

DOI:10.19403/j.cnki.1671-1521.2019.03.013

人参红皮病发病机理研究进展

初赛君,佟爱仔,韩士冬,和法明,曹志强*
(吉林人参研究院·吉林 通化·134001)

摘要: 通过对人参红皮病诸多发病机理研究的总结,将其发病机理分为非侵染性和侵染性两个途径。其中非侵染性发病机理可以分为病参中金属离子含量高和人参应激自我保护反应两种类型。侵染性发病机理可以分为革兰氏阴性细菌侵染、*Rhexocercosporidium panacis* 侵染以及其它微生物侵染三种类型。本文对其发病机理的探索及研究进行了归纳,有助于对人参红皮病研究的认识,对其发病机理的深入研究具有重要意义。

关键词: 人参;人参病害;红皮病

Advances about the pathogenesis researches on the red-skin diseases of *Panax ginseng*

CHU Sai-jun, TONG Ai-zi, HAN Shi-dong, HE Fa-ming, CAO Zhi-qiang*
(Chinese Institute of Jilin Ginseng Jilin Tonghua 134001)

Abstract: By summarizing the pathogenesis researches on the red-skin diseases of *Panax ginseng*, the pathogenesis was divided into two ways: non-invasive and invasive. Among them, The non-invasive pathogenesis was divided into two types: High levels of metal ions in diseased ginseng and Ginseng stress self-protection reaction. Invasive pathogenesis was divided into three types: Gram-negative bacterial infection, *Rhexocercosporidium panacis* infection and Other microbial infection. In this paper, the investigations and researches on its pathogenesis were summarized, which is helpful to acknowledge the research on the red-skin diseases of *Panax ginseng* and is of great significance for its in-depth study.

Keywords: *Panax ginseng*; Ginseng diseases; Red-skin diseases

人参(*Panax ginseng* C.A.Mey)为五加科人参属多年生宿根性药用植物^[1],是我国传统珍贵中药材,具有重要的药用价值以及生物活性。人参红皮病(也称水锈病)是人参中常见的根部病害,其病状表现为病参根部周皮出现大小不一、形状不规则的红褐色病斑,发病初期时出现于主、侧、须根局部,随着栽培时间增长,锈斑逐渐扩展到主、侧、须根的大部分,严重时至全根周皮,病斑仅出现于参根周表皮组织,无凹陷,无腐烂或特殊气味,病斑上有纵裂,但参根周表皮皮下组织正常,病株地上部无明显症状^[2-3]。患病参根产品质量下降,商品等级下降至少 2~3 个等,并且加工费时、费力,造成巨大的经济损失^[4-5],人参红皮病严重制约着人参产业健康可持续性发展。目前对于人参红皮病的发病机理探索研究众多,但并无确定结论,本文对其发病机理的探索研究进行了归纳总结,有助于加强对人参红皮病的研究认识并对后续的科学研究的具

有重要意义。通过对人参红皮病发病机理的研究进行归纳总结,可将其发病机理分为非侵染性和侵染性两个途径。

1 非侵染性

非侵染性人参红皮病的成因至今尚不明确,目前国内多数学者将人参红皮病定义为非侵染性病害,其发病机理主要可分为病参中金属离子含量高以及人参应激自我保护反应两种类型。

1.1 病参中金属离子含量高

该研究观点主要认为人参红皮病的发病机理为病参中金属离子含量高(分别为 Fe 含量高,Al 含量高,Fe、Al 含量高,多种金属离子含量高以及金属离子促使酚积累五种原因)致使人参产生红皮病。详情如下:

