中国农业大学学报 2026,31(12):180-193
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

王志强,李程,李志,徐美隆,周小平,胡新华,冯玺,胡兵兵,王惠林. 西瓜和甜瓜抗蚜虫遗传育种研究进展[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):180-193.
WANG Zhiqiang, LI Cheng, LI Zhi, XU Meilong, ZHOU Xiaoping, HU Xinhua, FENG Xi, HU Bingbing, WANG Huilin. Research progress on genetic breeding for aphid resistance in watermelon and melon[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 180-193.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.14

西瓜和甜瓜抗蚜虫遗传育种研究进展

王志强[1] 李 程[1] 李 志[1] 徐美隆[1] 周小平[2] 胡新华[3]
冯 玺[3] 胡兵兵[4] 王惠林[4]
(1. 宁夏农林科学院 园艺研究所, 银川 750002;
2. 宁夏农村科技发展中心, 银川 750021;
3. 宁夏巨丰种苗有限责任公司, 银川 750021;
4. 新疆农业大学 园艺学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要 西瓜和甜瓜是世界性园艺作物,因果肉甜美多汁,备受消费者青睐。在西瓜和甜瓜种植过程中,会受到多种害虫为害,蚜虫是发生最为严重的虫害之一,蚜虫吸食茎叶汁液、分泌蜜露,造成叶片卷曲和叶面污染,而且还会传播病毒,给生产带来不可估量的损失。杀虫剂防治蚜虫虽然效果较好,但是带来的环境污染更为突出,因此选育抗蚜虫品种是防治蚜虫效果最好的方法。本研究总结了西瓜甜瓜抗蚜虫的种质资源和品种,重点介绍了这些种质的来源和抗性水平,同时阐述了抗蚜虫性状的遗传规律和基因挖掘现状,分析了西瓜甜瓜蚜虫抗性机制,论述了抗蚜虫基因在育种上的应用情况。本研究为西瓜甜瓜抗蚜虫育种实践提供了借鉴。

关键词 蚜虫; 西瓜; 甜瓜; 基因; 病毒
中图分类号 S65 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0180-14 **文献标志码** A

Research progress on genetic breeding for aphid resistance in watermelon and melon

WANG Zhiqiang[1], LI Cheng[1], LI Zhi[1], XU Meilong[1], ZHOU Xiaoping[2], HU Xinhua[3], FENG Xi[3], HU Bingbing[4], WANG Huilin[4]
(1. Horticultural Research Institute, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China;
2. Ningxia Rural Science and Technology Development Center, Yinchuan 750021, China;
3. Ningxia Jufeng Seedings Limited Liability Company, Yinchuan 750021, China;
4. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract Watermelons and melons are worldwide horticultural crops, prized by consumers for their sweet and juicy flesh. During the cultivation of watermelons and melons, they are susceptible to various pests, with aphids being one of the most severe. Aphids not only feed on the sap of stems and leaves and secrete honeydew, resulting in leaf curling and leaf surface contamination, but also transmit viruses, leading to substantial production losses. Although insecticides are effective in controlling aphids, they cause more prominent environmental pollution. Therefore, breeding aphid-resistant varieties is the most effective method for aphid control. This article summarizes the germplasm resources and varieties of aphid-resistant watermelons and melons, with a focus on the sources and resistance levels of these germplasms. It also elaborates on the genetic laws of aphid-resistant traits and the current status of gene mining, analyzes the aphid resistance mechanisms of watermelons

收稿日期: 2026-03-02;接受日期:2026-07-14
基金项目: 宁夏回族自治区自然科学基金项目(2025AAC030573);宁夏回族自治区重点科技成果转化项目(2025CJE09004)
第一作者: 王志强(ORCID:0000-0002-3918-9539),副研究员,主要从事西瓜栽培和育种研究,E-mail: wzq2003135@163.com

and melons, and discusses the application of aphid-resistant genes in breeding. This article provides a reference for the practice of aphid-resistant breeding in watermelons and melons.

Keywords Aphids; watermelon; melong; gene; virus

西瓜（*Citrullus lanatus*）和甜瓜（*Cucumis melo* L.）均为葫芦科1年生草本蔓生植物，属于世界性的园艺作物。中国是世界第一大西瓜、甜瓜生产国和消费国，栽培面积和产量均居世界首位。2022年我国西瓜种植面积1 484.82×10^3 hm^2，总产量达到6 302.31万t；甜瓜种植面积380.76×10^3 hm^2，总产量达到1 386.79万t[1]。

瓜蚜（*Aphis gossypii* Glover）即为棉蚜[2]，俗称腻虫、蜜虫[3]，是一种世界性害虫。瓜蚜以成虫和若虫在叶背和嫩茎取食汁液，造成幼叶卷曲，同时分泌蜜露，使老叶发生霉污[4]，严重影响作物光合作用，导致受害瓜苗生长缓慢，叶片受害造成减产和品质的下降。此外，瓜蚜还能传播病毒病，引起植株早衰枯萎。由于瓜蚜繁殖能力强且具有迁飞能力，对作物危害严重，并且防治难度较大，目前已成为严重制约西瓜、甜瓜产业健康发展的重要因素之一。瓜农为防治瓜蚜危害，大量且频繁地使用化学农药，不仅导致瓜蚜抗药性的产生，而且严重影响了果品的安全供给和生态环境安全。目前，生产上对瓜蚜的防治，主要以喷施农药为主，但长期使用化学农药对自然环境和生态系统都会造成不良影响，同时瓜蚜产生的抗药性给虫害防治提出了新的挑战。因此，选育优良抗蚜虫品种成为蚜虫防治安全且经济的途径。收集抗蚜虫西瓜甜瓜种质资源，挖掘抗蚜虫基因并研究其抗性遗传规律和机制，将为西瓜甜瓜抗蚜虫育种提供新的借鉴。

1　西瓜甜瓜抗蚜虫种质资源与品种

甜瓜蚜虫抗性的研究最早开始于1944年[5]。直到1967年，由昆虫学家和植物遗传学家组成的科研团队，对甜瓜蚜虫抗性进行了系统研究[6-7]，聚焦于来自印度的品种‘PI 371795’（后命名‘PI 414723’），发现该品种植株上蚜虫数量少且繁殖率低，蚜虫危害较轻，认为这种对蚜虫的抗性受1个主基因和多个微效基因控制[8]。法国学者对韩国抗黄瓜花叶病毒品种‘PI 161375’的研究发现，将蚜虫接种至该品种植株上时，植株对病毒表现出完全抗性，同时蚜虫从植株迁离，针对‘PI 161375’表现出的对蚜虫和病毒的抗性，认为其由显性单基因控制[9]。同时发现，来自印度的‘PI 414723’和来自韩国的‘PI 161375’材料，具有相似的特征，同样对黄瓜花叶病毒的抗性由单显性基因控制，并且这2份材料仅对瓜蚜传播的病毒具有抗性，对其他蚜虫如苹果蚜（*Myzus malisuctus* Matsumura）、花生蚜（*Arachis hypogaea* L.）、甜菜蚜（*Aphis fabae* Scopoli）、桃蚜（*Myzus persicae*）传播的病毒表现为易感染，因此，控制2种表型（抗蚜和抗蚜传病毒）的基因被命名为 *Vat*，全称“Virus aphid transmission”[10]。

Pitrat等[11]检测了几百种资源的抗蚜特性，发现仅有5%的资源对蚜虫有抗性，也仅有很少部分的资源同时具备 *Vat* 的双重表型特征，即蚜虫和蚜传病毒的抗性。到目前为止，有25份甜瓜资源得到验证具备双重抗性，这些甜瓜资源分别来源于亚洲、非洲、美洲和欧洲[12-13]。甜瓜中，在测试的500份种质中，约有50份对瓜蚜具有抗性。在这些抗性种质中，无论其地理来源如何，绝大多数都携带相同的抗性等位基因 *Vat*，而有极少数种质携带有不同的等位基因[14]。

