

籽瓜及其近缘种表型遗传多样性分析

葛 优^{1,2}, 曾 凯¹, 陈乐文², 郭栋良², 战 勇¹, 谢丽琼²

(1. 新疆农垦科学院 新疆石河子 832000; 2. 新疆大学生命科学与技术学院 乌鲁木齐 830017)

摘要: 解析籽瓜及其近缘种的遗传多样性和表型变异规律有助于筛选优良的籽瓜种质, 为加快籽瓜育种提供基础。通过评价 34 个表型性状, 并利用相关性分析、聚类分析和主成分分析探究了 244 份籽瓜及其近缘种的遗传多样性。结果表明, 表型变异系数为 11.32%~84.59%, 香农-威纳多样性指数为 0.63~2.08。其中, 变异系数最大的为果肉中心硬度, 多样性指数最大的是叶片长、叶柄长、叶柄粗和节间长。聚类分析将 244 份材料分为两大组群, 组群 I 共有 138 份材料, 主要由籽瓜、阿马鲁西瓜、部分黏籽西瓜和毛西瓜构成, 种子长、千粒重和子叶较大, 叶裂较深, 果肉硬度较高。组群 II 共有 106 份材料, 主要由普通西瓜、部分籽瓜、黏籽西瓜和毛西瓜构成, 叶片、果实较大, 果肉颜色以红色为主, 籽粒较小, 大多数材料为单性花。主成分分析将 34 个表型性状综合成 9 个主成分, 累积贡献率为 70.44%。综合分析, 参试的籽瓜及其近缘种种质资源具有丰富的遗传多样性, 可为籽瓜遗传育种工作提供理论基础。

关键词: 籽用西瓜; 表型性状; 遗传多样性

中图分类号: S651

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)12-029-15

Analysis of phenotypic genetic diversity in edible seed watermelon and its relatives

GE You^{1,2}, ZENG Kai¹, CHEN Lewen², GUO Dongliang², ZHAN Yong¹, XIE Liqiong²

(1. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: Analyzing the genetic diversity and phenotypic variation patterns of edible seed watermelon and its relatives can help select superior germplasm and provide a basis for accelerating edible seed watermelon breeding. The genetic diversity of 244 edible seed watermelon and its relatives was investigated by evaluating 34 phenotypic traits and using correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis. The results showed that the phenotypic coefficient of variation ranged from 11.32% to 84.59%, and the Shannon-Weiner diversity index ranged from 0.63 to 2.08. Among them, the largest coefficient of variation was center hardness, and the largest diversity indices were leaf blade length, petiole length, petiole thickness and internode length. Cluster analysis divided the 244 materials into two major clusters. Cluster I consisted of 138 materials, which were mainly composed of seeded watermelon, amaru watermelon, partially sticky-seeded watermelon and hairy watermelon, with larger seed length, thousand seeds mass, and cotyledons, with deeper leaf cleavage (deep fissure), and higher pulp hardness. Cluster II had a total of 106 materials, consisting mainly of common watermelon, partially seeded watermelon, sticky seeded watermelon and hairy watermelon, leaf and fruit are larger, mostly red flesh colour, small seeds and unisexual flowers for most of the materials. The principal component analysis combined 34 phenotypic traits into 9 principal components, with a cumulative contribution of 70.44%. In the comprehensive analysis, the participating edible seed watermelon and its relatives have rich genetic diversity, which can be used as a theoretical basis for genetic breeding of edible seed watermelon.

Key words: Edible seed watermelon; Phenotypic traits; Genetic diversity

收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-07-15

基金项目: 兵团科技计划项目(2024AB025); 兵团农业科技创新工程专项(NCG202227)

作者简介: 葛 优, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为瓜类遗传育种。E-mail: 347565276@qq.com

通信作者: 谢丽琼, 女, 教授, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: picea@xju.edu.cn

战 勇, 男, 研究员, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: shzzhy@163.com

西瓜属(*Citrullus*)包含多个种及亚种,均起源于非洲。例如,阿马鲁西瓜(*C. amarus*)、黏籽西瓜(*C. mucospermus*)、毛西瓜(*Citrullus lanatus* ssp. *lanatus*)、普通西瓜(*Citrullus lanatus* ssp. *vulgaris* var. *vulgaris*)和籽用西瓜(*Citrullus lanatus* ssp. *vulgaris* var. *megaspermus*)^[1]。其中,阿马鲁西瓜是野生西瓜种,主要分布在非洲地区^[1]。黏籽西瓜和毛西瓜属于西瓜种中的不同亚种,主要分布在非洲地区。普通西瓜和籽用西瓜属于西瓜种普通西瓜亚种中的2个变种,是最常见的两种食用型西瓜,世界各地均有分布,中国的栽培面积最大^[2]。根据食用部位的不同,普通西瓜和籽用西瓜形成了不同的消费品种。

籽用西瓜简称籽瓜,主要食用部分是种子,根据种皮颜色的不同分为黑籽瓜和红籽瓜^[3]。籽瓜种子富含大量的蛋白质、氨基酸和不饱和脂肪酸等营养物质,可用于加工成炒货和油料^[4-5]。同时,籽瓜瓜瓢和瓜皮富含多糖类物质,具有抗氧化活性,可以制作成保健食品和化妆品原料^[6-7]。籽瓜适应能力强,具有耐贫瘠、耐旱等特点,广泛种植于我国西北地区^[8]。2018年以来,籽瓜在新疆的种植面积稳定在21万hm²左右,籽瓜已成为新疆的主要经济作物之一^[9-11]。

种质资源的遗传多样性是作物适应不同环境的前提,也是作物品种改良和选育的物质基础^[12-13]。因此,开展资源表型多样性分析及鉴定可以充分掌握种质资源的遗传背景,根据不同的育种目标选择特异的亲本材料,利用杂交、回交等方法进行品种改良,加速优质、高产和抗病品种的选育^[14-15]。国内外学者基于多种表型性状和分子标记技术对籽瓜及其近缘种进行遗传多样性分析。贾宋楠^[16]对65份籽用西瓜和黏籽西瓜遗传性状进行聚类分析,表明籽用西瓜遗传距离较近,可利用黏籽西瓜拓宽籽瓜的遗传背景。石磊^[17]采用表型性状和SSR分子标记技术对50份不同来源的籽用西瓜材料进行遗传多样性研究,结果表明籽瓜种质间遗传基础狭窄。上述研究表明,长期的人工驯化和定向选择导致国内籽瓜资源遗传基础狭窄,缺乏优异的育种亲本材料,严重制约了籽瓜的选育进程^[18]。作物的野生近缘种是作物育种过程中的重要资源^[19]。作为籽瓜的近缘种,饲用西瓜(*C. citroides*)和黏籽西瓜的遗传多样性较为丰富,同时对生物胁迫具有较强的抗性^[16, 20]。Fredes等^[21]和Thies等^[22]将饲用西瓜作为栽培种的砧木,用来提高栽培种的产量、果实品质和根结线虫抗

