

西洋参根腐病与三七素积累之间关系

任绪明¹, 蒋景龙^{1*}, 余妙¹, 李丽², 焦成瑾³, 杨玲娟⁴

(1. 陕西理工大学 生物科学与工程学院, 陕西 汉中 723001;

2. 陕西理工大学 化学与环境科学学院, 陕西 汉中 723000;

3. 天水师范学院 生物工程与技术学院, 甘肃 天水 741001;

4. 天水师范学院 化学工程与技术学院, 甘肃 天水 741001)

[摘要] **目的:**西洋参的根腐病与西洋参自身产生和分泌的化感物质有关,研究西洋参根腐病的发生与西洋参根中三七素(β -N-草酰-L- α , β -二氨基丙酸, β -N-oxalyl-L- α , β -diaminopropionic acid, β -ODAP)积累之间的相关性。**方法:**采集陕西汉中留坝县佳仕森西洋参种植基地生长2~4年的重茬地与生茬地的正常西洋参和患根腐病西洋参,利用2,4-二硝基氟苯(FDNB)柱前衍生法,然后通过高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定西洋参主根和侧根中 β -ODAP含量的变化。**结果:**结果表明,患根腐病参样中 β -ODAP的积累明显高于正常参样,重茬地患根腐病参样中 β -ODAP的积累明显高于生茬地;正常参样中 β -ODAP含量的积累为三年生最高,二年生次之,四年生最低,而在患根腐病参样中,四年生最高,二年生次之,三年生最低,呈完全相反趋势;且同株参样中,主根和须根中 β -ODAP含量的积累存在明显差异,尤其是二年生和三年生的参样。**结论:**以上结果表明重茬地西洋参根中 β -ODAP含量明显高于生茬地西洋参,患根腐病西洋参根中 β -ODAP含量明显高于正常西洋参,西洋参根腐病的发生与西洋参根中 β -ODAP含量的积累呈正相关。

[关键词] 西洋参; 根腐病; 化感作用; 三七素; 高效液相色谱法

[中图分类号] R284.1;R22;R282.2;R931.2;R243 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-9903(2018)06-0042-05

[doi] 10.13422/j.cnki.syfjx.20180691

[网络出版地址] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3495.R.20171113.1434.012.html>

[网络出版时间] 2017-11-13 14:34

Relationship Between Root Rot and Accumulation of Dencichine in *Panax quinquefolium*

REN Xu-ming¹, JIANG Jing-long^{1*}, YU Miao¹, LI Li², JIAO Cheng-jin³, YANG Ling-juan⁴

(1. School of Biological Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. College of Chemical and Environmental Sciences, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China;

4. School of Bioengineering and Biotechnology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China)

[Abstract] **Objective:** The root rot of *Panax quinquefolium* is related to the allelochemicals produced and secreted by itself, so it is to investigate the correlation between the occurrence of root rot and the accumulation of dencichine (β -N-oxalyl-L- α , β -diaminopropionate, β -ODAP) in *P. quinquefolium*. **Method:** Normal and root rot *Panax quinquefolium* in two to four years of growth with continuous cropping and stubble were collected from Jiashisen planting base, Liuba county, Hanzhong. Precolumn derivatization high performance liquid chromatography (HPLC) with 1-fluoro-2, 4-dinitrobenzene (FDNB) was used to determine the content change of β -ODAP in taproot and lateral root of *P. quinquefolium*. **Result:** The results showed that the content of β -ODAP in root rot disease was significantly higher than that in normal *P. quinquefolium*. The accumulation of β -ODAP in

[收稿日期] 20170705(013)

[基金项目] 陕西理工大学科研基金项目(SLGKY16-23);陕西理工大学研究生创新基金项目(SLGYCX1718)