国内关于西瓜、甜瓜抗蚜虫的报道，多集中在西瓜和甜瓜品种抗蚜虫的鉴定、抗蚜性与植株体内营养成分关系的研究，蚜虫防治，蚜传黄化病毒抗性分析、克隆和应用方面。

抗蚜虫品种和种质资源方面，徐雪莲等[15]采用室内蚜量比值法和田间离中率方法对台湾农友的35个西瓜品种开展了抗蚜性鉴定，鉴定出2个高抗品种。陈艾青[16]以6个西瓜品种为研究材料，通过分析瓜蚜在不同西瓜品种幼苗上的种群数量、单雌产蚜数和若虫死亡率等筛选出抗、感西瓜品种，并从表皮抗性（幼苗叶片蜡质含量、下表皮植毛体密度、气孔密度）、叶肉组织抗性（活性氧、水杨酸、茉莉酸含量）、韧皮部抗性（胼胝质沉积）方面，分析了西瓜抗、感品种的瓜蚜抗性差异机理。徐丹丹等[17]选择了7个甜瓜品种，综合比较了瓜蚜对不同品种室内离体叶片的取食选择性及在室外活体植株上的种群增长动态，发现瓜蚜在羊角蜜和IVF437上种群增长速度较慢。齐宏娇[18]对7个厚皮甜瓜材料进行抗蚜性鉴定，获得高抗材料1份，高感材料6份。各国抗蚜虫西瓜和甜瓜种质总结见表1。

表 1 西瓜甜瓜抗、感蚜虫种质资源

Table 1 Aphid-Resistant and Aphid-Susceptible germplasm resources

序号 Code	品种名称 Variety name	作物种类 Crop species	抗性水平 Resistance level	来源 Origin	参考文献 Reference
1	黑皮	西瓜	高抗	中国热带农业科学院环境与植物保护研究所	[15]
2	绿美人		高抗		[15]
3	黑美人		抗		[15]
4	惠兰		抗		[15]
5	安妮		中抗		[15]
6	惠玲		中抗		[15]
7	华玲		中抗		[15]
8	翠玲		中抗		[15]
9	黑帅		中抗		[15]
10	宝冠		中抗		[15]
11	嘉华		中抗		[15]
12	秀玲		中抗		[15]
13	青峰		中抗		[15]
14	瑞风		中抗		[15]
15	农友大宝		中抗		[15]
16	凤美		中抗		[15]
17	嘉玲		中抗		[15]
18	黑玫瑰		中抗		[15]
19	金美人		感		[15]
20	小玲		感		[15]
21	瑞光		感		[15]
22	小兰		感		[15]
23	丽晶		感		[15]
24	新兰		感		[15]
25	宝凤		感		[15]
26	农友特大新红宝		感		[15]
27	和平		感		[15]
28	兴华		感		[15]
29	新金兰		感		[15]
30	3F-1952		感		[15]
31	瑞兰		感		[15]
32	凤光		感		[15]
33	蕙宝		感		[15]
34	甜美人		高感		[15]
35	花绿		高感		[15]
36	金美都	西瓜	中抗	北京农学院生物与资源环境学院	[16]
37	霸道极品京欣		感		[16]
38	中华天王		感		[16]
39	早佳 8424		感		[16]
40	美福来		感		[16]
41	西农八号		高感		[16]

表1（续）

序号 Code	品种名称 Variety name	作物种类 Crop species	抗性水平 Resistance level	来源 Origin	参考文献 Reference
42	羊角蜜	甜瓜	抗	中国农业科学院蔬菜花卉研究所	[17]
43	IVF437		抗		[17]
44	IVF28		感		[17]
45	IVF58		感		[17]
46	IVF117		感		[17]
47	IVF118		感		[17]
48	IVF168		感		[17]
49	LZK-0402（inbred of PI 161375	甜瓜	抗	新疆维吾尔自治区葡萄瓜果研究中心	[18]
50	LZK-0415		感		[18]
51	LZK-0201		感		[18]
52	ZK3-10		感		[18]
53	皇后		感		[18]
54	阿克苏黄皮		感		[18]
55	黄醉仙		感		[18]
56	西州密 25 号		抗		[19]
57	西周密 17 号		抗		[20]
58	PI 414723	甜瓜	抗	西班牙国家研究委员会拉马约拉试验站	[21]
59	PI 161375		抗		[21]
60	TGR1551		抗		[21]
61	AR-5		抗		[21]
62	PMR-5		感		[21]
63	PMR-6		感		[21]
64	Bola de Oro		感		[21]
65	LJ 90234（inbred of PI 371395 from India）	甜瓜	高抗	美国农业部农业研究局	[22]
66	LJ 90230（selected from PI 161375 from Korea）		中抗		[22]
67	LJ 90254（selected from PI 255478 from Korea）		中抗		[22]
68	PMR45		感		[22]
69	91060		抗		[23]
70	91213		抗		[23]
71	92417		抗		[23]
72	AR Hale’s Best Jumbo	甜瓜	抗	美国农业研究局农业研究站	[24]
73	LJ 91059（LJ 90234 self）	甜瓜	抗	美国加利福尼亚州拉霍亚市农业局	[24]
74	LJ 91060（LJ 90234 self）		抗		[24]
75	LJ 91064（LJ 90234 self）		抗		[24]
76	Top Mark	甜瓜	感	美国北卡罗来纳州立大学昆虫学院	[25]
77	91213		抗		[25]
78	Rega（from PI 161375）	甜瓜	感	西班牙圣地亚哥德孔波斯特拉大学高等理工学院	[26]
79	Margot	甜瓜	抗	法国农业科学研究院	[27]

表1（续）

序号 Code	品种名称 Variety name	作物种类 Crop species	抗性水平 Resistance level	来源 Origin	参考文献 Reference
80	Ginsen Makuwa	甜瓜	抗		[27]
81	PI 266935		抗		[27]
82	PI 482420		抗		[27]
83	Chenggam		抗		[27]
84	Durgapura Madhu		抗		[27]
85	Miel Blanc		抗		[27]
86	Kanro Makuwa		抗		[27]
87	K5442		抗		[27]
88	PI 255478		抗		[27]
89	Meloncillo		抗		[27]
90	PI 164320		抗		[27]
91	PI 164323		抗		[27]
92	90625		抗		[27]
93	Anso 77		抗		[27]
94	PI 164723		抗		[27]
95	PI 224770		抗		[27]
96	Fegouss 1		抗		[27]
97	PI 282448		抗		[27]
98	Escrito 8429		抗		[27]
99	Vedrantais		感		[28]
100	Invernizo 8427	甜瓜	抗	法国农业科学研究院果蔬遗传改良研究室	[29]
101	San IIdefonso		抗		[29]
102	Durganpura Madhu		抗		[29]
103	Kanro Makuwa 1		抗		[29]
104	Kanro Makuwa 2		抗		[29]
105	AM 51		抗		[29]
106	PI 482398		抗		[29]
107	HSD2455		抗		[29]
108	Miel Blanc		抗		[29]
109	PI 266935		抗		[29]
110	Shiro Uri Okayama		抗		[29]
111	K5442		抗		[29]
112	Ginsen Makuwa		抗		[29]
113	Shirokawa Nashi Makuwa		抗		[29]
114	MR-1		抗		[30]
115	Charentais Vat R		抗		[30]
116	Charentais T		抗		[30]
117	Smiths' perfect		抗		[30]
118	PI 234607		抗		[30]
119	Anso AL77		抗		[30]
120	AR Hale's Best Jumbo	甜瓜	抗	法国农业科学研究院果蔬遗传改良研究室	[14]
121	Meloncillo		抗		[14]