1.1.1 Fe 含量高

20 世纪 90 年代张桂英等人^[6]用电感耦合氩等离

基金项目: 人参西洋参红锈病防治研究项目,吉林省科技厅吉科财字[2013]32 号。

作者简介: 初赛君,研究实习员,硕士,主要从事人参西洋参栽培、加工及植化研究。

*** 通信作者:** 曹志强,研究员,研究方向:人参、西洋参栽培、加工及植化研究。E-mail: th5161@163.com.

子发射光谱法(ICAP)对人参红皮病参皮和健参皮中的9种元素含量做了对比化学分析。得出结果为人参红皮病参皮中的铁和铝含量高于健参参皮,并且红皮病参皮中的磷含量甚高,因此推测红皮人参中可能存在磷酸铁化合物。随后张亚玉等人^[7-8]分别用邻菲罗啉比色法以及水培法对发病人参根以及健参根中Fe含量进行测定,得知铁膜的形成与人参不同生育期生理状况有关,随着发病程度的增加,参根各部位Fe的含量明显增高,且铁离子对参根铁膜形成作用是 $\text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$,明确了Fe的含量高低与人参红皮病的形成有直接关系。赵曰丰等人^[9]也用水培法进行了参根中Fe的测定,得出与张亚玉等人^[8]相一致的结论,间接说明了该观点的科学性。Wang Yingping等人^[10]通过测定人参根外皮中土壤和铁的还原物质,得知人参锈斑主要由有机复合铁组成,并且随着土壤水分和温度变化,活性铁和非活性铁相互转化。李志洪等人^[11]采用生态样块的方法,对白浆土区人参红皮病发生条件进行了较深入的研究,该研究表明,床土中活性还原有机物质的形成,促进了土壤中铁、锰氧化物活化,使亚铁、二价锰积累,因此得知床土中亚铁是红皮病发生的主导因素。上述研究说明红皮病人参中Fe含量高。

1.1.2 Al 含量高

20世纪90年代赵曰丰等人^[5]使用ICP法对长白山区主要参场红皮病株根、茎、叶及根际土与健康参株进行了对比化学分析,得知病株中 Al^{3+} 与人参红皮病形成具有密切关系,铝的积累主要分布在病根及其周皮中,病根周皮铝的含量明显高于健根周皮。到了21世纪XING LIU等人^[12]采用原子吸收分光光度法对人参床土土壤固体组分的铝分馏并进行了分析,发现具有较大红皮面积的人参植株在表皮和纤维根中积累了较高浓度的铝,且红皮病指数越高的地块,其容重、含水量和硝酸盐浓度也越高,床层土壤中交换性铝、NaOH萃取铝和草酸铵萃取铝的浓度也较高。上述研究说明红皮病人参中Al含量高。

1.1.3 Fe、Al 含量高

20世纪90年代刘俊峰等人^[13]对抚松四参场参龄6年的生病参、健参进行了面扫摄下电子像(形貌像)及铁、铝、锰、钛各元素的二维分布像,发现病参根表皮中含有过量的铁、铝,表明了人参红皮病是与铁、铝的沉积直接相关的。随后赵曰丰等人^[2,14]通过ICP法以及电子探针技术研究人参红皮病根中一些元素的含量和分布,研究发现病参根表面铁、铝的含量远高于健参根表面且病参根周皮外层有铁、铝富集,土壤中 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 在参根周皮木栓层上累积、固定、氧化淀积以及与人参本身生理生化活动综合作用导致红皮形成。21世纪初Sung-Sik Lee等人^[15]通过对生锈钢

的人参根部矿物营养测定得知人参生锈钢根系表皮中Fe、Na和Al的含量高于健康根系,高生锈钢度人参表皮中铁和铝的含量高于健康人参根表皮和低生锈钢度人参根表皮中铁和铝含量。后来刘星^[16]通过对土壤铝形态转化与人参红皮病关系的研究发现随着人参红皮病发病指数的增高,人参床土中非晶态铝(Alo)、非结晶的无机铝(Alo-Alp)、根部部位的交换态铝(Alexch)、非晶态铁(Feo)、非结晶的无机铁形态(Feo-Fep)含量逐渐增高。上述研究说明红皮病人参中Fe、Al含量高。