[第一作者] 任绪明,在读硕士,从事中药材连作障碍的研究工作,E-mail:15291620364@163.com

[通信作者] *蒋景龙,硕士生导师,博士,从事中药材连作障碍的研究工作,E-mail:jiangjinglong511@163.com

continuous cropping samples was significantly higher than that in the stubble samples. The content accumulation of β -ODAP in the normal *P. quinquefolium* was highest in three years samples, followed by two years samples, and lowest in four years samples. In contrast, the content accumulation of β -ODAP in root rot disease was highest in four years samples, followed by two years samples, and lowest in three years samples. There was significant differences in the accumulation of β -ODAP between the taproot and fibrous root, especially in two years and three years samples. **Conclusion:** The results showed that the content of β -ODAP in the continuous cropping *P. quinquefolium* was significantly higher than that in the raw stubble samples, and the content of β -ODAP in the root rot was significantly higher than that in the normal *P. quinquefolium*. The occurrence of *P. quinquefolium* root rot was positively correlated with the accumulation of β -ODAP in roots.

[**Key words**] *Panax quinquefolium*; root rot disease; allelopathy; dencichine; HPLC

西洋参(*Panax quinquefolium*)是五加科人参属,多年生草本植物,原产北美,别名花旗参、西洋人参,与我国传统人参一样是重要的名贵中药材,在吉林、河北、陕西等地广泛种植^[1]。陕西汉中留坝县地处秦岭南坡,气候温和,雨量充沛,自然生态环境得天独厚,适合种植西洋参。1981年从美国引种西洋参获得成功,1985年被国家科委列入首批“星火计划”,现为全国三大西洋参栽培基地之一,也是西北最大的种植基地,目前西洋参留床面积近173公顷,年产鲜参10万kg。西洋参为多年生宿根性草本植物,栽培过程中忌连作,即在同一块地收获西洋参后不能连续种植,否则病害加重,减产甚至绝收。目前主要采用与其他作物如玉米、马铃薯和荞麦等轮作的方法避免连作障碍的发生,轮作适宜周期为8~10年,甚至更长。人们普遍认为,西洋参连作障碍减产主要与根腐病有关,根腐病常年发病率维持在5%~20%,严重时高达70%以上,染病后,根部腐烂枯死^[2]。近年发现,植物根分泌的酚酸会促进土壤微生物群落变化,而这种变化可能会选择性的抑制或刺激土壤中的细菌及真菌,病参根际的有益细菌以及放线菌的数量均不同程度减小,而病原真菌的数量却明显上升,然后病原菌通过参根腐烂之处进入宿主根部引起病害,引起参根腐烂,从而导致连作障碍^[3-6]。此外,西洋参的根腐病还可能与西洋参根中自身分泌物的化感作用有关,化感作用是生物通过向周围环境分泌代谢物,影响其他生物(或自身),以获取一种竞争优势的生态现象^[7]。在已有的报道中,从西洋参中分离出的化感物质如酚类、有机酸、皂苷等也是其他植物中常见的代谢物,酚酸类物质主要包括

-香豆酸、香草酸、阿魏酸、肉桂酸等,属于根系分泌物,对人参种子的生长均具有自毒作用^[8-9]。已有研究表明,p-香豆酸对西洋参种胚和成株的生长均具有自毒作用,其抑制生长的生理机

制在于抑制叶片的光合作用^[10]。吴凤芝等^[11]从黄瓜根系分泌物中提取到苯甲酸、肉桂酸,能够抑制植株叶片的生长,降低蒸腾和光合作用。孙玉琴等^[12]实验表明,阿魏酸对三七、玉米、小麦种子发芽及病原菌生长均有不同程度的抑制作用,其抑制程度随阿魏酸浓度的增大抑制生长的作用明显增强。已有报道从西洋参根际土壤中检测到的香草酸等酚酸类化感物质,能显著降低西洋参幼苗的生长^[13]。植物的根系分泌物和根系脱落物能引起根际生态失调,从而造成西洋参连作障碍。然而这些代谢物并没有引起如此严重的连作障碍,表明西洋参中可能存在其他的特异化感物质^[14-15]。

