植物遗传资源学报 2022，23（6）：1682-1695
Journal of Plant Genetic Resources DOI：10.13430/j.cnki.jpgr.20220629002

苹果种质资源火疫病抗性鉴定评价与筛选

王大江[1]，高　源[1]，张玉刚[2]，张校立[3]，孙思邈[1]，路　翔[1,4]，
郭绍霞[2]，Khurshid S.Turakulov[5]，李连文[1]，王　昆[1]
（[1]中国农业科学院果树研究所 / 农业农村部园艺作物种质资源利用重点实验室，辽宁兴城 125100；[2]青岛农业大学，山东青岛 266109；
[3]新疆农业科学院园艺作物研究所，乌鲁木齐 830091；[4]石河子大学农学院 / 特色果树栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室，
新疆石河子 832000；[5]Institute of Genetics and Plant Experimental Biology，Academy Sciences of Uzbekistan，Uzbekistan Tashkent）

摘要：以 488 份苹果种质资源为试材，利用嫩叶和嫩枝离体接种方法鉴定评价苹果属栽培品种、野生种和古老栽培品种的火疫病抗性。结果表明，嫩叶和嫩枝接种结果存在较大差异，嫩枝接种的抗性资源明显多于嫩叶接种。不同种、不同来源、不同系谱的苹果资源火疫病抗性均存在较大差异。嫩叶接种显示苹果栽培品种和野生种的抗病资源比例均高于古老栽培品种；旭系和金冠系抗性资源比例较高；不同来源的 189 份塞威士苹果评价结果显示，高抗资源主要来自乌兹别克斯坦和中国新疆新源。嫩枝接种显示栽培品种的抗性表现与嫩叶接种相似；塞威士苹果则存在差异，来自乌兹别克斯坦和中国新疆巩留的抗性类型比例较高。嫩叶和嫩枝接种结果一致的 187 份资源分析，发现苹果栽培品种抗性资源比例较高；旭系品种的抗性较强；抗病的塞威士苹果主要来自乌兹别克斯坦和中国新疆新源。筛选高抗资源 8 份，苹果栽培品种 6 份和塞威士苹果 2 份。6 份苹果栽培品种可作为鲜食种质创制和品种选育亲本，2 份塞威士苹果既可作为鲜食也可用作砧木品种选育的基础材料。

关键词：苹果种质资源；火疫病；离体；接种；评价；筛选

Evaluation and Screening of *Malus* Germplasm Resources with Fire Blight Resistance

WANG Da-jiang[1]，GAO Yuan[1]，ZHANG Yu-gang[2]，ZHANG Xiao-li[3]，SUN Si-miao[1]，
LU Xiang[1,4]，GUO Shao-xia[2]，Khurshid S.Turakulov[5]，Li Lian-wen[1]，WANG Kun[1]
（[1]*Research Institute of Pomology*，*Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Horticultural Crops Germplasm Resources Utilization*，*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*，*Liaoning Xingcheng 125100*；[2]*Qindong Agricultural University*，*Shandong Qingdao 266109*；[3]*Institute of Horticultural Crops*，*Xinjiang Academy of Agricultural Sciences*，*Urumqi 830091*；
[4]*College of Agriculture*，*Shihezi University / Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Special Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization*，*Xinjiang Shihezi 832000*；
[5]*Institute of Genetics and Plant Experimental Biology*，*Academy Sciences of Uzbekistan*，*Uzbekistan Tashkent*）

Abstract：488 *Malus* germplasm resources，including cultivates，wild species，ancient cultivates，were evaluated for fire blight resistance by *in vitro* inoculating young leaves and shoots. A difference on resistance revealed by two inoculation methods（leaves *vs.* shoots）was observed，and a higher proportion of germplasms showing resistance were detected by inoculating the young shoots. The germplasm of different species，origins and pedigrees represented significant different on disease resistance. The results of young leaves inoculation showed that the proportion of resistant resources in cultivates and wild species was higher than that in ancient

收稿日期：2022-06-29　　**修回日期：**2022-07-18　　**网络出版日期：**2022-07-28
URL：https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20220629002
第一作者研究方向为苹果种质资源研究，E-mail：dajiang0101@126.com
通信作者：王　昆，研究方向为苹果种质资源，E-mail：wangkun5488@163.com
基金项目：国家重点研发计划项目（2021YFE0104200，2019YFD1001403）；中国农业科学院创新工程项目（CAAS-ASTIP-2016-RIP-02）
Foundation projects：National Key Research and Development Plan（2021YFE0104200，2019YFD1001403）；The Agricultural Science and Technology Innovation Program of the Chinese Academy of Agricultural Sciences（CAAS-ASTIP-2016-RIP-02）

cultivates. The proportion of resistant resources of McIntosh strains and Golden Delicious strains was higher than that of other strains. By analyzing the passport information of 189 *Malus sieversii* resources, these resources showing high resistant were mainly from Uzbekistan and Xinyuan County of Xinjiang autonomous region, China. The young shoots inoculation revealed a similar pattern with young leaves inoculation except for *Malus sieversii*, which had higher proportion of resistant resources from Uzbekistan and Gongliu County of Xinjiang autonomous region, China. There were 187 *Malus* germplasm resource showing consistent results revealed by both inoculation methods, of which the McIntosh strains showed strong resistance and majority of the *Malus sieversii* resources showing resistant were collected from Uzbekistan and Xinyuan County of Xinjiang autonomous region, China. The eight *Malus* germplasm resources were observed with high ressitance against fire blight, including six cultivates that could be used as the parents for germplasm innovation and cultivar breeding, as well as two *Malus sieversii* resources that could be used as basic materials for cultivar and rootstocks breeding.

Key words: *Malus* germplasm; fire blight; in vitro; inoculation; evaluation; screening

火疫病是由支链淀粉杆菌（*Eriwinia amylovora*）引起的细菌病害，对蔷薇科 36 个属 150 多个种致病，危害苹果、梨等果树的花朵、芽、枝条、树干和砧木，最终导致树体死亡，果园减产，严重时甚至造成毁灭性灾害[1]。历史上，火疫病在美国北部造成超过 6800 多万美元的损失[2]，在黎巴嫩和意大利的艾米莉亚 - 罗马涅造成超过 50 万株果树毁灭[3]，最近一次瑞士的爆发使经济损失达 2750 万美元[4]。

研究认为火疫病原产于北美东部，目前存在于 50 个国家 / 地区，包括欧洲、北非、中东、大洋洲和中亚等地，可以通过昆虫、鸟类、风雨、冰雹等传播[5]，预计最终会蔓延到蔷薇科植物分布的所有国家[4]。截至 2016 年，火疫病已扩散到中亚苹果种质资源起源地吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦以及东亚的韩国等地[6-8]。早期报道火疫病感染果园离中国边界线仅仅不足 200 km，预测早晚会传播到中国[9-10]。王俊等[11]报道火疫病已入侵我国新疆地区。虽然链霉素、土霉素和春雷霉素等抗生素具有一定的防治作用，但是对生态具有一定的破坏作用，因此抗火疫病苹果品种的筛选和选育是应对火疫病的首要选择[12]。

虽然转基因、基因编辑等生物育种技术手段已取得一定进展，但是常规的杂交选育仍是抗火疫病苹果品种获得的首要手段。苹果童期较长，抗性较强的野生资源对于鲜食抗火疫病品种选育需要多个世代，且容易导入果小、酸涩等不良性状，因此栽培大苹果及栽培苹果祖先塞威士苹果不失为抗火疫病品种选育的优选亲本[13]。

本研究以来自国内外的 230 份苹果栽培品种、47 份古老栽培品种、210 份野生种和 1 份观赏资源为试材，进行嫩叶和嫩枝离体接种鉴定评价，对比嫩叶接种和嫩枝接种发病差异，研究苹果栽培品种、塞威士苹果、其他栽培种不同类型、不同来源、不同系谱之间火疫病抗性差异，筛选抗火疫病资源，为抗性种质创制和品种选育提供物质基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料及取样

