

朱凌丽, 徐建, 姚协丰, 等. 厚皮甜瓜种质蔓枯病抗性评价与遗传多样性分析[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2): 454-464.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.02.023

厚皮甜瓜种质蔓枯病抗性评价与遗传多样性分析

朱凌丽^{1,2}, 徐建², 姚协丰², 徐锦华², 李苹芳², 柳李旺¹, 羊杏平²

(1. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095; 2. 江苏省农业科学院蔬菜研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 采用苗期蔓枯病接种和单核苷酸多态性(SNP)基因型分析对120份厚皮甜瓜高代自交系进行抗性评价与遗传多样性研究。结果显示:光皮类型厚皮甜瓜中高抗、中抗种质资源占比达11.11%,其抗性水平结构优于网纹甜瓜和哈密瓜。统计分析结果显示,21个SNP位点的PIC值为0.050~0.478,其中12个中度多态SNP位点的PIC值平均为0.37,表明甜瓜种质的多态性中等。群体结构与聚类分析结果表明,124份甜瓜种质资源可分成5大类型群,各类群具有一定的独立性,且类群间存在明显的差异,遗传多样性丰富。

关键词: 厚皮甜瓜; 种质资源; 蔓枯病; 抗性评价; 遗传多样性

中图分类号: S652 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)02-0454-11

Identification of gummy stem blight resistance and analysis of genetic diversity in muskmelon germplasms

ZHU Ling-li^{1,2}, XU Jian², YAO Xie-feng², XU Jin-hua², LI Ping-fang², LIU Li-wang¹, YANG Xing-ping²

(1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Institute of Vegetable, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: The gummy stem blight (GSB) resistance evaluation and genetic diversity study of 120 high generation inbred lines of muskmelons were conducted via inoculation at seedling stage and single nucleotide polymorphism (SNP) genotype analysis. The results showed that, the proportion of germplasm resources of smoothbark muskmelons with high and medium resistance to GSB was up to 11.11%, and the structure of resistance level was better than that of netted melon and Hami melon. The statistical analysis results showed that, the polymorphism information content (PIC) value of 21 SNP loci ranged from 0.050 to 0.478, and the average PIC value of 12 moderate polymorphic SNP loci was 0.37, indicating that the polymorphism of the melon germplasms was moderate. Results of population structure and clustering analysis showed that, the 124 melon germplasms could be classified into five major groups, and each group showed certain independence. Furthermore, there were obvious differences between different groups and the genetic diversity was abundant.

Key words: muskmelon; germplasm resources; gummy stem blight; resistance evaluation; genetic diversity

收稿日期: 2020-07-02

基金项目: 国家西甜瓜产业技术体系项目(CARS-26-08); 江苏省农业三新工程项目[SXGC(2017)088]; 徐州市重点研发计划项目(KC18119)

作者简介: 朱凌丽(1981-), 女, 江苏盐城人, 硕士, 助理研究员, 主要从事甜瓜新品种选育工作。(E-mail) sweetmelon2050@foxmail.com

通讯作者: 柳李旺, (E-mail) naliulw@njau.edu.cn; 羊杏平, (E-mail) xingping@jaas.ac.cn

甜瓜是世界范围内重要的经济作物,在热带、亚热带及温带地区广泛种植,具有极高的食用和经济价值。据联合国粮食及农业组织(FAO)统计,2018年全球甜瓜栽培面积约 1.05×10^6 hm²,其中中国甜瓜栽培面积占总量的34.3%,年总产量 1.278×10^7 t,位居世界之首。厚皮甜瓜是食用栽培甜瓜的一种类型,较薄皮甜瓜品质优良,香甜可口,营养丰富,是广受国内外市场欢迎的高档果品。随着哈密瓜东移栽培的成功,厚皮甜瓜逐渐成为中国主要的设施栽培

瓜类作物^[1]。但是中国东部地区气候湿润,在保护地栽培的甜瓜极易诱发瓜类蔓枯病,严重时常常造成毁灭性减产^[2]。

生产中主要通过使用化学药剂防治蔓枯病,不仅成本高、效率低,还会引发病原菌的抗药性与环境污染等问题^[3]。防治实践表明,利用抗源选育抗病品种是防治甜瓜蔓枯病最经济有效的措施^[4]。因此,利用致病力强的蔓枯病病菌人工接种厚皮甜瓜种质资源,鉴定其抗性,筛选出抗病或耐病的种质,可以从源头上解决蔓枯病问题,并为选育优质抗病品种奠定基础。近年来国内甜瓜蔓枯病的研究多侧重于对地方品种的抗病性鉴定^[5],以及蔓枯病抗性遗传关系分析及抗性基因定位^[6-7],亟需对厚皮甜瓜种质资源进行蔓枯病抗性评价。而且目前厚皮甜瓜商业品种多为杂交种,育种者为获取其优良特性进行多代自交获得骨干亲本,造成目前厚皮甜瓜种质资源的亲缘关系相近,遗传背景趋于模糊^[8]。因此,利用分子标记鉴定技术,完善厚皮甜瓜种质资源遗传多样性评价体系,明确其种质遗传多样性分布特点,对厚皮甜瓜的品种选育与种质创新以及甜瓜产业的发展都具有重要意义。

本研究对江苏省农业科学院蔬菜研究所西甜瓜创

新团队多年选育的 120 份厚皮甜瓜高代自交系材料进行蔓枯病抗性鉴定,分析不同类型及地理来源甜瓜种质资源对蔓枯病的抗感性;同时筛选厚皮甜瓜单核苷酸多态性(SNP)引物,对 124 份甜瓜种质资源的遗传多样性进行分析,以期对厚皮甜瓜核心种质构建、种质创制、抗病新品种选育等研究工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料准备

供试甜瓜种质资源共 124 份(表 1),包括厚皮甜瓜 120 份、薄皮甜瓜(抗蔓枯病对照)3 份和厚皮哈密瓜雪里红(感蔓枯病对照)1 份。其中厚皮甜瓜种质资源为江苏省农业科学院蔬菜研究所从国内不同省份和日本、韩国、东南亚、美国及欧洲等不同国家及地区收集,经多代自交选择获得的高代自交系;薄皮甜瓜引自美国,为抗蔓枯病对照材料;雪里红由新疆农业科学院哈密瓜研究中心培育,为感蔓枯病对照材料。厚皮甜瓜中有网纹甜瓜种质资源 48 份,哈密瓜种质资源 43 份,光皮甜瓜种质资源 27 份。2017 年秋季于江苏省农业科学院蔬菜研究所玻璃温室内进行甜瓜育苗,每份材料种植 20 个单株,日温 25~28 ℃,夜温 18~20 ℃,长至 2~3 张真叶时备用。