三七素(β -N-草酰-L- α , β -二氨基丙酸, β -N-oxalyl-L- α , β -diaminopropionic acid, β -ODAP)是一种非蛋白游离氨基酸,其许多性质与普通的蛋白氨基酸是相似的,如易溶于水,呈酸性(1 g·L⁻¹的溶液, pH 2.5)^[16]。化感物质的自毒作用能够引起土壤中营养元素变化和根际微生物群落变化,从而导致西洋参根腐病的发生。西洋参根腐病由真菌引起,是土传病害,主要通过土壤内水分、地下昆虫和线虫传播,常常危害幼苗根部和根茎部(地表以下茎部)^[17]。 β -ODAP能通过根分泌进入根际土壤,而且不易被分解,容易使西洋参产生自毒现象。笔者在前期研究中发现西洋参的根际土壤中含有3.58~3.82 μ g·g⁻¹的 β -ODAP。本文通过研究西洋参根腐病的发生与西洋参根茎中 β -ODAP含量的变化之间的规律,为解决西洋参根腐病的发生和连作障碍提供一些新的线索。

1 材料

西洋参样品于2016年10月份采集于陕西省汉中市留坝县西洋参种植基地(106.84°E, 33.69°N, 海拔高度1282.8 m, 湿度81.5%, 温度15℃)。对角线取样法的取样点全部落在田块的对角线上,其

中双对角线取样法是在田块四角的两条对角线上均匀分配调查样点取样。采用对角线取样法分别从重茬地(上轮采收西洋参后未闲置而直接种植西洋参地)和生茬地(以前从未种植过西洋参地)采挖二年生、三年生和四年生的正常西洋参和根腐病西洋参作为样本。每个西洋参样本,3个平行重复,主根和须根分开。

1100型高效液相色谱仪(美国Agilent公司), Luna-C₁₈色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm), HH-21-Ni6型电热恒温水浴锅(上海市百典仪器厂), TGL-20M型冷冻离心机(上海卢湘仪离心机仪器有限公司), BSA224S-CW型电子分析天平(瑞士Sartorius), UPH® -1-5/10/20T型超纯水仪(四川优普超纯科技有限公司)。

β-ODAP对照品(兰州大学实验室分离提纯,经峰面积归一化法测定纯度>98%);2,4-二硝基氟苯(FDNB,分析纯,上海生工生物有限公司);磷酸盐缓冲溶液(分析纯,pH 6.9);乙酸乙酸钠缓冲溶液(分析纯,pH 4.4);乙腈(色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);水为纯净水,每次使用前均经0.45 μm滤膜滤过。

2 方法

2.1 样品处理^[18] 参考文献方法,用FDNB作为衍生试剂,略改进。取重茬地和生茬地中二年生、三年生和四年生正常参以及根腐病参主根与须根各0.5 g,每个样品设3个平行,分别加入NaHCO₃溶液5 mL研磨,2 000 r·min⁻¹,4 ℃,离心10 min。取上清液0.1 mL,加入FDNB 0.1 mL,混匀,60 ℃恒温水浴30 min,进行衍生反应。然后再加磷酸缓冲液(0.067 mol·L⁻¹,pH 6.9) 0.8 mL,用0.45 μm的滤膜过滤后测定并记录。采用Luna-C₁₈色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm),以乙腈-乙酸乙酸钠缓冲液(0.5 mol·L⁻¹)缓冲液(17:83)为流动相进行梯度洗脱,流速1 mL·min⁻¹,柱温40 ℃,检测波长360 nm,进样量20 μL。