性。贾宋楠^[16]利用黏籽西瓜与籽瓜进行杂交,拓宽了籽瓜的遗传基础。Tetteh等^[23]和Pal等^[24]分别利用饲用西瓜与阿马鲁西瓜作为抗病亲本,研究白粉病与枯萎病抗病基因的遗传机制,为后续基因定位及克隆奠定基础。截至目前,针对国内籽瓜种质表型遗传多样性的研究多有报道,但是以国内外的籽瓜种质及籽瓜的近缘种为群体的表型调查研究较少。

笔者基于前期收集的国内外244份籽瓜及其近缘种材料,通过对34个表型性状进行统计,运用聚类分析和主成分分析,分析表型性状间的遗传多样性,并基于表型数据筛选出优异种质材料,为籽瓜种质创新奠定基础。研究和探讨籽瓜及其近缘种的遗传多样性对合理利用籽瓜的种质资源,拓展籽瓜的遗传基础以及选育新品种具有十分重要的指导意义^[25]。

1 材料与方法

1.1 材料

244份籽瓜及其近缘种材料来自世界各地33个国家和地区,详见表1,种质保存于新疆大学生命科学与技术学院种质资源库。

1.2 试验设计

试验材料于2023年5月播种于新疆石河子市农垦科学院试验田,2023年8月收获。试验采用随机区组设计,小区长3m,宽2m,株距0.3m,每个小区种植1份材料,2粒1穴,10次重复,单侧种植。采用单蔓整枝方式,人工套袋自交授粉,每株留单瓜,田间管理与大田生产相同。

1.3 性状调查分析

每份材料选择10株进行籽瓜全生育期34个表型性状的统计,包括子叶期:子叶长、子叶宽、下胚轴长、白粉病抗性。幼果期:叶片长、叶片宽、叶柄长、叶柄粗、雄花直径、节间长、叶片缺刻类型、叶片缺刻深浅、两性花。果实成熟期:果柄长、果柄粗、果长、果宽、果质量、果皮厚、果肉中心硬度、果肉边缘硬度、果肉颜色、果实形状、果实表面光滑程度、果皮底色、果皮覆纹颜色、果皮覆纹形状。种子收获期:单瓜籽粒数、单瓜籽粒质量、千粒重、种子长、种子宽、种子覆纹、种子底色。性状调查测定方法参照马双武等^[26]《西瓜种质资源描述规范和数据标准》。白粉病病情分级标准参考贾宋楠^[16]确定的籽瓜病情分级并结合本试验籽瓜材料的抗感表现进行(表2)。为便于后期的统计分析,对质量性状

表 1 244 份材料来源
Table 1 Sources of the 244 materials

编号 Code	类型 Type	来源 Source	编号 Code	类型 Type	来源 Source
W1	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W29	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W2	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W30	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W3	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W31	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W4	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W32	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W5	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W33	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W6	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W34	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W7	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W35	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W8	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W36	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W9	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W37	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W10	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W38	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W11	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W39	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W12	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W40	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W13	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W41	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W14	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W42	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W15	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W43	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W16	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W44	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W17	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W45	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W18	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W46	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W19	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W47	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W20	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W48	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W21	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W49	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W22	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W50	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	中国 China
W23	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W51	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	中国 China
W24	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W52	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	中国 China
W25	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W53	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	中国 China
W26	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W54	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	中国 China
W27	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W55	阿马鲁西瓜 <i>C. amarus</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W28	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W56	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	加纳 Ghana

表1 (续)
Table 1 (Continued)

编号 Code	类型 Type	来源 Source	编号 Code	类型 Type	来源 Source
W57	阿马鲁西瓜 <i>C. amarus</i>	尼日利亚 Nigeria	W86	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	乌克兰 Ukraine
W58	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	尼日利亚 Nigeria	W87	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	委内瑞拉 Venezuela
W59	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	加纳 Ghana	W88	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	伊朗 Iran
W60	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	尼日利亚 Nigeria	W89	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	印度 India
W61	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	博茨瓦纳 Botswana	W90	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia
W62	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia	W91	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W63	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	南非 South Africa	W92	阿马鲁西瓜 <i>C. amarus</i>	赞比亚 Zambia
W64	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	土耳其 Turkey	W93	黏籽西瓜 <i>C. mucosospermus</i>	美国 United States
W65	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China	W94	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W66	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W95	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	加纳 Ghana
W67	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	塞内加尔 Senegal	W96	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W68	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	埃塞俄比亚 Ethiopia	W97	阿马鲁西瓜 <i>C. amarus</i>	土耳其 Turkey
W69	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	博茨瓦纳 Botswana	W98	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W70	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	希腊 Greece	W99	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W71	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	加纳 Ghana	W100	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W72	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	墨西哥 Mexico	W101	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia
W73	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	津巴布韦 Zimbabwe	W102	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	阿富汗 Afghanistan
W74	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	乍得 Chad	W103	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W75	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	埃塞俄比亚 Ethiopia	W104	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	尼日利亚 Nigeria
W76	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	印度 India	W105	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W77	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	伊拉克 Iraq	W106	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W78	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia	W107	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W79	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	巴基斯坦 Pakistan	W108	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	南非 South Africa
W80	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	塞内加尔 Senegal	W109	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	加纳 Ghana
W81	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	苏丹 Sudan	W110	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	伯利兹 Belize
W82	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	索马里 Somalia	W111	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	加拿大 Canada
W83	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W112	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China
W84	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W113	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China
W85	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W114	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China

表1 (续)
Table 1 (Continued)

编号 Code	类型 Type	来源 Source	编号 Code	类型 Type	来源 Source
W115	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China	W145	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India
W116	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India	W146	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India
W117	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India	W147	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W118	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	马尔代夫 Maldives	W148	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W119	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	塞尔维亚 Serbia	W149	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W120	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	索马里 Somalia	W150	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W121	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	叙利亚 Syria	W151	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W122	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W152	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W123	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W153	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	委内瑞拉 Venezuela
W124	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W154	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	北马其顿 Macedonia
W125	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe	W155	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W126	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W156	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W127	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	阿富汗 Afghanistan	W157	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W128	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	利比里亚 Liberia	W158	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China
W129	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	伊朗 Iran	W159	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	美国 United States
W130	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	美国 United States	W160	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W131	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India	W161	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	西班牙 Spain
W132	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W162	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	津巴布韦 Zimbabwe
W133	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	日本 Japan	W163	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China
W134	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W164	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W135	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	土耳其 Turkey	W165	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W136	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia	W166	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	日本 Japan
W137	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	北马其顿 Macedonia	W167	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	印度 India
W138	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W168	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W139	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W169	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey
W140	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	土耳其 Turkey	W170	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	北马其顿 Macedonia
W141	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	加纳 Ghana	W171	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China
W142	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	马里 Mali	W172	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W143	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	西班牙 Spain	W173	籽瓜 <i>Citrullus lanatus</i> var. <i>megalaspermus</i>	中国 China
W144	普通西瓜 <i>Citrullus lanatus</i> ssp. <i>vulgaris</i> var. <i>vulgaris</i>	中国 China			

表2 籽瓜种质白粉病病情分级标准

Table 2 Edible seed watermelon germplasm powdery mildew disease condition grading

级别 Grade	症状 Symptom
0	整株没有病斑。 No spots on the whole plant.
1	叶片上有零星病斑,病斑面积占叶片面积的5%以下。 Sporadic lesions on leaves with less than 5% of leaf area.
3	叶片上有少量病斑,病斑面积占叶片面积的6%~25%。 Small number of spots on leaves, 6%-25% of leaf area.
5	叶片上出现中等数量病斑,病斑面积占叶片面积26%~50%。 Medium number of spots on leaves, 26%-50% of leaf area.
7	叶片上有大量病斑,病斑面积占叶片面积的51%~75%。 Large number of spots on leaves, with 51%-75% of the leaf area covered by spots.
9	叶片上布满病斑,病斑面积占叶片面积的75%以上,叶片枯黄。 Leaf blades covered with disease spots, the area of disease spots accounted for more than 75% of the area of leaf blades, leaf blades yellowing.

