

新疆野苹果枯枝症状级别与水杨酸含量、 胸径关系研究

于少帅, 赵文霞*, 姚艳霞, 淮稳霞, 肖文发

(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 分析同一采样地、同一生境新疆野苹果枯枝症状级别与水杨酸含量、胸径的关系, 寻找与枯死症状可能相关的特征。 [方法] 通过超声提取、HPLC 检测分析不同枯枝症状级别样品中水杨酸组成和含量差异, 并对枯枝症状级别与水杨酸含量、胸径关系进行统计分析。 [结果] 不同枯枝症状级别的新疆野苹果枝叶中水杨酸含量在 $39.5 \sim 122.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 含量差异显著 ($P < 0.05$)。枯枝症状从 0 级到 V 级, 水杨酸含量存在先降低后升高的趋势。不同枯枝症状级别新疆野苹果胸径大小变异系数差异明显, V 级样品个体间胸径变异系数相对较大 (39.18%); I 级样品变异系数相对较小 (30.28%)。新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小呈负相关 ($P > 0.05$), 其中, 0 级、V 级样品水杨酸含量和胸径大小呈正相关, I 级、II 级、III 级、IV 级样品水杨酸含量和胸径大小呈负相关 ($P > 0.05$)。 [结论] 新疆野苹果枯枝症状级别与水杨酸含量、胸径大小关系较为密切, 研究结果对于天山野果林的生态保育与修复、苹果优质新品种的筛选与培育等具有一定的参考价值。

关键词: 新疆野苹果; 水杨酸; 胸径; 相关性分析; 抗逆性

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2019)02-0111-06

新疆野苹果 (*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.) 又称塞威氏苹果, 属第三纪孑遗植物, 可能是现代栽培苹果的祖先种。我国新疆野苹果是研究世界苹果遗传多样性和基因进化的重要天然基因库, 对我国优质栽培苹果的生产具有重要作用。新疆野苹果主要分布于我国新疆伊犁州的巩留县、新源县、霍城县, 塔城地区的额敏县、裕民县、托里县等地^[1]。其果实形态、颜色、风味等变异很多, 并且在长期的自然进化过程中形成了许多具有抗寒、抗病虫害等优良性状的新疆野苹果种群或单株^[2-3]。近年来新疆野苹果的生存状态受到人类活动、苹小吉丁和苹果腐烂病等因素影响较为严重^[1,4]。受苹小吉丁危害枯死的新疆野苹果枝干上分布着大量苹果腐烂病菌, 自然条件下, 苹果小吉丁虫往往和苹果腐烂病等混合发生, 复合危害新疆野苹果林的生存状态^[4]。自然条件下植物的健康状况往往不是受单一因素的影响, 而是受病害、虫害、生境、植物自身特征等多种

因素综合影响^[5]。目前关于我国新疆野苹果枯死原因尚不清楚。因此, 可以通过不同枯枝症状新疆野苹果遗传特征的比较, 寻找与枯死症状相关的遗传特征, 推测引起差异症状的原因及可能的胁迫因子。

水杨酸是植物体内一种小分子酚类物质, 参与活体营养型病原菌引发的防御反应, 并诱发植物的系统获得抗性^[6-7]。Pasqualini 等发现臭氧可诱导烟草叶片中水杨酸含量的升高, 高浓度的水杨酸可增加烟草植株中活性氧含量从而激活植株细胞死亡等植物防御机制^[8]。水杨酸不仅可以通过抑制病原菌分泌的细胞壁降解酶的活性降低病原菌的致病力, 还能作为信号诱导植物体内病程相关基因的表达, 增加植物抗病能力^[6,9]。在苹果属植物与其病原菌互作过程中, 水杨酸作为信号物质而起到重要的作用^[9-10-11]。不同抗枣疯病性枣树间水杨酸含量差异极其显著 ($P < 0.01$), 并且水杨酸的组成和含量与枣树抗枣疯病性呈现一定的相关性^[12]。植物

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501503), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2017SZ003)

* 通讯作者: 赵文霞, 研究员, 主要从事森林保护、有害生物检疫相关研究. E-mail: zhaowenxia@caf.ac.cn。

的组成抗性是植物在未受到侵害时就已经具备的天然抗性屏障,防御蛋白是组成抗性的重要组成部分,已有研究表明植物防御蛋白与植物胸径(diameter at breast height, DBH)关系密切^[13]。张睿彬等研究发现胸径大的东北红豆杉针叶内苯丙氨酸解氨酶(PAL)和过氧化物酶(POD)的活性显著高于胸径小的($P < 0.05$)^[13]。此外,植物胸径的大小与植物树龄、立地条件、气候环境等具有一定程度的相关性。