2.2 标准曲线的绘制^[18] 取β-ODAP对照品适量,用NaHCO₃溶液配制成1.27 g·L⁻¹储备液,取储备液0.1 mL,加入FDNB 0.1 mL,混匀,60 ℃恒温水浴30 min,进行衍生反应。取β-ODAP衍生溶液0.1 mL,以0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃溶液进行逐级稀释为317.5, 158.75, 79.38, 39.69, 19.84, 9.92, 4.96 mg·L⁻¹。分别加入磷酸盐缓冲溶液0.8 mL, 0.22 μm有机相滤头过滤,测定,在0.40~1.2 g·L⁻¹色谱峰面积与β-ODAP线性关系良好,回

归方程 $A = 123.5 \times 10^3 C + 136.7 (r = 0.9987)$ 。

2.3 数据处理 实验数据用Microsoft Excel 2010软件整理,应用Graphpad Prism和Photoshop作图,同时采用SPSS 21.0软件进行统计分析,对相关性指标进行显著性检验($P < 0.05$)。

3 结果与分析

3.1 西洋参发病生理现象 四年生正常西洋参,体积较大,须根较多,无腐烂现象;四年生患根腐病西洋参根部腐烂严重,有些上部烂根,有些下部烂根,且有些西洋参伴有虫害。在采样中发现,四年生重茬地西洋参的根腐病发病率高达70%,而生茬地西洋参的根腐病发病率较低,仅为13.6%。二年生正常西洋参较四年生体积较小,细长,须根也比较多,在采挖过程中发现,二年生西洋参也有少量患有根腐病,一般在下部烂根。随着年份的增加,西洋参根腐病的病变现象愈加严重,发病部位由一开始的下部烂根,变为中部烂根,继而变为上部烂根,且伴有虫害。见图1。

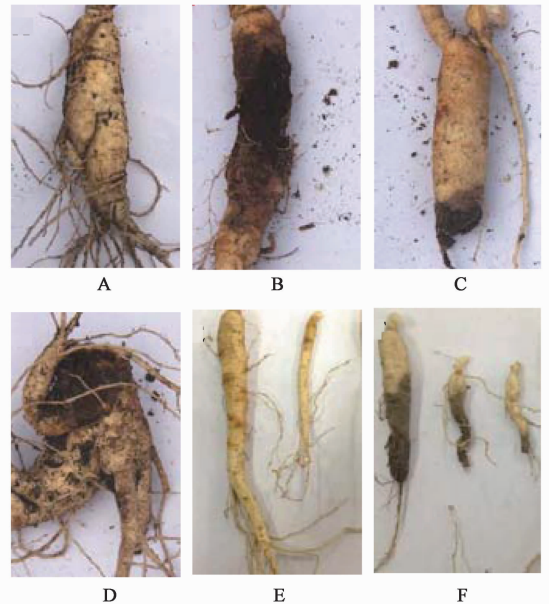


图1 不同生长年限正常西洋参和不同发病西洋参性状
A. 四年生正常西洋参;B,C,D. 四年生患根腐病西洋参;E. 二年生正常西洋参;F. 二年生患根腐病西洋参

图1 Comparison of normal and different diseases of *Panax quinquefolium*

3.2 四年生重茬地和生茬地西洋参根中β-ODAP含量的变化 无论是重茬地还是生茬地,正常西洋参须根中的β-ODAP无明显差异。同样,重茬地中患根腐病西洋参根中β-ODAP的含量均明显高于($P < 0.05$)正常西洋参根中β-ODAP含量。重茬地中患根腐病西洋参根中β-ODAP的含量均明显高于

生茬地中患根腐病西洋参根中 β -ODAP 的含量 ($P < 0.05$)。本研究也对西洋参的主根和须根中 β -ODAP 含量进行了分析,结果显示,除了生茬地正常西洋参须根中的 β -ODAP 含量明显低于主根中 β -ODAP 含量外,其他各组西洋参须根中 β -ODAP 含量均高于主根中 β -ODAP 含量。以上结果表明,患根腐病西洋参与正常西洋参根中 β -ODAP 含量存在明显差异性,同时重茬地患根腐病西洋参根中 β -ODAP 含量更高。见表 1。