予以赋值,具体描述分组见表3。

1.4 数据分析

计算供试材料病情指数 $DI = \sum (si \times ni) / 9N \times 100$ 。式中 s 为发病级别, n 为相应发病级别的株数, i 为病情分级的各个级别, N 为调查总株数。根据平均病情级数确定白粉病抗性级别。病情指数为 0(免疫), 0~11.11(高抗), 11.12~22.22(中抗), 22.23~33.33(抗病), 33.34~55.55(感病), 55.56~77.77(中感), 77.78~100(高感)。

对质量性状予以赋值,计算频率分布和多样性指数 H' 。数量性状统计最小值、最大值、平均值、变异系数、标准差、极差、遗传多样性指数 H' ; 遗传多样性指数计算公式如下。

根据平均数、标准差将材料分为 10 级,从第 1 级 $\{X_i < (x - 2\sigma)\}$ 到第 10 级 $\{X_i \geq (x + 2\sigma)\}$,每 0.5σ 标准差为 1 级,每 1 组的相对频率 (P_i) 用于计算他们的香农-威纳多样性指数 (H')^[27]。 $H' = -\sum (P_i)(\ln P_i)$, 其中 P_i 表示第 i 种变异类型出现的频率。采用 EXCEL 2021 进行数据统计,表型相关性热图使用 OriginPro 2024 绘制并计算皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient),使用 SPSS 27.0 进行聚类分析和主成分分析,表型热图使用 TBtools-II V2.027 绘制,主成分分析图使用 R4.3.1 绘制。

2 结果与分析

2.1 籽瓜及其近缘种表型多样性分析

由表 4 可知,变异系数分布为 11.32%~84.59%。其中,变异系数最大的是果肉中心硬度(84.59%),其次是果肉边缘硬度(79.62%)、单瓜籽粒质量(48.53%)、果质量(46.28%)、千粒重

(45.53%)、白粉病抗性(34.43%)、果柄长(33.72%)以及果皮厚(31.36%),变异系数均超过 30%,说明这 8 个性状的遗传变异较为丰富,遗传改良的潜力较大;叶片长(13.54%)、叶片宽(14.49%)、叶柄粗(14.11%)、雄花直径(11.32%)、节间长(11.64%)和果宽(13.67%)的变异系数相对较小,表明它们有稳定的遗传特性。多样性指数的变幅为 1.47~2.08,其中,多样性指数最大的是叶片长、叶柄长、叶柄粗和节间长,均为 2.08,说明这 4 个表型性状在 244 份种质间的分布更加均匀。果肉边缘硬度(1.47)和果肉中心硬度(1.54)遗传多样性最小,说明其表型性状在 244 份种质间的分布较为集中。

由表 5 可知,244 份籽瓜及其近缘种多样性指数的变幅是 0.63~1.74,平均值为 1.08,其中 6 个性状(果实表面光滑程度、果皮底色、果皮覆纹颜色、果皮覆纹形状、果肉颜色、种子底色)的多样性指数大于 1,多样性指数最高的是果肉颜色,以白色和红色为主。叶片以深裂(52.46%)和中裂为主(47.13%),单性花占了绝大部分(68.00%),果皮底色以深绿色(32.83%)和墨绿色(38.52%)为主,果实形状圆形(51.23%)和椭圆形(42.21%)占了绝大部分,圆柱形(2.46%)和纺锤形(4.10%)较少。果皮覆纹颜色主要是深绿(35.66%)和墨绿(41.39%),形状以网纹(47.13%)和齿条(30.74%)为主。表面光滑度以光滑(51.64%)和沟(37.70%)为主,大部分种子有覆纹(58.61%),无覆纹的种子以黑色(59.02%)为主。

2.2 籽瓜及其近缘种表型性状的相关性分析

对籽瓜 34 个表型性状进行相关性分析(图 1),结果显示,在 $p < 0.001$ 时,多个性状之间均呈显

表3 质量性状赋值
Table 3 Quality traits assignment

性状 Trait	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
叶片缺刻类型 Type of leaf notch	无 Absent	1对 1 pair	2对 2 pairs	3对 3 pairs	4对 4 pairs								
叶片缺刻深浅 Leaf blade notch depth	无 Absent	浅 Shallow	中 Middle	深 Deep									
花性型 Floridity	无 Absent	有 Present	瘤 Groove	棱 Arris									
果实表面光滑程度 Fruit surface smoothness	光滑 Smooth	瘤 Tumour	沟 Groove	棱 Arris									
果皮底色 Base colour of fruit peel	无 Absent	浅黄 Light yellow	黄 Yellow	深黄 Dark yellow	绿白 Green white	浅绿 Light green	黄绿 Yellow green	绿 Green	深绿 Light green	墨绿 Black green			
果皮覆纹颜色 Pericarp overprint colour	无 Absent	浅黄 Light yellow	黄 Yellow	深黄 Dark yellow	浅绿 Light green	绿 Green	深绿 Dark green	墨绿 Black green					
果皮覆纹形状 Shape of pericarp overprint	无 Absent	网条 Netbar	齿条 Rack	条带 Strip	放射条 Reflective strip	斑点 Spot							
果肉颜色 Flesh colour	无 Absent	白 White	乳白 Milky white	浅绿 Light green	浅黄 Light yellow	黄 Yellow	橙黄 Orange	粉红 Pink	桃红 Peach	红 Red	橘红 Tangerine	大红 Dark red	
果实形状 Fruit shape	圆形 Round	椭圆形 Oval	橄榄形 Olive shaped	圆柱形 Cylindrical									
种子覆纹 Seed covering	无 Absent	有 Present											
种子底色 Seed base colour	无 Absent	白 White	黄白 Yellow white	灰黄 Gray yellow	黄 Yellow	红黄 Red yellow	浅红 Light red	红 Red	红褐 Red brown	灰褐 Gray brown	黑 Black	绿 Green	墨绿 Black green

表4 籽瓜种质资源数量性状的变异统计

Table 4 Diversity analysis of continuous traits of edible seed watermelon germplasm resources

