DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0196

主要瓜类作物白粉病发生规律及防控措施研究进展

于洪野,赵庆屹,赵　薇,张思宁,佟雪姣,高　鹏,蒋欣梅,程　瑶

(东北农业大学园艺学院　哈尔滨　150030)

摘　要:本文围绕西瓜、甜瓜、黄瓜和南瓜4种主要瓜类作物的白粉病,系统梳理了病原菌组成与生理小种分化特点、发病流行规律及核心诱因,同时总结了农业、生物、化学三大类防控技术的研究进展。现有研究表明,棚室长期处于病菌适宜温度、植株枝叶郁闭不透风、田间病菌持续积累是白粉病频繁暴发的核心原因。化学药剂目前仍是快速防控白粉病的重要手段,但全年高频用药会显著加剧病菌抗药性风险。生产上需以不同作用机制的药剂轮换使用为核心,配合合理复配、减量增效与抗性监测,同时提前落实通风控密、清洁菌源、生防诱抗等措施,构建"降菌源-控环境-稳药效-减压力"的综合防控体系,为瓜类白粉病绿色防控提供参考。

关键词:瓜类作物;白粉病;生理小种;发生规律;综合防控

中图分类号:S642+S651+S652　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1673-2871(2026)10-001-09

Research progress on the occurrence and control of powdery mildew in major cucurbit crops

Yu Hongye, Zhao Qingyi, Zhao Wei, Zhang Sining, Tong Xuejiao, Gao Peng, Jiang Xinmei, Cheng Yao

(*College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China*)

Abstract: Powdery mildew is one of the most common and destructive foliar diseases of cucurbit crops, including watermelon, melon, cucumber and pumpkin. It spreads rapidly, causes repeated infections and often leads to premature leaf senescence, thereby reducing yield and fruit quality. This review summarizes recent progress in the study of powdery mildew in major cucurbit crops, with emphasis on pathogen composition, physiological race differentiation, epidemic characteristics, major driving factors and integrated control strategies. Current evidence indicates that frequent outbreaks are closely associated with prolonged greenhouse conditions favorable for pathogen development, dense canopies with poor ventilation and the continuous accumulation of inoculum in the field. Chemical fungicides remain important for rapid disease suppression; however, frequent applications throughout the year can accelerate the development of fungicide resistance. Therefore, sustainable management should be based on the rotation of fungicides with different modes of action, rational mixtures, dose reduction, efficacy improvement and resistance monitoring. These measures should be integrated with cultural practices such as ventilation improvement, planting density regulation, sanitation, biological control and induced resistance. Overall, an integrated management strategy characterized by "reducing inoculum sources, regulating the environment, stabilizing fungicide efficacy and lowering selection pressure" can provide a practical basis for the green and sustainable control of powdery mildew in cucurbit crops.

Key words: Cucurbit crop; Powdery mildew; Physiological race; Occurrence pattern; Integrated disease management

瓜类作物(西瓜、甜瓜、黄瓜、南瓜等)在我国设施与露地生产中占据重要地位,而白粉病因传播快、易反复侵染、主要危害功能叶片并导致植株早衰,已成为限制瓜类作物稳产优质的常发性病害。该病害可造成叶片光合能力下降、坐果能力减弱及果实商品性降低,严重时可导致明显减产。甜瓜生产中减产幅度一般为10%~40%[1]。该病害在设施条件下更易流行,一方面与病原菌专性寄生、分生孢子易随气流扩散且孢子萌发不依赖叶面游离水等生物学特性有关,另一方面也受设施温湿环境、

收稿日期:2026-03-10;**修回日期:**2026-05-29

基金项目:黑龙江省重点研发项目(GA23B007);东北农业大学大学生创新训练计划(202510224059)