新疆野苹果树大面积衰败和死亡,遗传资源面临严重威胁,但是新疆野苹果林的生态退化机理目前尚不清楚。在巩留的野外调查发现:同一采样点、同一生境条件下不同新疆野苹果种群或单株表现出不同的抗逆性,有的新疆野苹果株系健康,枝叶繁茂;有的新疆野苹果株系受病原菌或其它胁迫因子影响枯枝严重甚至枯死。而关于同一生境下,不同新疆野苹果株系表现出不同症状的原因尚未见报道。因此,有必要寻求新的研究思路揭示野苹果抗病原因。关于我国新疆野苹果化学成分、遗传多样性等方面的研究相对较多^[1],但这些因素与新疆野苹果抗病虫害关系尚未见报道。因此,本研究对同一生境、同一采样地表现出不同枯枝症状的新疆野

苹果中水杨酸组成和含量差异进行分析;并将不同枯枝症状级别新疆野苹果的水杨酸含量与胸径结合分析,寻找与新疆野苹果枯枝症状相关的遗传特征,为天山野果林的保育和优质苹果资源的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 新疆野苹果调查采样和枯枝症状级别划分

2016年7月至9月,对新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州巩留县阿勒玛勒山同一生境条件下的123株新疆野苹果病虫害、生境等状况进行调查,测定、记录胸径和采样地点海拔、经纬度等信息,调查点经纬度为82°49′23.26″E、43°15′17.06″N,海拔高度为1188m。根据调查点新疆野苹果树上的枯枝率(一株新疆野苹果树上的枯枝量占总枝量的比率),对新疆野苹果枯枝症状按级别进行划分^[5],共分6个级别:0级(0)、I级(0~10%)、II级(10%~40%)、III级(40%~60%)、IV级(60%~90%)、V级(90%~100%)。其中,以0级(0)为对照。新疆野苹果不同级别的枯枝症状如图1所示。

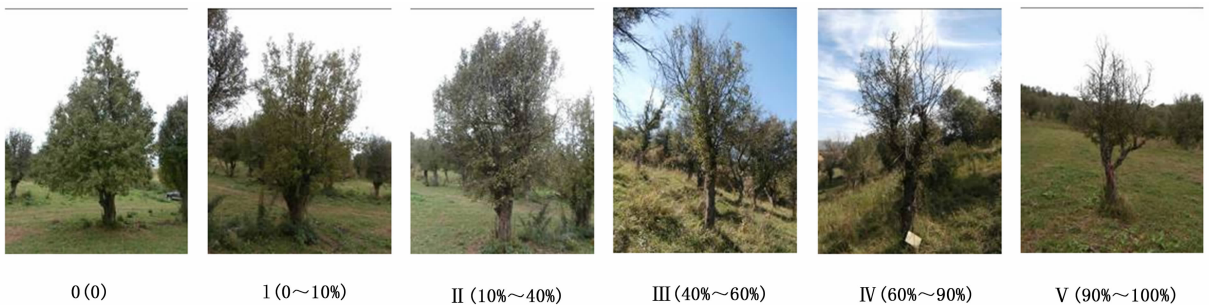


图1 新疆野苹果不同级别枯枝症状

Fig. 1 Deadwood symptom of *Malus sieversii* with different grades

每个级别选取胸径、长势相似的4株新疆野苹果取样用于植物化学分析。每株树单独采取树中部枝叶若干,枝叶样品干燥粉碎后称取2.0g备用。

1.1.2 试剂 甲醇为色谱醇,水为超纯水,由MILLI-Q超纯水纯化系统制得。水杨酸标准品为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司,含量 $[C_7H_6O_3] \geq 99.5\%$ 。其他试剂均为分析纯。

1.1.3 实验仪器 KQ-600E型超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司),RE-52型旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂),Ohaus电子分析天平(上海奥豪斯公司),DL-101-3BS型电热鼓风干燥箱(天津市中环实验电炉有限公司),FW100高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司),ZDP-2270型全自