性状 Trait	标准差 Standard deviation	均值 Mean	变异系数 Coefficient of variation/%	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	多样性指数 H' Diversity index H'
子叶长 Cotyledon length/cm	0.89	5.00	17.80	8.20	1.50	6.70	2.07
子叶宽 Cotyledon width/cm	0.77	3.24	23.77	8.20	1.00	7.20	2.02
下胚轴长 Hypocotyl length/cm	0.96	3.83	25.07	8.90	1.50	7.40	1.98
叶片长 Leaf length/cm	2.45	17.62	13.54	26.50	9.40	17.10	2.08
叶片宽 Leaf width/cm	2.16	14.91	14.49	24.80	7.40	17.40	2.07
叶柄长 Petiole length/cm	3.18	11.28	28.19	25.50	3.00	22.50	2.08
叶柄粗 Petiole thickness/mm	0.67	4.75	14.11	7.28	2.50	4.78	2.08
节间长 Internode length/cm	1.02	8.76	11.64	13.40	4.40	9.00	2.08
雄花直径 Male flower diameter/cm	0.42	3.71	11.32	5.70	2.00	3.70	2.05
果柄长 Stalk length/cm	2.03	6.02	33.72	17.60	1.30	16.30	2.03
果柄粗 Stalk thickness/mm	0.90	5.68	15.85	10.46	1.51	8.95	1.99
果质量 Fruit mass/kg	0.87	1.88	46.28	13.71	0.35	13.36	1.78
果长 Fruit length/cm	2.59	15.42	16.80	36.20	8.10	28.10	1.98
果宽 Fruit width/cm	2.01	14.70	13.67	39.00	9.10	29.90	1.98
果皮厚 Pericarp thickness/cm	0.37	1.18	31.36	4.40	0.20	4.20	2.02
果肉中心硬度 Fruit flesh centre hardness/(g·cm ⁻²)	2.14	2.53	84.59	19.21	0.31	18.90	1.54
果肉边缘硬度 Fruit flesh edge hardness/(g·cm ⁻²)	1.25	1.57	79.62	10.24	0.11	10.13	1.47
单瓜籽粒数 Number of seeds	111.74	254.74	43.86	978.00	24.00	954.00	2.02
单瓜籽粒质量 Seed mass of single melon/g	17.39	35.83	48.53	344.00	4.28	339.72	1.75
种子长 Seed length/cm	2.40	13.40	17.91	19.63	6.00	13.63	2.02
种子宽 Seed width/cm	1.85	8.48	21.82	13.10	3.50	9.60	1.97
千粒重 Thousand grain mass/g	71.92	157.96	45.53	346.63	16.31	330.32	1.91
白粉病抗性 Powdery mildew resistance	14.10	40.95	34.43	80.95	8.80	72.15	2.07
平均 Average			32.50				1.92

表5 籽瓜种质资源质量性状的变异统计

Table 5 Diversity analysis of discontinuous traits of edible seed watermelon germplasm resources

性状 Trait	频率 Frequency/%													多样性指数 H' Diversity index H'
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
叶片缺刻类型 Type of leaf notch		0.41	2.05	34.84	62.70									0.76
叶片缺刻深浅 Leaf blade notch depth		0.41	47.13	52.46										0.72
花性型 Floridity	68.00	32.00												0.63
果实表面光滑程度 Fruit surface smoothness	51.64	5.33	37.70	5.33										1.02
果皮底色 Base colour of fruit peel		1.64	0.00	0.00	2.05	7.38	11.07	32.38	38.52	6.97				1.50
果皮覆纹颜色 Pericarp overprint colour	0.00	0.41	0.41	0.00	3.28	18.85	35.66	41.39						1.20
果皮覆纹形状 Shape of pericarp overprint		47.13	30.74	21.31	0.82									1.09
果肉颜色 Flesh colour		31.82	5.24	0.35	10.84	7.34	1.05	8.04	6.64	12.24	1.05	0.70		1.74
果实形状 Fruit shape	51.23	42.21	2.46	4.10										0.93
种子覆纹 Seed covering	41.39	58.61												0.68
种子底色 Seed base colour		2.05	5.74	12.70	1.64	2.05	0.41	3.28	9.02	3.69	59.02	0.00	0.41	1.46
平均 Average														1.08

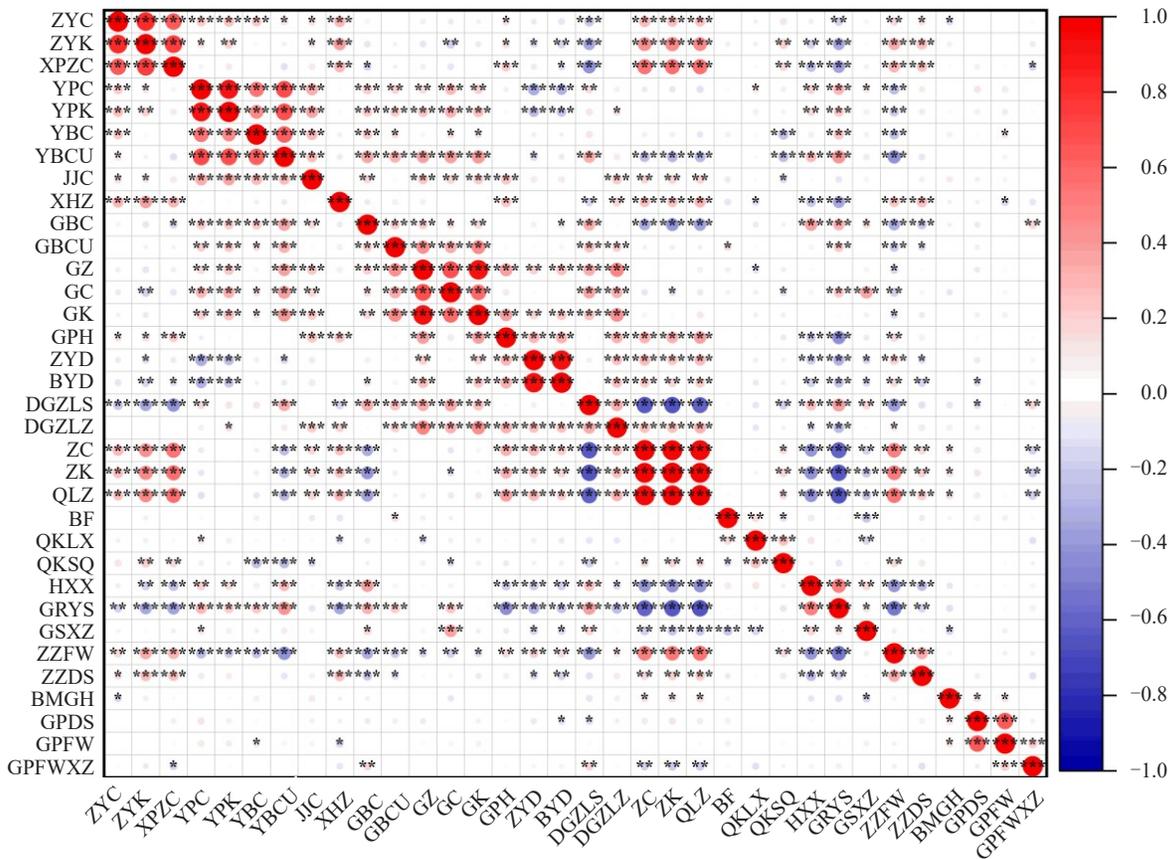
著相关。子叶长与子叶宽、叶片长、叶片宽之间均呈极显著正相关。果质量与叶片长、叶片宽、果柄长、果柄粗、果长、果宽之间均呈极显著正相关。单瓜籽粒质量与种子长、种子宽和千粒重呈极显著正相关。单瓜籽粒数与果实性状相关表型呈极显著正相关,与籽粒大小相关表型性状呈极显著负相关。