1.1.4 多种金属离子含量高

20世纪80年代武孔云^[17]采用美国Jarrell-Ash公司生产的Mark II型800等离子光谱仪对不同年份不同红皮病程度人参病皮作无机离子测定,结果发现人参红皮病与Al、Fe、Mn、Ba、Ca、Ni、Sr、P、Cu、Mg等离子均有极明显的相关关系,并随离子含量的增加而发病程度增加。随后高金方、李志洪、孙淑梅等人^[18-20]经测定研究后均认为人参红皮病是在白浆土的白浆化过程中,在过湿的周期性氧化还原状态波动的影响下,Fe、Mn富集导致。但曹国军等人^[21]采用中子活化法测定了6年生14个人参周皮层样品中31种无机元素的含量,发现Fe、Al、Eu、Sc、La有促进人参红皮病发生的趋势,而Mn、Mg、K有抑制参根发病的趋势。20世纪90年代Tae Su Lee等人^[22]经过研究发现六年生锈钢的各组织中的Na、Fe含量高于健康根。到了21世纪李刚、孙淑梅等人^[23,20]认为由于白浆型参地土壤酸化加剧,使得红皮病参地土壤中Al、Ca、Mg、Sr含量明显高于正常参地,这与武孔云^[17]等人研究结果相吻合。后来Q X Wang等人^[24]分析了长白山5个不同地区土壤的理化性质和酶活性,研究发现田间采集的土壤样品生锈钢指数与pH、N、Fe、Mn、Al、Zn和Ca呈显著正相关。上述研究说明红皮病人参中多种金属离子含量高。

1.1.5 金属离子促使酚积累

20世纪末至21世纪初Sung-Sik Lee等人^[25-26]进行了田间栽培人参的耐锈蚀性实验研究,并且进行了化学成分分析,该研究发现健康人参皮质、表皮和细根中的酚类化合物含量均低于锈病人参,健康人参皮质中K、Ca、Na含量均低于锈病人参,健康人参表皮中Mg、Fe、Na、Mn、Al、Si含量低于锈病人参,健康人参分枝和细根中Fe含量与锈病人参相比较低,且根系锈蚀程度与栽培时间呈正相关关系。随后Zhou Y等人^[27]对5年生健康和患病的红皮人参的表皮、皮质和纤维根进行了无机元素组成、酚类化合物浓度、反应性氧化系统、抗坏血酸盐和谷胱甘肽等抗氧化剂浓度、与酚代谢和氧化有关的酶的活性、以及抗氧化系

统、抗坏血酸-谷胱甘肽循环的检测,通过研究发现Al和Fe元素的较高积累,激活了与酚类化合物的积累及其氧化相关的多种酶,这可能导致人参的红皮症状,这一观点也证明了Sung-Sik Lee等人^[25-26]研究的科学性。上述研究说明红皮病人参中金属离子促使酚积累。

1.2 人参应激自我保护反应

该研究观点主要认为人参红皮病的发病机理为人参长期处于铁、铝胁迫下的一种应激自我保护反应。长期的铁、铝胁迫刺激人参表皮细胞分泌大量的酚类化合物和活性氧,酚类化合物被活性氧氧化成醌类,保护人参内部免受危害,醌类化合物的颜色与红皮病人参表皮的颜色相似,同时酚类化合物螯合金属Al、Fe以及Fe元素的氧化等人参生理生化活动综合作用使人参产生红皮病。