作者简介:于洪野,男,在读本科生,研究方向为蔬菜栽培与生理及药食同源类植物的开发利用。E-mail:1678482998@qq.com

通信作者:蒋欣梅,女,教授,研究方向为蔬菜栽培与生理、药食同源类植物(含山野菜)的开发利用。E-mail:jxm0917@163.com

程　瑶,女,讲师,研究方向为蔬菜栽培与生理。E-mail:chengyao@neau.edu.cn

通风透光、栽培密度与肥水管理等因素共同驱动。当前生产上仍主要依赖化学药剂防治白粉病，但在周年种植与频繁用药背景下病原菌抗药性上升迅速，叠加不同地区与寄主间群体差异和生理小种分化，导致防控效果波动并增加防治难度。因此，笔者从病害症状、病原特性、发病规律和综合防控技术等方面进行综述，以期为瓜类白粉病绿色高效综合防控提供参考。

1 主要瓜类作物白粉病病害症状

瓜类白粉病主要危害叶片，也可侵染叶柄和茎蔓。发病初期，叶片表面出现近圆形或不规则的白色粉状小斑，部分作物常从下部老叶开始发生；在种植密度过大、通风透光不良等条件下，病害更易发生并加速扩展。随着病情发展，白粉斑逐渐扩大并相互融合，形成连续的白色粉层；发病严重时，叶片失绿、黄化、卷曲并逐渐干枯，功能叶片提前衰退，植株出现早衰现象，进而影响光合作用及产量形成[2-4]。

从田间症状来看，西瓜、甜瓜、黄瓜和南瓜白粉病的发病过程总体相似，通常表现为早期叶片出现点状或近圆形白色粉斑，随后病斑逐渐扩大并相互融合，形成连续白粉层，严重时可由叶片扩展至叶柄和茎蔓。西瓜白粉病多从下部老叶始发，初期叶片可出现褪绿黄斑，随后形成明显白色粉霉层；甜瓜和黄瓜设施栽培中叶片正面或背面均可受侵染，严重时叶片黄化、卷曲并早衰；南瓜多在生育中后期加重，病叶黄化、卷曲和干枯更为明显[3-6]。因此，白粉病症状识别的关键在于早期白粉斑出现、白粉层扩展以及功能叶片早衰等连续变化的精准把控。

2 主要瓜类作物白粉病病原特性

2.1 病原菌种类

西瓜、甜瓜、黄瓜、南瓜等瓜类作物白粉病是一类发生普遍、危害较重的真菌性病害，在设施和露地栽培中均可发生，设施栽培条件下发生更为突出。白粉病菌属于子囊菌门（Ascomycota）盘菌亚门（Pezizomycotina）锤舌菌纲（Leotiomycetes）白粉菌目（Erysiphales）真菌，白粉菌目仅包含白粉菌科（Erysiphaceae）[7]。瓜类白粉病病原种类因地区、寄主和栽培环境不同而存在差异，目前我国在主要瓜类作物上报道较多、危害较重的病原主要为单囊壳白粉菌 *Podosphaera xanthii*（*P. xanthii*）和二孢白粉菌 *Golovinomyces cichoracearum*（*G. cichoracearum*）。其中，*P. xanthii* 属于单囊壳属（*Podosphaera*），*G. cichoracearum* 属于戈洛文白粉菌属（*Golovinomyces*），二者均为白粉菌科专性寄生真菌，是引起瓜类白粉病发生和流行的重要病原类群[8]。

2.2 病原特性

白粉病菌通常具有专性活体寄生特征，侵染后多在寄主叶片、叶柄和茎蔓表面形成外生菌丝，并通过吸器与寄主表皮细胞建立营养联系，从中吸收营养，吸器在营养获取和致病过程中具有重要作用[9]。病部表面可产生大量分生孢子，形成典型白色粉状霉层；分生孢子主要随气流传播，在适宜温湿度和寄主连续存在条件下可完成多次再侵染，这是瓜类白粉病扩展快、易反复发生的重要生物学基础[2-3,5-6,8]。相较而言，*P. xanthii* 在我国瓜类作物上发生更普遍，寄主范围广，生理小种分化复杂，是当前瓜类白粉病抗性鉴定、抗病育种和抗药性治理中关注较多的优势病原；*G. cichoracearum* 在部分地区和寄主上亦可引起白粉病，但整体报道频度和优势程度低于 *P. xanthii*[8-11]。从形态特征看，*P. xanthii* 分生孢子多呈椭圆形并具纤维状体，而 *G. cichoracearum* 分生孢子多呈细长圆柱形且无纤维状体，这些特征可作为病原初步鉴别的重要依据[11]。