2.3 籽瓜及其近缘种表型聚类分析

由图2可知,在欧氏距离为15时,受试籽瓜群体可分为2个组群。组群I共有138份材料,占总材

料的56.56%,该组群由123份籽瓜、4份普通西瓜、3份毛西瓜、4份黏籽西瓜和4份阿马鲁西瓜所构成,籽粒、千粒重和子叶较大,叶裂较深,果肉硬度较高。组群II共有106份材料,该组群由33份籽瓜、63份普通西瓜、4份黏籽西瓜和6份毛西瓜构成,占总材料的43.44%,该组群的叶片、果实较大,果肉颜色以红色为主,籽粒较小,大多数材料为单性花。

在欧式距离为9时,组群I又可分为2个亚群。

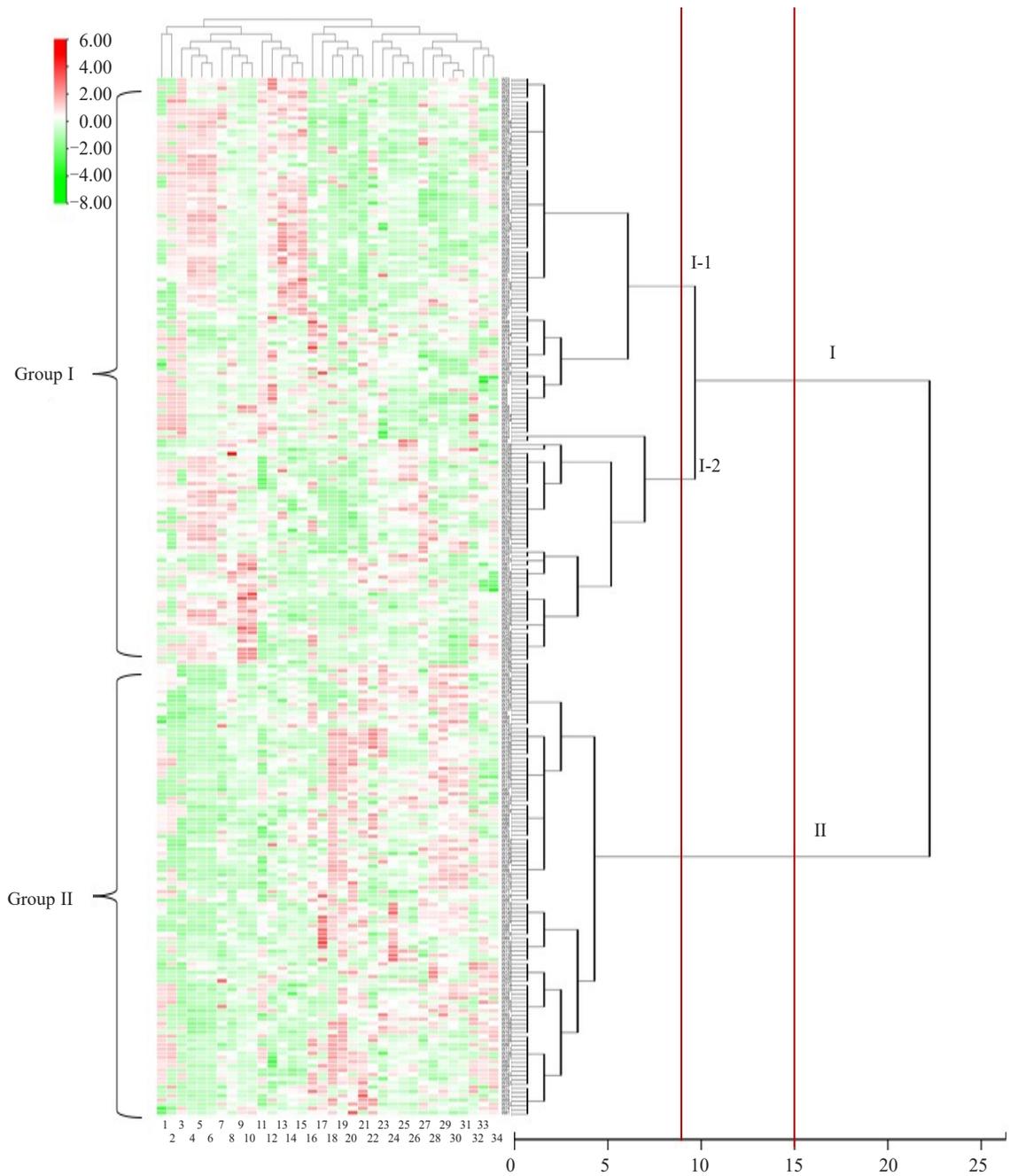


注:***、**、*分别表示在0.001、0.01、0.05水平上显著相关。ZYC:子叶长;ZYK:子叶宽;XPZC:下胚轴长;YPC:叶片长;YPK:叶片宽;YBC:叶柄长;YBCU:叶柄粗;JJC:节间长;XHZ:雄花直径;GBC:果柄长;GBCU:果柄粗;GZ:果质量;GC:果长;GK:果宽;GPH:果皮厚;ZYD:果肉中心硬度;BYD:果肉边缘硬度;DGZLS:单瓜籽粒数;DGZLZ:单瓜籽粒质量;ZC:种子长;ZK:种子宽;QLZ:千粒重;BF:白粉病抗性;QKLX:叶片缺刻类型;QKSQ:叶片缺刻深浅;HXX:花性型;GRYS:果肉颜色;GSXZ:果实形状;ZZFW:种子覆纹;ZZDS:种子底色;BMGH:果实表面光滑程度;GPDS:果皮底色;GPFW:果皮覆纹颜色;GPFWXZ:果皮覆纹形状。

Note: ***, **, * indicate significant correlation at the 0.001, 0.01, and 0.05 levels, respectively. ZYC: cotyledon length; ZYK: cotyledon width; XPZC: hypocotyl length; YPC: leaf blade length; YPK: leaf blade width; YBC: petiole length; YBCU: petiole thickness; JJC: internode length; XHZ: staminate flower diameter; GBC: fruit stalk length; GBCU: fruit stalk thickness; GZ: Fruit mass; GC: Fruit length; GK: Fruit width; GPH: Pericarp thickness; ZYD: Centre hardness; BYD: Edge hardness; DGZLS: Number of seeds in a single melon; DGZLZ: Seed weight in a single melon; ZC: Seed length; ZK: Seed width; QLZ: Thousand-seed weight; BF: BF: Powdery mildew resistance; QKLX: Type of leaf abscission; QKSQ: Depth of leaf abscission; HXX: Flowering phenology; GRYS: flesh colour; GSXZ: fruit shape; ZZFW: seed overprint; ZZDS: seed base colour; BMGH: fruit surface smoothness; GPDS: peel base colour; GPFW: peel overprint colour; GPFWXZ: peel overprint shape.