20世纪末赵日丰等人^[28]用ICP法对长白山区各参场人参红皮病病株根茎叶与健株根茎叶的无机元素含量进行了测定,该研究发现病参全株铁、铝含量明显增加,特别是根周皮铁、铝含量大幅度上升,而茎、叶及根的其它部位铁、铝含量却相对减少,因而得知人参根系把铁铝中毒受害部位局限在人参周皮,使人参其它部位免受其害,这是一种为适应环境胁迫而产生的自我保护反应。21世纪初Sung-Sik Lee等人^[29]通过分析人参健康根和人参生锈根各组织的抗氧化活性水平发现人参生锈根部的超氧化物歧化酶活性、过氧化氢酶活性、DPPH自由基清除活性均比人参健康根中的高,锈病根系表皮组织、皮层组织和根组织中谷胱甘肽、还原性谷胱甘肽与氧化性谷胱甘肽的比值比健康根系的高,因此得知人参锈根的高抗氧化活性可能与克服环境胁迫引起的氧化应激有关。到了21世纪刘文^[30]从人参植株的无机元素含量变化、活性氧和人参表皮中酚类化合物三方面研究了Al与红皮病的关系,得知人参红皮病可能是Al胁迫人参植株,刺激人参表皮细胞分泌大量的酚类化合物和活性氧,酚类化合物被活性氧氧化成醌类,醌类化合物的颜色与红皮病人参表皮的颜色相似,同时酚类化合物螯合金属Al、Fe以及Fe元素的氧化等人参生理生化活动综合作用的结果,从而进一步推测,人参植株内酚类化合物含量的增加是人参抵抗外界环境的一种手段。随后邵灵灵、张博^[31,32]分别通过研究得出铝胁迫和酚类化合物的氧化是红皮病发病的重要原因,并推测红皮病是人参长期处于铝毒胁迫下的一种自发的自我保护机制,长时间的铝胁迫导致酚类化合物在人参表皮堆积、氧化形成红色病皮组织,保护人参内部免受危害,这与刘文^[30]得出一致结论。上述研究说明人参红皮病是人参的应激自我保护反应。

2 侵染性

目前国内外部分学者认为侵染性人参红皮病的人参中存在革兰氏阴性细菌侵染、*Rhexocercosporidium panacis*侵染以及其它微生物侵染共三种类型的侵染性病害。

2.1 革兰氏阴性细菌侵染

21世纪10年代Jae Eul Choi等人^[32]经研究人参生锈根和内生细菌之间的潜在关系发现生锈人参根系中存在大量的内生菌,并从生锈的人参根中分离出31株分离物,其中24株分离物在人参根部反复诱导致使人参中度生锈,7株分离物则引起轻微生锈。经鉴定生锈人参根部的细菌主要为革兰氏阴性需氧菌。同年Park YD等人^[33]从高丽参锈根病灶表面组织中分离到革兰氏阴性需氧菌CG20106T。对其进行16S rRNA基因序列的系统发育分析表明该需氧菌是假单胞菌属中一个未知的亚系。该人参分离物的总体表型特征与*Pseudomonas cedrina*, *Pseudomonas migulae*和*Pseudomonas azotoformans*相似,并将该菌株CG20106T命名为*Pseudomonas panacis* sp. nov.。21世纪20年代Farh ME1等人^[34]从位于韩国江原道华川山的人参根的根际分离出一种名为DCY109T的革兰氏染色阴性棒状细菌菌株,这与Jae Eul Choi、Park YD等人^[32-33]研究结果相吻合。经16S rRNA基因序列分析表明,DCY109T菌株属于*Phenylobacterium*,与*Phenylobacterium muchangponense* KACC 15042T(相似性98.2%),*Phenylobacterium immobile* DSM 1986T(96.9%)和*Phenylobacterium koreense* KCTC 12206T(96.7%)密切相关,基于生理学、生物化学、化学分类学和遗传学分析,菌株DCY109T被认为代表*Phenylobacterium*的新物种,其被提议命名为*Phenylobacterium panacis* sp. nov.。上述研究说明红皮病人参中存在革兰氏阴性细菌侵染。