表1（续）

序号 Code	品种名称 Variety name	作物种类 Crop species	抗性水平 Resistance level	来源 Origin	参考文献 Reference
122	Miel Blanc	甜瓜	抗		[14]
123	PI 164320		抗		[14]
124	PI 164323		抗		[14]
125	SVI 0105		抗		[14]
126	Virgos		抗		[14]
127	Escrito 8429		抗		[14]
128	Malaga AN-C-22		抗		[14]
129	Negro		抗		[14]
130	Persiski BR5		抗		[14]
131	PI 282448		抗		[14]
132	TR3		抗		[31]
133	TR4		抗		[31]
134	SUKRUBEY	甜瓜	高抗	土耳其安塔利亚省西地中海农业研究所植物保护研究室	[32]
135	UNLU		高抗		[32]
136	TK15		高抗		[32]
137	CA		高抗		[32]
138	N43		抗		[32]
139	MLN9		抗		[32]
140	MLN20		抗		[32]
141	N16		抗		[32]
142	N72		抗		[32]
143	N2		抗		[32]
144	N18		抗		[32]
145	N22		抗		[32]
146	N41		抗		[32]
147	N77		抗		[32]
148	N54		抗		[32]
149	N3		感		[32]
150	TKU3		感		[32]
151	N24		感		[32]
152	TF37		感		[32]
153	TF29		感		[32]
154	N21		感		[32]
155	MLN16		感		[32]
156	Bola de oro	甜瓜	感	突尼斯苏塞省绍特马里埃市园艺与有机农业区域研究中心	[33]
157	TUN-1（Stambouli）		感		[33]
158	TUN-2（Maazoun Menzel Chaker）		感		[33]
159	TUN-3（Trabelsi）		感		[33]
160	TUN-4（Maazoun Mehdia）		感		[33]
160	TUN-5（Galaoui）		感		[33]
162	TUN-6（Sarachika）		感		[33]

表1（续）

序号 Code	品种名称 Variety name	作物种类 Crop species	抗性水平 Resistance level	来源 Origin	参考文献 Reference
163	TUN-7（Chamem（Ananas type））	甜瓜	抗	美国佛罗里达大学昆虫与线虫学系	[33]
164	TUN-8（Rupa）		感		[33]
165	TUN-9（Asli）		感		[33]
166	TUN-10（Dziri）		感		[33]
167	TUN-12（Fakous）		感		[33]
168	TUN-13（Arbi13）		感		[33]
169	TUN-14（Maazou）		感		[33]
170	TUN-15（Maazoun）		感		[33]
171	PI 180283	甜瓜	抗		[34-35]
172	PI 31397		抗		[34-35]
173	90625（from PI 31397）		抗		[34-35]
174	AM5	甜瓜	抗	西班牙农业基因组学研究中心	[12]
175	AM52		抗		[12]

由此可见，在抗蚜虫种质资源的抗性鉴定方面，我国在西瓜上完成工作较多，但我国保存挖掘的抗蚜虫甜瓜种质资源仍然较少，同时在甜瓜抗蚜虫育种方面，系统性的种质创新和新品种选育研究工作仍存在很多空白。

2 西瓜甜瓜抗蚜遗传规律

2.1 单基因显性遗传

我国甜瓜抗蚜虫遗传分析方面，有研究以4个高代自交系、3个栽培品种正反交获得的8个F_1及F_2代进行抗蚜性鉴定，发现F_1代均表型为抗蚜，且F_2代群体抗蚜性表现3∶1分离比例，认为甜瓜自交系‘LZK-0402’抗蚜性是由显性单基因所控制[18]。

我国西瓜抗蚜虫遗传分析方面，有研究以西瓜高抗品种‘黑皮’和高感品种‘花绿’为亲本进行正反杂交，遗传分析结果表明，其后代F_1表型均表现为高抗（HR），F_2代抗蚜与感蚜植株分离比经χ^2测验符合3∶1分离规律，表明参试西瓜材料抗蚜性由单显性核基因控制，且能稳定遗传[36]。另有研究以‘黑皮’‘花绿’为亲本的杂交F_1代对瓜蚜表现为抗性，自交F_2代植株表型出现抗感性分离，抗蚜与感蚜植株分离比经卡方测验符合3∶1分离规律，并用筛选标记验证了抗蚜品种和感蚜品种，结果以‘黑皮’为亲本的西瓜抗蚜性由单显性核基因控制且能稳定遗传[37]。

以色列学者以感蚜亲本‘UC Top Mark’和抗蚜亲本‘PI 414723’构建‘UC Top Mark’×‘PI 414723’甜瓜遗传群体，F_2代抗蚜与感蚜植株分离比经卡方测验符合3∶1分离规律，确定‘PI 414723’材料对瓜蚜的抗性表现为显性单基因控制[38]。

美国学者以甜瓜品种‘LJ 90234’（inbred of PI 371395 from India，对甜瓜蚜虫有抗性）与另一栽培品种‘PMR45’杂交，杂交后代中，蚜虫侵染后甜瓜叶片表现出平展和卷曲表型，叶片平展的甜瓜耐蚜性（Ag，蚜虫耐受性）为显性性状，经过卡方验证，表明叶片平展和卷曲的表型受单个显性基因控制[22]。

2.2 主基因及多个微效基因控制

Kishaba等[9]利用抗蚜材料和感蚜材料杂交，通过F_1、F_2和回交世代蚜虫繁殖情况，发现‘PI 371795’的抗蚜虫特性受1对主基因和多个微效基因控制。

从现有文献可知，西瓜甜瓜抗蚜性有2种遗传模式，一种是单基因显性遗传，具有质量性状遗传特征；另一种是主基因和多个微效基因控制的遗传模式，具有数量性状遗传特征。这与西瓜甜瓜种质资源复杂的遗传背景和抗蚜性具有较高的遗传多样性有关。

3 西瓜甜瓜抗蚜基因挖掘

齐宏娇[18]运用RAPD技术，对330个随机引物

筛选，找到了1个与厚皮甜瓜抗蚜基因连锁的RAPD标记，并将其命名为OPA1100。通过表型比较分析，确定筛选的抗蚜基因连锁标记遗传距离为13.7 cmol。徐雪莲[36]采用混合分组分析法（BSA）从89个随机引物中筛选到1个与西瓜抗蚜性基因连锁的分子标记$WO4_{530}$，并在杂交后代F2群体和供试抗、感蚜虫品种中得到了验证。陈青等[37]采用单株蚜量比值法室内鉴定与RAPD、SCAR标记相结合的方法，用筛选获得的RAPD标记$WO4_{600}$、SCAR标记$WO4\text{-}S_{530}$验证了4个抗蚜品种、4个感蚜品种和10个F_2抗蚜单株、10个F_2感蚜植株，确定$WO4_{600}$和$WO4\text{-}S_{530}$是与西瓜抗蚜基因连锁的RAPD和SCAR标记。我国虽然针对西瓜甜瓜蚜虫抗性开展了分子标记和BSA基因定位研究，但研究结果仍然处于开发遗传标记阶段，利用图位克隆和遗传图谱深入定位克隆抗蚜基因的研究工作仍是空白。

Perin等[39]通过分析源自Védrantais×PI 161375杂交组合的163个重组自交系群体中346个AFLP标记、113个IMA标记及表型性状的分离情况，构建了第一张遗传图谱，将*Vat*基因定位在第5连锁群的端粒区域[40-42]。Dogimont等[43]以‘PI161375’构建的群体中，利用图位克隆技术从甜瓜中分离出*Vat*基因，*Vat*基因全长6 kb，属于1个抗病基因簇，由5个外显子和4个内含子组成，编码1个由1 467个氨基酸组成的蛋白，该蛋白属于卷曲螺旋（CC）-核苷酸结合位点（NBS）-富含亮氨酸重复序列（LRR）家族。该基因具有独特的双重抗性，既抗蚜虫又抗蚜传病毒[44-45]。而CC-NBS-LRR结构通过直接或间接识别病原相关分子模式（PAMPs）或病原体效应因子在特定的基因-基因相互作用中介导抗性[46-47]。*Vat*基因的C端包含4个由65个氨基酸组成的近乎完美的重复序列，其侧翼为高度不完美的LRR基序拷贝，参与蚜虫效应蛋白的特异性识别[14]。植物蚜虫识别被认为触发信号级联反应，迅速激活植物对蚜虫的防御，而*Vat*基因的LRR重复数量的差异，是造成抗蚜性和抗蚜传病毒的直接原因[43]。另有研究发现，甜瓜白粉病抗性基因Pm-wWMR29是瓜蚜（Aphis gossypii）抗性基因*Vat*-1PI161375的同源基因。Pm-wWMR29没有对蚜虫的抗性，而*Vat*-1PI161375没有对白粉病的抗性。这2个同源基因均属于1个高度多样化的NLR基因簇[48]，即*Vat*基因簇。在代表全球野生和栽培甜瓜类型的678份材料中，10%～13%的材料含有*Vat*-1PI161375和Pm-wWMR29的特异性标记。包含*Vat*/Pm-w基因的基因簇结构复杂且在甜瓜中具有多样性，这表明*Vat*同源基因可能有助于识别多种尚未被发现的害虫和病原体[49]。