表 1 四年生重茬和生茬地西洋参样品中 β -ODAP 含量比较 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 1 Four years of continuous cropping and stubble in β -ODAP content ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

| 分类 | 主根 | 须根 |
|------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 重茬地正常西洋参 | 3.05 \pm 0.275 ^c | 4.14 \pm 0.794 ^d |
| 重茬地患根腐病西洋参 | 6.37 \pm 0.320 ^a | 7.68 \pm 0.140 ^c |
| 生茬地正常西洋参 | 4.44 \pm 0.182 ^b | 3.80 \pm 0.030 ^d |
| 生茬地患根腐病西洋参 | 5.19 \pm 0.831 ^b | 6.60 \pm 0.626 ^c |

注:不同字母代表具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

3.3 不同生长年份正常西洋参和患根腐病西洋参中 β -ODAP 含量的变化 不同生长年份正常西洋参和患根腐病西洋参根中 β -ODAP 含量变化呈相反趋势。其中,二至四年生正常西洋参根中 β -ODAP 含量先升高后降低,三年生 β -ODAP 含量最高;二至四年生患根腐病西洋参根中 β -ODAP 的含量先降低后升高,三年生 β -ODAP 含量最低。三年生与四年生正常西洋参主根中 β -ODAP 含量明显比二年生高;相反,二年生与三年生正常西洋参须根中 β -ODAP 含量明显高于四年生。不同年份患根腐病西洋参须根中 β -ODAP 的含量均高于主根中的含量,二年生和四年生根腐病西洋参主须根中 β -ODAP 的含量均比三年生高。见表 2。

表 2 不同生长年份生茬地正常西洋参根、患根腐病西洋参根中 β -ODAP 含量 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 2 Content of β -ODAP in roots of normal ginseng and sick *Panax quinquefolium* ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

| 分类 | 年份 | 主根 | 须根 |
|----------|-----|--------------------------------|-------------------------------|
| 正常西洋参根 | 二年生 | 4.34 \pm 0.070 ^b | 5.26 \pm 0.849 ^c |
| | 三年生 | 4.78 \pm 0.290 ^a | 5.84 \pm 0.500 ^c |
| | 四年生 | 4.44 \pm 0.182 ^{ab} | 3.80 \pm 0.030 ^d |
| 患根腐病西洋参根 | 二年生 | 4.93 \pm 0.330 ^a | 5.40 \pm 0.266 ^d |
| | 三年生 | 3.47 \pm 0.351 ^b | 4.08 \pm 0.452 ^c |
| | 四年生 | 5.19 \pm 0.830 ^a | 6.60 \pm 0.626 ^c |

3.4 同株西洋参参主、须根中 β -ODAP 含量的变化 除四年生正常西洋参外,正常和患根腐病西洋参根中,须根中 β -ODAP 含量均高于主根中的含量。二年生和三年生正常西洋参须根中 β -ODAP 的含量高于主根中的含量,四年生生茬地正常西洋参主根与须根中 β -ODAP 含量无显著性差异;患根腐病西洋参主根中 β -ODAP 的含量均小于须根,其中四年生含量最高 ($P < 0.05$),二年生和三年生患根腐病参主根与须根中 β -ODAP 之间存在显著性差异 ($P < 0.05$),须根中含量更高。见表 3。

表 3 同株西洋参生茬地正常参根、患根腐病参根中主、须根 β -ODAP 的含量 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 3 Content of β -ODAP in roots of normal and sick *Panax quinquefolium* ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

| 分类 | 年份 | 主根 | 须根 |
|----------|-----|-------------------------------|-------------------------------|
| 正常西洋参根 | 二年生 | 4.34 \pm 0.070 ^b | 5.26 \pm 0.849 ^a |
| | 三年生 | 4.78 \pm 0.290 ^b | 5.84 \pm 0.500 ^a |
| | 四年生 | 4.44 \pm 0.182 ^a | 3.80 \pm 0.030 ^a |
| 患根腐病西洋参根 | 二年生 | 4.04 \pm 0.421 ^b | 5.33 \pm 0.488 ^a |
| | 三年生 | 3.47 \pm 0.351 ^b | 4.08 \pm 0.452 ^a |
| | 四年生 | 5.19 \pm 0.831 ^a | 6.60 \pm 0.626 ^a |