动新型电热培养箱(上海智城分析仪器制造有限公司),美国安捷伦1200高效液相色谱系统,包括G1322A型脱气机,G1312A型二元泵,G1329A-ALS型自动进样器,G1316A-TCC型柱温箱和G1365D-MWD型紫外检测器。

1.2 实验方法

1.2.1 水杨酸提取 新疆野苹果枝叶样品40℃烘干粉碎,精确称取样品粉末2.0g,置入100mL锥形瓶中,加入30mL甲醇超声处理1h,取上清液过滤。残渣按上述方法再处理1次。合并两次上清滤液,用旋转蒸发仪将上清液40℃减压蒸干。用10mL甲醇洗脱圆底烧瓶底部浸膏,野苹果样品提取液-20℃保存备用。

1.2.2 HPLC 检测 新疆野苹果样品提取液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析,样品检测的色谱条件为:色谱柱热电 ODS(4.6 mm \times 200 mm, 5 μm);流动相为 60% 甲醇和 40% 水(体积比),pH 值约为 3;柱温为室温;检测波长为 220 nm;流速为 0.8 mL \cdot min⁻¹;通过外标法对检测成分定性定量。每份样品做 3 个平行检测。新疆野苹果枝叶样品中水杨酸含量以平均值 \pm 标准差的形式表示,单位为 mg \cdot kg⁻¹。

1.3 数据处理

本研究数据的单因素方差分析、多重比较和相关性分析等采用 SPSS 13.0 统计软件完成,显著性水平 $P = 0.05$ 。图采用 Sigma Plot 12.0 绘图软件完成。

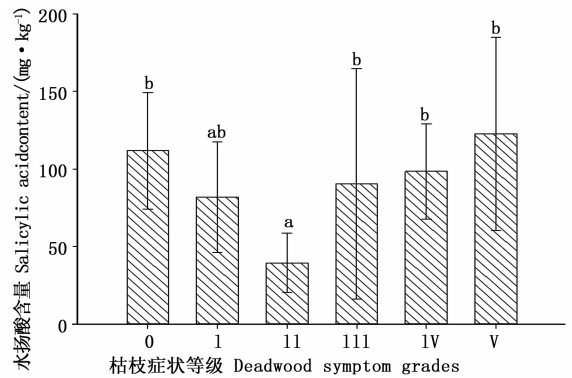
2 结果与分析

2.1 不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量及其差异

对不同症状级别新疆野苹果枝叶中的水杨酸含量检测表明:水杨酸含量在 V 级样品水杨酸含量最高,为 122.6 mg \cdot kg⁻¹;0 级样品水杨酸含量次之,为 111.7 mg \cdot kg⁻¹;II 级样品中水杨酸含量最低,为 39.5 mg \cdot kg⁻¹;I、III、IV 级样品中水杨酸含量基本一致,分别为 81.8、90.3、98.5 mg \cdot kg⁻¹(图 2)。单因素方差分析和 LSD、Duncan 分析表明新疆野苹果不同症状级别间水杨酸含量差异显著($P = 0.01 < 0.05$)。新疆野苹果部分症状级别两两之间也有显著差异($P < 0.05$),II 级样品水杨酸含量与 0、III、IV、V 级样品水杨酸含量差异显著($P < 0.05$),与 I 级样品中水杨酸含量差异并不显著($P > 0.05$)(图 2)。由图 2 可知,新疆野苹果枯枝症状从 0 级到 V 级,水杨酸含量存在一个先降低后升高的变化趋势。

2.2 不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量相关性分析

对不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量进行相关性分析发现:0 级与 I 级、0 级与 V 级、I 级与 II 级、I 级与 IV 级、I 级与 V 级、II 级与 IV 级、IV 级与 V 级样品之间水杨酸含量存在一定程度的正相关性;0 级与 II 级、0 级与 III 级、0 级 IV 级、I 级与 III 级、II 级与 III 级、II 级与 V 级、III 级与 IV 级、III 级与 V 级之间样品之间水杨酸含量存在一定程度的负相关性,但相关性水平均不显著,如表 1 所示。III 级样品与所有级别样品之间的水杨酸含量均呈负相关,相关性不显著。由此可知,不同枯枝症状级别的



注:柱形图上方不同的小写字母表示差异显著($P = 0.05$)。

Note: Different small letters above the column diagram indicated the significant difference ($P = 0.05$).