2.3 生理小种分化

生理小种是病原菌种内具有特定致病特性的分化类群，也是抗性易失效与品种表现不稳定的重要原因。二孢白粉菌有 2 个生理小种，分别为小种 0 和 1，单囊壳白粉菌可分化为 11 个生理小种：小种 N1、N2、N3、N4、0、1、2US、2France、3、4 和 5[8]。生理小种分化是抗原利用效果不稳定和抗病品种易失效的重要原因之一。在我国，不同瓜类作物上的白粉病菌群体及其生理小种构成具有明显地域差异。在西瓜方面，北京、上海、宁夏、新疆、海南和黑龙江等地均已有白粉病菌生理小种鉴定的报道。北京和海南地区检出小种 1 和 2France，其中 2France 为优势小种[9,12]；上海地区西瓜、甜瓜上存在小种 1 和 2France，且小种 1 为优势小种[13]；宁夏西瓜、甜瓜主栽区的白粉病菌均被鉴定为小种 1[10]；新疆北疆地区以小种 1 为主，而南疆部分籽用西瓜产区检出小种 5[14]；黑龙江省葫芦科作物中还鉴定到小种 1、N1 及新生理小种[15]。甜瓜上已报道多种生理小种，小种 2France 在陕西产区发生[16]；小种 1 在多地高频出现，北京[9]、江浙沪[13,17-18]、吉林[19]、山东[20]、湖北[21]及宁夏[10]等地均有相关报道；新疆[14,22]与甘肃[23-24]等地报道的小种类型相对多样，表明不

同产区病原群体分化较为明显。黄瓜上已有研究人员在北京[9]、陕西[16]等地检测到以 1 和 2France 为主的群体结构。南瓜白粉病菌群体以 *P. xanthii* 的 2France 小种报道最为集中，北京[9]、黑龙江[25-27]、陕西[16]、湖南[28]、云南[29]及海南[12]等地均有检出；内蒙古等地除 2France 外，还存在 2US、4 与 1 等小种共存现象[30-31]，以上结果说明部分地区群体分化更为复杂。因此，明确当地白粉病菌的种类和优势生理小种，是开展抗病品种筛选、抗原利用和区域化防控的重要前提。

综合已有报道，2France 在我国北京、海南、上海、陕西、江苏等西瓜、甜瓜和黄瓜产区均有检出，在北京和海南部分瓜类样本中可表现为优势小种；此外，在黑龙江、湖南、云南、陕西、海南等南瓜或籽用南瓜产区也多有检出，提示 2France 已成为我国多种瓜类作物白粉病菌群体中需要重点监测的小种类型之一。

总体来看，瓜类白粉病病原以单囊壳白粉菌和二孢白粉菌为主，其中单囊壳白粉菌 *P. xanthii* 在我国主要瓜类作物上的报道更普遍、危害更突出。两类病原均具有专性活体寄生、寄主体表生长、通过吸器获取养分等共同特征，病部表面形成的菌丝和分生孢子构成典型白色粉状霉层，因此生产上常称为“白毛”或“白粉”。

3　主要瓜类作物白粉病发病规律

从流行规律看，主要瓜类白粉病对温度的反应具有一定共性。多数研究认为，分生孢子可在较宽温度范围内萌发，其中 20~25 ℃通常较适宜白粉病菌分生孢子萌发、侵染和病斑扩展[27-28,31]。与多数叶部真菌病害不同，白粉病菌孢子萌发对叶面游离水依赖较低，一般不需要形成自由水膜即可完成侵染，在空气湿度适中、干湿交替且通风不良的环境条件下更有利于分生孢子传播和病害流行[5-6,32]。在栽培管理方面，设施内植株郁闭、种植密度过大、氮肥偏施、光照不足、通风排水不良以及植株长势衰弱等，均可加重田间病情并提高再侵染风险；同时，植株矿质营养状况也会影响白粉病的发生程度[4,6,33]。