488 份试验材料（表 1）均取自国家果树种质苹果圃（辽宁兴城），圃地管理水平中等，树势中庸，基砧为山荆子，大小较为整齐。488 份种质分属于苹果属 27 个种，其中苹果栽培品种（*Malus domestica* Borkh.）230 份，原产中国古老栽培种 5 个（39 份），分别为楸子（*Malus prunifolia*（Willd.）Borkh.）、扁棱海棠（*Malus robusta*（Carr.）Rehd.）、花红（*Malus asiatica* Nakai.）、垂丝海棠（*Malus halliana*（Anon.）Koehne.）、西府海棠（*Malus micromalus* Makino.）；国外古老栽培种 2 个（8 份），分别为珠眉海棠（*Malus zumi*（Mats.）Rehd.）和多花海棠（*Malus floribunda* Siebold.）；19 个野生种（210 份），其中 12 个为中国原产，分别为塞威士苹果（*Malus sieversii*（Led.）Roem.）、陇东海棠（*Malus kansuensis*（Batal.）Schneid.）、变叶海棠（*Malus toringoides*（Rehd.）Hughes.）、三叶海棠（*Malus sieboldii*（Regel.）Rehd.）、丽江山荆子（*Malus rockii* Schneid.）、昭觉山荆子（*Malus zhaojaoensis* Jiang.）、湖北海棠（*Malus hupehensis*（Pamp.）Rehd.）、毛山荆子（*Malus manshurica*（Komarovii）Likh.）、西蜀海棠（*Malus prattii*（Hemsl.）Schneid.）、锡金海棠（*Malus sikkimensis*（Wenzig.）Koehne.）、小金海棠（*Malus xiaojinensis* Cheng et Jiang.）、樱叶海棠（*Malus ceracifolia* Spach.），

表1 用于火疫病抗性鉴定评价的27个种苹果属种质资源

Table 1 Twenty-seven *Malus* species of germplasm resources for evaluation and screening for fire blight resistance

类型 Type	所属种 Species	数量 Number	名称 Name
栽培品种 Cultivar	苹果	230	国外选育品种：阿堪（Arkansas Black），阿林屯（Allington Pippin），矮威尔（Wellspur Delicious），矮早辉（Stark Earlibaze），矮壮（Hardispur Delicious），昂林（Korin），奥别尔基卡（РенетОбердика），奥查克金（Ozark Gold），澳红（Pink Lady），白罗斯马林（Bsuosimalin），百福高（Unknown），坂田津轻（さかたけぃっがる），磅（Menage），包曼（Baumann），宝斯库普（Belld de Boskoop），毕斯马克（Bismark），波11（Unknown），波19（Unknown），布科卡（Bukowka），布兰里（Bramley's Seeding），草莓苹果（Земляничное），查尔斯·罗斯（Charles Ross），赤龙（Baldwin），初津轻（Unknown），初秋（Hatsuaki），初笑（Oldenburg），春香（Haruka），醇露（Winesap），翠玉（Newtown Pippin），大锦（Twenty Ounce），大绿（Fall Pippin），大猩猩（Mother），东光（Toko），冬甜（зимнийдесерт），短枝旭（Macspur），恩七（Unknown），法国灰苹（РенетСерыйФранцуский），芳明（Homei），伏花皮（Gravenstein），镐罗（Goro），格杰克库奎（Gjecee Kuge），格鲁晓夫卡（Грущовка），古德伯格（Guldborg），锅屋（Coopermarket），国光（Ralls），赫腊桑（Unknown），褐色凤梨（КоричневоеПолосатое），褐色条纹（КоричневоеПолосатое），红绞（Fameuse），红金（Redgold），红锦（Unknown），红卡维（Calville Rouge），红魁（Red Astrachan），红乔王（Jonared king），红王将（Unknown），红玉（Jonathan），花道（ikebana），花嫁（Wealthy），花奎（Lowland Raspderry），黄姑娘（Unknown），黄魁（Yellow Transparent），黄皮（Unknown），黄太平（Unknown），惠（Megumi），杰西麦克（Jerseymac），捷18（Unknown），捷巴（Unknown），金矮生（Gold Spur Delicious），金冠（Golden Delicious），金花（Williams Favorite），金色洛索善（РоссошанскоеЗолотое），津轻（Tsugaru），君袖（Northern spy），凯塞·威廉（Kaiser Wilhel），考特兰德（Cortland），克拉普（Clapp's Seedling），克里阿（Ctrea），克里斯克（КандильСинаП），克龙谢尔透明（кронселскоепрозрачное），克鲁斯（Close），克洛登（Cloden），库列洒（Kuliesa），拉宝（Lobo），拉方（Lawfarm），拉里坦（Raritan），莱蒂（Lady），兰篷王（Unknown），理想（Мечта），列涅特·加拿大（Reinette Canada），柳玉（Smith Cider），鲁比（Ruby），陆奥（Mutsu），麻姑（Magu），马空（Macoun），满堂红（King of Pippin），梅露斯（Melrose），梅泽（Unknown），美尔巴（Melba），美尔塔什（Meltosh），美浓富士（Unknown），萌（Kizashi），米丘林纪念（Память Мичурина），蜜脆（Honeycrisp），拿破仑（Наполен），纽蕃（Newfane），诺安（Norand），诺桑（Norsan），女游击队员（Партизанка），帕顿（Patten），皮诺瓦（Pinova），普利阿姆（Priam），普瑞玛（Prima），千秋（Senshu），乔纳金（Jonagold），乔雅尔（Joyal），青龙（White Pippin），青森早生（Unknown），清明（Seimei），秋力蒙（РенетЛандсбергский），日之丸（さなとれ），瑞丹（Judaine），瑞拉（Unknown），瑞莲娜（Unknown），瑞林（Judeline），赛温（Saiwen），沙拉托尼（Саратони），史东好吉（Unknown），史东塔什（Stonetosh），斯塔克矮金冠（Stark Spur Golden），斯塔克矮生（Stark spur），斯塔克金矮生（Stark Spur Gold Del），苏维埃（Советское），太平洋玫瑰（Pacific Rose），桃苹（Irish Peach），甜安东诺夫卡（АНТОНОВКа Сахарна），甜旭（Sweet McIntosh），甜伊萨耶娃（Десертное Исаева），王林（Orin），维琴尼（Vicenza），维斯塔·贝拉（Vista Bella），未希生命（Miki Life），文红（Unknown），西伯利亚白点（СибирскаяБелопятность），西蒙菲（Simonffy Piros），希特实生（СеянецШцтта），虾夷衣（Roxbury），夏光（Summer），先锋（Pioneer），小町（Early Strawberry），心里美（Unknown），新红星（Starkrimson），新世界（Unknown），旭（McIntosh），艳红（Starkspur Ultra Red Delicious），阳光（Yoko），耶维林（Evelyn），一斗金（Iowa Beauty），伊朗桃苹（ИрландскоеПерсиковое），乙女（Alps Otome），优异玫瑰（Unknown），玉霰（Grimes Golden），元帅（Delicious），约士基（Yoshkee），早黄（Early Harvest），早生赤（Early red bird），早生红（Hopa），早生旭（Early McIntosh），珍宝（Stark Jumbo），紫倭锦（Drumbo），紫香蕉（Black Gilliflower），紫玉（Lowver），紫云（Whitney），自由（Liberty），醉玉（Helm） 国内选育品种：矮丰，矮黄，北京0201，昌红，垂枝国光，岱红，岱绿，丹霞，伏红，伏锦，伏帅，富红，富秋，国玲，国庆，国帅，华美，金光，金红，锦红，龙冠，露香，绿光，绿帅，眉短1号，宁丰，宁冠，宁秋，青冠，青香，秋金星，秋锦，瑞香，胜利，胜利红冠，十三陵短枝，实矮，双红，斯托诺维，泗水短枝，甜黄魁，无锈金冠，香红，新冬，新国光，新红，新花，新元帅，兴平，秀水国光，燕山红，迎秋，早翠绿，早金冠，枣强短枝，长红
	楸子	11	楸子，长果海棠，东北黄海棠，吉林小红海棠，吉林小黄海棠，宁夏海棠，莱芜难咽，红海棠，新疆红海棠，德钦海棠，保德海棠
	扁棱海棠	9	八棱海棠，小八棱海棠，平顶海棠，热磙子，冷海棠，小矾山八棱（紫），热磙子短枝，晚白海棠，早白海棠
	花红	17	花红，矮花红，紫塞明珠，滦庄沙果，下井沟槟子1号，甜槟子，小矾山槟子，霍城白果子，林檎，奈子，崂山奈子，大香果，石洞彩苹1号，小古城香果1号，槟子，冬红果，冬白果
	垂丝海棠	1	垂丝海棠

