶、超氧化物歧化酶等^[2,4]。其中,苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonialyase, PAL, E. C. 4. 3. 1. 5)是植物次生代谢,特别是苯丙烷途径的关键酶和限速酶,与植物的抗病性直接相关^[14]。过氧化物酶和多酚氧化酶同属于氧化酶体系,主要参与酚类氧化为醌及木质素前体的聚合作用,其活性与抗性有密切关系。POD 和 SOD 又是植物体内重要的活性氧防御酶。植物在正常状态下,体内活性氧的产生与消除处于平衡状态,因此防御酶体系也相对稳定。云兴福发现抗霜霉病的黄瓜品种 POD、PPO、SOD 活性高于感病品种^[8]。该研究表明 SCN 不同生理小种侵染不同大豆品种后 PAL、POD、PPO、SOD 活性的变化与 SCN 对侵染寄主的致病性密切相关,与吴海燕^[2]、云兴福^[8]等研究的结果一致。

刘晔等研究发现大豆胞囊线虫 1 号生理小种侵染后 19 d,感病品种 PI88788 根中已有成熟的雌虫,而抗病的磨石豆根内的线虫仍处于幼虫阶段,虫体没有膨大^[15]。颜清上等在对抗原品种抗 4 号生理小种的机制中表明,抗病品种根内线虫从 J2 向 J3 及从 J3 向 J4 阶段有较高的死亡率^[16]。吴海燕认为,不同抗性大豆品种抗 SCN 机制不同,表现在抗孵化、抗侵入、抗发育和抗繁殖 4 个方面^[2]。结果表明,在 PI88788 和 PI90762 受相对于本品种而言致病性较弱的 SCN 生理小种侵染初期, PAL、POD、PPO、SOD 活性的变化与对照相比不显著,而接种第 12 天以后均显著上升,由此可以推论, PI88788 对 SCN 3 号和 14 号生理小种与 PI90763 对 SCN 1 号和 3 号生理小种均为抗发育品种。由于采用的试材具有一定的代表性,此结果是否适于所有品种,有待进一步研究。

参考文献

[1] 刘维志,段玉玺. 植物病原线虫学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. (Liu W Z. Plant pathogenic nematology [M]. Beijing: Agriculture Press, 2000.)

[2] 吴海燕. 大豆与大豆胞囊线虫相互关系的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2002. (Wu H Y. The interaction of resistant soybeans and *Heterodera Glycines* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2002.)

[3] Davis E L, Hussey R S, Baum T J. Getting to the roots of parasitism by nematodes[J]. Trends in Parasitology, 2004 20(3): 134-141.

[4] Vanholme B, Meutte J D, Tytgat T, et al. Secretions of plant-parasitic nematodes: a molecular update[J]. Gene, 2004 24(2):13-27.

[5] Keppler L D, Novacky A. The initiation of membrane lipid peroxidation during bacteria-induced hypersensitive reaction[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 1987 30(2): 233-245.

[6] 王树彬,叶明志,柯玉琴,等. 水稻幼苗感染细菌性条斑病后

细胞内几种保护性酶活性的变化[J]. 福建省农科院学报, 1996 11(2): 46-52. (Wang S B, Ye Z M, Ke Y Q, et al. The activity change of several protective enzymes in cell of rice seedlings infected by *Xanthomonas Campestris* pv. *oryzicola* [J]. Journal of Fujian Academy of Agricultural Sciences, 1996 11(2): 46-52.)

[7] 栾晓燕,陈怡,杜维广,等. 不同抗性大豆品种感染 SMV 后过氧化物酶、多酚氧化酶、超氧化物歧化酶变化分析[J]. 大豆科学, 2001 20(3): 200-203. (Luan X Y, Chen Y, Du W G, et al. Studies on the changes of peroxidase, polyphenoloxidase and superoxide dismutase in plants of different soybean cultivars infected by SMV[J]. Soybean Science, 2001, 20(3): 200-203.)

[8] 云兴福,崔世茂,霍秀文. 黄瓜组织中几种酶活性与其对霜霉病抗性的关系[J]. 华北农学报, 1995, 10(1): 92-98. (Yun X F, Chui SM, Huo X W. The relationship between the activity of several enzymes in cucumber tissues and their resistance to downy mildew of cucumber[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1995, 10(1): 92-98.)

[9] Moerschbacher B, Heck B, Kogel KH et al. An elicitor of the hypersensitive lignification response in wheat leaves isolated from the rust fungus *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* II. Induction of enzymes correlated with biosynthesis of lignin[J]. Zeitschrift fur Naturforsch, 1986, 41: 839-844.

[10] 刘凤全,王金生. 水杨酸对水稻防卫反应酶系的系统诱导[J]. 植物生理学通报, 2002, 38(2): 121-123. (Liu F Q, Wang J S. Systemic induction of several defense response enzymes in rice seedlings by salicylic acid[J]. Plant Physiology Communications, 2002, 38(2): 121-123.)

[11] 王冬梅,王智忻,杨秀屏,等. 已知 Lr 基因小麦在叶锈菌侵染过程中 PO 活性及其同工酶的变化[J]. 河北农业大学学报, 1994, 17(1): 1-6. (Wang D M, Wang Z X, Yang X P, et al. Changes of peroxidase activity and isozymes in the course of leaf rust infection of wheat lines with known Lr[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 1994, 17(1): 1-6.)

[12] 李靖,利容千,袁文静. 黄瓜感染霜霉病菌叶片中一些酶活性的变化[J]. 植物病理学报, 1991, 21(4): 277-282. (Li J, Li R Q, Yuan W J. On the change of enzyme activities of cucumber leaf infected by *pseudoperonospora cubensis* (berk. et ctrt) rosos [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 1991, 21(4): 277-282.)

[13] Beauchamp C, Fridovich I. Superoxide dismutase, improved assays and an assay applicable to acrylamide gels[J]. Anal Biochemistry, 1971, 44: 276-287.

[14] 马俊彦,杨汝德,敖利刚. 植物苯丙氨酸解氨酶的生物学研究进展[J]. 现代食品科技, 2007, 23(7): 71-74. (Ma J Y, Yang N D, Ao L G. Progress in biological research of phenylalanine ammonialyase (E. C. 4. 3. 1. 5) [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(7): 71-74.)

[15] 刘晔,刘维志. 大豆胞囊线虫在不同大豆品种根内的发育[J]. 辽宁农业科学, 1988(4): 16-18 (Liu Y, Liu W Z. Development of soybean cyst nematode within roots soybean varieties [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 1988(4): 16-18.)

[16] 颜清上,陈品三,王连铮. 中国黑豆抗源对大豆胞囊线虫 4 号生理小种抗性机制的研究 I. 抗源品种对大豆胞囊线虫侵染和发育的影响[J]. 植物病理学报, 1996, 26(4): 317-323. (Yan Q S, Chen P S, Wang L Z. Mechanism of resistance to race 4 of *Heterodera glycines* in Chinese black soybeans. The effects of resistant varieties on the penetration and development of *Heterodera glycines* [J]. Acta Phytopathologica Sinica, 1996, 26(4): 317-323.)