从环境因子看，温度、空气湿度、昼夜干湿变化和植株群体结构共同影响白粉病发生程度[6,32]。已有研究表明，*P. xanthii* 分生孢子萌发和芽管形成受温度与空气水汽压差共同影响，25~28 ℃及较低水汽压差条件下更有利于分生孢子萌发和侵染结构形成；在相对较干条件下，分生孢子虽仍可形成初生芽管，但侵染效率和病程推进速度可能下降[34]。因此，设施内通风不良、群体郁闭、昼夜温湿度波动明显、氮肥偏施和植株长势衰弱等因素，往往会共同促进白粉病流行[6,32]。

瓜类白粉病菌的侵染循环通常包括菌源保存、初侵染、分生孢子传播和多次再侵染等环节[2-3,6,34]。在北方低温地区，病菌多以菌丝体或闭囊壳形式在病残体上越冬，翌年条件适宜时成为初侵染来源；在南方温暖地区或设施周年栽培条件下，病菌可在连续种植的寄主、病株或田间杂草上以菌丝体和分生孢子形式持续存活，从而实现越冬、越夏或周年循环[3,5,32]。初侵染发生后，病部表面形成白粉层并产生大量分生孢子，分生孢子主要借气流传播，也可随设施内空气流动、农事操作、植株扰动和病叶移动在田间扩散[2-3,6]；在适宜温湿度和寄主连续存在条件下，病菌可在一个生长季内连续产生多代分生孢子并造成多次再侵染，这是白粉病扩展快、防治后易反复的重要原因[2-3,6,34]。

虽然各种瓜类作物白粉病有相似之处，但不同瓜类作物在主要病菌种类、易感时期、发病时间上仍有区别。以甜瓜为例，白粉病主要由单囊壳属和白粉菌属两大类病原菌引起，其中单囊壳白粉菌在多数地区发生更普遍、危害更重。山东地区调查显示，单囊壳属 1 号生理小种为优势小种，这提示当地在抗病品种评价和防控策略制定中应关注优势小种[20]。国内该病高发期为 5—6 月和 9—10 月，设施及地膜栽培发病重于露地；重茬、种植过密、通风透光差等因素，会加重病害发生与蔓延[3]。甜瓜从苗期到结果期均可能发病，但进入结瓜及果实成熟阶段，植株抗病能力往往下降，病情更易由下部老叶起始并快速向上蔓延，导致功能叶片提前早衰枯死，对产量与商品品质造成持续影响。在甜瓜不同类型中，网纹甜瓜在设施栽培中表现出发病快、扩散快的特点。当相对湿度维持在 90%~95%且伴随干湿交替时，病情发展通常更快。侵染后约 20 h 即可萌发，5~6 d 出现可见病斑，且叶片正面比背面更容易先发病[5]。不同地区越冬方式亦有差异，低温区以菌丝或闭囊壳越冬，温热湿润区可由菌丝与分生孢子共同越冬，从而造成初侵染来源、始发期与高峰期不尽一致[5]；如武威日光温室甜瓜多见于晚春、早秋及夏季湿度较低时段[35]，南京设施甜瓜常在 5 月下旬至 6 月上旬始发，6 月下旬达到高峰[36]。国外已有研究将 *P. xanthii* 引起的白粉病视为西瓜及其他瓜类作物的重要限制因子，并围绕西瓜抗病种

质、抗性位点和抗病信号通路开展了转录组与重测序研究，可为我国西瓜白粉病抗原利用和分子标记辅助育种提供借鉴[37]。

黄瓜白粉病发生范围广，在设施栽培条件下发生期长，可持续危害。病原同样为专性活体寄生真菌，分生孢子可随气流传播并侵染叶片表皮。设施内温湿度条件相对稳定，叠加植株群体密集、通风透光不足、肥水管理不当等因素，通常使病害发生早、扩展快、持续时间长，防控难度高于露地栽培[6,32,38]。区域分布方面，华北地区温室黄瓜多在4－5月病害高发，拱棚黄瓜多在5月底至6月开始发病，7－8月进入高发期，露地则集中于6－8月发病，秋茬黄瓜发病相对较轻[6]；南北方棚室均可能出现持续危害，寒冷地区则更多以闭囊壳随病残体在土壤中越冬，成为第二年的初侵染来源[32]。因此，黄瓜白粉病防控应强调全生育期连续管理，通过棚室小气候调控、合理轮作、及时清洁田园与科学用药等措施协同降低病害压力[6,32,38]。