表 1（续）

类型 Type	所属种 Species	数量 Number	名称 Name
栽培品种	西府海棠	1	西府海棠
Cultivar	珠眉海棠	7	珠眉海棠，珠眉 1，珠眉 2，珠眉 3，珠眉 4，珠眉 5，珠眉 6
	多花海棠	1	多花海棠
野生种 Wild species	塞威士苹果	189	26002，26003，26004，26005，26006，26007，26008，26010，26011，26012，26014，26015，26018，26019，26020，26021，26023，26025，26027，26029，26030，27002，27003，27004，27006，27007，27008，27009，27010，27011，27012，27015，27016，27017，27018，27019，27020，28001，28002，28003，28005，28007，28008，28009，28010，28011，28012，28013，28014，11-01，11-42，11-43，11-44，11-46，11G1，11G2，11G3，11G4，11G5，GB-1，GB-2，GB-4，GB-5，GB-6，GB-7，GB-8，GB-9，GB-10，GB-12，GB-13，GB-14，GB-15，GB-16，GB-19，GD-3，GD-4，GD-6，GD-7，GD-8，GD-9，GD-10，GD-11，GD-12，GD-13，GD-15，GD-16，GD-17，GD-21，GD-22，UZ2016-3，UZ2016-4，UZ2016-8，UZ2016-10，UZ2016-11，UZ2016-13，UZ2016-15，UZ2016-16，UZ2016-18，UZ2016-19，UZ2016-20，UZ2016-22，UZ2016-23，UZ2016-24，UZ2016-25，UZ2016-29，UZ2016-30，UZ2016-31，UZ2016-32，UZ2016-33，UZ2016-34，UZ2016-35，UZ2016-37，UZ2016-38，UZ2016-41，UZ2016-42，UZ2016-43，UZ2016-45，UZ2016-46，UZ2016-47，UZ2016-48，UZ2016-49，UZ2016-50，UZ2016-51，UZ2016-54，UZ2016-55，UZ2016-56，UZ2016-57，UZ2016-59，UZ2016-60，UZ2016-61，UZ2016-62，UZ2016-64，UZ2016-65，UZ2016-66，UZ2016-67，UZ2016-71，XY-11，XY-12，XY-16，XY-18，XY-19，XY-20，XY-21，XY-22，XY-23，XY-24，XY-25，XY-26，XY-27，XY-28，XY-29，XY-32，XY-33，XY-35，XY-37，XY-38，XY-39，XY-43，XY-51，XY-53，XY-55，XY-57，XY-58，XY-59，XY-61，XY-64，XY-65，XY-66，XY-67，XY-68，XY-71，XY-77，XY-78，XY-79，XY-80，XY-81，XY-82，XY-83，XY-84，XY-85，XY-88，XY-89，XY-90，红肉苹果，吉尔吉斯苹果，苹果王，土库曼苹果，新疆野苹果 1 号，新疆巩留浓 1 号
	湖北海棠	2	茶果，平邑甜茶
	陇东海棠	2	陇东海棠，五棱陇东
	三叶海棠	2	林芝海棠，沙金海棠
	其他种	15	扁果海棠，变叶海棠，东方苹果，褐海棠，野香海棠，丽江山荆子，毛山荆子，乔劳斯基海棠，森林苹果，西蜀海棠，锡金海棠，小金海棠，樱叶海棠，窄叶海棠，昭觉山荆子
观赏海棠 Ornamental resources	杂交种	1	草莓果冻（*Malus* strawberry Parfait）

楸子、扁棱海棠、花红、垂丝海棠、西府海棠、珠眉海棠和多花海棠合计 47 份资源为古老栽培品种

The total of 47 resources of *Malus prunifolia*（Willd.）Borkh.，*Malus robusta*（Carr.）Rehd.，*Malus asiatica* Nakai.，*Malus halliana*（Anon.）Koehne.，*Malus micromalus* Makino.，*Malus zumi*（Mats.）Rehd. and *Malus floribunda* Siebold. were ancient cultivars

7 个引进的国外野生种，分别为扁果海棠（*Malus platycarpa* Rehd.）、东方苹果（*Malus orientalis* Uglitz.）、褐海棠（*Malus fusca*（Raf.）Schneid.）、野香海棠（*Malus coronaia*（L.）Mill.）、乔劳斯基海棠（*Malus tschonoskii*（Maxm.）Schneid.）、森林苹果（*Malus sylvestris* Mill.）、窄叶海棠（*Malus angustifolia*（Ait.）Michx.）；1 份为国外引进的观赏海棠。2021 年 5 月随机取树冠外围具有生长点的一年生嫩枝，每份资源取 6 个生长一致的嫩枝，采集后用湿润的纱布全部包裹，放在装有冰袋的保温箱中邮寄至新疆库尔勒接种。

1.2　接种及评价

1.2.1　菌液制备　菌液制备参考李洪涛等[14]方法，采用的火疫病病菌 *Erwinia amylovara*，菌液编号为 *E.a* 6，菌液浓度为 1×10^7 CFU/mL，OD_{600} 为 0.4 左右。

1.2.2　嫩枝接种　2021 年 5 月份挑选无损伤的 3 个健康嫩枝（即 3 个重复）进行接种，纯水清洗干净，底部呈马蹄状剪去 0.5 cm。采用牙签蘸取菌液，牙签上面明显可以看到水滴状菌液为准，在完全展开的第二片叶根部主茎上，用牙签针刺接种于嫩枝中，将接种后的嫩枝置于 2% 蔗糖水中培养，每隔 24 h 更换蔗糖水，并喷水雾保持湿度，观察记录病斑长度。

1.2.3　嫩叶接种　2021 年 5 月份采集苹果资源新

梢上端完全展开的第三或第四片健康幼嫩叶，纯水清洗干净，剪去多余叶柄，在超净工作台中，采用牙签蘸取菌液，牙签上面明显可以看到水滴状菌液为准，从嫩叶背面刺入主叶脉，完成接种，每份资源接种3片叶子，即3个重复。

在铺有无菌湿润滤纸的培养皿中，无菌牙签搭三角架，将接种后的嫩叶背面朝上置于三角牙签架上，每个培养皿中放置1片嫩叶，置于28 ℃恒温箱中培养，每隔24 h观察嫩叶发病情况，并记录病斑长度。

1.2.4 抗病评价 嫩叶接种72 h、嫩枝接种2周统计发病情况。根据火疫病离体接种发病情况分级[14]。为了减少嫩叶和嫩枝长度不均的影响，对嫩叶和嫩枝病斑长度除以各自最长的病斑长度进行归一化处理，归一化后的比值作为分级值：0级：无病变现象；1级：病斑长度占总长度的1%~5%；3级：病斑长度占总长度的5.1%~15%；5级：病斑长度占总长度的15.1%~30%；7级：病斑长度占总长度的30.1%~50%；9级：病斑长度占总长度>50.1%。

$$\text{病情指数(DI)}=\frac{\sum(\text{各级发病样品数}\times\text{分级值})}{\text{总样品数}\times\text{最高分级值}}\times 100$$

根据相同时间内病情指数，将供试样品抗病能力分为6个等级，高抗（HR）：DI为0~5；抗病（R）：DI为5.1~15；中抗（MR）：DI为15.1~30；中感（MS）：DI为30.1~60；感病（S）：DI为60.1~80；高感（HS）：DI>80。

1.3 数据分析

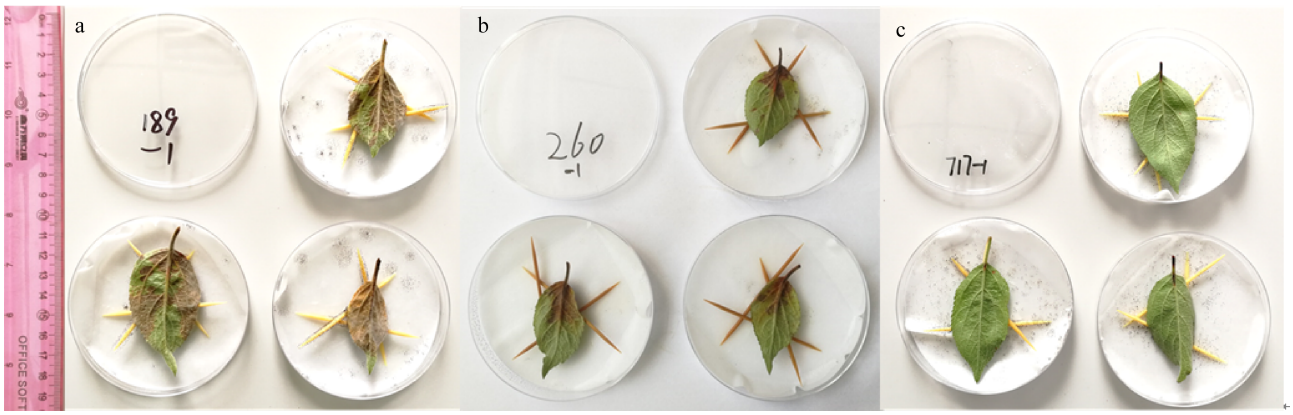
采用Excel 2010进行数据处理和分析，箱图和雷达图由在线平台Hiplot绘制（https://hiplot.com.cn）。