2.2 *Rhexocercosporidium panacis* 侵染

X. H. Lu等人^[35]于2013年9月在吉林省和黑龙江省的三个地区分别收集了10个人参患病根。从患病组织中培养出小的橄榄色黑色菌落,将3个随机选择的菌丝纯化后进行进一步鉴定,经鉴定三个分离菌株的序列显示(GenBank登录号为KJ149287、KJ149288和KJ149290-93),其与之前鉴定的*Rhexocercosporidium panacis*分离株(DQ2499992和DQ457119)的同源性均为99%~100%,并将这三种分离株鉴定为*R. panacis*并保藏于中国通用微生物菌种保藏中心(CGMCC3.17259-61)。该研究说明红皮病人参中存在*R. panacis*侵染。

2.3 其它微生物侵染

20世纪90年代尚延智等人^[36]通过研究发现采用侵

染性途径在人参移栽期对其进行侵染,可以使人参100%染病,因此判断人参红皮病为侵染性病害,微生物的作用是形成红褐色物质的诱因。随后陈振山等人^[7]分别用 ICP-6500 等离子发射光谱仪及 825-50 型氨基酸分析仪测定健康白皮参及患病的红皮参中所含的无机元素及氨基酸含量,经研究得知人参红皮病病变部位周皮所含的无机元素及氨基酸量均比健康的人参周皮含量高,因此推测在红皮病形成过程中有微生物侵染源的存在。同年司永吉等人^[8]利用聚丙烯酰胺凝胶电泳和薄层扫描进行了人参红皮病发病部位同工酶组份和活力变化的研究,该研究表明被侵染的人参各类样品中酯酶活力平均比无病白皮参增加100%,多酚氧化酶活力增加30%~60%,且在侵染早期出现了新的同工酶谱带,多酚氧化酶同工酶及酯酶同工酶的活力变化均与受人参感病的时间和程度呈正相关,该研究说明人参红皮病根自身的酯酶活力增加是由于受了侵染导致的。到了21世纪10年代 Rahman M 等人^[9]用甲苯胺蓝将人参锈蚀根染成蓝绿色,表明其存在酚类化合物并使用能量色散 x 射线光谱和原子发射光谱分析得知受红皮病影响的人参表皮细胞有明显的铁、铝、硅、镁等阳离子的积累并且总酚类化合物含量增加了3倍,同时采用 HPLC 分析显示人参中槲皮素、肉桂酸、香草酸、对羟基肉桂酸、苯甲酸、绿原酸和儿茶酸含量显著升高,后在田间种植的人参根系上施用壳聚糖,发现其引起的症状类似于人参根系生锈,因此推测红皮病发病机理可能是由于含几丁质的土壤真菌入侵诱导宿主产生防御反应,在人参表皮细胞和皮层细胞产生酚,随后酚类化合物的氧化和金属离子的螯合(特别是 Fe 的螯合)导致红皮病产生。上述研究说明红皮病人参中存在其它微生物侵染。

3 讨论

白浆土质地粘重、团聚体质量差、土壤含水过多、排水不畅易导致人参产生红皮病。关于人参红皮病的研究众多,除上述主要研究观点外,孙彦君等人^[40]认为参根周皮层死亡组织的分解及其腐殖化是这类参根锈斑物质的重要来源之一,而徐成路^[41]则认为人参根际土壤含水量高、土壤容重大、pH 值小、有机质含量高、铁锰离子含量高、人参根际土壤多酚氧化酶活性高的人参容易患红皮病,并且人参根际土壤中变形菌门、酸杆菌门、芽单胞菌门和硝化螺旋菌门以及 Rhodoplanes、Nitrospira、Pseudomonas、Thiobacillus、Hyphomicrobium 和 Pedomicrobium 菌属在土壤中所占比例高的人参更容易得红皮病,这也间接证明了 Park YD 等人^[33]研究的科学性。目前国内外学者针对人参红皮病发病机理的研究多集中于定义其为非侵