表 1 供试甜瓜种质资源类型与来源

Table 1 Types and origins of melon germplasm evaluated in this study

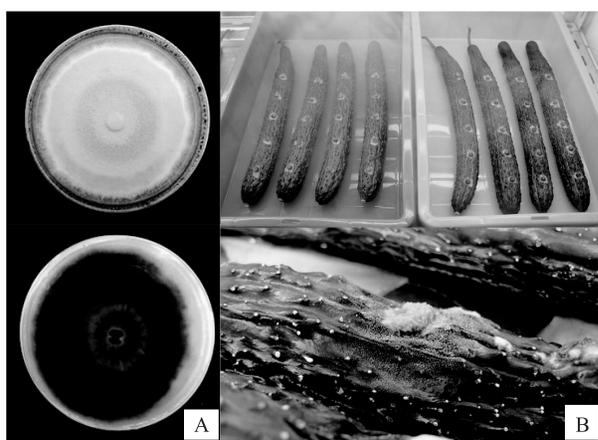
材料序号	材料编号	材料类型	材料来源	材料序号	材料编号	材料类型	材料来源
1	M-08-13	厚皮,网纹	日本	63	M-13-11-13-4-3	厚皮,哈密瓜	中国上海
2	M-08-14	厚皮,网纹	日本	64	M-13-11-13-4-9	厚皮,哈密瓜	中国上海
3	M-08-19	厚皮,网纹	日本	65	M-13-11-14-7	厚皮,哈密瓜	中国上海
4	M-08-16	厚皮,网纹	日本	66	M-13-12-1-7	厚皮,网纹	中国香港
5	M-08-123	厚皮,光皮	日本	67	M-14-13-3-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆
6	M-08-124	厚皮,光皮	日本	68	M-14-14-3-3	厚皮,哈密瓜	中国新疆
7	M-08-125	厚皮,光皮	日本	69	M-14-14-4	厚皮,哈密瓜	中国新疆
8	M-08-126	厚皮,光皮	日本	70	M-14-17-2-7	厚皮,网纹	中国河南
9	M-10-26	厚皮,网纹	日本	71	M-14-18-1-3	厚皮,哈密瓜	中国台湾
10	M-10-29-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆	72	M-14-18-1-4	厚皮,哈密瓜	中国台湾
11	M-10-31	厚皮,哈密瓜	中国新疆	73	M-14-25-2-8	厚皮,网纹	日本
12	M-10-32-1	厚皮,哈密瓜	中国新疆	74	M-14-25-5	厚皮,网纹	日本
13	M-10-34	厚皮,网纹	日本	75	M-16-TH-4	厚皮,哈密瓜	中国江苏
14	M-10-35	厚皮,网纹	中国台湾	76	M-16-TH-6	厚皮,哈密瓜	中国江苏
15	M-10-36-1	厚皮,哈密瓜	中国新疆	77	M-16-TH-9	厚皮,光皮	中国江苏
16	M-10-36-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆	78	M-16-TH-13	厚皮,光皮	中国江苏
17	M-10-43	厚皮,哈密瓜	中国新疆	79	M-16-TH-14	厚皮,哈密瓜	中国江苏
18	M-10-44	厚皮,网纹	日本	80	M-16-TH-15	厚皮,哈密瓜	中国江苏
19	M-10-48-2-1	厚皮,哈密瓜	中国新疆	81	M-16-TH-22	厚皮,哈密瓜	中国江苏

续表 1 Continued 1

材料序号	材料编号	材料类型	材料来源	材料序号	材料编号	材料类型	材料来源
20	M-10-48-2-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆	82	M-16-TH-23	厚皮,哈密瓜	中国江苏
21	M-10-50	厚皮,哈密瓜	中国新疆	83	M-16-TH-24	厚皮,哈密瓜	中国江苏
22	M-10-51	厚皮,哈密瓜	中国新疆	84	M-16-TH-25	厚皮,哈密瓜	中国江苏
23	M-10-53-1	厚皮,哈密瓜	中国新疆	85	M-16-TH-26	厚皮,哈密瓜	中国江苏
24	M-10-54	厚皮,哈密瓜	中国新疆	86	M-16-TH-35	厚皮,光皮	中国江苏
25	M-10-60	厚皮,网纹	韩国	87	M-16-TH-36	厚皮,光皮	中国江苏
26	M-10-61	厚皮,网纹	中国上海	88	M-16-TH-39	厚皮,光皮	中国江苏
27	M-10-63-1	厚皮,网纹	中国江苏	89	M-16-TH-42-2	厚皮,光皮	中国江苏
28	M-10-66	厚皮,哈密瓜	中国新疆	90	M-16-TH-43-2	厚皮,光皮	中国江苏
29	M-10-67-1	厚皮,哈密瓜	中国新疆	91	M-16-TH-44	厚皮,光皮	中国江苏
30	M-10-67-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆	92	M-16-TH-57	厚皮,网纹	中国江苏
31	M-12-83	厚皮,网纹	美国	93	M-16-TH-58	厚皮,网纹	中国江苏
32	M-12-88-1	厚皮,网纹	美国	94	M-17-54-4-7	厚皮,光皮	中国台湾
33	M-12-88-2	厚皮,网纹	美国	95	M-17-55-2-2	厚皮,光皮	日本
34	M-12-90	厚皮,网纹	美国	96	M-17-55-2-6	厚皮,光皮	日本
35	M-12-68-2-1	厚皮,哈密瓜	中国江苏	97	M-17-56-1-2	厚皮,光皮	日本
36	M-12-68-4	厚皮,哈密瓜	中国江苏	98	M-17-56-2-3	厚皮,光皮	日本
37	M-12-68-5	厚皮,哈密瓜	中国江苏	99	M-17-58-1-13	厚皮,网纹	中国江苏
38	M-12-69	厚皮,光皮	法国	100	M-17-58-2-2	厚皮,网纹	中国江苏
39	M-12-72	厚皮,光皮,皱褶	法国	101	M-17-58-3-3	厚皮,网纹	中国江苏
40	M-12-74-2	厚皮,网纹	法国	102	M-17-58-3-6	厚皮,网纹	中国江苏
41	M-12-75-1	厚皮,网纹	法国	103	M-17-58-8-7	厚皮,网纹	中国江苏
42	M-12-75-3	厚皮,网纹	法国	104	M-17-59-1	厚皮,稀纹	英国
43	M-12-76-1	厚皮,网纹	法国	105	M-17-60-2	厚皮,网纹	英国
44	M-12-91-2	厚皮,哈密瓜	中国新疆	106	M-17-61	厚皮,光皮	西班牙
45	M-12-93	厚皮,哈密瓜	中国新疆	107	M-17-63-4-4	厚皮,网纹	西班牙
46	M-12-8-3	厚皮,光皮	泰国	108	M-17-63-4-7	厚皮,网纹	西班牙
47	M-13-2-3-2	厚皮,网纹	日本	109	M-17-96	厚皮,网纹	法国
48	M-13-2-6	厚皮,网纹	日本	110	M-17-97	厚皮,网纹	德国
49	M-13-3	厚皮,网纹	日本	111	M-17-98	厚皮,网纹	德国
50	M-13-4-3	厚皮,网纹	中国上海	112	M-17-99	厚皮,光皮	德国
51	M-13-4-9	厚皮,网纹	中国上海	113	M-17-100	厚皮,稀纹	德国
52	M-13-4-15-2	厚皮,网纹	中国上海	114	M-17-103	厚皮,光皮	中国甘肃
53	M-13-4-17	厚皮,网纹	中国上海	115	M-17-104	厚皮,光皮	中国甘肃
54	M-13-5-1-8	厚皮,网纹	中国上海	116	M-17-105	厚皮,稀纹	中国甘肃
55	M-13-5-11	厚皮,网纹	中国上海	117	M-17-106	厚皮,光皮	中国甘肃
56	M-13-6-2-5	厚皮,哈密瓜	中国新疆	118	M-17-107	厚皮,光皮	中国甘肃
57	M-13-6-3-5	厚皮,哈密瓜	中国新疆	119	M-17-108	厚皮,光皮	中国甘肃
58	M-13-7-3	厚皮,哈密瓜	中国新疆	120	M-17-109	厚皮,网纹	中国甘肃
59	M-13-10-2-2	厚皮,网纹	泰国	121	PI 140471(引进-1)	薄皮	美国
60	M-13-10-4	厚皮,网纹	泰国	122	PI 482398(引进-2)	薄皮	美国
61	M-13-11-3-4	厚皮,哈密瓜	中国上海	123	PI 200819(引进-3)	薄皮	美国
62	M-13-11-10	厚皮,哈密瓜	中国上海	124	雪里红(引进-4)	厚皮,哈密瓜	中国新疆