2 结果与分析

2.1 嫩叶离体接种鉴定评价

嫩叶接种结果显示（图1），高抗和抗病资源数量较少，分别为18和14份，合计占该资源份数的6.56%，中感、感病和高感占比较高，其中中感最多，为180份，占资源总份数的36.89%。按照资源类型进行分类发现，栽培品种抗火疫病资源数量最多，高抗和抗病资源为20份，合计占该资源总数的8.70%，古老栽培品种无高抗资源，仅有2份抗病资源，野生种高抗和抗病资源10份，占该资源总数的4.76%，无论是总份数还是占比，栽培品种均居首位（表2）。

对系谱明确的90份栽培品种进行抗火疫病分析，共分为金冠系、元帅系、国光系、富士系、旭系、红星系和红玉系7个系谱。在所有的系谱中（图2），红玉系和旭系的病情指数在0.05水平上存在显著差异。金冠系的抗病和感病类型较为离散，可能与所检测的金冠系资源最多有关。其中高抗资源份数最多的为旭系，共3份，占比也最高，占该资源份数的27.27%，其次为金冠系，高抗资源为2份，但是中感和感病资源份数亦最多。火疫病抗性较差的为富士系、国光系和元帅系，高抗和抗病资源均为0份。



a：高感；b：中抗；c：高抗

a：HS；b：MR；c：HR

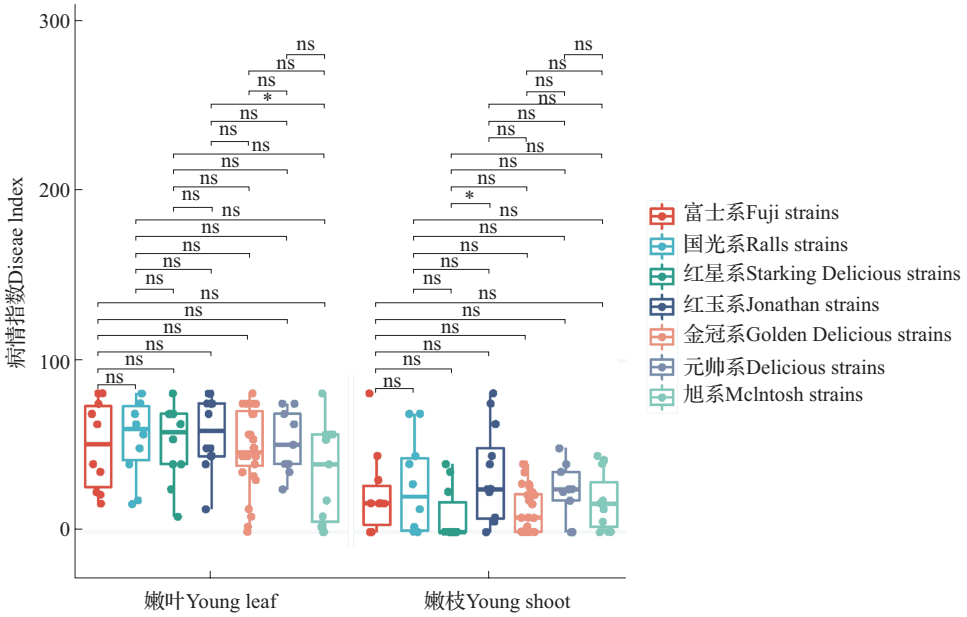
图1 嫩叶发病情况

Fig.1 Incidence of young leaves

表 2　苹果资源嫩叶抗火疫病评价

Table 2　Evaluation of resistance to fire blight of *Malus* germplasm young leaves

类型 Types	数量 Number	平均病情指数 Average DI	不同抗性级别资源数 The number of apple germplasm resources for different resistance						高抗及抗病资源占比（%） The proportion of HR and R
			高抗 HR	抗病 R	中抗 MR	中感 MS	感病 S	高感 HS	
栽培品种 Cultivar	230	50.61	12	8	23	93	70	24	8.70
野生种 Wild species	210	54.88	6	4	18	78	77	27	4.76
古老栽培品种 Ancient cultivar	47	62.00	0	2	4	9	16	16	4.26
观赏资源 Ornamental resources	1	81.00	0	0	0	0	0	1	0
合计 Total	488	62.12	18	14	45	180	163	68	6.56
百分比（%） Percentage	100.00		3.69	2.87	9.22	36.89	33.40	13.93	



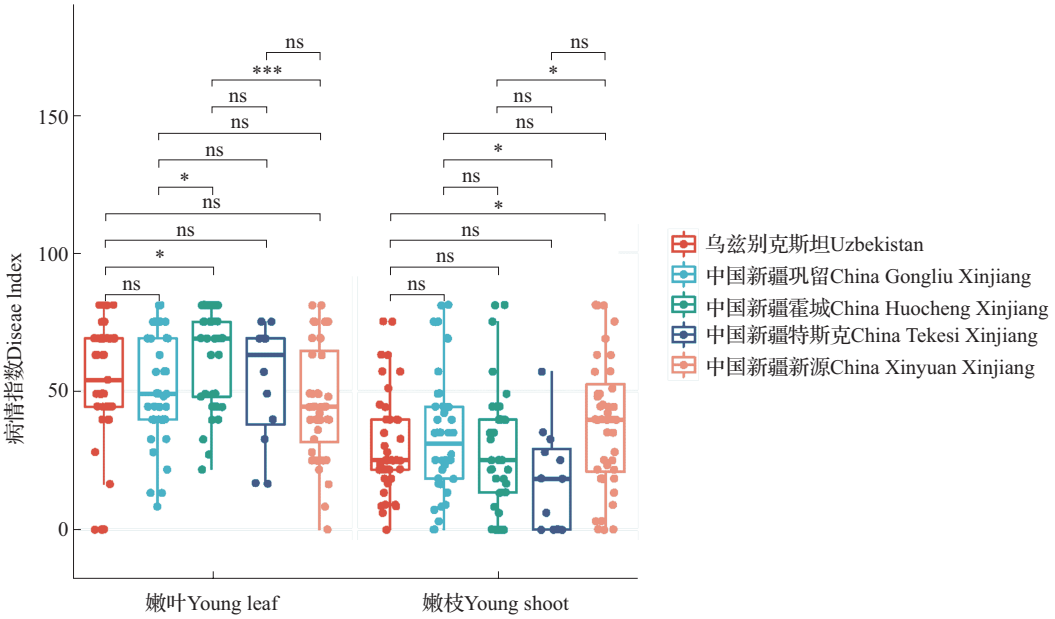
ns：无显著差异；*：在 0.05 水平上存在显著差异；下同

ns：No significance；*：There are significant differences at the 0.05 level；The same as below

图 2　不同系谱苹果栽培品种嫩叶和嫩枝火疫病接种病情指数

Fig.2　Disease index of fire blight resistance for young leaf and shoot of different strains of apple cultivars

不同来源地的 189 份塞威士苹果火疫病病情指数存在差异（图 3），中国新疆霍城与乌兹别克斯坦、中国新疆巩留在 0.05 水平上存在差异，与中国新疆新源在 0.001 水平上存在差异。乌兹别克斯坦和中国新疆新源均存在病情指数为 0 的资源，中国新疆霍城的资源病情指数相对其他地区比较大，抗性资源较少。塞威士苹果获得高抗资源 6 份，5 份来自乌兹别克斯坦；中国新疆新源的高抗和抗病资源均为 1 个，中国新疆巩留的抗病资源 3 个，来源于中国新疆特克斯的 12 份均为中感或感病资源。