Boissot等[50]以来自法国的‘Vedrantais’和来自韩国的抗蚜虫材料‘PI 161375’构建遗传群体，发现在甜瓜中有4个加性QTL和2对上位性QTL影响甜瓜抗蚜性。其中，1个主效QTL同时影响蚜虫的行为和生物潜力；它与*Vat*克隆基因共定位，可能与*Vat*克隆基因相对应。后经等位性测试和图谱数据表明，多个抗源中的抗性基因位于*Vat*位点或者*Vat*位点附近[31,51-52]。

Garzo等[53]利用刺吸电位图谱（EPG）技术研究甜瓜对蚜虫抗性机制，通过比较瓜蚜在PI-414723（印度，*Agr*基因源）、‘PI-161375’（韩国，*Vat*基因源）、‘TGR-1551’（津巴布韦，新型抗源）3种抗蚜甜瓜材料上的取食行为，发现3种材料的抗性均涉及韧皮部和韧皮部相关因子，但三者的抗性机制存在差异，推测存在不同于*Vat*基因的另一个基因*Agr*，其具有蚜虫抗性，但不具有蚜传病毒抗性。同时认为携带*Agr*基因的抗性甜瓜与感病品种嫁接后，抗性无法通过接穗传递。而‘TGR-1551’具有比‘PI-161375’更强的抗蚜特性。

在西瓜中，通过CRISPR-Cas9技术敲除*VST1*基因和过表达*VST1*基因，均会影响其对蚜虫的吸引力和抗蚜侵害程度。表明*VST1*是西瓜抗蚜性的负调控因子[54]。

植物凝集素（Plant lectin）是所有具有至少一个非催化结构域，能够可逆结合特定单糖或寡糖的蛋白质，最早于1888年被报道，直到1983年，大豆凝集素作为首个凝集素序列被克隆。根据植物细胞中的定位，将植物凝集素分为2类，第一类包括所有在附着于内质网的核糖体上合成的凝集素，这些凝集素最终被转运到液泡、沉积在细胞壁或分泌到细胞外空间。第二类包括合成时无信号肽的凝集素，在细胞质中的游离核糖体上翻译，合成后，这些凝集素留在细胞质中或转移到细胞核。凝集素备受关注，主要在作物改良、生物医学研究以及作为糖生物学研究工具的应用价值上。凝集素可分为12大家族[55]，其中雪花莲凝集素（GNA）、苋菜籽凝

集素(ACA)应用最为广泛。基于雪花莲凝集素和苋菜凝集素对蚜虫表现出一定的灭杀作用[56-57],学者已采用遗传工程方法,将雪花莲凝集素基因和苋菜凝集素基因导入多种粮食作物和经济作物中,同时转基因植株对蚜虫均表现出较好的防治效果[58-59]。但限于表达水平、蚜虫杀伤效果、蚜虫抗性和生态风险等问题,凝集素的应用仍然有限[60]。

4 西瓜甜瓜抗蚜作用机理

抗蚜虫叶片物理结构。植物通过自身的组织结构来抵御害虫的取食为害,这些特殊的物理防御屏障包括叶表茸毛或者刚毛、气孔密度和叶片蜡质等。研究认为叶片气孔密度、叶片表面茸毛密度和蜡质含量,与蚜虫抗性密切相关。徐雪莲[36]以西瓜为研究材料,发现叶片气孔密度、茸毛密度和蜡质含量与西瓜品种抗蚜性显著正相关。齐宏娇[18]以甜瓜为研究材料,认为叶片气孔密度和刚毛密度与抗蚜性正相关。而陈艾青[16]认为单株蚜量比值与不同西瓜品种的叶片蜡质含量、下表皮植毛体密度以及气孔密度均无相关性。

抗蚜虫营养物质。有研究认为,瓜蚜为害后,叶组织中可溶性糖、游离氨基酸、脯氨酸和一些与生理胁迫相关的酶类物质会出现相关性变化。如徐雪莲[36]和陈青等[61]研究认为,瓜蚜为害后,可溶性氮、游离氨基酸和脯氨酸含量与西瓜品种抗蚜性显著负相关,糖/氮比与西瓜品种抗蚜性显著正相关,多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(AsA-POD)活性的增加与西瓜品种抗蚜性显著正相关,叶组织中的Vc和可溶性糖含量与西瓜抗蚜性无显著相关性。瓜蚜为害后叶组织中丙二醛含量的增加与西瓜抗蚜性呈显著负相关[61]。

抗蚜虫次生代谢产物。植物会产生许多对蚜虫有害的次生代谢产物,主要包括酚类化合物、萜类化合物和生物碱等,这些次生代谢产物能够帮助植物抵抗蚜虫侵害。酚类主要是酚酸、羟基苯甲酸、儿茶酚、木质素、单宁类和黄酮类等,植物在受到蚜虫取食时,通过苯丙烷途径产生酚类化合物[62],木质素含量增加导致的木质化是植物增强抗性的一个重要机制[63]。单宁是有效的化学防御物质,能够抑制蚜虫的生长发育和繁殖。陈青[61]认为瓜蚜为害西瓜叶组织后,单宁酸含量增加与西瓜抗蚜性显著正相关。萜类化合物通常由异戊烯基二磷酸(IDP)、二甲基丙烯基二磷酸(DMAPP)的异构体产生,而作为生物农药大量应用的印楝素和除虫菊素是萜类物质的典型代表[64]。生物碱是含氮植物次生代谢物的主要类别,这些化合物直接影响昆虫的神经系统,干扰DNA复制,并最终影响酶功能和蛋白质合成[65]。生物碱对蚜虫的毒性物质主要包括吗啡、阿托品、尼古丁、奎宁、咖啡因、辣椒素或茄碱等[66],而苦参碱和苦豆碱都是抗虫次生代谢产物中生物碱类应用较多的物质。

抗蚜虫植物激素。茉莉酸(Jasmonic acid, JA)、水杨酸(Salicylic acid, SA)等植物激素,能够激活下游信号通路,累积到一定程度时可触发防御基因表达、次生代谢物产生、细胞死亡和系统获得性抗性,进而增强植物的抗虫性。茉莉酸是自然界中广泛存在、具有激素和信号传递功能,同时诱导植物产生抗虫作用的激素类物质[67]。其基本机构是一个环戊烷,具有2种天然异构体和人工合成的异构体,其能诱导生物碱、酚类和蛋白酶抑制素,对害虫的生理活动产生不良影响,对害虫起到趋避和毒害作用。水杨酸作为一种植物激素类物质,主要靠水杨酸甲酯起作用,水杨酸甲酯能够激活植物防御基因,使植物产生毒素或者防御蛋白,实现抵抗虫害的作用[68]。