图 2 不同症状级别新疆野苹果水杨酸含量及其差异
Fig. 2 Salicylic acid contents and their differences in different symptom grades *Malus sieversii*

新疆野苹果中水杨酸含量存在一定的相关性,但相关性水平均不显著($P > 0.05$)。

表 1 不同症状级别新疆野苹果水杨酸含量相关性分析

Table 1 Correlation analysis of salicylic acid content in different symptom grade *Malus sieversii*

症状级别 Symptom grade	参数 Param.	0 级	I 级	II 级	III 级	IV 级
I 级	r	0.163				
	P	0.837				
II 级	r	-0.817	0.301			
	P	0.183	0.699			
III 级	r	-0.275	-0.119	-0.165		
	P	0.725	0.881	0.835		
IV 级	r	-0.061	0.440	0.580	-0.869	
	P	0.939	0.560	0.420	0.131	
V 级	r	0.749	0.770	-0.357	-0.166	0.171
	P	0.251	0.230	0.643	0.834	0.829

2.3 新疆野苹果枯枝症状级别与胸径关系分析

对巩固同一立地条件下 123 株新疆野苹果胸径测量、统计表明:新疆野苹果枯枝症状为 II 级的样品胸径平均值最大,为 38.38 cm;枯枝症状为 V 级的样品胸径平均值最小,为 31.16 cm。单因素方差分析表明:不同枯枝症状级别的新疆野苹果胸径大小差异并不显著($P > 0.05$)。LSD、Duncan 分析表明:新疆野苹果不同枯枝症状级别组间也没明显差异($P > 0.05$),如表 2 所示。由此推知新疆野苹果枯枝症状级别与其胸径大小关系并不明显。不同枯枝症状级别新疆野苹果胸径大小的变异系数差异明显,变异系数由大到小依次为:V 级 $>$ 0 级 $>$ II 级 $>$

IV级 > III级 > I级。V级样品个体间胸径大小的变异系数最大,为 39.18%;I级样品个体间胸径大小的变异系数最小,为 30.28%;III、IV级样品个体间胸径大小的变异系数基本一致,分别为 31.05% 和 31.22% (表 2)。

表 2 不同症状级别新疆野苹果胸径大小统计分析

Table 2 Statistics analysis of DBH sizes of *Malus sieversii* with different symptom grades

症状级别 Symptom grade	调查数 量/株 Survey No.	平均值 Mean/ cm	最大值 Max/ cm	最小值 Min/ cm	标准差 St Dev/ cm	变异系数 Coefficient of Variation/%
0	21	33.05	65.00	20.00	12.20	36.90
I	22	35.00	55.00	15.00	10.60	30.28
II	21	38.38	64.00	20.00	13.85	36.08
III	21	31.33	60.00	19.00	9.73	31.05
IV	19	32.58	52.00	14.00	10.17	31.22
V	19	31.16	60.00	18.00	12.21	39.18

2.4 不同枯枝症状级别新疆野苹果枝叶中水杨酸含量与胸径相关性分析

枯枝症状为 V 级的新疆野苹果样品水杨酸含量最高,胸径变异系数也最大,0 级样品的水杨酸含量和胸径变异系数均次之,I 级样品的水杨酸含量和胸径变异系数均较小,II 级新疆野苹果水杨酸含量最低,但胸径大小变异系数相对较大,如表 2 所示。不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小的相关性分析表明:不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小存在一定程度的负相关性 ($r = -0.157$),但相关性水平不显著 ($P > 0.05$),如表 3 所示。此外,相关性分析表明:0 级、V 级新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小呈一定程度的正相关性,相关系数分别为 0.162 和 0.906 ($P > 0.05$); I、II、III、IV 级样品水杨酸含量和胸径大小呈一定程度的负相关性,相关系数分别为 -0.879 、 -0.217 、 -0.805 和 0.551 ($P > 0.05$) (表 3)。由此可知,总体水平上新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小存在一定程度的负相关性,不同症状级别新疆野苹果水杨酸含量与胸径大小相关性有所不同,但相关性均不显著 ($P > 0.05$)。

表 3 不同枯枝症状级别新疆野苹果水杨酸含量与胸径相关性分析 ($n = 24$)

Table 3 Correlation analysis between salicylic acid content and DBH of *Malus sieversii* with different deadwood symptom grades ($n = 24$)

参数 Param.	0 级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级	总体 Overall
r	0.162	-0.879	-0.217	-0.805	-0.551	0.906	-0.157
P	0.838	0.121	0.783	0.195	0.449	0.094	0.464