：在 0.01 水平上存在显著差异；*：在 0.001 水平上存在显著差异

: There are significant differences at the 0.01 level; *: There are significant differences at the 0.001 level

图 3 不同来源塞威士苹果资源嫩叶和嫩枝火疫病接种病情指数

Fig.3 Disease index of fire blight resistance for young leaf and shoot of different origin of *Malus sieversii*

2.2 嫩枝离体接种鉴定评价

嫩枝接种评价结果与嫩叶存在较大的差异（图 4），高抗和抗病资源数量较多，分别有 163 和 47 份，合计占资源总份数的 43.03%，感病和高感较少，其中高感最少为 12 份，占资源总份数的 2.46%。按照资源类型进行分类发现，依旧是栽培品种抗火疫病资源数量最多，高抗资源占栽培品种数量的 61.74%，古老栽培品种高抗资源 11 份，野生种高抗资源 27 份，无论是总份数还是占比，栽培品种均占首位，与嫩叶鉴定结果一致（表 3）。

来源于 7 个系谱的 90 份栽培种资源嫩枝火疫病抗性分析（图 2），红玉系与红星系、金冠系病情指数在 0.05 水平存在差异。高抗资源份数最多的为金冠系，其次为红星系、国光系、旭系和富士系，占比最高的为红星系，占比 70.00%，其次为金冠系，占比 46.43%，后续依次为国光系，占比 40.00%，富士系占比 30.00%；高抗资源占比较少的为红玉系、旭系和元帅系，分别为 16.67%、27.27% 和 22.22%。资源抗性和感病性分配均匀的为红玉系和国光系。

a：高感；b：中抗；c：高抗

a：HS；b：MR；c：HR

图 4 嫩枝发病情况

Fig.4 Incidence of young shoots

表 3　苹果资源嫩枝抗火疫病评价

Table 3　Evaluation of resistance to fire blight of *Malus* germplasm young shoots

类型 Types	数量 Number	平均病情指数 Average DI	不同抗性级别资源数 The number of apple germplasm resources for different resistance						高抗及抗病资源占比（%） The proportion of HR and R
			高抗 HR	抗病 R	中抗 MR	中感 MS	感病 S	高感 HS	
栽培品种 Cultivar	230	14.78	125	17	42	32	12	2	61.74
野生种 Wild species	210	31.53	27	23	64	68	19	9	10.25
古老栽培品种 Ancient cultivar	47	27.16	11	7	9	14	5	1	3.69
观赏资源 Ornamental resources	1	75.00	0	0	0	0	1	0	0.00
合计 Total	488	37.12	163	47	115	114	37	12	43.24
百分比（%） Percentage	100.00		33.40	9.63	23.57	23.36	7.58	2.46	

来源于 5 个不同地方的 189 份塞威士苹果嫩枝抗火疫病分析（图 3），中国新疆新源与乌兹别克斯坦、中国新疆霍城、中国新疆特克斯及中国新疆巩留与特克斯的病情指数在 0.05 水平上存在显著差异。来源于乌兹别克斯坦和中国新疆巩留的塞威士苹果与嫩叶的鉴定结果差异较大，高抗资源分别为 1 份和 3 份，分别占该资源的 2.13% 和 7.14%，来源于乌兹别克斯坦的中抗资源较多，占该资源的 51.06%。

2.3　嫩叶和嫩枝鉴定结果比较

由以上结果发现，嫩叶和嫩枝对火疫病的抗性存在较大的差异，嫩叶接种鉴定的抗火疫病资源较少，倾向于感病类型，相反嫩枝鉴定出的抗火疫病资源较多，倾向于抗病，为了使得到的结果更加准确，对两种鉴定结果取交集，筛选出嫩叶和嫩枝表现一致的资源进一步分析。

两种鉴定结果一致的为 187 份资源，占总数的 38.32%。按照资源类型分析，高抗资源和抗病资源数量均较少，合计占交集总数的 9.63%，中抗资源占交集总数的 18.72%；感病资源占比最高，依次是中感、高感资源，分别占交集总数的 31.55%、27.81%、12.30%（表 4）。

表 4　嫩叶和嫩枝抗火疫病评价交集的苹果资源列表

Table 4　List of evaluation of resistance to fire blight of intersection of *Malus* germplasm young leaves and shoots

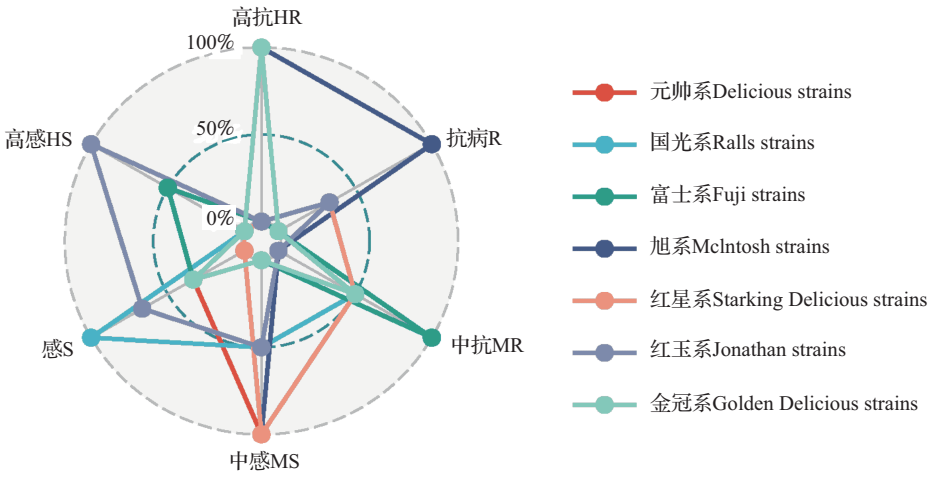
类型 Types	数量 Number	平均病情指数 Average DI	不同抗性级别资源数 The number of apple germplasm resources for different resistance						高抗及抗病资源占比（%） The proportion of HR and R
			高抗 HR	抗病 R	中抗 MR	中感 MS	感病 S	高感 HS	
栽培品种 Cultivar	72	32.41	6	8	20	16	18	4	19.44
野生种 Wild species	98	47.57	2	1	13	33	34	15	3.06
古老栽培品种 Ancient cultivar	17	51.92	0	1	2	3	7	4	5.88
合计 Total	187	43.97	8	10	35	52	59	23	9.63
百分比（%） Percentage	100.00		4.28	5.35	18.72	27.81	31.55	12.30	

对 187 份资源中亲本明确的 32 份栽培品种进行抗火疫病分析（表 5），金冠系和旭系资源均含有 1 份高抗资源，其中抗病资源份数最多的为旭系，其次为红玉和红星，抗病资源分别为 3 份、1 份和 1 份。雷达图显示金冠系高抗资源占主导（图 5），旭系高抗和抗病为主，国光系以感病为主，富士系以中抗为主，元帅系和红星系以中感为主，红玉系以高感为主。

表 5　32 份不同系谱苹果栽培品种火疫病抗性分析

Table 5　Analysis on fire blight resistance of 32 apple cultivars from different strains

系谱 Strain	数量 Number	平均病情指数 Average DI	不同抗性级别资源数 The number of apple germplasm resources for different resistance level						高抗及抗病资源占比（%） The proportion of HR and R
			高抗 HR	抗病 R	中抗 MR	中感 MS	感病 S	高感 HS	
元帅系 Delicious strains	4	38.71	0	0	1	2	1	0	0.00
国光系 Ralls strains	5	47.20	0	0	1	1	3	0	0.00
富士系 Fuji strains	4	34.42	0	0	2	0	1	1	0.00
旭系 McIntosh strains	6	20.83	1	3	0	2	0	0	66.67
红星系 Starking Delicious strains	4	23.50	0	1	1	2	0	0	25.00
红玉系 Jonathan strains	6	51.72	0	1	0	1	2	2	16.67
金冠系 Golden Delicious strains	3	25.28	1	0	1	0	1	0	33.33
合计 Total	32	34.52	2	5	6	8	8	3	21.88
百分比（%） Percentage	100.00		6.25	15.63	18.75	25.00	25.00	9.38	



0%：代表某一抗性级别最小资源数与最大资源数比值的百分数；50%：代表某一抗性级别资源数的中值与最大资源数比值的百分数；100%：代表某一抗性级别最大资源数与最大资源数比值的百分数；下同