102号材料 M-17-58-3-6 植株播种后出苗情况不佳,最终未能进行接种鉴定。

蔓枯病病菌[*Didymella bryoniae* (Auersw.) Rehm]选择 DBJSY2 作为接种菌株,该菌株由江苏省农业科学院蔬菜研究所瓜类作物研究室从田间收集、分离、鉴定和保存,致病力强,稳定性好。接种前将 DBJSY2 接种于马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)固体培养基上,16 h/d光照、26~28 °C 培养 1 周。参照姚协丰等^[9]方法利用黄瓜培养蔓枯病病菌分生孢子(图 1)。用刀片刮取菌块,研磨后以无菌水冲洗,用 4 层灭菌纱布过滤冲洗液,在显微镜下将分生孢子悬浮液调整为 1 ml 5×10^5 个备用。



A: 培养基中的蔓枯病病菌,上图为平板正面,下图为平板反面;
B: 新鲜黄瓜中培养的蔓枯病病菌分生孢子,上 2 张图是接种蔓枯病病菌的黄瓜,蔓枯病之菌户孢的黄瓜。

图 1 DBJSY2 菌株及分生孢子培养

Fig.1 Incubation of strains and conidia of DBJSY2

1.2 取样及 DNA 提取

对 124 份甜瓜种质资源叶片用标准打孔器打孔取样,每份资源材料取 8 张叶片,液氮冷冻保存。采用十六烷基三甲基溴化铵/十二烷基硫酸钠(CTAB/SDS)方法提取组织 DNA。DNA 溶解后用 BioTEK 多功能酶标仪测定 OD 值,包括 OD_{230} 、 OD_{260} 、 OD_{280} 。通过 1% 琼脂糖凝胶于 120 V 电泳 30 min,确定 DNA 的完整性。

1.3 蔓枯病病菌苗期接种及病情鉴定

参照周晓慧等^[10]方法进行苗期接种,在甜瓜苗期 3~4 叶期时用喷雾器喷洒孢子悬浮液(按 1 ml 5×10^5 个的密度,加 1% Tween80),喷至植株叶片开始滴水为止。每份材料处理 5 株,3 次重复,以清水为对照。接种后置于拱棚内覆膜并加盖遮阳网,保证湿度在 90% 以上,温度控制在 25 °C 左右,3 d 后揭开拱棚。

甜瓜苗期活体接种后分别在第 7 d、11 d、15 d

调查统计蔓枯病病害发生情况。参照 Gabriele 等^[11]方法,根据植株不同部位发病情况及病斑大小进行抗性分级统计:0 级,无症状;1 级,叶片发黄(仅疑似感病);2 级,叶片有轻微症状(<20% 坏死);3 级,叶片有中度症状(21%~45% 坏死);4 级,叶片有严重症状(>45% 坏死);5 级,有叶片病死,茎上无症状;6 级,叶片有轻微症状(<20% 坏死),叶柄和茎上也有坏死(<3 mm);7 级,叶片有中度症状(21%~45% 坏死),叶柄和茎上也有坏死(3~5 mm);8 级,叶片有严重症状(>45% 坏死),叶柄和茎秆坏死(>5 mm);9 级,植株死亡。平均病情级别数(RI)计算公式: $RI = \sum(\text{各级值} \times \text{株数}) / \text{总株数}$ 。根据平均病情级别数确定蔓枯病抗性级别。高抗(HR): $RI \leq 2.0$; 抗(R): $2.0 < RI \leq 3.0$; 中抗(MR): $3.0 < RI \leq 4.0$; 感(S): $4.0 < RI \leq 5.0$; 中感(MS): $5.0 < RI \leq 6.0$; 高感(HS): $RI > 6.0$ 。

1.4 SNP 引物设计合成

以检出率 100%、杂合率 <30%、最小等位基因频率(MAF) >40%、上下游 100 bp 内没有其他 SNP、基因组单拷贝为标准,挑选了 40 个均匀覆盖甜瓜基因组的 SNP 标记^[12-15]。根据 SNP 位点设计 PCR 3' 末端扩增引物,设计软件为 Primer5,引物 T_m 值为 55~65 °C。每个 SNP 位点设计 2 条 SNP 特异性引物和 1 条通用引物,引物由 Lifetech 公司合成。

1.5 SNP 基因分型验证

竞争性等位基因特异性 PCR(Kompetitive allele specific PCR, KASP)反应体系:10 ng 基因组 DNA, 5.00 μ l KASP V4.0 2 \times Master Mix, 0.14 μ l KASP 72 \times assay mix, 加 ddH₂O 至 10.00 μ l(适用 96 孔板)。其中 KASP V4.0 2 \times Master Mix 购于 LGC 公司,包括荧光探针 A、荧光探针 B、淬灭探针 A 和淬灭探针 B、高保真 Taq 酶、dNTP 等。KASP 72 \times assay mix 由浓度为 100 μ mol/L 的 SNP1-A1、SNP1-A2、SNP1-C1 与 ddH₂O 按照 12:12:30:46(体积比)混合组成。试验同时设置不加模板的空白对照,每个 PCR 板中设置 1 个空白对照。梯度 PCR 反应程序如下:95 °C 15 min,10 个循环;94 °C 20 s,61 °C(每个循环降 0.6 °C)退火 60 s,26 个循环;94 °C 20 s,55 °C 退火 60 s。采用双向单激发读板仪 PHERAstar 对 PCR 扩增产物进行扫描,羧基荧光素(FAM)激发波长为 485 nm,发射波长为 520 nm,六氨-6-甲基荧光素(HEX)激发波长为 528 nm,发射波

长为 560 nm,系统参比荧光(ROX)激发波长为 575 nm,发射波长为 610 nm。

采用 Kraken™ 软件对双向单激发读板仪 PHERAstar 进行扫描数据分析:聚合在接近 X 轴、显示蓝色的样本基因型为连接 FAM 荧光标签序列的等位基因,聚合在接近 Y 轴、显示红色的样本基因型为连接 HEX 荧光标签序列的等位基因,中间显示绿色的样本基因型为上述 2 种等位基因的杂合型,显示粉色的样本可能是 DNA 质量或浓度问题而使扩增产物没有明确分型,显示黑色的样本为空白对照^[16]。