南瓜白粉病的特点是整个生育期都能发病，以生长中后期发病最重[39]，主要危害叶片，病斑扩大连片，形成厚厚的白粉层后，会造成叶片发黄、干枯、卷曲，从而导致减产、品质下降。从发病规律来看，多地田间观察显示出明显的季节性：苗期到成株期均可发病，湖南地区一般5月下旬前后出现首批病株，6月病情缓慢发展；到7月中下旬，遇到干湿交替、通风不良等条件时，病害易快速暴发[4]。因此，南瓜白粉病的防控重点，应放在保护中后期的功能叶片上，避免在果实膨大期和采收前后叶片快速干枯衰败。

总的来说，主要瓜类作物白粉病的共同特点是病原菌专性寄生，在植株表面生长并主要依靠气流传播，在棚室温湿度适宜、植株群体郁闭和菌源持续积累等条件下，容易发生多次再侵染并持续流行。不同瓜类作物之间的差异，主要体现在优势病原菌种类、易感生育期以及不同产区的发病高峰时间等方面。因此，生产上应将共同发病规律落实到棚室温、湿、光、风及植株群体管理中，并针对不同作物的关键易感时期提前预防，才能在减少化学农药使用的前提下，将白粉病发生风险控制在绿色生产允许的范围内。

4 主要瓜类作物白粉病综合防控

4.1 农业防治

农业防治是通过农业管理手段和栽培技术，如选用抗病品种、加强栽培管理等方式，创造出适宜作物生长的环境，以降低白粉病的发病率。现有研究与生产经验可以总结为4个方面：源头减菌与健康种苗、设施环境消毒与微气候调控、种植制度优化、土肥水与设施条件改良。

第一，源头减菌，培育健康种苗，是降低白粉病早期发生风险的基础。生产上应重点强调抗病或耐病品种利用、健康种苗培育和苗床清洁管理。已有研究表明，选用抗病品种、合理密植、改善通风透光、科学水肥管理和清除病残体等措施，有助于降低瓜类白粉病发生风险[2,32]。由于瓜类白粉病病菌可在寄主残体或连续存在的寄主上保存菌源，且分生孢子可随气流扩散，育苗和定植前后宜通过使用清洁基质、及时清除病叶和病残体、防止苗床郁闭、改善通风透光等措施降低早期菌源压力[2-3,32]。育苗前应做好种子消毒和育苗基质处理，以降低苗期病害发生风险。播种前可通过晒种、药剂浸种等方式减少种子表面病菌，促进发芽；育苗时宜采用营养杯或穴盘育苗，选用疏松、肥沃、无病虫和杂草种子的清洁基质，避免使用多年菜园土或连作瓜类土壤。必要时可对营养土进行药剂处理或使用无菌基质，以减少白粉病等真菌性病害的发生，为培育健壮瓜苗创造条件[40-41]。

第二，在设施栽培中，做好环境消毒和环境调控，是农业防治中最实用、最有效的办法，核心是利用物理方法阻断病菌再次传播。已有研究显示，高温与紫外线可显著抑制病害，如温室条件下约45 ℃配合通风持续2~3周可有效抑制甜瓜白粉病发生[42]；高温闷棚（约45 ℃、湿度70%、处理4 h）对白粉病防控也取得较好效果（防效77.25%）[43]。曹莹等[35]通过采用不同时间、不同频次、不同器械喷施清水试验，发现用弥雾机于下午关风口后每天喷施清水1次，连喷7 d对甜瓜白粉病的防效最佳。在紫外线利用方面，可在拱棚/露地条件下每周2次UV-C（254 nm，短波紫外线技术）处理对白粉病控制效果突出，接近药剂防效[44]。此外，在温室黄瓜上，夜间短时补充UV-B也可显著抑制白粉病发生，其抑菌效果还会受到背景光质的影响，说明光谱调控可作为设施白粉病物理防控的重要补充[45]。这些结果都证明了通过温湿度与光环境调控削弱病原适生性，是设施农业中降低病害压力的重要路径[42-45]。