抗蚜虫基因。目前已在多种植物中,定位到蚜虫抗性基因,番茄中的*Mi-1.2*基因和甜瓜中的*Vat*基因分别对马铃薯蚜虫和瓜蚜具有抗性。这2个基因均编码卷曲螺旋(CC)-NBS-LRR型抗性(R)蛋白。并且,*Mi-1.2*基因还对粉虱和木虱等其他具有相似取食方式的昆虫具有抗性[69]。*Vat*基因会影响瓜蚜的取食,并对该蚜虫传播的病毒具有抗性。

*Vat*基因的抗性机制为:蚜虫侵染后不久,在蚜虫取食部位会出现大量胼胝质积累、细胞壁木质化、过氧化物酶活性增强、酚类物质合成以及轻微的氧化迸发;在抗蚜虫植株中,蚜虫侵染后未观察到明显的坏死症状[21,70]。这些结果表明,蚜虫可特异性诱导植物发生快速的程序性细胞死亡,且该过程仅局限于蚜虫侵染区域。同时,由蚜虫抗性基因激活的防御信号通路与病原菌触发的通路部分重叠,并依赖水杨酸和茉莉酸这2种信号分子[71]。在抗蚜虫植株中,蚜虫取食可显著激活乙烯响应基因,包括乙烯信号通路相关基因(*ETR2*、*EIN2*、

EIN3、*EIL1*、*ERF1*）、下游响应基因（*SAG-21*、*SSA-13*、I型蛋白酶抑制剂、*CAMTA1*），这些基因在蚜虫侵染后 6 h 内呈高表达，而在 24 h 后激活效应减弱[72]。

微小 RNA（miRNA）是一类在转录后水平调控蛋白编码基因表达的非编码 RNA。在 *Vat* 介导的抗性植株中，miRNA 在蚜虫侵染早期上调表达，而在感蚜品种中则呈下调表达[73]。蚜虫侵染可在 *Vat* 介导的抗蚜甜瓜植株中诱导大规模的转录重编程，进而启动多样化的植物防御反应。此外，棉蚜来源的 miRNA 在与抗、感寄主植物互作过程中表现出差异调控[74]，这与蚜虫在 *Vat* 基因赋予的抗性压力下所出现的繁殖、发育及形态变化相一致。

抗蚜凝集素可特异性结合蚜虫肠道内的碳水化合物，进而干扰蚜虫的生理过程[75]。例如，通过韧皮部凝集素基因 *PP2-A1* 转化的黄瓜植株，在接蚜后其蚜虫定殖率和繁殖力显著降低，且该转基因黄瓜植株对蚜虫表现出明显的抗性[76]。

植物防御信号传导。植物受体与蚜虫效应因子之间的反应，启动多种信号通路及分子级联反应。植物的信号传导和防御机制包括产生过氧化氢和活性氧（ROS）、丝裂原活化蛋白激酶级联反应、胼胝质沉积以强化细胞壁，以及钙离子内流等，以帮助密封筛管，阻止蚜虫吸食韧皮部汁液[77]。水杨酸、茉莉酸、乙烯（ET）、脱落酸（ABA）和赤霉素（GA）等植物激素也可作为信号分子，启动下游防御反应和信号通路，例如诱导植物次生代谢产物的产生[78]。再者，蚜虫与寄主相互作用过程中诱导产生的植物激素对蚜虫也有特殊抗性[79-80]。

5　西瓜、甜瓜抗蚜基因的应用

为了证实 *Vat* 抗性等位基因的作用，通过农杆菌介导的遗传转化将含有 *Vat* 编码区、启动子和 30-侧翼区的 11 kb DNA 片段导入 2 个感病甜瓜品系‘Vedrantais’‘CLTZ’中，获得了 4 个独立转基因植株，所有植株均表现出对瓜蚜和病毒的高水平抗性[46]。

法国 *Vat* 抗蚜虫基因育种工作开展较早，旨在将抗棉蚜特性转育到栽培品种：一项是将‘PI 161375’的抗性导入 Charentais 类型甜瓜中，在育种过程中进行回交将‘PI 161375’*Vat* 基因介导的抗蚜性导入 Charentais 类型甜瓜，培育出了 INRA 品种 Margot 以及近等基因系 Charentais *Vat*R 和 Charentais *Vat*S[43]。另一项是将‘PI 414723’的抗性转入 Western Shipper 型甜瓜品种中。由于抗蚜特性与抗蚜传播病毒特性完全连锁，2 项计划培育的自交系在蚜虫接种病毒时均表现出抗性。1987 年，Margot 类型甜瓜成为首个被列入法国品种目录的抗蚜甜瓜品种。此后，法国已推出 110 个抗蚜虫的 Charentais 类型甜瓜品种。法国东南部、西南部以及小安的列斯群岛的 2 个岛屿上都种植甜瓜，得益于 *Vat* 抗性等位基因的广泛应用，部分抗性品种得到成功推广，占法国甜瓜种植面积的 40% 以上。2000 年以来，法国东南部约 80% 的甜瓜作物都携带了这种 *Vat* 基因的抗性[29]。

日本将带有 *Vat* 基因的抗蚜虫材料‘AR5’通过连续回交和自交的方式，把抗蚜虫基因转育到 Earl’s 型甜瓜中，并于 2006 年育成新的甜瓜杂交种[81]。

在中国甜瓜育种中，因‘LZK-0402’抗蚜性来源于‘PI 161375’，同时‘西州密 17 号’‘西州密 25 号’2 个哈密瓜品种，因母本抗蚜虫而杂交品种具备抗蚜虫特性。

6　总结与展望

瓜蚜是西瓜和甜瓜生产中最主要的害虫之一，不仅直接影响植株生长、降低果实产量与品质，还能传播病毒，加剧危害程度。目前生产中对蚜虫的防治仍以化学防控为主，易导致蚜虫抗药性增强、环境污染及产品质量下降等问题，而培育和应用抗蚜虫品种是解决该问题最经济、环保和可持续的途径。

6.1　抗蚜虫种质资源的挖掘、创新及精准评价

种质资源是抗蚜虫研究与品种选育的基础，当前西瓜和甜瓜抗蚜虫种质资源的挖掘仍存在范围较窄、评价体系不统一和不完善等问题。首先，针对野生近缘种和地方特色品种进行系统筛选，挖掘具有稳定抗蚜性的优异种质，明确其抗蚜等级与特性，丰富抗蚜种质库，仍然是抗蚜种质资源研究的重要工作之一。其次，在抗蚜性评价标准上，尚且缺少统一的技术标准，抗性鉴定结果缺乏准确性。如有用室内蚜量比值法和田间离中率法鉴定品种抗性，也有依据瓜蚜种群数量、瓜蚜单雌产蚜数、单株蚜量比值法和瓜蚜若虫死亡率判定品种抗性水

平。也有比较室内离体叶片取食选择性和室外活体植株上的种群增长动态来确定品种的抗性水平。而结合工作实际,多种考量方式相结合的鉴定方法,则更为可靠。再次,针对抗蚜性突出的种质,应当在不同生态区域开展抗性鉴定工作,以避免不同蚜虫生物型存在差异,从而影响种质资源的鉴定结果。最后,环境因素也是影响抗性鉴定结果的原因之一,如有试验在露地进行,也有试验在设施内开展,试验结果势必存在较大误差。

6.2 抗蚜虫特性遗传关系研究

目前西瓜和甜瓜抗蚜虫特性的遗传规律研究仍缺少系统性。在遗传模式上,既有单基因显性遗传,也有单个主基因多个微效基因遗传,其遗传关系较为复杂,说明抗蚜性同时具有质量性状和数量性状遗传特征。因此,应当关注现有甜瓜*Vat*基因与抗蚜QTL的协同作用,并在育种实践中解析各类抗蚜种质抗蚜虫特性的遗传效应。