1.6 统计分析

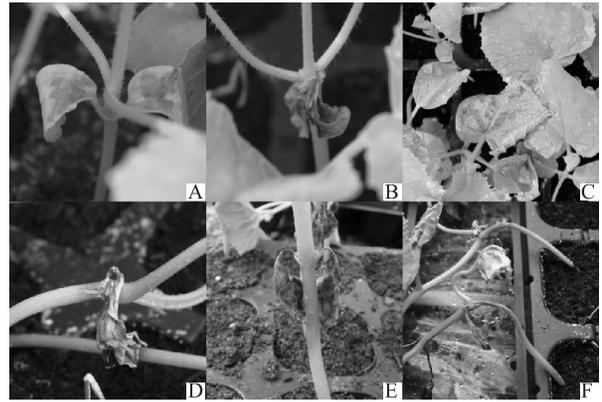
病情级别统计数据利用 DPS 统计软件进行相关性分析。SNP 位点基因型频率数据使用 PIC-CALC 软件计算分析多态信息量(PIC 值)。利用 Structure 2.3 软件计算遗传相似系数,用 Structure 2.3 软件分析群体结构及其遗传多样性,选择最佳群体组群数(K),并在计算时将 K 取值范围设置为 1~8,重复 8 次,采用 Admixture model,计算 ΔK 值作为衡量最佳 K 值的标准。获得聚类矩阵,利用 Structure 软件进行数学模型聚类分析,基于结构程序生成聚类图。

2 结果与分析

2.1 不同厚皮甜瓜种质资源对蔓枯病病菌的抗病性

利用喷雾接种法鉴定 120 份厚皮甜瓜种质资源对蔓枯病病菌的抗性反应。除 1 份材料(编号 102)出苗情况不佳未能接种外,其余 119 份自交系材料和感病对照(雪里红)在接种 3~5 d 后均开始发病。具体症状表现为:子叶最先出现失绿斑点,随着病斑的扩展而坏死;叶部出现褪绿色病斑,并逐渐扩大扩展为“V”形病斑;茎秆晚于子叶、叶片发病,感病时出现水渍状病斑,逐渐扩大后渗出少量红色胶状物(图 2)。不同材料的发病程度不同,蔓枯病抗性对照 PI140471 达到高抗水平。在 119 份自交系中未发现免疫或高抗材料,除 PI 200819、PI 482398 两份抗病对照达到抗(R)级别外,发现 8 份厚皮甜瓜自交系抗蔓枯病,其平均病情级别数在 2.00 至 3.00 之间。此外还有 30 份自交系平均病情级别数小于 4.00,对蔓枯病表现为中抗(MR),其余材料均易感蔓枯病(表 2)。

群体中筛选到抗性种质资源 8 份,占比 6.7%,包括 4 份网纹甜瓜种质资源、3 份光皮甜瓜种质资源以及 1 份哈密瓜种质资源。这 8 份抗性种质资源在果实形状、果皮果肉颜色和果肉质地



A:子叶发病;B:子叶坏死;C:叶片感病;D:茎上病斑;E:茎渗出胶状物;F:茎坏死。

图 2 甜瓜植株不同部位蔓枯病症状

Fig.2 Symptoms of gummy stem blight on different parts of melon seedlings

方面表现迥异,可作为优质种质资源加以利用(表 3)。其中 M-16-TH-39、M-17-108 为光白皮圆果,全生育期 110 d,中心糖分含量别为 16.0%、14.5%,是开展早熟、高品质、抗病厚皮甜瓜育种的优良种质;M-17-58-8-7 的果肉中心糖分含量达到 17.4%,绿色果肉风味浓厚,是较为难得的高糖优质抗病种质资源。

2.2 119 份厚皮甜瓜种质资源地理来源与蔓枯病抗性关系分析

将 119 份厚皮甜瓜种质资源按照地理来源划分成 6 组,其中来源于国内的种质资源按地理来源划分成 2 个组,即中国南方组和中国北方组。国外有日本和韩国组、东南亚组、欧洲组、美国组。统计分析结果表明,不同地理来源的甜瓜自交系中都有抗性材料分布,但是不同地理来源抗性材料占比差别较大,东南亚组内达到中抗(MR)级别以上的材料占比最高,达到 66.70%(图 3)。中国南方组中达到抗(R)与中抗级别的材料数量最多,抗级别的材料占比最高,达到 11.36%。达到抗病级别的种质资源都来源于中国、日本和韩国。

2.3 SNP 位点筛选及 PIC 值分析

从 ARAYA 荧光阅读仪上读取荧光信号,然后将结果导入数据库,采用 Kraken™ 软件对双向单激发读板仪 PHERAstar 扫描获得的数据进行分析,124 个甜瓜种质资源中含有候选 SNP 位点的 3 个基因型类别。通过 Kraken™ 软件从 40 个均匀覆盖甜瓜基因组的标记中筛选出 21 对多态性较好的 SNP 引物(表 4)。

表 2 不同厚皮甜瓜种质资源苗期蔓枯病抗性鉴定结果

Table 2 Identification results of gummy stem blight resistance of different muskmelon germplasms at seedling stage