第三，优化种植制度，主要是通过减少病菌积累、改善田间通风透光条件、降低病害发生和流行的可能。轮作、间作、合理密度与播期等栽培措施

调整都属于种植模式的优化。如利用毛叶苕子、三叶草、小麦3种作物分别与黄瓜进行间作，白粉病的病情指数均极显著低于黄瓜单作[46]；菜豆、芹菜与甜瓜轮作亦可显著降低白粉病的发病率[47]。因此，农业防治不应只停留在“发生后处理”，更应结合当地发病规律与气候特征，通过播期与茬口安排尽量避开高风险窗口期。

第四，改善土壤、水肥管理和设施条件，目的是让植株长势健壮，同时创造不利于病菌发生的环境。北方春耕前的翻耕与土壤处理有助于降低设施连作风险；玉米秸秆配合微生物菌剂用于设施黄瓜土壤修复，可降低病情指数并延缓病情发展[48]。部分土壤改良剂投入也显示出一定抑病效果，如温室黄瓜土壤中添加0.2~0.8 $g \cdot kg^{-1}$硫磺粉在一定范围内可降低白粉病发生率（防效14.28%~54.08%），且对土壤环境影响不显著[49]。黄瓜在水肥管理上对白粉病的影响呈现阶段性，且叶面喷施营养盐类的抑病效果通常优于随水施用：育苗期，灌溉水中N、Mg含量偏高可减轻发病率，而P含量处于中等水平且K含量偏高时更易加重白粉病病情；进入结果期，在N含量偏高、P含量偏低、K含量较高的条件下发病相对较轻。全生育期可配合叶面喷施KH_2PO_4、杂卤石等盐类以持续抑菌，且喷灌施肥效果优于滴灌[33]；南瓜应避免N、P、K偏施并适当补硅以降低发病率[4]。此外，设施结构与覆盖材料也会通过改变光环境影响发病，透光率更高的覆盖膜可显著降低黄瓜白粉病发生率[50]。

综上，农业防治是白粉病综合防控的基础措施。从源头减少病菌、调控环境、优化种植模式，降低初始发病量，为后续生物防治和必要时的药剂防治打下基础，让防治更稳定、用药更少。

4.2　生物防治与绿色替代

生物防治因环境友好与可持续性优势，在瓜类白粉病绿色防控中应用前景广阔。现有研究的绿色替代资源可归纳为三类：微生物制剂（以芽孢杆菌为代表）[51-54]、植物源药剂[55-56]和其他天然产物[57]，整体来看，生物防治更适用于作为预防与病害初现阶段的防治手段，用于压低侵染基数，减少化学农药使用频次。

微生物制剂中，芽孢杆菌类在西瓜、甜瓜、黄瓜和南瓜中的研究较为集中且防效相对稳定。甜瓜生产中，利用设施土壤筛选的枯草芽孢杆菌经诱变并复配制成复合微生物菌肥，可用于白粉病防控[52]；解淀粉芽孢杆菌发酵产物对甜瓜白粉病防效可达80%[53]。西瓜上，复合菌剂FH改良效果最优，可显著提升土壤养分含量、酶活性及有益微生物丰度，大幅增强西瓜光合能力，并提升产量和改善品质，同时白粉病病情指数下降38.86%[58]。黄瓜上，枯草芽孢杆菌按一定剂量与次数施用可取得74.83%的防效[51,59]。研究表明，在温室黄瓜上，枯草芽孢杆菌、多黏副芽孢杆菌和黏质沙雷菌及木霉类生防菌也均表现出较好的抑菌效果，并可同步改善植株生长和产量性状[60]。南瓜上，利用抗病材料筛选内生拮抗菌，从高抗白粉病南瓜中获得的蜡样芽孢杆菌对白粉病菌孢子萌发抑制率达88.65%，叶盘与盆栽防效分别为79.58%和83.21%，发酵原液防效为82.14%[54]。此外，枯草芽孢杆菌、短小芽孢杆菌和哈茨木霉等生防菌在南瓜/西葫芦上也能显著降低白粉病发病程度，并伴随CAT、POX和PPO等防御酶活性升高[61]。相较而言，木霉菌、寡雄腐霉等真菌制剂以及白粉寄生菌也有应用报道[62-63]，但田间效果受环境与病程影响较大，往往更适合作为体系化防控的补充措施。