6.3 抗蚜虫基因的挖掘及功能验证

抗蚜虫基因的挖掘与功能验证是实现分子标记辅助育种的核心。当前已报道的西瓜甜瓜抗蚜虫基因数量仍然较少,仅有*Vat*基因,且对该基因功能和抗蚜虫机制解析不够深入,仍需依托多组学技术与基因编辑技术,对比分析抗蚜与感蚜材料在蚜虫侵染前后的基因表达、代谢物积累及蛋白质变化差异,筛选与抗蚜性密切相关的候选基因。同时,利用图位克隆和关联分析等方法,定位并克隆具有明确抗蚜功能的关键基因,丰富西瓜和甜瓜抗蚜基因资源库。采用基因编辑(CRISPR/Cas9)、基因过量表达、RNA干扰(RNAi)等技术,对候选基因进行功能验证,明确其在抗蚜反应中的作用机制,如调控植株防御酶活性、木质素积累和信号通路激活等,都是抗蚜虫育种的重要内容之一。与此同时,探究抗蚜基因的表达调控机制,明确启动子和转录因子对其表达的调控作用,可加速抗蚜基因的挖掘与验证进程,为基因的高效利用提供理论支撑。

6.4 育种方法

整合传统育种与分子育种技术,构建“种质筛选-基因定位-分子标记辅助选择-品种培育”的高效育种体系。利用分子标记辅助选择(MAS)技术,将已克隆的抗蚜基因或定位的QTL导入优良栽培品种,缩短育种周期;同时,利用基因编辑技术对现有主栽品种进行精准改良,可定向提升其抗蚜性。

参考文献 References

[1] 国家统计局[DB/OL].[2025-12-16].http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01
National Bureau of Statistics[DB/OL].[2025-12-16].http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm cn=C01 (in Chinese)

[2] 刘超,徐翔,伍兴隆,蔡鹏,房超,李跃建,蒲德强.2种生物防治方法对瓜蚜的防治效果[J].中国植保导刊,2021,41(9):59-61
Liu C, Xu X, Wu X L, Cai P, Fang C, Li Y J, Pu D Q. Effects of two biological control methods on *Aphis gossypii* Glover[J]. *China Plant Protection*, 2021, 41(9): 59-61 (in Chinese)

[3] 陈敏炀,梁郸娜,陈学好.瓜类作物抗蚜研究进展[J].分子植物育种,2017,15(9):3803-3810
Chen M Y, Liang D N, Chen X H. Research progress of cucurbit crops resistance to aphid[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2017, 15(9): 3803-3810 (in Chinese)

[4] 张海波,周福才,陈学好,吴晓霞,苏宏华,赵斌,张玉华,衡森,杨爱民,邬亚红.茼蒿对瓜蚜的控制作用研究[J].中国植保导刊,2017,37(9):46-49
Zhang H B, Zhou F C, Chen X H, Wu X X, Su H H, Zhao B, Zhang Y H, Heng S, Yang A M, Wu Y H. Study on controlling effect of *Chrysanthemum* coronarium on *Aphis gossypii* Glover[J]. *China Plant Protection*, 2017, 37(9): 46-49 (in Chinese)

[5] Ivanoff S S. Resistance of cantaloupes to downy mildew and the melon aphid[J]. *Journal of Heredity*, 1944, 35(2): 35-39

[6] Kishaba A N, Bohn G W, Toba H H. Resistance to *Aphis gossypii* in Muskmelon123[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1971, 64(4): 935-937

[7] Kennedy G G, Kishaba A N. Response of alate melon aphids to resistant and susceptible muskmelon Lines123[J]. *Journal of Economic Entomology*, 1977, 70(4): 407-410

[8] Bohn G W, Kishaba A N, Toba H H. Mechanisms of resistance to melon aphid in a muskmelon Line1[J]. *HortScience*, 1972, 7(3): 281-282

[9] Kishaba A N, Bohn G W, Toba H H. Genetic aspects of antibiosis to *Aphis gossypii* in *Cucumis melo* from India1[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1976, 101(5): 557-561

[10] Pitrat M, Lecoq H. Genetic relations between non-acceptance and antibiosis resistance to *Aphis gossypii* in melon. Search for linkage with other genes[J]. *Agronomie*, 1982, 2, 503-508

[11] Pitrat M, Risser G, Bertrand F, Blancard D, Lecoq H. Evaluation of a melon collection for disease resistances[C]. In: *Proceedings of the Cucurbits Towards 2000, 6th EUCARPIA meeting on Genetics and Breeding*, Mailaga: Eucarpia, 1996, 49-58

[12] Fergany M, Kaur B, Monforte A J, Pitrat M, Rys C, Lecoq H, Dhillon N P S, Dhaliwal S S. Variation in melon (*Cucumis melo*) landraces adapted to the humid tropics of southern India[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2011, 58(2): 225-243

[13] Pitrat M, Hanelt P, Hammer K. Some comments on infraspecific classification of cultivars of melon[J]. *Acta Horticulturae*, 2000(510): 29-36

[14] Dogimont C, Chovelon V, Tual S, Boissot N, Rittener V, Giovinazzo N, Bendahmane A. Molecular diversity at the *Vat*/Pm-W resistance locus in melon[C]. In: *Proceedings of the 9th EUCARPIA meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*. Avignon: EUCARPIA, 2008, 219-227

[15] 徐雪莲,张银东,符悦冠,卢芙萍,卢辉,陈青.不同西瓜品种抗蚜性鉴定[J].中国蔬菜,2013(20):82-86
Xu X L, Zhang Y D, Fu Y G, Lu F P, Lu H, Chen Q. Identification of watermelon resistance to *Aphis gossypii* glover[J]. *China Vegetables*,

2013(20)：82-86 (in Chinese)

[16] 陈艾青. 六个西瓜品种抗瓜蚜能力差异比较[D]. 北京：北京农学院，2023
Chen A Q. The resistance comparison of six watermelon cultivators against *Aphis gossypii* Glover[D]. Beijing：Beijing University of Agriculture，2023 (in Chinese)

[17] 徐丹丹，张友军，王怀松，王少丽. 瓜蚜对不同甜瓜品种的取食选择性[J]. 中国蔬菜，2018(7)：60-63
Xu D D，Zhang Y J，Wang H S，Wang S L. Feeding preference of *Aphis gossypii* glover on different melon varieties[J]. *China Vegetables*，2018(7)：60-63 (in Chinese)

[18] 齐宏娇. 厚皮甜瓜自交系LZK-0402抗蚜性的理化特性及其RAPD分析[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2009
Qi H J. Study on the physical and chemical characteristics，and RAPD analysis of Aphis Resistance in melon inbred-line "LZK-0402"[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2009 (in Chinese)

[19] 张瑞，廖新福，杨军，孙玉萍，杨英. 优质哈密瓜新品种西州密25号的选育[J]. 中国瓜菜，2012，25(3)：20-23
Zhang R，Liao X F，Yang J，Sun Y P，Yang Y. Breeding of a new Hami melon variety "xizhoumi No. 25"[J]. *China Cucurbits and Vegetables*，2012，25(3)：20-23 (in Chinese)

[20] 张瑞，孙玉萍，杨军，杨英，户金鸽，廖新福. 优质甜瓜新品种西州密17号的选育[J]. 中国瓜菜，2013，26(1)：29-31
Zhang R，Sun Y P，Yang J，Yang Y，Hu J G，Liao X F. Breeding of a high quality melon variety "xizhoumi No. 17" [J]. *China Cucurbits and Vegetables*，2013，26(1)：29-31 (in Chinese)

[21] Villada E S，Gonzalez E G，Lopez-Sese A I，Castiel A F，Gomez-Guillamon M L. Hypersensitive response to *Aphis gossypii* Glover in melon genotypes carrying the *Vat* gene[J]. *Journal of Experimental Botany*，2009，60(11)：3269-3277

[22] Bohn G W，Kishaba A N，Principe J A，Toba H H. Tolerance to melon aphid in *Cucumis melo* L 1[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*，1973，98(1)：37-40

[23] McCreight J D，Bohn G W，Kishaba A N. Pedigree of PI 414273 Melon[A]. Cucurbit Genetics Cooperative Report No. 15，1992，51-52