材料序号	材料编号	平均病情级别数	抗性	扩展半径 (cm)	材料序号	材料编号	平均病情级别数	抗性	扩展半径 (cm)
121	PI 140471	1.87±0.09	HR	1.15±0.09	96	M-17-55-2-6	5.13±0.34	MS	1.60±0.08
49	M-13-3	2.27±0.23	R	1.73±0.07	1	M-08-13	5.20±0.30	MS	0.37±0.12
123	PI 200819	2.33±0.23	R	0.69±0.09	31	M-12-83	5.21±0.32	MS	0.75±0.26
103	M-17-58-8-7	2.40±0.27	R	1.55±0.06	18	M-10-44	5.27±0.27	MS	0.71±0.23
51	M-13-4-9	2.67±0.33	R	1.81±0.07	83	M-16-TH-24	5.27±0.37	MS	1.43±0.05
122	PI 482398	2.73±0.37	R	0.65±0.08	3	M-08-19	5.33±0.54	MS	0.74±0.12
53	M-13-4-17	2.87±0.27	R	1.58±0.03	94	M-17-54-4-7	5.33±0.61	MS	1.66±0.05
62	M-13-11-10	2.93±0.07	R	1.77±0.07	27	M-10-63-1	5.40±0.31	MS	1.17±0.25
88	M-16-TH-39	2.93±0.07	R	2.22±0.09	77	M-16-TH-9	5.40±0.65	MS	1.81±0.07
95	M-17-55-2-2	3.00±0.34	R	1.86±0.14	65	M-13-11-14-7	5.60±0.36	MS	1.73±0.07
119	M-17-108	3.00±0.49	R	0.41±0.18	98	M-17-56-2-3	5.60±0.59	MS	1.82±0.08
37	M-12-68-5	3.07±0.37	MR	1.11±0.11	99	M-17-58-1-13	5.60±0.62	MS	1.66±0.09
92	M-16-TH-57	3.07±0.38	MR	1.57±0.10	63	M-13-11-13-4-3	5.67±0.63	MS	1.57±0.07
14	M-10-35	3.27±0.60	MR	1.15±0.05	100	M-17-58-2-2	5.67±0.56	MS	1.60±0.10
74	M-14-25-5	3.27±0.34	MR	1.69±0.08	114	M-17-103	5.67±0.41	MS	1.40±0.06
73	M-14-25-2-8	3.33±0.51	MR	1.60±0.05	24	M-10-54	5.73±0.59	MS	1.29±0.09
93	M-16-TH-58	3.33±0.16	MR	1.39±0.08	104	M-17-59-1	5.73±0.55	MS	1.72±0.06
112	M-17-99	3.33±0.49	MR	1.43±0.11	76	M-16-TH-6	5.80±0.44	MS	1.79±0.06
9	M-10-26	3.40±0.24	MR	0.86±0.12	79	M-16-TH-14	5.80±0.64	MS	1.45±0.11
50	M-13-4-3	3.40±0.35	MR	1.40±0.03	16	M-10-36-2	5.87±0.36	MS	1.26±0.06
25	M-10-60	3.47±0.48	MR	1.23±0.08	21	M-10-50	5.87±0.68	MS	0.71±0.23
116	M-17-105	3.60±0.49	MR	1.35±0.08	71	M-14-18-1-3	5.87±0.67	MS	1.75±0.06
54	M-13-5-1-8	3.67±0.25	MR	1.55±0.06	66	M-13-12-1-7	6.00±0.64	MS	1.86±0.08
32	M-12-88-1	3.73±0.34	MR	1.07±0.13	117	M-17-106	6.00±0.58	MS	1.42±0.11
52	M-13-4-15-2	3.80±0.68	MR	1.81±0.08	6	M-08-124	6.13±0.64	HS	1.01±0.06
72	M-14-18-1-4	3.80±0.33	MR	1.76±0.07	68	M-14-14-3-3	6.13±0.39	HS	1.72±0.10
59	M-13-10-2-2	3.87±0.42	MR	1.68±0.07	107	M-17-63-4-4	6.20±0.63	HS	1.88±0.13
109	M-17-96	3.93±0.21	MR	1.51±0.06	10	M-10-29-2	6.36±0.66	HS	1.01±0.15
115	M-17-104	3.93±0.52	MR	1.27±0.06	64	M-13-11-13-4-9	6.40±0.48	HS	1.62±0.11
101	M-17-107	3.93±0.51	MR	1.35±0.09	85	M-16-TH-26	6.40±0.38	HS	1.66±0.03
15	M-10-36-1	4.00±0.20	MR	1.30±0.11	19	M-10-48-2-1	6.47±0.38	HS	1.19±0.04
60	M-13-10-4	4.00±0	MR	1.69±0.14	23	M-10-53-1	6.47±0.34	HS	1.17±0.04
120	M-17-109	4.00±0	MR	1.09±0.19	124	雪里红	6.53±0.50	HS	1.34±0.09
70	M-14-17-2-7	4.07±0.28	S	1.59±0.06	4	M-08-16	6.60±0.48	HS	1.25±0.08
87	M-16-TH-36	4.07±0.56	S	1.86±0.07	30	M-10-67-2	6.60±0.54	HS	0.50±0.23
29	M-10-66	4.13±0.55	S	1.29±0.07	36	M-12-68-4	6.67±0.40	HS	0.97±0.09
41	M-12-74-2	4.13±0.39	S	1.05±0.14	82	M-16-TH-23	6.67±0.50	HS	1.62±0.07
2	M-08-14	4.20±0.24	S	0.73±0.04	20	M-10-48-2-2	6.73±0.41	HS	0.92±0.19

续表 2 Continued 2

材料序号	材料编号	平均病情级别数	抗性	扩展半径 (cm)	材料序号	材料编号	平均病情级别数	抗性	扩展半径 (cm)
34	M-12-90	4.27±0.33	S	1.30±0.03	44	M-12-91-2	6.73±0.45	HS	1.09±0.07
42	M-12-75-1	4.27±0.36	S	0.89±0.40	97	M-17-56-1-2	6.73±0.50	HS	1.56±0.04
38	M-12-69	4.33±0.44	S	0.87±0.12	8	M-08-126	6.87±0.41	HS	0.89±0.11
56	M-13-6-2-5	4.33±0.48	S	1.55±0.09	75	M-16-TH-4	6.91±1.02	HS	1.15±0.36
13	M-10-34	4.40±0.51	S	1.31±0.10	78	M-16-TH-13	6.93±0.55	HS	1.72±0.06
33	M-12-88-2	4.40±0.43	S	1.14±0.12	80	M-16-TH-15	6.93±0.47	HS	1.51±0.10
47	M-13-2-3-2	4.40±0.59	S	1.57±0.06	7	M-08-125	7.00±0.53	HS	1.14±0.10
105	M-17-60-2	4.40±0.51	S	1.66±0.06	22	M-10-51	7.00±0.37	HS	1.09±0.03
110	M-17-97	4.47±0.47	S	1.44±0.08	69	M-14-14-4	7.00±0.53	HS	1.65±0.05
26	M-10-61	4.53±0.57	S	1.26±0.09	12	M-10-32-1	7.07±0.48	HS	1.28±0.08
81	M-16-TH-22	4.53±0.51	S	1.52±0.12	108	M-17-58-3-3	7.08±0.57	HS	1.61±0.12
111	M-17-98	4.67±0.59	S	1.57±0.04	40	M-12-72	7.13±0.55	HS	0.93±0.11
48	M-13-2-6	4.73±0.42	S	1.53±0.09	91	M-16-TH-44	7.13±0.46	HS	1.60±0.10
58	M-13-7-3	4.80±0.66	S	1.56±0.10	113	M-17-100	7.20±0.44	HS	1.34±0.07
17	M-10-43	4.83±0.58	S	0.64±0.28	35	M-12-68-2-1	7.40±0.31	HS	1.23±0.08
67	M-14-13-3-2	4.83±0.69	S	1.91±0.09	106	M-17-61	7.40±0.51	HS	1.82±0.04
55	M-13-5-11	4.87±0.47	S	1.61±0.09	57	M-13-6-3-5	7.47±0.27	HS	1.87±0.05
43	M-12-75-3	4.93±0.44	S	1.20±0.11	46	M-12-8-3	7.50±0.69	HS	1.00±0.32
61	M-13-11-3-4	5.00±0.55	S	1.70±0.05	39	M-12-70-1	7.60±0.51	HS	0.41±0.18
84	M-16-TH-25	5.07±0.48	MS	1.50±0.12	45	M-12-93	7.87±0.27	HS	1.78±0.07
108	M-17-63-4-7	5.00±0.58	S	1.65±0.14	11	M-10-31	8.00±0.63	HS	0.45±0.20
86	M-16-TH-35	5.13±0.52	MS	1.59±0.06	5	M-08-123	8.38±0.37	HS	1.09±0.11
89	M-16-TH-42-2	5.13±0.51	MS	1.96±0.11	29	M-10-67-1	8.43±0.43	HS	0.88±0.22
90	M-16-TH-43-2	5.13±0.40	MS	1.67±0.08					