在天然产物与植物源药剂方面，发酵液与植物提取物普遍更适合预防白粉病发生。灵芝药渣厌氧发酵液对黄瓜白粉病预防效果达94.74%，治疗效果为66.67%[64]；植物源药剂中，0.3%丁子香酚可溶液剂与0.1%大黄素甲醚水剂对黄瓜白粉病具有较好防效[55]；蛇床子乙醇提取物对南瓜与黄瓜白粉病的保护与治疗效果分别达87.57%与86.80%，部分情况下优于三唑酮[56,59]。

综合来看，生物防治和绿色防控技术，应仅作为白粉病综合防控的前期关键措施，优先在育苗期和发病初期使用；已有温室试验表明，不同替代产品之间防效差异较大，合理筛选植物源制剂与助剂组合，并优化施用间隔，是将绿色替代措施纳入IPM（有害生物综合防治）的关键[65]。到了发病高峰期，只靠生物防治，效果通常不够稳定，需要配合农业防控措施，再结合精准用药、轮换用药、延缓抗药性等方法，形成“以绿色防控为主、化学防治兜底”的防控模式。

4.3　化学防治与抗药性治理

目前瓜类作物白粉病在设施栽培中全年都能发生，用药次数多，生产上仍以化学杀菌剂快速控制病情为主。但长期用药带来的高选择压力，让病菌抗药性上升较快。

近年药剂试验显示，多种单剂和复配药剂在甜瓜和黄瓜生产上防效都较好。其中，肟菌•戊唑醇

与苯醚甲环唑交替施用，可有效防控西瓜白粉病[66]；50%苯醚甲环唑•硫磺水分散粒剂田间应用效果突出，每 667 m^2 施用 80 g 时，2 次施药后 7 d 防效为 70.81%，4 次施药后 7 d 防效可达 83.28%，整体防效优于苯醚甲环唑、硫磺单剂，生产中推荐稀释 900~1200 倍液喷雾使用[67]。氟菌•肟菌酯在拱棚甜瓜上的防效可达 93.41%[62]；64%多抗•乙醚•丙乳油对甜瓜白粉病防效为 82.6%[68]；42%苯菌酮与 400 $g \cdot L^{-1}$ 氯氟醚菌唑在甜瓜上使用安全，且第 2 次施药后 14 d 防效分别为 82.9%和 96.9%，持续性较好[36]。24%氟茚唑菌胺•四氟醚唑悬乳剂在 900~1200 $mL \cdot hm^{-2}$ 用量下对黄瓜白粉病的防效分别为 84.65%和 87.30%[69]。在三唑类等内吸性药剂中，40%氟硅唑在南瓜白粉病发病初期防治效果突出，2 次施药后防效分别达 95.69%与 80.85%，显著优于三唑酮[70]。在新型药剂中，30%氟苯醚酰胺悬浮剂在 415.5、499.5 $mL \cdot hm^{-2}$ 用量下药后 7 d 对黄瓜白粉病防效分别为 83.31%和 86.07%[71]。采用药剂复配，既能保证防效，又能降低抗药性风险。嘧菌酯与戊唑醇按 1∶2 复配防效随剂量提高而提升，对黄瓜白粉病防效在 70.99%~83.82%[72]；29%吡萘•嘧菌酯减量并配合助剂使用后，仍能维持 86.59%防效且兼具增产效应[73]，这也表明了在不减防效的前提下，适当减少用药量，再搭配助剂或优化药剂配方是完全可行的。