[24] McCreight J D，Kishaba A N，Bohn G W. AR hale's best jumbo，AR 5，and AR topmark：Melon aphid-resistant muskmelon breeding lines [J]. *HortScience*，1984，19(2)：309-310

[25] Kennedy G G，McLean D L，Kinsey M G. Probing behavior of *Aphis gossypii* on resistant and susceptible Muskmelon12 [J]. *Journal of Economic Entomology*，1978，71(1)：13-16

[26] Martin B，Rahbé Y，Fereres A. Blockage of stylet tips as the mechanism of resistance to virus transmission by *Aphis gossypii* in melon lines bearing the *Vat* gene[J]. *Annals of Applied Biology*，2003，142(2)：245-250

[27] Boissot N，Mistral P，Chareyron V，Dogimont C. A new view on aphid resistance in melon：The role of *Aphis gossypii* variability [C]. In：*Cucurbitaceae 2008，Proceedings of the 9th EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*，Avignon：EUCARPIA，2008，163-172

[28] Chen J Q，Delobel B，Rahbé Y，Sauvion N. Biological and chemical characteristics of a genetic resistance of melon to the melon aphid [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*，1996，80(1)：250-253

[29] Boissot N，Schoeny A，Vanlerberghe-Masutti F. Vat，an amazing gene conferring resistance to aphids and viruses they carry：From molecular structure to field effects[J]. *Frontiers in Plant Science*，2016，7：1420

[30] Thomas S，Dogimont C，Boissot N. Association between *Aphis gossypii* genotype and phenotype on melon accessions [J]. *Arthropod-Plant Interactions*，2012，6(1)：93-101

[31] Boissot N，Thomas S，Chovelon V，Lecoq H. NBS-LRR-mediated resistance triggered by aphids：Viruses do not adapt；aphids adapt *via* different mechanisms[J]. *BMC Plant Biology*，2016，16(1)：25

[32] Kirişik M，Ünlü M，Erler F. Evaluation of some melon lines for their resistance against melon aphid，*Aphis gossypii* Glover[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*，2020，44(3)：322-329

[33] Chikh-Rouhou H，Ben Belgacem A M，Sta-Baba R，Tarchoun N，Gómez-Guillamón M L. New source of resistance to *Aphis gossypii* in Tunisian melon accessions using phenotypic and molecular marker approaches [J]. *Phytoparasitica*，2019，47(3)：405-413

[34] MacCarter L E，Habeck D H. Melon aphid resistance in *Cucumis* spp[J]. *The Florida Entomologist*，1974，57(2)：195-204

[35] Bohn G W，Kishaba A N，McCreight J D. A survey of tolerance to *Aphis gossypii* Glover in part of the world collection of Cucumis melo L[C]. In：*Proceedings of the Cucurbits Towards 2000，6th EUCARPIA meeting on Genetics and Breeding*，Mailaga：Eucarpia，1996，334-339

[36] 徐雪莲. 西瓜抗蚜性鉴定及其机理研究[D]. 海口：海南大学，2013
Xu X L. Watermelon resistance to：*Aphis gossypii* glover[D]. Haikou：Hainan University，2013 (in Chinese)

[37] 陈青，梁晓，伍春玲，刘迎，徐雪莲. 西瓜品种'黑皮'对瓜蚜的抗性遗传分析[J]. 热带作物学报，2020，41(7)：1415-1419
Chen Q，Liang X，Wu C L，Liu Y，Xu X L. Genetic analysis of resistance of watermelon cultivars 'heipi' to *Aphis gossypii*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*，2020，41(7)：1415-1419 (in Chinese)

[38] Klingler J，Kovalski I，Silberstein L，Thompson G A，Perl-Treves R. Mapping of cotton-melon aphid resistance in melon [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*，2001，126(1)：56-63

[39] Périn C，Hagen L，De Conto V，Katzir N，Danin-Poleg Y，Portnoy V，Baudracco-Arnas S，Chadoeuf J，Dogimont C，Pitrat M. A reference map of *Cucumis melo* based on two recombinant inbred line populations [J]. *Theoretical and Applied Genetics*，2002，104(6)：1017-1034

[40] Pitrat M. Linkage groups in *Cucumis melo* L[J]. *Journal of Heredity*，1991，82(5)：406-411

[41] Baudracco-Arnas S，Pitrat M. A genetic map of melon (*Cucumis melo* L) with RFLP，RAPD，isozyme，disease resistance and morphological markers [J]. *Theoretical and Applied Genetics*，1996，93(1)：57-64

[42] Brotman Y，Silberstein L，Kovalski I，Perin C，Dogimont C，Pitrat M，Klingler J，Thompson G，Perl-Treves R. Resistance gene homologues in melon are linked to genetic loci conferring disease and pest resistance[J]. *Theoretical and Applied Genetics*，2002，104(6)：1055-1063

[43] Dogimont C，Chovelon V，Pauquet J，Boualem A，Bendahmane A. The *Vat* locus encodes for a CC-NBS-LRR protein that confers resistance to *Aphis gossypii* infestation and A *gossypii*-mediated virus resistance[J] *Plant J*. 2014，80：993-1004

[44] Pauquet J，Burget E，Hagen L，Chovelon V，Le Menn A，Valot N，Desloire S，Caboche M，Rousselle P，Pitrat M，Bendahmane A，Dogimont C. Map-based cloning of the *Vat* gene from melon conferring resistance to both aphid colonization and aphid transmission of several viruses[C]. In：*Proceedings of the 8th EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*，eds A. Olomouc：Palaky University Olomouc，2004，325-329

[45] Chovelon V，Restier V，Giovinazzo N，Bendahmane A，Dogimont C. Functional validation of the double phenotype triggered by the melon *Vat* gene by complementation experiments [C] In：*Proceedings of the 10th EUCARPIA meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*，Adana：Çukurova University，2012，506-507

[46] Acevedo F E，Rivera-Vega L J，Chung S H，Ray S，Felton G W. Cues from

chewing insects: The intersection of DAMPs, HAMPs, MAMPs and effectors [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, 26: 80-86

[47] Basu S, Varsani S, Louis J. Altering plant defenses: Herbivore-associated molecular patterns and effector arsenal of chewing herbivores[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2018, 31(1): 13-21

[48] Dangl J L, Jones J D G. Plant pathogens and integrated defence responses to infection[J]. *Nature*, 2001, 411(6839): 826-833

[49] Boissot N, Chovelon V, Rittener-Ruff V, Giovinazzo N, Mistral P, Pitrat M, Charpentier M, Troadec C, Bendahmane A, Dogimont C. A highly diversified NLR cluster in melon contains homologs that confer powdery mildew and aphid resistance[J]. *Horticulture Research*, 2024,11:1-12

[50] Boissot N, Thomas S, Sauvion N, Marchal C, Pavis C, Dogimont C. Mapping and validation of QTLs for resistance to aphids and whiteflies in melon[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2010, 121(1): 9-20

[51] Pitrat M, Maestro-Tejada MC, Ferriere C, Ricard M. Resistance to *Aphis gossypii* in Spanish melon (*Cucumis melo*)[J]. *Cucurbit Genet Coop Rep* 1988,11:50-51

[52] Sarria E, Yuste-Lisbona F J, Palomares F J, Lopez-Sese A I, Gomez-Guillamon M L. Inheritance of tolerance to Aphis gossypii in C melo TGR-1551 and its relation with resistance to virus transmission [C]. In: *Proceedings of the 9th EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*, Pitrat Avignon: INRA, 2008,459-464

[53] Garzo E, Soria C, Gómez-Guillamón M L, Fereres A. Feeding behavior of*Aphis gossypii* on resistant accessions of different melon genotypes (*Cucumis melo*)[J]. *Phytoparasitica*, 2002, 30(2): 129-140

[54] Li M Y, Guo S G, Zhang J, Sun H H, Tian S W, Wang J F, Zuo Y, Yu Y T, Gong G Y, Zhang H Y, Ren Y, Xu Y. Sugar transporter VST1 knockout reduced aphid damage in watermelon[J]. *Plant Cell Reports*, 2022, 41(1): 277-279