染性病害,对于其为侵染性病害的研究鲜少报道,其发病机理有待于进一步研究。目前推测其发病机理可能为土壤湿度、土壤温度改变导致病参中金属离子堆积胁迫或土壤湿度、土壤温度改变后参根周际微生物群落变化使人参招致微生物侵染后人参本身的一种自我应激保护反应,保护人参内部免受危害,使得人参在受到胁迫或侵染后表皮细胞分泌大量的酚类化合物和活性氧,酚类化合物被活性氧氧化,同时酚类化合物螯合金属离子以及金属元素的氧化等人参生理生化活动综合作用的结果。

参 考 文 献

- [1]国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:中国医药科技出版社,2010:62~64.
- [2]赵曰丰. 长白山区人参红皮病诊断及综合治理研究的新进展[J]. 特产研究,1998(01):41~46.
- [3]张博. 红皮病人参酚类化合物代谢分析及其发病机理解析[D]. 吉林大学,2014.
- [4]赵曰丰,李晓明,侯玉兵. 人参红皮病根部生物化学变化及病参质量综合评价[J]. 植物病理学报,1997(02):82~86.
- [5]赵曰丰,李晓明. 土壤中 Al³⁺对人参的为害[J]. 特产研究,1998(03):38~42.
- [6]张桂英,赵清池,张娅婕,蔡君峰. 人参红皮病参皮的化学分析[J]. 人参研究,1992(01):12~13.
- [7]张雅玉,李晓明. 人参表皮中铁的测定[J]. 特产研究,1994(02):41.
- [8]张亚玉,李晓明,赵曰丰,赵景辉,王玉芳,崔贞淑. 人参西洋参根部铁膜形成的研究[J]. 特产研究,1996(01):14~16+64.
- [9]赵曰丰,李晓明. 人参根红皮膜形成的研究[J]. 中国林副特产,1998(03):5~7.
- [10]Wang Yingping, Li Zhihong, Sun Yanjun, et al. Studies on the Genesis of Ginseng Rust Spots[J]. Korean J. Ginseng Sci. 1997, vol. 21. (No. 2): 69~77.
- [11]李志洪,郭世伟,田淑珍,刘兆荣,龙宝库. 白浆型床土人参红皮病发生原因的研究[J]. 土壤学报,1997(03):328~335.
- [12]Liu X, Yang ZM, Gao LL, et al. Comparison of the characteristics of artificial ginseng bed soils in relation to the incidence of ginseng red skin disease[J]. Experimental agriculture. 2014, Vol. 50 (No. 1): 59~71.
- [13]刘俊峰,刘波,赵曰丰. 铁、铝等无机元素在人参红皮病病根中的分布[J]. 植物病理学报,1998(01):39.
- [14]赵曰丰,李晓明,郭靖,刘俊峰. 电子探针在人参

红皮病诊断上的应用[J].特产研究,2000(03):1~5.

[15]SS Lee,KH Lee,ES Kim.Mineral Nutrition Contents of Rusty-Root Tolerance Ginseng Lines in 6-Year Old Root[J].《Journal of Ginseng Research》,2002 ,26 (3):165~169.2002.

[16]刘星. 参地土壤表层硝酸盐运移、土壤铝形态转化与人参红皮病的关系研究[D].吉林大学,2011.

[17]武孔云.人参红皮病与无机离子的关系[J].中药材,1989(12):15~16.

[18]高金方,金龙南,张树人,赵兰珍.人参的土壤营养与培肥研究 VI.关于人参红皮病[J].吉林农业科学,1992(01):45~47.

[19]李志洪,田淑珍,孙艳君,郭世伟,刘兆荣.人参红皮病与土壤生态条件的关系[J].生态学报,1999(06):864~869.

[20]孙淑梅,李玉国,陆继龙,焦保权,姜喜同.吉林省集安市红皮病人参参地土壤地球化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(02):412~416.

[21]曹国军,李志洪,郭士伟,孙艳君,田淑珍,刘兆荣.红皮病人参周皮层无机元素的相关性[J].土壤通报,1999(03):33~35.

[22]Tae Su Lee,Sung Kyun Mok,Seong Ki Cheon,etal.Chemical Components of Rusty Root of Ginseng[J].Journal of Ginseng Research.1995,Vol.19(No.1):77~83.