3 讨论

水杨酸能诱发植物的抗逆反应,增强其免疫能力^[6,14]。已有研究表明水杨酸可诱导桉树苗显著地增强对青枯病的抗性^[15],应用水杨酸溶液喷洒油茶叶片可有效诱导植株产生对炭疽病的局部或系统性抗性^[16]。黎淑芬等研究表明水杨酸可诱导 4 月生黑松苗产生对松材线虫病不同程度的抗性^[17]。此外,水杨酸可增强植物对盐碱、干旱等逆境的抗性^[7,18-19]。本研究结果表明新疆野苹果不同个体、不同枯枝症状级别的水杨酸含量差异显著 ($P < 0.05$)。新疆野苹果枯枝症状从 0 级到 V 级,水杨酸含量存在先升后降趋势。水杨酸是植物体内重要的信号传导分子,在植物防御病原菌侵染过程中起着重要作用^[6,20-21]。植物受病原菌侵染初期,会发生一系列植物防御反应的早期信号事件,放大信号。这一过程中,植物体内活性氧迸发,水杨酸与水杨酸结合蛋白高度专化结合,诱发脂质过氧化产生小分子脂质物,这些物质可直接诱发基因表达或蛋白质磷酸化;植物体内的 NO 可以激活水杨酸信号途径并且至少可以部分通过水杨酸信号途径介导真菌诱导子诱发的病原相关蛋白合成积累^[22-23]。推测植物受病原菌侵染前期是一个消耗植物体内水杨酸的过程。而植物体内活性氧迸发产生的 NO 也可促进水杨酸积累^[24];病原菌侵染能激活次生代谢苯环烷类莽草酸途径和异分枝酸途径合成水杨酸导致水杨酸合成增加^[22-23]。推测植物受到病原菌侵染一定时期内水杨酸含量水平会显著升高。因此推测随着新疆野苹果病情的发展,在病情发展的不同阶段植物体内水杨酸含量先降后升的趋势可能与水杨酸在植物抗逆性中的效应有关。

此外,新疆野苹果水杨酸含量差异显著也可能与新疆野苹果不同个体间本身存在的遗传特性差异有关。由于植物自身的遗传特性差异,在受到外界胁迫因子的影响时,不同个体会产生不同程度的防御反应从而表现出不同症状^[6-7,14]。已有研究表明在枣树抵御其病原菌植原体的侵染过程中,不同遗传品质、不同抗枣疯病的枣树会通过不同程度的信号转导、基因调控、抗病物质合成等代谢活动来增强枣树植株的抗病能力,从而在受植原体侵染时,不同枣树种质资源会表现出不同的症状反应^[25-26]。本研究方差分析表明不同枯枝症状级别的新疆野苹果枝叶间水杨酸含量差异显著 ($P < 0.05$)。由此推测,水杨酸含量的差异可能与类群本身的遗传背景有关。

已有研究表明植物体内参与防御反应的活性物质与植物胸径大小关系密切($P < 0.05$)^[13]。本研究表明:新疆野苹果不同枯枝症状级别间胸径差异并不显著,其枯枝症状与胸径大小关系并不明显。由此推知新疆野苹果的枯枝率与其自身树龄并不存在显著的关系,但不同枯枝症状级别新疆野苹果胸径大小的变异系数差异明显。新疆野苹果水杨酸含量和胸径大小存在一定程度的负相关性,枯枝率在0~90%之间的新疆野苹果样品水杨酸含量和胸径大小也呈负相关性,但枯枝率为0或>90%的新疆野苹果样品中水杨酸含量与胸径大小却呈正相关性,相关程度并不显著。新疆野苹果枯枝症状级别、水杨酸含量、胸径大小等彼此之间均存在一定的相关性,关系较为密切。不同枯枝症状级别的新疆野苹果水杨酸含量差异显著($P < 0.05$),胸径大小差异并不明显($P > 0.05$)。