HR:高抗; R:抗; MR:中抗; S:感; MS:中感; HS:高感。

表 3 119 份厚皮甜瓜种质资源对蔓枯病的抗性评价

Table 3 Gummy stem blight resistance evaluation of 119 muskmelon germplasm

抗病类型	平均病情级别指数 (RI)	材料数量 (份)	占比 (%)
高抗(HR)	$RI \leq 2.0$	0	0
抗病(R)	$2.0 < RI \leq 3.0$	8	6.7
中抗(MR)	$3.0 < RI \leq 4.0$	22	18.5
感病(S)	$4.0 < RI \leq 5.0$	25	21.0
中感(MS)	$5.0 < RI \leq 6.0$	28	23.5
高感(HS)	$RI > 6.0$	36	30.3

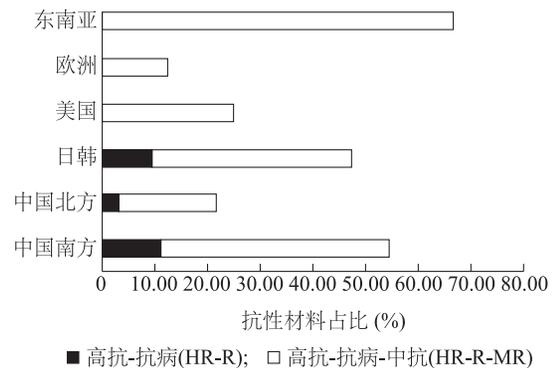


图 3 不同地理来源甜瓜种质资源对蔓枯病的抗性差异

Fig.3 Gummy stem blight resistance differences among melon germplasm from different regions

表 4 甜瓜果实性状及抗病相关单核苷酸多态性 (SNP) 位点信息

Table 4 Single nucleotide polymorphism (SNP) loci associated with fruit traits and disease resistance of melons

序号	基因	标记位点	等位基因型	染色体编号	物理位置(bp)	基因名称
1	<i>CMPSNP711</i>	A009970	C/T	1	26 308 138	MELO3C021106
2	<i>CmEIN3LIKE2ex2</i>	A009971	C/T	2	3 611 363	MELO3C003696
3	<i>CmINHLIKE2.2</i>	A009972	C/T	2	22 908 768	MELO3C017187
4	<i>CmINHLIKE2.1</i>	A009973	C/T	2	22 908 848	MELO3C017187
5	<i>AtEIN3ex4.2</i>	A009974	C/T	3	17 934 192	MELO3C019931
6	<i>SIERF1</i>	A 009 975	C/T	3	22 138 473	MELO3C011287
7	<i>CMPSNP677</i>	A009976	C/G	4	26 788 563	MELO3C009586
8	<i>CmAIN2.3</i>	A009981	C/T	9	19 770 655	-
9	<i>CmVPELIKE3.2</i>	A009982	C/T	9	21 406 361	MELO3C005564
10	<i>MLO1212438.1</i>	A009983	C/T	10	473 116	MELO3C012438
11	<i>CmERF2ex2</i>	A009984	G/T	10	1 742 964	MELO3C012242
12	<i>CmXTH5</i>	A009985	C/G	10	3 358 353	MELO3C012004
13	<i>CmAAG2.1</i>	A009986	C/G	8	4 970 380	MELO3C011771
14	<i>snpWRK704</i>	A009987	A/G	10	8 808 281	MELO3C020166
15	<i>CmOr1</i>	A009990	G/A	9	20 549 181	MELO3C005449
16	<i>CmOr2</i>	A009991	A/G	9	20 549 204	MELO3C005449
17	<i>CmOr3</i>	A009992	A/C	9	20 549 272	MELO3C005449
18	<i>AtEIN3ex4.2</i>	A009504	C/T	6	3 243 220	MELO3C019931
19	<i>MLO65044.1</i>	A009512	C/T	12	3 625 217	MELO3C005044
20	<i>FOM-2</i>	A009514	G/A	11	6 770 053	-
21	<i>GsbR</i>	A009517	A/G	4	15 515 183	MELO3C012987

根据 21 个 SNP 位点的基因分型,分析 21 个 SNP 在所测试甜瓜种质资源中的基因型频率和多态信息量,结果显示,21 个 SNP 位点的 *PIC* 值为 0.050~0.478(表 5)。

2.4 甜瓜种质资源群体结构及遗传多样性分析

用 Structure 2.3 软件计算 ΔK 值,作为衡量最佳 *K* 值的标准。结果显示,当 *K* = 5 时 ΔK 最大(图 4)。依据 *K* = 5 时分析获得的数据,在 Simulation Result 中用 bar plot 绘制各个材料在各群中所占比例(图 5)。由图 5 可以看出,124 份甜瓜种质资源分成 5 大类群(5 种颜色表示 5 个类群),各群体间存在明显的差异,并具有一定的独立性,这说明供试的甜瓜种质资源存在明显的群体结构。抗蔓枯病材料主要集中在绿色的第 2 大类和粉色的第 5 大类中。第 2 大类全部为软肉类型甜瓜种质资源,蓝色的第 3 大类以脆肉型甜瓜为主,黄色的第 4 大类全

部为来源于新疆和上海的哈密瓜,第 5 大类以网纹甜瓜为主。

根据材料的地理来源,用 Structure 软件分析得到 124 个甜瓜种质资源聚类三角图(图 6),3 个角顶点代表 3 个群组。Cluster 1 群组主要为来源于中国新疆、上海和欧洲的厚皮甜瓜种质资源,Cluster 2 群组主要为来源于日本、韩国、中国台湾及美国的厚皮甜瓜种质资源,其中黄色点为引自美国的薄皮甜瓜种质资源,在 Cluster 1 和 Cluster 2 中间聚类,表现出一定差异性。All others 群组主要包括来源于甘肃、河南的种质资源。棕色点为来源于江苏的种质资源,在 3 个组群都有分布,说明来源于江苏的部分种质资源与 3 个类群间的差异都比较大,在中间聚类。同一地理来源的厚皮甜瓜种质资源可能聚在同一类群组,也可能交叉分布在不同群组,可见其聚类并不完全以地理来源为标准。

表5 21个甜瓜 SNP 位点的基因型频率和多态信息量

Table 5 Genotype frequency and polymorphism information content of 21 SNP loci of melons