[23]李刚. 白浆型参地土壤铝形态转化及与人参红皮病的关系研究[D].吉林大学,2009.

[24]Wang Q X , Xu C L , Sun H , et al. Analysis of the relationship between rusty root incidences and soil properties in Panax ginseng [C]// Iop Conference Series: Earth & Environmental Science. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2016.

[25]Lee Sung-Sik, Lee Myong-Gu, Choi Kwang-Tae. Rusty-Root Tolerance and Chemical Components in 4-year old Ginseng Superior Lines [J].Journal of Ginseng Research.1999,Vol.23(No.2):61~66.

[26]Lee, Sung-Sik.Phenolic Compounds Contents of Rusty-Root Tolerance Ginseng Lines in 6-Year Old Root [J].Journal of Ginseng Research.2002,Vol.26(No.3):165~169.

[27]Zhou Y,Yang ZM,Gao LL,etal.Changes in element accumulation, phenolic metabolism, and antioxidative enzyme activities in the red-skin roots of Panax ginseng[J].Journal of Ginseng Research.2017,Vol.41(No.3):307~315.

[28]赵曰丰,刘俊峰,李晓明,郭晶.人参对铁铝环境胁迫的保护反应[J].特产研究,1999(04):1~4.

[29]Sung-Sik Lee,Myong-Gu Lee,Kwang-Tae Choi,

etal.Studies on the Causal Component of Rusty-Root on Panax ginseng I. Antioxidative Activity Oriented[J].Journal of Ginseng Research.2000,Vol.24(No.3):113~117.

[30]刘文. 白浆型参地人参红皮病发病机理研究[D].吉林大学,2012.

[31]部灵灵. 白浆型参地土壤交换性铝年度监测及红皮病人参抗坏血酸代谢相关酶活性分析[D].吉林大学,2013.

[32]Jae-Eul Choi, Jin-Ah Ryuk, Jin-Hee Kim, et al. Identification of Endophytic Bacteria Isolated from Rusty-colored Root of Korean Ginseng (Panax ginseng) and Its Induction [J].Korean Journal of Medicinal Crop Science.2005,Vol.13(No.1):1~5.

[33]Park YD, Lee HB, Yi H, et al. Pseudomonas panacis sp. nov., isolated from the surface of rusty roots of Korean ginseng [J].International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.2005

[34]Farh ME1, Kim YJ2, Singh P3, et al. Phenyllobacterium panacis sp. nov., isolated from the rhizosphere of rusty mountain ginseng. [J].INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMATIC AND EVOLUTIONARY MICROBIOLOGY.2016:2691~2696.

[35]XH Lu, AJ Chen, XS Zhang, et al. First Report of Rhexocercosporidium panacis Causing Rusty Root of Panax ginseng in Northeastern China [J].Plant Disease. 2014,Vol.98(No.11):1580.

[36]尚延智,陈振山,司永吉,滕冰.人参红皮病发病原因探讨[J].中药材,1996(04):163~165.

[37]陈振山,尚延智,司永吉,滕冰,胡宝忠.人参红皮病发病部位化学分析报告[J].中药材,1997(03):111~112.

[38]司永吉,尚延智,陈振山,滕冰,胡宝忠.人参红皮病发病部位同工酶的研究[J].中药材,1997(06):271~273.

[39]Rahman Mahfuzur,Punja Zamir K.(punja@sfu.ca).Biochemistry of ginseng root tissues affected by rusty root symptoms.[J].Plant Physiology and Biochemistry.2005,Vol.43(NO.12):1103~1114.

[40]孙彦君,李志洪,曹国军,王英平,田淑珍,刘兆荣.参根周皮层锈斑有机组分来源的探讨[J].土壤通报,2002(03):223~225.

[41]徐成路. 人参红皮病根际土壤特性研究[D].中国农业科学院,2016.