0%: Representing the percentage of the minimum number to the maximum number of resources for a resistance level;

50%: Representing the percentage of the median number to the maximum number of resources for a resistance level;

100%: Representing the percentage of the maximum number to the maximum number of resources for a resistance level; The same as below

图 5　不同系谱苹果栽培品种交集火疫病抗性雷达图

Fig.5　Radar map of fire blight resistance for intersection of different strains of apple cultivars

对 189 份资源中来源地明确的 91 份塞威士苹果资源进行抗火疫病分析（表 6），发现来源于中国新疆新源和乌兹别克斯坦的均有 1 份高抗资源，乌兹别克斯坦还存在 1 份抗病资源、中抗资源数量也最多；高感最多的是中国新疆霍城。雷达图显示（图 6），乌兹别克斯坦塞威士苹果以高抗和中抗为主，中国新疆新源资源则在抗病和感病中分布较为均匀，中国新疆巩留资源主要以感病居多。

表 6　91 份不同来源塞威士苹果资源火疫病抗性分析

Table 6　Analysis on fire blight resistance of 91 *Malus sieversii* resources from different origin

来源 Origin	数量 Number	平均病情指数 Average DI	不同抗性级别资源数 The number of apple germplasm resources for different resistance level						高抗及抗病资源占比（%） The proportion of HR and R
			高抗 HR	抗病 R	中抗 MR	中感 MS	感病 S	高感 HS	
乌兹别克斯坦 Uzhekistan	21	39.66	1	1	4	7	7	1	9.52
新疆巩留 Gongliu Xinjiang	20	48.48	0	0	2	9	7	2	0.00
新疆新源 Xinyuan Xinjiang	26	48.28	1	0	3	9	10	3	3.85
新疆特克斯 Tekesi Xinjiang	9	34.70	0	0	2	5	2	0	0.00
新疆霍城 Huocheng Xinjiang	15	52.89	0	0	2	1	6	6	0.00
合计 Total	91	44.80	2	1	13	31	32	12	3.30
百分比（%） Percentage	100.00		2.20	1.10	14.29	34.07	35.16	13.19	

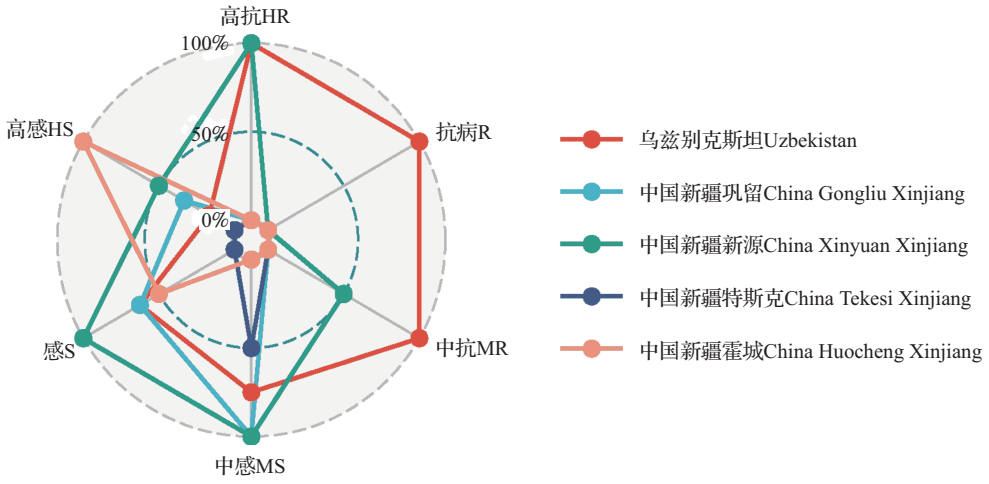


图 6　91 份不同来源塞威士苹果资源火疫病抗性雷达图

Fig.6　Radar map of fire blight resistance for 91 *Malus sieversii* resources from different origin

2.4　抗火疫病资源筛选

对嫩叶和嫩枝鉴定取得交集的 187 份资源，筛选高抗、抗病和中抗资源 53 份（表 7），可作为抗火疫病育种的亲本材料，对其进行详细分析，为育种利用提供参考。各个类型的资源均有中抗及以上的资源，所有资源中栽培品种占据多数，8 份高抗资源中 6 份为栽培品种，其他 2 份为塞威士苹果。对其亲本分析发现，在 14 份高抗和抗病栽培品种中，其中有 4 个品种为旭的后代。

塞威士苹果中仅有 2 份来自乌兹别克斯坦和中国新疆新源的资源表现为高抗，1 份来自乌兹别克斯坦的表现为抗病，其他表现为中抗的 13 份塞威士苹果在 5 个来源地均有分布，且数量较为均一，区域特性表现不明显。中国原产栽培品种仅有 1 份抗病资源和 2 份中抗资源，均来自河北，其中 1 个为具有悠久栽培历史的石洞彩苹 1#。

表 7 苹果嫩叶和嫩枝抗火疫病资源列表

Table 7 List of *Malus* germplasm of resistance to fire blight both young leaves and shoots

序号 Code	资源名称 Name of resources	所属种 Species	类型 Types	来源 Source	亲本 Parents	评价 Evaluation
1	奥别尔基卡	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	俄罗斯	实生选种	高抗
2	奥查克金	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	金冠 × H1291	高抗
3	紫香蕉	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	不详	高抗
4	短枝旭	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	加拿大	森马兰旭枝变	高抗
5	维斯塔 · 贝拉	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	{（美尔巴 × sonora）×［（金花 × 斯塔尔）× 美国 DA34］} × Julyred	高抗
6	红锦	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	不详	不详	高抗
7	XY-68	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆新源		高抗
8	UZ2016-19	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		高抗
9	瑞香	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	红玉 × 红魁	抗病
10	一斗金	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	不详	红星 × 黄魁	抗病
11	史东塔什	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	加拿大	Stone × 旭	抗病
12	褐色条纹	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	原苏联	不详	抗病
13	黄姑娘	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	不详	不详	抗病
14	马空	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	旭 × 黑泽西	抗病
15	米丘林纪念	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	原苏联	香槟海棠实生后代	抗病
16	甜旭	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	Lawver × 旭	抗病
17	平顶海棠	*Malus robusta*（Carr.）Rehd.	古老栽培品种	中国		抗病
18	UZ2016-60	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		抗病
19	芳明	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	日本	津轻着色芽变	中抗
20	阳光	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	日本	金冠实生	中抗
21	富秋	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	富士 × 秋红	中抗
22	新花	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	国光 × 花红	中抗
23	矮丰	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	秋锦 × 新红星	中抗
24	紫云	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	自然杂交后代	中抗
25	眉短 1 号	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	元帅芽变	中抗
26	枣强短枝	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	中国	不详	中抗
27	Prima	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	南斯拉夫	14-510 × N.J.122149	中抗
28	诺安	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	加拿大	Columbia × Redant	中抗
29	克拉普	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	丹麦	自然实生	中抗
30	美浓富士	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	日本	富士芽变	中抗
31	布科卡	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	波兰	不详	中抗
32	诺桑	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	加拿大	Haralson × Rescue	中抗
33	红绞	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	加拿大	自然实生	中抗
34	拉里坦	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	（美尔巴 × Sunora）×（美尔巴 ×（金花 × starr））	中抗
35	红魁	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	俄罗斯	白魁芽变	中抗
36	查尔斯 · 罗斯	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	不详	不详	中抗

表 7（续）

序号 Code	资源名称 Name of resources	所属种 Species	类型 Types	来源 Source	亲本 Parents	评价 Evaluation
37	百福高	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	日本	不详	中抗
38	克鲁斯	*Malus domestica* Borkh.	栽培品种	美国	不详	中抗
39	石洞彩苹 1#	*Malus domestica* subsp. *Chinensis* Li Y. N.	古老栽培品种	中国		中抗
40	热磙子	*Malus robusta*（Carr.）Rehd.	古老栽培品种	中国		中抗
41	26012	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆霍城		中抗
42	27017	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆霍城		中抗
43	28001	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆特克斯		中抗
44	28002	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆特克斯		中抗
45	GB-15	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆巩留		中抗
46	11G2	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆巩留		中抗
47	XY-35	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆新源		中抗
48	XY-38	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆新源		中抗
49	XY-29	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	中国新疆新源		中抗
50	UZ2016-13	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		中抗
51	UZ2016-15	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		中抗
52	UZ2016-59	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		中抗
53	UZ2016-64	*Malus sieversii*（Led.）Roem.	野生种	乌兹别克斯坦		中抗