序号	标记位点	基因型频率			多态信息量 (PIC)	序号	标记位点	基因型频率			多态信息量 (PIC)
		等位基因型	数量(个)	频率				等位基因型	数量(个)	频率	
1	A009970	T/T	87	0.836	0.269	12	A009985	C/C	52	0.430	0.396
		C/T	8	0.077				G/C	2	0.017	
		C/C	9	0.087				G/G	67	0.553	
2	A009971	C/C	109	0.973	0.052	13	A009986	C/C	100	0.870	0.217
		T/C	2	0.018				G/C	4	0.035	
		T/T	1	0.009				G/G	11	0.095	
3	A009972	T/T	110	0.924	0.134	14	A009987	G/G	90	0.750	0.356
		C/T	8	0.067				A/G	8	0.067	
		C/C	1	0.009				A/A	22	0.183	
4	A009973	C/C	114	0.974	0.050	15	A009990	A/A	65	0.565	0.371
		T/C	2	0.017				G/G	50	0.435	
		T/T	1	0.009				G/G	67	0.554	
5	A009974	C/C	113	0.966	0.065	16	A009991	A/G	3	0.025	0.406
		T/C	2	0.017				A/A	51	0.421	
		T/T	2	0.017				C/C	65	0.556	
6	A009975	C/C	94	0.783	0.329	17	A009992	A/C	1	0.009	0.384
		T/C	9	0.075				A/A	51	0.435	
		T/T	17	0.142				C/C	112	0.918	
7	A009976	C/C	105	0.921	0.142	18	A009504	T/C	3	0.025	0.147
		G/C	3	0.026				T/T	7	0.057	
		G/G	6	0.053				C/C	109	0.916	
8	A009981	T/T	81	0.743	0.327	19	A009512	T/C	2	0.017	0.148
		C/T	2	0.018				T/T	8	0.067	
		C/C	26	0.239				G/G	109	0.924	
9	A009982	C/C	36	0.316	0.392	20	A009514	T/G	1	0.008	0.134
		C/T	4	0.035				T/T	8	0.068	
		T/T	74	0.649				C/C	41	0.334	
10	A009983	T/T	65	0.537	0.478	21	A009517	T/T	79	0.642	0.383
		T/C	11	0.091				T/C	3	0.024	
		C/C	45	0.372							
11	A009984	G/G	65	0.560	0.406						
		G/T	3	0.026							
		T/T	48	0.414							

$PIC > 0.50$ 为高度多态, $0.25 < PIC \leq 0.50$ 为中度多态, $PIC \leq 0.25$ 为低度多态。

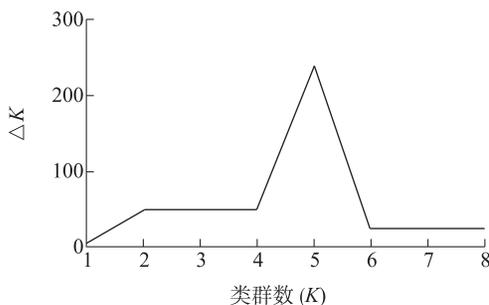
图4 基于 ΔK 的甜瓜种质资源群体结构分析Fig.4 Analysis on group structure of melon germplasms based on ΔK

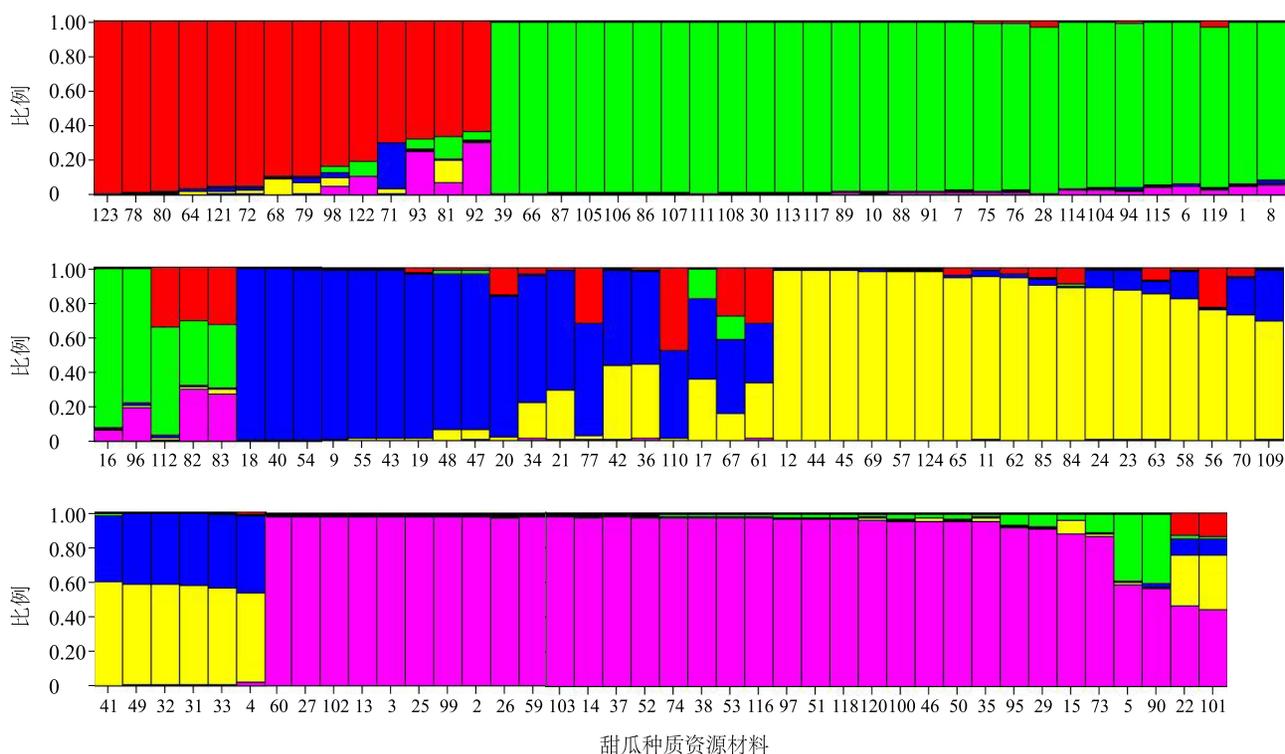
图6中的绿色点代表引自中国新疆的厚皮甜瓜

材料,淡蓝色点代表引自中国上海的厚皮甜瓜材料,粉红色点代表引自欧洲的厚皮甜瓜材料,棕色点代表引自中国江苏的厚皮甜瓜材料,深紫色点代表引自日本的厚皮甜瓜材料,淡紫色点代表引自中国台湾地区的厚皮甜瓜材料,卡其色点代表引自美国的厚皮甜瓜材料,黄色点代表引自美国的薄皮甜瓜材料,深蓝色点代表引自中国甘肃的厚皮甜瓜材料。

3 讨论

3.1 厚皮甜瓜种质对蔓枯病的抗病性评价

高温、高湿有利于甜瓜蔓枯病的发生,在相同的利于发病的栽培环境中,来源于内陆干旱地区的甜



1~124 甜瓜种质资源材料见表 1。5 种颜色分别代表甜瓜材料的 5 大类群。

图 5 供试甜瓜种质资源材料在各类群中所占比例

Fig.5 Proportion of melon germplasm resources used in this study in different groups