图1 籽瓜种质资源表型性状聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of phenotypic traits of edible seed watermelon germplasm resources



注: 1~34 依次表示叶片缺刻类型、叶片缺刻深浅、种子覆纹、种子长、种子宽、千粒重、果皮厚、单瓜籽粒质量、果肉中心硬度、果肉边缘硬度、种子底色、雄花直径、下胚轴长、子叶长、子叶宽、果皮覆纹形状、果实形状、花性型、果肉颜色、果柄长、单瓜籽粒数、白粉病抗性、果柄粗、果长、果质量、果宽、节间长、叶柄长、叶柄粗、叶片长、叶片宽、果实表面光滑程度、果皮底色、果皮覆纹颜色。

Note: 1-34 in order of leaf notch type, leaf notch depth, seed overprint, seed length, seed width, thousand-seed mass, pericarp thickness, seed mass of single melon, Fruit flesh centre hardness, Fruit flesh edge hardness, seed base colour, staminate flower diameter, hypocotyl length, cotyledon length, cotyledon width, shape of pericarp overprint, shape of fruit, floral phenotype, flesh colour, petiole length, number of seeds in a single melon, powdery mildew resistance, powdery mildew resistance and seed size. Number of grains, powdery mildew resistance, stalk thickness, fruit length, Fruit mass, fruit width, internode length, petiole length, petiole thickness, leaf blade length, leaf blade width, fruit surface smoothness, rind base colour, rind overprint colour.

图 2 籽瓜种质资源表型性状聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of phenotypic traits of edible seed watermelon germplasm resources

组群I-1 共有 85 份材料,包括 77 份籽瓜、4 份西瓜、2 份毛西瓜和 2 份黏籽西瓜。组群I-2 共有 53 份材料,包括 46 份籽瓜、1 份毛西瓜、2 份黏籽西瓜和 4

份阿马鲁西瓜。

由图 3 可知,组群 I 的种子长、种子宽和千粒重显著大于种群 II;组群 II 的单瓜籽粒数显著大于组群 I。

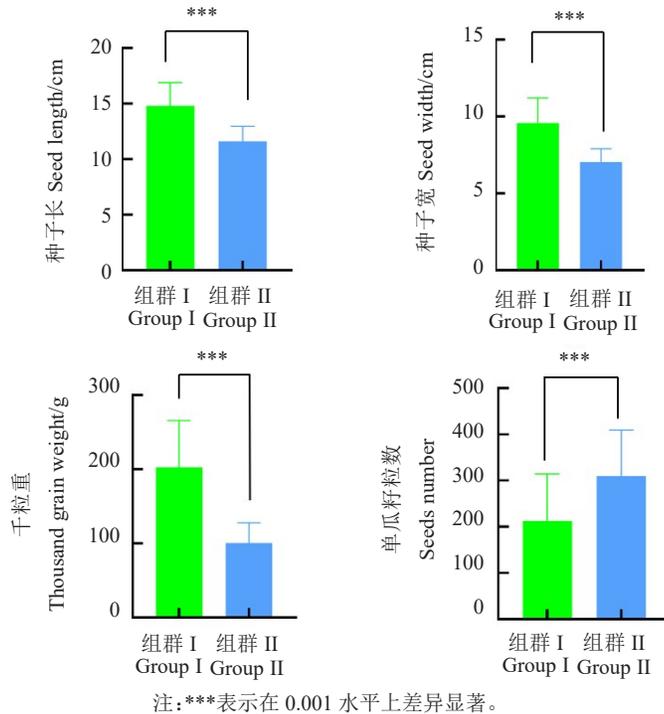


图 3 组群I和组群II重要农艺性状差异分析

Fig. 3 Difference analysis of important agronomic traits between group I and group II

2.4 籽瓜及其近缘种表型性状主成分分析

对 244 份籽瓜及其近缘种种质资源的 34 个表型性状进行主成分分析(表 6),以特征值大于 1 为标准提取前 9 个主成分,累积贡献率达到了 70.44%,涵盖了 34 个性状指标的绝大部分遗传信息,可用于籽瓜及其近缘种种质资源表型性状的综合评价。第 1 主成分贡献率为 19.84%,其中种子长(0.85)、种子宽(0.88)、千粒重(0.88)、单瓜籽粒数(-0.70)、果肉颜色(-0.79)和种子覆纹(0.70)特征向量绝对值较大,说明第 1 主成分代表籽瓜特征性状因子。第 2 主成分贡献率为 13.42%,其中果质量(0.73)、果长(0.59)、果宽(0.73)、叶片长(0.60)、叶片宽(0.66)和叶柄粗(0.63)特征向量值较大,说明第 2 主成分主要代表普通西瓜特征性状因子。第 3 主成分贡献率为 10.37%,果肉中心硬度和果肉边缘硬度特征向量绝对值较大,说明第 3 主成分反映了籽瓜类群果实品质相关性状。主成分 4、主成分 5、主成分 6、主成分 7、主成分 8 和主成分 10 的贡献率分别为 6.19%、5.08%、4.47%、4.20%、3.64%和

3.23%,主要反映了籽瓜类群果实和叶片的形态特征以及白粉病抗性等相关性状。

提取前 2 个主成分运用 R 语言生成主成分分析图(图 4),组群I和组群II分布相似,主成分分析结果与聚类分析结果(图 2)基本一致。

3 讨论与结论

表型性状是经过长期驯化和选择形成的,是由基因和环境共同决定的^[28-29]。对籽瓜及其近缘种种质资源的表型进行调查和多样性分析是种质资源研究的重要工作,也是获得作为育种材料的特异种质资源的基础^[15]。笔者鉴定了来自世界各地的 244 份籽瓜及其近缘种种质,23 个数量性状的平均遗传多样性指数为 1.92,11 个质量性状的平均遗传多样性指数为 1.08,表明该种质的数量性状具有较高的丰富度和均匀度,这与赵世豪^[30]的研究结果一致。有研究表明,群体的表型变异系数大于 10%,说明群体之间的表型差异明显^[31-32]。本研究结果表明,23 个数量性状的表型变异系数均大于 10%,说明笔

表6 籽瓜种质资源表型性状的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of phenotypic traits of edible seed watermelon germplasm resources