[55] Tsaneva M, Van Damme E J M. 130 years of plant lectin research[J]. *Glycoconjugate Journal*, 2020, 37(5): 533-551

[56] 罗青, 巫鹏举, 李晓莺, 贝盏临, 曲玲, 曹有龙. 转雪花莲凝集素酶基因枸杞对蚜虫的抑制作用[J]. 植物保护, 2007, 33(1): 65-67
Luo Q, Wu P J, Li X Y, Bei Z L, Qu L, Cao Y L. Inhibition effects of the transgenic *Lycium* plants expressing snowdrop lectin on development of aphid population[J]. *Plant Protection*, 2007, 33(1): 65-67 (in Chinese)

[57] 邓智年, 李楠, 魏源文, 吕维莉, 李杨瑞. 野苋菜凝集素基因的克隆及抗蚜性[J]. 广西师范大学学报:自然科学版, 2007, 25(1): 86-90
Deng Z N, Li N, Wei Y W, Lyu W L, Li Y R. Cloning of AVA gene from *Amaranthus viridis* and effect of aphid resistance on transgenic tobacco plants [J]. *Journal of Guangxi Normal University*:*Natural Science Edition*, 2007, 25(1): 86-90 (in Chinese)

[58] 钟俐, 李群, 李冠. 雪花莲凝集素基因转化新疆甜瓜抗蚜虫的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 556-560
Zhong L, Li Q, Li G. A study on transferring snowdrop *Galanthus nivalis* (GNA) gene in *Cucumis melo* l of Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(3): 556-560 (in Chinese)

[59] 姜瑛. 苋菜凝集素基因(ACA)转入甜瓜及其在转基因植物中的表达[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2001
Jiang Y. Transformation of muskmelon with amaranthum caudatus agglutinin (ACA) gene and studies on the gene expressing of transgenic plants[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2001 (in Chinese)

[60] 张忠, 叶恭银, 胡萃. 雪花莲凝集素抗虫作用研究进展[J]. 中国生物防治, 2003, 19(4): 197-201
Zhang Z, Ye G Y, Hu C. Research progress in insecticidal activity of agglutinin from *Galanthus nivalis*[J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2003, 19(4): 197-201 (in Chinese)

[61] 陈青, 卢芙萍, 卢辉, 李迁, 徐雪莲. 几种生化物质与西瓜抗蚜性的相关性[J]. 植物保护学报, 2016, 43(5): 858-863
Chen Q, Lu F P, Lu H, Li Q, Xu X L. The correlation between several chemical substances and watermelon resistance to *Aphis gossypii*[J]. *Journal of Plant Protection*, 2016, 43(5): 858-863 (in Chinese)

[62] Kortbeek R W J, van der Gragt M, Bleeker P M. Endogenous plant metabolites against insects[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2019, 154(1): 67-90

[63] 孙彩霞, 陈振华, 缪璐, 牛翰杰. 转基因抗虫棉花木质素含量及其生物合成关键酶活性研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2007, 28(6): 867-870
Sun C X, Chen Z H, Miao L, Niu H J. Lignin content and its activity of key metabolic enzymes in transgenic cotton [J]. *Journal of Northeastern University*: *Natural Science*, 2007, 28(6): 867-870 (in Chinese)

[64] Steppuhn A, Gase K, Krock B, Halitschke R, Baldwin I T. Nicotine's defensive function in nature[J]. *PLoS Biology*, 2004, 2(8): e217

[65] Züst T, Agrawal A A. Mechanisms and evolution of plant resistance to aphids [J]. *Nature Plants*, 2016, 2: 15206

[66] Leucht S, Burkard T, Henderson J H, Maj M, Sartorius N. *Physical Illness and Schizophrenia: A Review of the Evidence Depression and Physical Tllness*[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2007

[67] 桂连友, 刘树生, 陈宗懋. 外源茉莉酸和茉莉酸甲酯诱导植物抗虫作用及其机理[J]. 昆虫学报, 2004, 47(4): 507-514
Gui L Y, Liu S S, Chen Z M. Plant resistance to insects induced by application of exogenous jasmonic acid and methyl jasmonate[J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2004, 47(4): 507-514 (in Chinese)

[68] 苗进, 李国平, 韩宝瑜. 水杨酸和水杨酸甲酯在植物抗虫中的作用及机制研究进展[J]. 热带作物学报, 2007, 28(1): 111-114
Miao J, Li G P, Han B Y. Recent developments in effect and mechanism of salicylic acid and methyl salicylate on plant resistance to pests[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2007, 28(1): 111-114 (in Chinese)

[69] Kettles G J, Kaloshian I. The potato aphid salivary effector Me47 is a glutathione-S-transferase involved in modifying plant responses to aphid infestation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1142

[70] Shinoda T. Callose reaction induced in melon leaves by feeding of melon aphid, *Aphis gossypii* GLOVER, as possible aphid-resistant factor[J]. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 1993, 37(3): 145-152

[71] Kaloshian I, Walling L L. Hemipterans as plant pathogens[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2005, 43: 491-521

[72] Anstead J, Samuel P, Song N, Wu C J, Thompson G A, Goggin F. Activation of ethylene-related genes in response to aphid feeding on resistant and susceptible melon and tomato plants[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2010, 134(2): 170-181

[73] Sattar S, Song Y, Anstead J A, Sunkar R, Thompson G A. *Cucumis melo* microRNA expression profile during aphid herbivory in a resistant and susceptible interaction[J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2012, 25 (6): 839-848

[74] Sattar S, Addo-Quaye C, Song Y, Anstead J A, Sunkar R, Thompson G A. Expression of small RNA in *Aphis gossypii* and its potential role in the resistance interaction with melon[J]. *PLoS One*, 2012, 7(11): e48579

[75] Vandenborre G, Smagghe G, Van Damme E J M. Plant lectins as defense proteins against phytophagous insects[J]. *Phytochemistry*, 2011, 72(13): 1538-1550

[76] Li Y P, Fan H F, Si Y Y, Guo Y T, Wu Z M, Du C X. The phloem lectin PP2-A1 enhances aphid resistance by affecting aphid behavior and maintaining ROS homeostasis in cucumber plants[J]. *International Journal*

of Biological Macromolecules, 2023, 229: 432-442

[77] Zebelo S A, Maffei M E. Role of early signalling events in plant-insect interactions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(2): 435-448

[78] Sharma H C, Sharma K K, Seetharama N, Ortiz R. Prospects for using transgenic resistance to insects in crop improvement[J]. *Electronic Journal of Biotechnology*, 2000, 3(2): 21-22

[79] Walling L L. The myriad plant responses to herbivores[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2000, 19(2): 195-216

[80] Koch K G, Palmer N A, Donze-Reiner T, Scully E D, Seravalli J, Amundsen K, Twigg P, Louis J, Bradshaw J D, Heng-Moss T M, Sarath G. Aphid-responsive defense networks in hybrid switchgrass[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 1145

[81] Sakata Y, Oyabu T, Yabe K, Sugiyama M, Morishita M, Sugahara S, Saito T. Development of an earl's-type melon, 'Earl's kagayaki', with resistance to cotton-melon aphid, powdery mildew and *Fusarium* wilt[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*: *JARQ*, 2006, 40(2): 177-181

责任编辑：董金波



第一作者简介：王志强，副研究员。从事西瓜甜瓜育种和栽培等方面研究。主持宁夏自然科学基金和自治区重点研发项目等课题10余项；以第一作者身份在《西北农业学报》《东北农业大学学报》《植物遗传资源学报》、*Plant Genetic Resources*: *Characterization and Utilization*等期刊发表学术论文20余篇。选育西瓜甜瓜品种获得非主要农作物品种登记11项，植物新品种权保护3项；参与出版学术专著3部；获得省部级奖项2项。