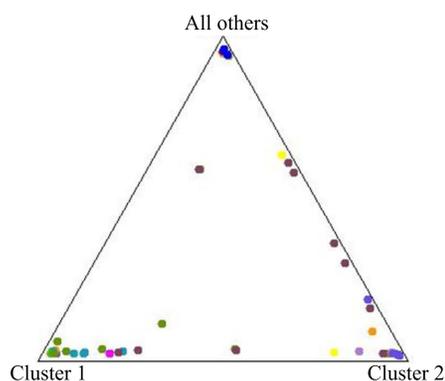


图 6 供试甜瓜种质资源材料的三角聚类结果

Fig.6 Triangle clustering result of melon germplasm resources used in this study

瓜种质资源更容易感病,来源于沿海等潮湿地区的厚皮甜瓜因自然压力的选择积累遗传,通常能够适应潮湿的气候环境,会对蔓枯病形成不同程度的抗敏反应。张学军等^[17]对国内外 190 份甜瓜种质进行蔓枯病苗期筛选时,发现来源于中国新疆的甜瓜资源全部表现为高感。本试验所用哈密瓜种质资源中抗性材料占比明显低于网纹甜瓜和光皮甜瓜,来

源于中国新疆的哈密瓜材料全部感病,达到抗、中抗级别的 3 份哈密瓜材料则分别来源于中国上海、中国江苏和中国台湾。参试的光皮甜瓜种质资源主要来源于日本和中国江苏,其抗性材料占比较高,达到高抗、抗级别的材料占比达到 11.11%。欧洲栽培厚皮甜瓜的历史悠久,并拥有包括罗马甜瓜、网纹甜瓜、冬甜瓜等在内的多类型、数量丰富的甜瓜种质资源。而本试验所用的欧洲甜瓜种质资源仅 16 份,占材料总数的 13.4%,筛选出抗蔓枯病材料 1 份。通过对厚皮甜瓜种质进行蔓枯病抗性评价,筛选出了能应用于抗性改良。同时具有优良性状的种质,对于从源头上解决蔓枯病问题具有广泛的应用价值。

3.2 厚皮甜瓜种质遗传多样性

多态性位点效率往往可以揭示不同种质材料间的遗传多样性。本研究从 40 个 SNP 位点中筛选出 21 个 SNP 位点设计引物组合,对 124 份甜瓜种质进行了分析,发现有 12 个位点的 *PIC* 值处于中度多态,*PIC* 值平均为 0.37,表明这些位点在甜瓜种质间多态性程度中等。同时,使用 Structure 软件对供试甜瓜种质材料进行了基于数学模型的类群划分,所

划分的5个群体材料各具遗传特征。本方法主要基于模型,具有不过分依赖于遗传距离、避免人为因素干扰等优点,可以在不了解材料背景时,结合样品的遗传信息和额外的地理来源信息、表型性状等对群体综合分类,相比于遗传距离可以更加真实地反映材料间在遗传上的差异^[18]。本研究划分的5类群体,除了作为对照的薄皮甜瓜外,其他群体均为栽培种自交系,表明基因间有一定渗透性。这可能是有些最初来源相同的材料各自在不同生态环境栽培过程中,在分子水平上积累的遗传变异所导致。

本试验材料包括中国江苏、中国上海、中国新疆、中国河南、中国台湾、日本、美国、欧洲等15个不同地理来源的种质资源。Structure聚类分析能够把部分种质资源的地理来源区分开来,如将甘肃材料、日韩(中国台湾)材料、新疆和上海材料区分为3个组别,这些同一地理来源材料倾向于聚在一起,可能与同一地理来源材料间相对亲缘关系比较近有关。日本、韩国、中国台湾地区作为传统的优质厚皮甜瓜种质来源地,材料亲缘关系也比较近,主要与其材料类型一致性较高有关,同时也表明不同地理来源甜瓜种质资源存在丰富的遗传多样性。通过对厚皮甜瓜种质资源进行遗传多样性分析,掌握高代自交系的遗传多样性和类群间的遗传关系,能够使育种思路更加清晰,育种目标更易实现,同时也为厚皮甜瓜核心种质构建、种质创制等工作提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 李田,刘海河,张彦萍,等. 外源硝酸胺对厚皮甜瓜坐果节位叶片衰老及果实产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2018, 2018(7): 15-21.
- [2] 王晓东,李国英. 哈密瓜蔓枯病菌分生孢子器诱发及室内品种抗病性测定[J]. 新疆农业科学, 2004, 41(5): 341-344.
- [3] KEINATH A P, ZITTER T A. Resistance to benomyl and thiophanate-methyl in *Didymella bryoniae* from South Carolina and New York [J]. Plant Disease, 1998, 82:479-484.
- [4] 张永兵,王登明,张聪,等. 甜瓜蔓枯病离体接种方法初步研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 521-525.
- [5] 张奠,王宣仓,李霖华,等. 新疆甜瓜品种资源蔓枯病抗性鉴定[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(10): 1841-1845.
- [6] FRANTZ J D, JAHN M M. Five independent loci each control monogenic resistance to gummy stem blight in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2004, 108(6): 1033-1038.
- [7] 王红英,钱春桃,娄丽娜,等. 甜瓜抗蔓枯病基因 Gsb-4 的分子标记[J]. 园艺学报, 2012, 39(3): 574-580.
- [8] 钱春桃,娄群峰,陈劲枫. 我国甜瓜属蔬菜作物特异基因资源的挖掘和利用[J]. 中国蔬菜, 2006(7): 30-32.
- [9] 姚协丰,徐锦华,李莘芳,等. 菜瓜蔓枯病苗期抗性鉴定方法比较[J]. 中国瓜菜, 2017, 30(2): 11-14.
- [10] 周晓慧, JOSEPH N W, 李英, 等. 甜瓜抗蔓枯病种质资源的筛选及 RAPD 分析[J]. 园艺学报, 2007, 34(5): 1201-1206.
- [11] GABRIELE G, RONGHAO S, TODD C W. New sources of resistance to gummy stem blight in watermelon [J]. Crop Science, 2005, 45(2): 582-588.
- [12] WANG S, YANG J, ZHANG M. Developments of functional markers for Fom-2-mediated fusarium wilt resistance based on single nucleotide polymorphism in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. Molecular Breeding, 2011, 27(3): 385-393.
- [13] LEIDA C, MOSER C, ESTERAS C, et al. Variability of candidate genes, genetic structure and association with sugar accumulation and climacteric behavior in a broad germplasm collection of melon (*Cucumis melo* L.) [J]. BMC Genetics, 2015, 16(1): 1-17.
- [14] TZURI G, ZHOU X, CHAYUT N, et al. A 'golden' SNP in CmOr governs the fruit flesh color of melon (*Cucumis melo*) [J]. Plant Journal, 2015, 82(2): 267-279.
- [15] HU Z Y, DENG G C, MOU H P, et al. A re-sequencing-based ultra-dense genetic map reveals a gummy stem blight resistance-associated gene in *Cucumis melo* [J]. DNA Research, 2018, 25(1): 1-10.
- [16] SAXENA R K, ERIC V W, UPADHYAYA H D, et al. Genetic diversity and demographic history of *Cajanus* spp. illustrated from genome-wide SNPs [J]. PLoS ONE, 2014, 9(2): e88568.
- [17] 张学军,郭丽霞,马新力,等. 甜瓜种质资源抗霜霉病和蔓枯病苗期筛选与评价[J]. 中国瓜菜, 2014, 2014(27): 38-40.
- [18] 羊杏平,刘广,侯喜林,等. 西瓜核心种质枯萎病抗性与 SRAP 分子标记的关联分析[J]. 园艺学报, 2013, 40(7): 1298-1308.

(责任编辑:张震林)