3　讨论

火疫病主要通过花、伤口等侵入植物，可危害花朵、芽、叶、枝条、树干和砧木[1,15]。因此，火疫病的鉴定可采用花朵、嫩叶、嫩枝、活体等多种接种方法进行鉴定。但是作为检疫性病害，活体接种存在一定的局限性，规模化的鉴定多采用离体鉴定方法。然而同一份资源在不同的年份、不同地点、采用不同的鉴定方法，得到的鉴定结果存在不一致的现象[13,16-17]。本研究的嫩叶和嫩枝接种结果存在较大的差异，嫩叶的抗性明显低于嫩枝，这应该与植物组织的幼嫩程度相关。因此在进行嫩枝鉴定筛选时，可结合嫩叶作为更严格的筛选标准，获得两个组织均表现为高抗的资源作为抗火疫病优异资源。国外报道的金冠和自由为抗火疫病品种[18]，但是本研究中这两个品种均未表现出抗病特性，推测与接种使用的菌种不同相关。

不同来源地的野生资源在当地生态环境下进化形成的特性亦不同。Richards 等[19-20]对来源于 8 个采集地的 949 份塞威士苹果进行遗传多样性分析，发现采集地之间和采集地之内的遗传多样性均存在差异。Harshman 等[13]通过对 12 个不同来源地的塞威士苹果接种亦得出了相同结论。本研究发现来源地不同的塞威士苹果火疫病抗性存在差异，来源于乌兹别克斯坦的塞威士苹果抗火疫病占比较高，说明该地的塞威士苹果与中国分布的塞威士苹果在遗传基础上存在差异。筛选出的中抗级别以上的塞威士苹果在不同地区均有分布，两份高抗资源分别来自乌兹别克斯坦和中国新疆新源，说明塞威士苹果本身对火疫病具有一定的抗性，这与其他研究得出的结论一致。如 Fazio 等[21]对来源于 12 个家族的塞威士苹果进行鉴定，535 份表现为高抗或者抗火疫病。本研究采用的其他野生资源类型和份数较少，未获得抗性资源。我国原产栽培种资源虽然具有悠久的栽培历史[22]，但未经过火疫病抗性自然选择，因此无高抗资源，仅仅获得 1 份抗病和 2 份中抗资源，其中石洞彩苹 1# 为我国传统种植的大果绵苹果，可作为抗火疫病选育的亲本。

根据筛选的抗性栽培品种，分析其亲本是进行抗性育种设计的重要参考。本研究根据亲本对 7 个系谱的栽培品种进行了分析。来源于不同亲本的栽培品种对火疫病抗性差异较为明显，以金冠和旭为亲本的后代明显倾向于高抗或抗病。研究显示

金冠中抗火疫病，旭为感病品种[23]。然而旭的后代在本研究中倾向于高抗或抗病，可能是菌种不同而致，也有可能是另一亲本为抗性品种。此外，筛选获得2份抗病品种亲本分别为红魁和黄魁，红魁在本研究中表现中抗，红魁的亲本为白魁，这3个品种均为俄罗斯的古老早熟品种，具有悠久的栽培历史[24]。因此，来自俄罗斯的魁系品种可作为抗性选育的亲本。除了杂交以外，自然实生和芽变均可产生抗病品种，特别是芽变，如感病品种富士芽变产生的美浓富士为中抗品种。

苹果火疫病在历史上危害较为严重的是2000年发生于美国密歇根州西南部的苹果园，造成了220000株苹果树死亡，损失达4200万美元[25]。该病的发病概率和严重程度主要由环境条件和品种自身的抗性决定，品种自身的抗性起决定性作用[16,25]。目前世界范围内多数商业化栽培苹果品种均不抗火疫病，如富士、嘎啦、粉红女士、布瑞本等[18,26]。筛选抗火疫病种质是解决品种抗性的根本途径，相对于果实品质较差的野生资源，栽培苹果的祖先，塞威士苹果具有和栽培苹果相近的特性[27-29]，因此抗病栽培品种和塞威士苹果种质是抗性亲本的最佳选择[13,30-32]。本研究嫩叶和嫩枝两种接种方法的鉴定结果均显示，栽培品种中高抗火疫病的比例最高。筛选获得53个中抗级别以上的优异资源，其中高抗资源8份，6份栽培品种，2份塞威士苹果，其中两个古老栽培种资源表现为中抗，来自南斯拉夫的Prima表现为中抗，该品种在盆栽苗中接种也表现为中抗[33]。这些高抗材料可作为抗性品种选育的亲本材料，特别是2份塞威士苹果既可作为品种亲本，亦可作为砧木亲本。

美国和欧洲历史上遭遇到多次火疫病爆发，在品种选育过程中抗火疫病为其育种目标之一。美国、新西兰、加拿大、瑞士、波兰和德国等国家针对火疫病抗性较早地启动了育种项目[16]，德国选育出了Reanda、Remo、Rene、Resi和Rewena等抗火疫病品种[34-35]，美国选育出了抗火疫病的G系列砧木[36]。目前我国在梨火疫病抗性的鉴定评价方面做了较多的研究，启动了相关项目，筛选出了一批抗火疫病梨资源，在后续的抗性育种中可以应用[14,37-40]。但是苹果相关方面的研究较为滞后，可考虑启动相关性研究和育种计划。

参考文献

[1] van der Zwet T, Keil H L. Fire blight: A bacterial disease of *Rosaceous* plants. United States Department Agriculture Handbook No. 510. Washington, D.C. US Department of Agriculture, 1979: 21-26

[2] Bonn W G. Opening address. Acta Horticulturae, 1999, 489: 27-28

[3] Calzolari A, Finelli F, Mazzoli G L. A severe unforeseen outbreak of fire blight in the Emilia-Romagna Region. Acta Horticulturae, 1999, 489: 171-176

[4] van der Zwet T, Orolaza-Halbrendt N, Zeller W. Fire blight: History, biology, and management. Minnesota: The American Phytopathological Society Press, 2012: 37-41

[5] Khan M, Zhao Y, Korban S. Molecular mechanisms of pathogenesis and resistance to the bacterial pathogen *Erwinia amylovora*, causal agent of fire blight disease in *Rosaceae*. Plant Molecular Biology Reporter, 2012, 30: 247-260

[6] Drenova N V, Isin M M, Dzhaimurzina A A, Zharmukhamedova G A, Aitkulov A K. Bacterial fire blight in the republic of Kazakhstan. Plant Health: Research and Practice, 2013, 3: 44-48

[7] Doolotkeldieva T, Bobusheva S. Fire blight disease caused by *Erwinia amylovora* on *Rosaceae* plants in Kyrgyzstan and biological agents to control this disease. Advances in Microbiology, 2016, 6: 831-851

[8] Park D H, Yu J G, Oh E J, Han K S, Mi C Y, Lee S J. First report of fire blight disease on Asian pear caused by *Erwinia amylovora* in Korea. Plant Disease, 2016, 100: 1946

[9] Chen C, Chen J, Hu B S, Jiang Y H, Liu F Q. Potential distribution of alien invasive species and risk assessment: A case study of *Erwinia amylovora* in China. Agricultural Sciences in China, 2007, 6: 50-57

[10] Zhao Y Q, Tian Y L, Wang L M, Geng G M, Zhao W J, Hu B S, Zhao Y F. Fire blight disease, a fast-approaching threat to apple and pear production in China. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(4): 815-820

[11] 王俊，高建诚，巴音克西克，木也沙·买买提，张军恒，田艳丽，胡白石. 利用电加热自动消毒修枝剪阻断梨火疫病田间传播. 植物检疫, 2021, 36(2): 25-28
Wang J, Gao J C, Bayinkexike, Muyassar M, Zhang J H, Tian Y L, Hu B S. Block the field spread of fire blight by electric heating automatic disinfection pruning. Plant Quarantine, 2021, 36(2): 25-28

[12] Peil A, Emeriewen O F, Khan A, Kostick S, Malnoy M. Status of fire blight resistance breeding in *Malus*. Journal of Plant Pathology, 2021, 103: 3-12