关于新疆野苹果种质遗传变异和系统发育研究表明:新疆巩留县、新源县等地的新疆野苹果种群存在丰富的遗传多样性^[27-28],种群内部遗传分化程度较高^[1,29]。同一采样地、同一生境新疆野苹果枯枝症状级别、水杨酸含量的差异可能与新疆野苹果自身的遗传特征差异有关。由研究结果可知,同一采样地、同一生境新疆野苹果表现出不同枯枝症状,而这些症状差异可能与新疆野苹果本身的分子遗传变异有关。通过分子生物学手段可以很好的揭示植物内在分子遗传变异与其外在抗性表型性状间的关系^[29-30]。Klabunde 等用 11 对 SSR 引物对 152 份具有不同苹果叶斑病抗性的巴西栽培苹果接穗的遗传多样性评估发现不同抗性栽培苹果间存在丰富的遗传多样性,对苹果叶斑病抗病、感病品种间遗传结构差异显著,有 120 个等位位点是抗病品种独有的^[31]。因此,有待于结合分子生物学手段对同一采样地、同一生境不同新疆野苹果个体的遗传背景做进一步分析。

4 结论

本研究对同一采样地、同一生境的新疆野苹果不同枯枝症状级别的水杨酸组成和含量差异进行分析,结果表明:新疆野苹果不同枯枝症状级别间水杨酸含量差异显著($P < 0.05$)。新疆野苹果枯枝症状级别从 0 级到 V 级,水杨酸含量存在先降低后升高的趋势。新疆野苹果不同枯枝症状级别间胸径差异并不显著,其枯枝症状与胸径大小关系并不明显。不同枯枝症状级别新疆野苹果胸径变异系数差异较大。新疆野苹果本身遗传特征可能是同一立地条件

下、同一胁迫条件下,新疆野苹果表现出不同枯枝症状的原因之一。因此,有必要通过分子生物学方法对新疆野苹果不同个体的分子变异和系统发育做深入研究,以期揭示不同新疆野苹果个体间更多的遗传信息及其分子变异特征。本研究结果对于探究我国新疆野苹果枯死原因和修复天山野果林生态等具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 张艳敏,冯涛,张春雨,等. 新疆野苹果研究进展[J]. 园艺学报, 2009, 36(3): 447-452.
- [2] 梅闯,闫鹏,韩立群,等. 新疆野苹果不同类型单株对苹果小吉丁虫抗性差异[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(10): 1859-1865.
- [3] 刘君,刁永强,陈淑英,等. 伊犁河谷不同苹果品种苗木冻害调查及分析[J]. 北方园艺, 2013, (23): 34-37.
- [4] 刘爱华,张新平,温俊宝,等. 天山野苹果林苹果小吉丁与苹果腐烂病复合危害研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2240-2244.
- [5] 阿格里斯. 植物病理学,第5版[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2009.
- [6] An C F, Mou Z L. Salicylic acid and its function in plant immunity[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2011, 6: 412-428.
- [7] Jini D, Joseph B. Physiological mechanism of salicylic acid for alleviation of salt stress in rice[J]. Rice Science, 2017, 24(2): 97-108.
- [8] Pasqualini S, Torre G D, Ferranti F, et al. Salicylic acid modulates ozone-induced hypersensitive cell death in tobacco plants[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 115(2): 204-212.
- [9] 刘斐,谭贻,王忆,等. 苹果腐烂病菌侵染过程中枝条相关病程物质含量的变化[J]. 中国农学通报, 2015, 31(34): 177-186.
- [10] Yin L H, Zou Y J, Ke X W, et al. Phenolic responses of resistant and susceptible *Malus* plants induced by *Diplocarpon mali*[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 17-23.
- [11] Yin L H, Zou Y J, Li M J, et al. Resistance of *Malus* plants to *Diplocarpon mali* infection is associated with the antioxidant system and defense signaling pathways[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2013, 84: 146-152.
- [12] 于少帅. 植原体 tuf 基因启动子分子特征和枣树抗植原体物质研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2016.
- [13] 张睿彬,胡晓,刘彤,等. 性别、胸径和叶龄对东北红豆杉针叶内防御蛋白活力的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 29(8): 48-52.
- [14] 汪尚,徐鹭芹,张亚仙,等. 水杨酸介导植物抗病的研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 52(5): 581-590.
- [15] 冉隆贤,谷文众,吴光金. 水杨酸诱导桉树抗青枯病的作用及相关酶活性变化[J]. 林业科学研究, 2004, 17(1): 12-18.
- [16] 王军,陈绍红,黄永芳,等. 水杨酸诱导油茶抗炭疽病的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 629-632.
- [17] 黎淑芬,吴小芹. 水杨酸对黑松苗抗松材线虫病的诱导作用[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2005, 29(6): 49-53.