表型 Trait	主成分 Principal component								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
子叶长 Cotyledon length	0.34	0.33	0.54	-0.23	0.41	0.17	0.25	-0.07	0.02
子叶宽 Cotyledon width	0.56	0.26	0.54	-0.26	0.24	0.12	0.22	-0.10	0.06
下胚轴长 Hypocotyl length	0.62	0.26	0.43	-0.14	0.11	0.09	0.23	-0.07	-0.10
叶片长 Leaf length	-0.34	0.60	0.55	0.12	-0.02	-0.11	-0.18	0.10	0.10
叶片宽 Leaf width	-0.25	0.66	0.49	0.12	-0.01	-0.14	-0.12	0.11	0.09
叶柄长 Petiole length	-0.27	0.45	0.33	0.30	0.33	-0.09	-0.27	-0.09	-0.04
叶柄粗 Petiole thickness	-0.55	0.63	0.23	0.12	0.15	-0.09	-0.14	-0.02	-0.10
节间长 Internode length	0.05	0.53	0.05	0.08	0.19	0.07	-0.41	0.23	0.14
雄花直径 Male flower diameter	0.38	0.24	0.10	-0.43	-0.02	0.04	-0.01	-0.22	0.03
果柄长 Stalk length	-0.49	0.24	-0.04	-0.05	0.45	0.13	0.18	0.18	0.16
果柄粗 Stalk thickness	-0.25	0.46	-0.16	-0.03	-0.04	-0.19	0.40	-0.19	-0.09
果质量 Fruit mass	-0.18	0.73	-0.45	-0.14	-0.23	0.01	0.18	0.04	-0.04
果长 Fruit length	-0.34	0.59	-0.19	-0.18	-0.40	0.11	0.04	0.13	-0.15
果宽 Fruit width	-0.15	0.73	-0.40	-0.01	-0.18	-0.07	0.23	-0.02	-0.06
果皮厚 Pericarp thickness	0.35	0.44	-0.33	-0.06	0.06	0.08	0.00	-0.13	0.10
果肉中心硬度 Flesh centre hardness	0.28	0.12	-0.71	0.16	0.41	0.08	-0.03	0.21	0.01
果肉边缘硬度 Flesh edge hardness	0.21	0.17	-0.73	0.14	0.41	0.05	-0.02	0.22	0.01
单瓜籽粒数 Seeds number of single melon	-0.70	0.17	-0.25	-0.23	-0.08	0.07	0.00	-0.25	0.28
单瓜籽粒质量 Seed mass of single melon	0.16	0.55	-0.38	-0.10	-0.21	-0.03	-0.07	-0.18	0.22
种子长 Seed length	0.85	0.29	-0.00	0.18	-0.01	-0.08	0.03	0.11	-0.16
种子宽 Seed width	0.88	0.27	0.02	0.19	-0.06	-0.10	0.01	0.09	-0.14
千粒重 Thousand grain mass	0.88	0.31	-0.05	0.16	-0.07	-0.08	0.02	0.05	-0.11
白粉病抗性 Powdery mildew resistance	-0.03	-0.00	-0.01	0.40	0.06	-0.21	0.28	-0.54	0.03
叶片缺刻类型 Type of leaf notch	0.02	-0.08	0.16	0.32	-0.14	-0.53	0.20	0.27	0.31
叶片缺刻深浅 Leaf notch depth	0.25	-0.13	0.13	-0.11	-0.17	-0.19	0.46	0.47	0.40
花性型 Floridity	-0.57	-0.03	0.16	0.08	0.11	-0.02	0.29	0.18	-0.04
果肉颜色 Flesh colour	-0.79	-0.05	0.19	0.07	-0.02	-0.05	0.13	0.08	-0.11
果实形状 Fruit shape	-0.25	0.06	0.12	-0.46	-0.16	0.36	-0.11	0.35	-0.16
种子覆纹 Seed covering	0.70	-0.06	-0.05	-0.08	-0.07	0.06	-0.10	0.00	0.22
种子底色 Seed base colour	0.32	0.11	0.26	-0.20	-0.38	0.08	-0.26	-0.06	0.38
果实表面光滑程度 Fruit surface smoothness	0.11	0.07	-0.03	0.44	-0.17	-0.07	-0.29	-0.09	0.20
果皮底色 Base colour of fruit peel	0.07	0.03	0.23	0.54	-0.35	0.52	0.16	0.04	-0.12
果皮覆纹颜色 Pericarp overprint colour	-0.03	0.13	0.08	0.60	-0.18	0.61	0.20	0.02	0.08
果皮覆纹形状 Shape of pericarp overprint	-0.20	-0.05	-0.13	0.07	0.25	0.39	0.11	-0.13	0.50
特征值 Eigenvalue	6.75	4.56	3.53	2.11	1.73	1.52	1.43	1.24	1.10
贡献率 Contribution rate/%	19.84	13.42	10.37	6.19	5.08	4.47	4.20	3.64	3.23
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	19.84	33.26	43.63	49.82	54.90	59.37	63.57	67.21	70.44

者所收集的籽瓜类群种质的遗传变异较为丰富,有利于拓宽籽瓜的遗传背景。其中,白粉病抗性、单瓜籽粒数、单瓜籽粒质量、千粒重和单瓜质量等表型变异系数均在30%以上,说明该种质资源重要农艺性状具丰富的遗传变异,可为日后培育高产和抗病性较强的籽瓜新品种提供物质基础。

相关性分析是检验性状间相关程度的重要方

法,对育种性状的选择具有重要意义^[13]。对34个表型性状间相关性研究的结果表明,叶片相关性状与果实相关性状之间均呈极显著正相关。这说明作物的营养生长影响着生殖生长,即营养生长是基础,为作物的生殖生长提供足够的生物量,这与继海波^[27]的研究结果一致。单瓜籽粒数、单瓜质量及千粒重是影响产量的主要因素。单瓜籽粒数与单

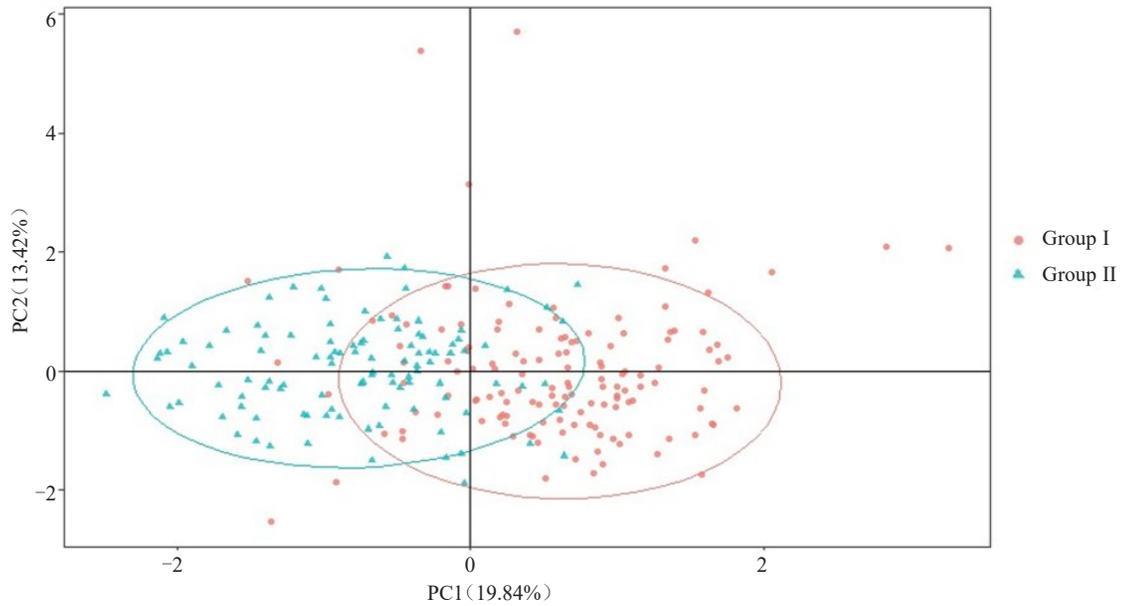


图4 籽瓜种质资源表型性状的主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis of phenotypic traits of edible seed watermelon germplasm resources