4 讨论与结论

西洋参是名贵中药材,连作障碍会导致西洋参病虫害的发生,降低其品质,产量明显降低甚至绝产,因此连作障碍成为制约西洋参产业发展的主要阻力^[19]。近年来发现,危害西洋参生长的病虫害有立枯病、斑点病、叶锈病、锈腐病、地老虎、金针虫等,病虫害严重侵袭留坝县西洋参种植业,造成缺苗断畦、大幅减产,播种面积连续下滑^[20]。本文研究发现,随着年份的增加,西洋参根腐病的病变现象愈加严重,发病部位由一开始的下部烂根,变为中部烂根,继而变为上部烂根,且伴有虫害。

β -ODAP 的生物合成被认为是在酶的作用下,经天冬酰胺最终合成,属于植物次生代谢产物^[21]。最初是从山黧豆种子中分离到的,有很强的抑菌活性,命名为山黧豆毒素^[22]。文献报道中药三七中也分离到了 β -ODAP,是止血的有效成分,命名为三七素^[23]。三七素是西洋参根中的主要化学成分,在西洋参生长时期,它能大量分泌进入土壤,是西洋参根分泌物中的重要特异性化感物质。后来检测发现, β -ODAP 也存在于包括西洋参在内的许多人参品种以及苏铁根中^[24-26]。本研究发现, β -ODAP 的含量变化与西洋参根腐病的发生有密切关系, β -ODAP

的积累越高,根腐病发生得越严重。进而推测,根腐病的病变程度可能与分泌到土壤中 β -ODAP的含量呈正相关。此外,Robertd等^[27]发现人参皂苷能够促进西洋参主要土传病害锈腐菌和疫霉菌的生长,而抑制其拮抗菌哈茨木霉菌的生长,从而引起根际微生态失调,引起西洋参连作障碍。龙期良等^[28]研究表明,低浓度酚酸类物质对人参种子的胚根和胚轴的生长表现为低浓度促进高浓度抑制作用,且对人参根尖的形态和根毛的生长也有不同程度影响。至于健康西洋参和根腐病西洋参中 β -ODAP含量的差异是否影响土壤的根际微生物平衡还是作为一种西洋参自身分泌的化感物质影响自身的生长,还有待于进一步深入研究。本文通过对西洋参根腐病与 β -ODAP积累之间的关系研究,为解决西洋参根腐病的发生和连作障碍提供一些新的线索。

[参考文献]

[1] 张丹,吴兰芳,王乾,等.不同产地西洋参药材中8种皂苷类成分含量测定及指纹图谱研究[J].中药材,2016,39(10):2306-2310.

[2] 田苗,房敏峰,黄建新.根际土壤微生物变化对西洋参种植的影响[J].生物学杂志,2011,28(5):38-41.

[3] 祁建军,赵晓萌,周丽莉,等.西洋参根际土壤微生物群落组成与多样性研究[J].中国中药杂志,2010,35(18):2378-2382.

[4] 张鸿雁,薛泉宏,唐明,等.不同种植年限人参土壤地放线菌生态研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(8):151-159.

[5] 傅佳,李先恩,傅俊范.重茬种植西洋参对其根区土壤微生物与土壤理化性质影响[J].微生物学杂志,2009,29(2):63-66.

[6] LI X G, DING C F, HUA K, et al. Soil sickness of peanuts is attributable to modifications in soil microbes induced by peanut root exudates rather than to direct allelopathy [J]. Soil Biology Biochem, 2014, 78: 149-159.

[7] 吴连举,关一鸣,逢世峰,等.利用拮抗微生物防治人参、西洋参土传病害研究进展[J].安徽农业科学,2010,38(28):15630-15631,15657.