[13] Harshman J M, Evans K M, Allen H, Potts R, Flamenco J, Aldwinckle H S, Wisniewski M E, Norelli J L. Fire blight resistance in wild accessions of *Malus sieversii*. Plant Disease, 2017, 101: 1738-1745

[14] 李洪涛，张静文，盛强，唐章虎，张祥林，张春竹，罗明. 我国20个梨品种(种质)对国外梨火疫病菌的抗病性评价. 果树学报, 2019, 36(5): 629-637
Li H T, Zhang J W, Sheng Q, Tang Z H, Zhang X L, Zhang C Z, Luo M. Resistance evaluation of 20 pear varieties (germplasms) in China to foreign strains of *Erwinia amylovora*. Journal of Fruit Science, 2019, 36(5): 629–637

[15] Russo N L, Robinson T L, Fazio G, Aldwinckle H S. Fire blight resistance of Budagovsky 9 apple rootstock. Plant Disease, 2008, 92: 385-391

[16] Peil A, Bus V G M, Geider K, Richter K, Flachowsky H, Hanke M V. Improvement of fire blight resistance in apple and pear. International Journal of Plant Breeding, 2009, 3: 1-27

[17] Kostick S A, Norelli J L, Evans K M. Novel metrics to classify the fire blight resistance of 94 apple cultivars. Plant Pathology, 2019, 68: 985–996

[18] Brown S. Apples. New York: Springer-Verlag, 2012

[19] Richards C M, Volk G M, Reeves P A, Reilley A A, Henk A D, Forsline P L, Aldwinckle H S. Selection of stratifield core sets representing wild apple (*Malus sieversii*). Journal of the Amecican Society for Horticultural Science, 2009, 134: 228-235

[20] Richards C M, Volk G M, Reiley A, Heck A D, Lockwook D R, Reeves P A, Forslin P L. Genetic diversity and population structure in *Malus sieversii*, a wild progenitor species of domesticated apple. Tree Genetics & Genomes, 2009, 5: 339-347

[21] Fazio G, Aldwinckle H S, Volk G M, Richards C M, Janisiewicz W J, Forsline P L. Progress in evaluating *Malus sieversii* for disease resistance and horticultural traits. Acta Horticulturae, 2009, 814: 59-66

[22] 李育农 . 苹果属植物种质资源研究 . 北京：中国农业出版社，2001：20-82
Li Y N. Researches of germplasm resources of *Malus* Mill. Beijing: China Agriculture Press, 2001: 20-82

[23] Aldwinckle H S, Preczewski J L. Reaction of terminal shoots of apple cultivars to invasion by *Erwinia amylovora*. Phytopathology, 1976, 66: 1439–1444

[24] 陆秋农，贾定贤 . 中国果树志 · 苹果卷 . 北京：中国林业出版社，1999：313-331
Lu Q N, Jia D X. China fruit tree–apple. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999: 313-331

[25] Norelli J L, Jones A L, Aldwinckle H S. Fire blight management in the twenty-first century: Using new technologies that enhance host resistance in apple. Plant Disease, 2003, 87(7): 756

[26] Aldwinckle H S, Gustafson H L, Forsline P L. Evaluation of the core subset of the USDA apple germplasm collection for resistance to fire blight. Acta Horticulturae, 1999, 489: 169-272

[27] Duan N B, Bai Y, Sun H H, Wang N, Ma Y M, Li M J, Wang X, Jiao C, Legall N, Mao L Y, Wan S B, Wang K, He T M, Feng S Q, Zhang Z Y, Mao Z Q, Shen X, Chen X L, Jiang Y M, Wu S J, Yin C M, Ge S F, Yang L, Jiang S H, Xu H F, Liu J X, Wang D Y, Qu C Z, Wang Y C, Zuo W F, Xiang L, Liu C, Zhang D Y, Gao Y, Xu Y M, Xu K N, Chao T, Fazio G, Shu H R, Zhong G Y, Cheng L L, Fei Z J, Chen X S. Genome re-sequencing reveals the history of apple and supports a two-stage model for fruit enlargement. Nature Communications, 2017, 8: 249

[28] Zhang L Y, Hu J, Han X L, Li J J, Gao Y, Richards C M, Zhang C X, Tian Y, Liu G M, Gul H, Wang D J, Tian Y, Yang C X, Meng M H, Yuan G P, Kang G D, Wu Y L, Wang K, Zhang H T, Wang D P, Cong P H. A high-quality apple genome assembly reveals the association of a retrotransposon and red fruit colour. Nature Communications, 2019, 10(1): 1494

[29] Sun X P, Jiao C, Schwaninger H, Chao C T, Ma Y M, Duan N B, Khan A, Ban S, Xu K N, Cheng L L, Zhong G Y, Fei Z J. Phased diploid genome assemblies and pan-genomes provide insights into the genetic history of apple domestication. Nature Genetics, 2020, 52: 1423-1432

[30] Ludy J. Taxonomic classification and brief history. Massachusetts: CABI Publishing, 2003

[31] Forsline P L, Aldwinckle H S. Natural occurrence of fire blight in USDA apple germplasm collection after 10 years of observation. Acta Horticulturae, 2002, 590: 351-357

[32] Forsline P L, Aldwinckle H S, Luby J J. Fire blight incidence on *Malus sieversii* grown in New York and Minnesota. Acta Horticulturae, 2008, 793: 345-350

[33] 李颖章，韩碧文，V · Ognjanov. 苹果组培苗和温室盆栽苗对火疫病的感病性研究 . 中国农业大学学报，2000，5(1)：25-30
Li Y Z, Han B W, Ognijanov V. Susceptibility of apples to fire blight grown in vitro and in greenhouse. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(1): 25-30

[34] Fischer C, Fischer M. Results in apple breeding at Dresden-Pillnitz. Gartenbauwissenschaft, 1996, 61: 139-146

[35] Fischer M, Fischer C. Evaluation of *Malus* species and cultivars at the fruit Genebank Dresden-Pillnitz and its use for apple resistance breeding. Genetic Resoures and Crop Evolution, 1999, 46: 235-241

[36] 王大江，Bus Vincent G M，王昆，高源，赵继荣，刘立军，李连文，朴继成 . 美国苹果砧木育种历史、现状及其商业化砧木特性 . 中国果树，2018，6：107-110，113
Wang D J, Bus V G M, Wang K, Gao Y, Zhao J R, Liu L J, Li L W, Piao J C. The history and present situation of apple rootstock breeding in America and its commercial rootstock characteristcs. China Fruits, 2018, 6: 107–110, 113

[37] 刘华威，王晓鸣，郭庆元，韩丽娟，曹玉芬，张薇，田路明 . 梨种质对梨火疫病的抗性研究 . 植物遗传资源学报，2008，9(2)：195-200
Liu H W, Wang X M, Guo Q Y, Han L J, Cao Y F, Zhang W, Tian L M. Identification of resistance to fire blight in pear germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, 9(2): 195-200

[38] 何临梓，田雯，张校立，徐叶挺，叶春秀 . 梨火疫病检测鉴定技术的研究进展 . 分子植物育种，2022，URL：https：//kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220428.1251.013.html
He L Z, Tian W, Zhang X L, Xu Y T, Ye C X. Research progress on detection and identification technology of pear fire blight. Molecular Plant Breeding, 2022, URL: https: //kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220428.1251.013.html

[39] 何临梓，张校立，叶春秀，王永鹏，陈励坤 . 四种梨砧木对梨火疫病的抗病相关酶活性变化分析 . 分子植物育种，2022，URL：https：//kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220412.1028.010.html
He L Z, Zhang X L, Ye C X, Wang Y P, Chen L K. Changes of enzyme activities related to resistance of four pear tootstokcs to pear fire blight. Molecular Plant Breeding, 2022, URL: https: //kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220412.1028.010.html

[40] 热孜亚 · 麦麦提，盛强，白雪莹，吕天宇，罗明 . 新疆梨火疫病菌对噻霉酮的敏感性及抗药性分析 . 果树学报，2022，URL：https：//doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20220059
Reziya · Maimaiti, Sheng Q, Bai X Y, Lv T Y, Luo M. Senceptibility of *Erwinia amylovora* and its resistance risk analysis to benziothiazolinone in Xinjaing. Journal of Fruit Science, 2022, URL: https: //doi.org/10.13925/j.cnki.gsxb.20220059