瓜质量呈极显著正相关,与千粒重呈极显著负相关。因此,在选育优质籽瓜品种时,要平衡单瓜籽粒质量与千粒重,以达到高产的目的。

主成分分析和聚类分析可以直观地表明种质资源的丰富程度、遗传背景等特点,经常被用来评价种质资源遗传多样性和筛选优良种质^[33]。在本研究中,主成分分析和聚类分析的结果较为一致。组群I中的种质籽粒较大,组群II中的种质籽粒较小,果实和叶片略大,这与第1主成分和第2主成分所反映的主要性状一致。

通过对34个表型性状进行主成分分析,提取了前9个主成分,反映了70.44%的遗传信息,第1主成分主要反映籽粒相关性状,表明种质间籽粒性状差异明显,能够为选育优异的籽瓜种质提供基础。例如,W181和W205单瓜籽粒数均在400粒以上,W201和W212籽粒较大,千粒重均在300g以上,可以考虑进行杂交或者回交,以便选育粒大籽多的籽瓜品种。

244份材料表型性状聚类结果表明,在欧氏距离为15或者9时,籽瓜和普通西瓜均可被分为不同的亚群,但并不能将栽培西瓜和野生西瓜完全区分开,这可能是由于在人工驯化及定向选择过程中,栽培西瓜保留了野生西瓜优异的表型性状,例如籽粒和果实等性状,从而导致野生西瓜的部分表型和栽培西瓜相似。不同组群具有不同的性状特点,因此,可选择不同组群间遗传背景不同、表型差

异明显的材料作为亲本,例如,W9和W165在白粉病抗性方面差异明显,W212和W161在籽粒大小方面差异明显,可为揭示籽瓜白粉病抗性和籽粒大小的遗传机制及相关基因的挖掘提供基础。

综上所述,参试的244份籽瓜及其近缘种种质资源遗传多样性丰富,各组群间差异显著,对筛选优异的种质资源、培育高产抗病的新品种、加速籽瓜产业发展具有积极作用。其中,W181、W205、W201和W212这4份材料的单瓜籽粒数、籽粒大小等产量性状较为优异,可用于籽瓜的新品种选育。

参考文献

- [1] 林德佩.西瓜属(*Citrullus* Schrad.)的分类系统研究[J].中国瓜菜,2015,28(5):1-4.
- [2] 刘启振.西瓜引种中国及其本土化研究[D].南京:南京农业大学,2019.
- [3] 陈菁菁,许勇,张建农,等.我国籽用西瓜生产与研究进展[J].中国蔬菜,2015(12):12-18.
- [4] 柳唐镜,汪李平.籽瓜(籽用西瓜)产业前景展望[J].北京农业,2007(32):13-15.
- [5] 张玉秀,赵文明.籽瓜种子营养成分研究II.籽瓜种子脂肪酸成分分析[J].中国西瓜甜瓜,1992(2):18-19.
- [6] 王翠平.籽瓜抗氧化及抗肿瘤活性研究[J].安徽农业科学,2011,39(29):17833-17836.
- [7] 赵多勇,李应彪,翟金兰,等.籽瓜系列产品的开发现状与存在问题[J].北方园艺,2008(4):100-102.
- [8] 于海彬.籽用西瓜种子生长发育规律与种质资源遗传多样性研究[D].武汉:华中农业大学,2010.

- [9] 周远航,鲁伟丹,马小龙,等.籽瓜种质资源表型性状鉴定及遗传多样性分析[J].中国农业大学学报,2023,28(8):119-132.
- [10] 赵靓,战勇,张恒斌,等.灌水量和种植密度交互对籽瓜产量及籽粒性状的影响[J].北方园艺,2020(22):1-9.
- [11] 王旭辉,王卉,山其米克,等.我国籽瓜的开发现状与研究进展[J].北方园艺,2018(6):149-153.
- [12] PANDEY A, KHAN M K, ISIK R, et al. Genetic diversity and population structure of watermelon (*Citrullus* sp.) genotypes[J]. Biotech, 2019, 9(6):210.
- [13] 解慧芳,牛静,邢璐,等.117份谷子核心种质资源表型性状的遗传多样性分析[J].江苏农业科学,2023,51(13):76-81.
- [14] 康泽然,王晓磊,魏云山,等.绿豆种质资源主要农艺性状、经济性状遗传多样性分析及综合评价[J].江苏农业科学,2022,50(21):36-41.
- [15] 乔玲,陈红霖,王丽侠,等.国外绿豆种质资源农艺性状的遗传多样性分析[J].植物遗传资源学报,2015,16(5):986-993.
- [16] 贾宋楠.黏籽西瓜与籽用西瓜种质遗传性状及抗病性评价[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.
- [17] 石磊.籽用西瓜种质资源遗传多样性的分析和核心种质库的构建[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [18] 谢春立.黏籽西瓜与籽瓜亚种间杂交种性状遗传研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [19] RENNER S S, WU S, PEREZ-ESCOBAR O A, et al. A chromosome-level genome of a kordofan melon illuminates the origin of domesticated watermelons[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(23):e2101486118.
- [20] NGWEPE R M, MASHIL J, SHIMELIS H. Progress in genetic improvement of citron watermelon (*Citrullus lanatus* var. *citroides*): A review[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2019, 66(3):735-758.
- [21] FREDES A, ROESLLO S, BELTRAN J, et al. Fruit quality assessment of watermelons grafted onto citron melon rootstock[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(5):1646-1655.
- [22] THIES J A, ARISS J J, HASSELL R L, et al. Grafting for management of southern root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, in watermelon[J]. Plant Disease, 2010, 94(10):1195-1199.
- [23] TETTEH A Y, WEHNER T C, DAVIS A R. Inheritance of resistance to powdery mildew race 2 in *Citrullus lanatus* var. *lanatus*[J]. HortScience, 2013, 48(10):1227-1230.
- [24] PAL S, RAO E S, SRIRAM S. Genetic analysis of resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* race 2 in cultivated watermelon [*Citrullus lanatus* (Thunb) Matsum & Nakai] [J]. Australasian Plant Pathology, 2020, 49(3):319-326.
- [25] 孙艳楠,路耿新,李冠义,等.燕麦种质资源形态学性状的遗传多样性[J].西北植物学报,2024,44(1):112-121.
- [26] 马双武,刘君璞.西瓜种质资源描述规范和数据标准[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [27] 纪海波.西瓜种质资源表型多样性研究[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [28] 贾平平,靳娟,阿布都卡尤木·阿依麦提,等.新疆118个枣品种表型性状比较分析[J].西北农业学报,2023,32(6):887-898.
- [29] 代攀虹,孙君灵,何守朴,等.陆地棉核心种质表型性状遗传多样性分析及综合评价[J].中国农业科学,2016,49(19):3694-3708.
- [30] 赵世豪.167份西瓜种质资源遗传多样性分析[D].郑州:河南农业大学,2017.
- [31] 杨涛,黄雅婕,李生梅,等.海岛棉种质资源表型性状的遗传多样性分析及综合评价[J].中国农业科学,2021,54(12):2499-2509.
- [32] 魏书洞,孙晓雪,孟川,等.引进大白菜种质资源表型多样性分析[J].中国瓜菜,2023,36(11):40-49.
- [33] 牛雪婧,王新栋,王金萍,等.高粱地方种质资源表型多样性分析及综合评价[J].植物遗传资源学报,2024,25(4):562-575.