[8] 焦晓林,杨家学,高微微.老参地土壤中的酚酸类化合物对4种作物的化感作用[J].中国现代中药,2015,17(5):479-484.

[9] 龙期良,李勇,高原,等.酚酸类物质对人参种子的化感作用研究[J].中国现代中药,2016,18(1):92-96.

[10] 焦晓林,毕晓宝,高微微.p-香豆酸对西洋参的化感作用及生理机制[J].生态学报,2015,35(9):3006-3013.

[11] 吴凤芝,赵凤艳,马凤鸣.酚酸物质及其化感作用

[J].东北农业大学学报,2001,32(4):402-407.

[12] 孙玉琴,陈中坚,韦美丽,等.阿魏酸对三七化感作用的初步研究[J].特产研究,2008(2):39-41.

[13] HE C N, GAO W W, YANG J X, et al. Identification of autotoxic compounds from fibrous roots of *Panax quinquefolium* L. [J]. Plant Soil, 2009, 318(1):63-72.

[14] 张一鸣,刘芳君,杨莉,等.人参根际土壤甲醇提取物对人参病原真菌和拮抗菌的影响[J].吉林农业大学学报,2014,36(4):436-441,453.

[15] 焦晓林,杜静,毕晓宝,等.西洋参中酚酸及皂苷成分对病原菌的作用[J].中国农学通报,2015,31(17):105-110.

[16] 焦成瑾,杨玲娟,雷新有,等.山藜豆毒素的薄层分离[J].氨基酸和生物资源,2007,29(4):76-80.

[17] 毕乃亮,侯丽娟.如何防治西洋参根腐病[J].农业知识:瓜果菜,2016(12):24-25.

[18] 杨玲娟,高二全,焦成瑾.柱前衍生 HPLC 法测定三七中的三七素[J].资源开发与市场,2015,31(1):1-3,34.

[19] 王苗,孙燕,刘清梅,等.西洋参连作障碍产生原因及生物防治概述[J].中药材,2016,39(11):2665-2667.

[20] 赵丽敏,张斌.陕西留坝西洋参种植棚内的温度特征[J].中国农业气象,2015,36(5):544-552.

[21] 张大伟,邢更妹,熊友才,等.山藜豆毒素 ODAP 的生物合成及与抗逆性关系研究进展[J].生态学报,2011,31(9):2621-2630.

[22] RAO S L N, Adiga P R, Sarma P S. The isolation and characterization of β -N-oxalyl-L- α , β -diaminopropionic acid: A neurotoxin from the seeds of *Lathyrus sativus* L. [J]. Biochemistry, 1964, 3(3):432-436.

[23] Kosuge T, Yokota M, Ochiai A. Studies on an insulin-like principles in the crude drugs for hemostatics II. On antihemorrhagic principle in Sanchi Ginseng Radix[J]. Yakugku Zasshi, 1981, 107(7):629-632.

[24] JIAO C J, JIANG J L, KE L M, et al. Factors affecting β -ODAP content in *Lathyrus sativus* and their possible physiological mechanisms [J]. Food Chem Toxicol, 2011, 49(3):543-549.

[25] 焦成瑾.山藜豆毒素积累生理机制及相关合成酶研究[D].兰州:兰州大学,2011.

[26] Kuo Y H, Ikegami F, Lambein F. Neuroactive and other free amino acids in seed and young plants of *Panax ginseng*[J]. Phytochemistry, 2003, 62(7):1087-1091.

[27] Robertd W N, Lina Y, James A T, et al. Ginsenosides stimulate the growth of soilborne pathogens of American ginseng[J]. Phytochemistry, 2003, 64(1):257-264.

[28] 龙期良,李勇,高原,等.酚酸类物质对人参种子的化感作用研究[J].中国现代中药,2016,18(1):92-96.

[责任编辑 顾雪竹]