- [18] 叶松涛, 杜旭华, 宋帅杰, 等. 水杨酸对干旱胁迫下毛竹实生苗生理生化特性的影响[J]. 林业科学, 2015, 11: 25–31.
- [19] 陈颖, 徐彩平, 汪南阳, 等. 盐胁迫下水杨酸对南林 895 杨树组培苗抗氧化系统的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 6: 17–22.
- [20] Delaney T P, Uknes S, Vernooij B, *et al.* A central role of salicylic acid in plant disease resistance [J]. *Science*, 1994, 266 (5188): 1247–1250.
- [21] Klessig D F, Durner J, Noad R, *et al.* Nitric oxide and salicylic acid signaling in plant defense[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, 97 (16): 8849–8855.
- [22] 王三根, 宗学凤. 植物抗性生物学[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2015.
- [23] 商鸿生. 植物免疫学, 2 版[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
- [24] 马健, 刘振宇, 吕全, 等. SA 及 H₂O₂ 在杨树与溃疡病菌互作中的表达差异[J]. 林业科学, 2013, 49(1): 107–113.
- [25] 田国忠, 李志清, 胡佳绩, 等. 我国部分枣树品种(系)的枣疯病抗性鉴定[J]. 林业科技开发, 2013, 27(3): 19–25.
- [26] 刘孟军, 赵锦, 周俊义. 枣疯病[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [27] Zhang C, Chen X, He T, *et al.* Genetic structure of *Malus sieversii* population from Xinjiang, China, revealed by SSR markers [J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2007, 34(10): 947–955.
- [28] 张春雨, 陈学森, 林群, 等. 新疆野苹果群体遗传结构与遗传多样性的 SRAP 分析[J]. 园艺学报, 2009, 36(1): 7–14.
- [29] 董研, 张军, 任亚超, 等. 中国新疆野苹果天然群体遗传多样性 SSR 分析[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(5): 771–777.
- [30] Saha D, Rana R S, Arya L, *et al.* Genetic polymorphisms among and between blast disease resistant and susceptible finger millet, *Eleusine coracana* (L.) Gaertn [J]. *Plant Genetic Resources*, 2016, <https://doi.org/10.1017/S1479262116000010>.
- [31] Klabunde G H F, Junkes C F O, Tenfen S Z A, *et al.* Genetic diversity and apple leaf spot disease resistance characterization assessed by SSR markers [J]. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 2016, 16 (3): <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332016v16n3a29>.

Relationships among Deadwood Symptom Grades, Salicylic Acid Content and DBH of *Malus sieversii*

YU Shao-shuai, ZHAO Wen-xia, YAO Yan-xia, HUAI Wen-xia, XIAO Wen-fa

(Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To analyze the relationships among deadwood symptom grades, the salicylic acid content and the DBH of *Malus sieversii* trees collected in same sampling site and habitat conditions was analyzed in order to find the features of *M. sieversii* that might be related to the symptoms of exsiccation. [Method] The difference in salicylic acid composition and content in different symptom grades of *M. sieversii* was investigated by ultrasonic extraction and HPLC methods. Statistical analysis was conducted to find the relationships among deadwood symptom grades, the salicylic acid content and DBH of *M. Sieversii*. [Result] The content of salicylic acid in *M. sieversii* branches and leaves with different deadwood symptom grades was in the range of 39.5 ~ 122.6 mg · kg⁻¹, showing significant difference ($P < 0.05$). Along with deadwood symptoms from grade 0 to grade V, the salicylic acid content fell down at first and then up. The variation coefficient of DBH size of *M. sieversii* was significantly different. The variation coefficient of DBH among grade V samples was relatively high (39.18%), and the coefficient of grade I samples was comparatively low (30.28%). There was a negative correlation between salicylic acid content and DBH of *M. sieversii* ($P > 0.05$). There was a positive correlation between salicylic acid content and DBH of grade 0 and grade V samples, and there was a negative correlation between salicylic acid content and DBH of samples of grades I, II, III and IV ($P > 0.05$). [Conclusion] There is a comparatively close relationship among deadwood symptom grades, the salicylic acid content and the DBH of *M. sieversii*. The results achieved in the study will provide some reference clues for ecological conservation and restoration of wild fruit forest in Tianshan Mountains and the screening and cultivation of high-quality varieties of cultivated apple.

Keywords: *Malus sieversii*; salicylic acid; diameter at breast height; correlation analysis; stress resistance