随着化学农药施用量及施用频次的增加，白粉病菌的抗药性风险逐渐升高，抗药性治理已成为化学防治能否持续应用的关键。监测显示，西班牙瓜类白粉病菌对啶酰菌胺与氟吡菌酰胺的抗性比例分别达 37.9%和 44.0%，抗性与 SdhC 亚基 A86V、G151R 突变相关，并已建立 LAMP 快速检测方法，提醒这类药剂要在抗性管理体系下规范、谨慎使用[74]。类似地，在温室黄瓜白粉病菌中，QoI 类（醌类外部抑制剂）药剂连续施用也显示出较高抗性风险，有研究在连续 9 次施药后即检出稳定抗性分离物，且部分抗性与 *Cyt b* 基因 G143A 突变有关[75]。国内研究也发现，黄瓜白粉病菌对甲基硫菌灵已产生抗性（平均 EC_{50} 为 2.89 $\mu g \cdot mL^{-1}$），且高抗菌株在无药环境下竞争力下降，说明停用或减少用药后，抗性水平可能自然下降[76]。因此，目前较为可行的抗药性治理策略是在发病初期以 3~4 种不同作用机制药剂交替或者轮换使用，必要时采用合理复配并控制施药次数与间隔（如间隔 7 d 连喷 2 次）来稳定防效并延缓抗药性发生[77-78]；同时，采用低抗性风险的诱抗剂等替代措施也越来越受重视。例如 $KHCO_3$ 通过 HCO_3^- 诱导植株抗氧化与抗病相关代谢，提高自身免疫，减轻白粉病发生，为减少传统化学农药用量及延缓抗药性提供了补充路径[1]。

国外研究在瓜类白粉病绿色防控和抗药性治理方面具有一定的借鉴意义。一方面，针对西瓜、黄瓜、甜瓜等瓜类作物的研究已从单纯病害识别和药剂筛选逐步扩展到抗性位点解析、抗性信号转导、光环境诱抗和病害预测等方面；例如，西瓜抗白粉病材料的转录组与重测序研究为抗原利用和分子标记开发提供了依据[34]，UV-B 处理可通过诱导黄瓜局部抗性减轻白粉病发生[37]，而温度和水汽压差对 *P. xanthii* 分生孢子萌发及芽管形成的影响研究也为病害风险预测模型构建奠定了基础[79]。另一方面，国外对 *P. xanthii* 抗药性风险和环境因子驱动流行的研究提示，设施瓜类白粉病防控应从单纯依赖化学药剂转向“抗病品种-健康栽培-绿色替代-精准轮换用药-抗性监测”相结合的综合治理模式[34,74,79]。

5 结论与展望

5.1 结论

瓜类作物白粉病是影响西瓜、甜瓜、黄瓜和南瓜等作物稳产优质的重要叶部病害。不同地区和不同瓜类作物上的白粉病菌群体存在明显差异，生理小种分化复杂，小种 1 和 2France 等在多个产区均有报道，说明区域化病原监测对抗病品种筛选和精准防控具有重要意义。

从发生规律看，瓜类白粉病具有传播快、再侵染频繁和设施条件下易持续流行等特点。病害发生受病原菌生物学特性、寄主生育阶段、设施小气候和栽培管理措施共同影响。温暖适宜的温度条件、干湿交替环境、植株群体郁闭、通风透光不良、氮肥偏施、重茬连作以及田间菌源持续积累，均可促进白粉病发生和蔓延。因此，白粉病防控不能单纯依赖发病后的药剂处理，而应将抗病品种利用、田园清洁、合理密植、通风控湿、平衡施肥、生物防治和科学用药等措施有机结合，构建以“降菌源、控环境、稳药效、减压力”为核心的综合防控体系。

目前，化学药剂仍是生产上快速防治白粉病的重要手段，但长期高频、单一用药会加速病原菌抗药性产生，导致防效下降和治理难度增加。生物防治、植物源药剂、天然产物、诱抗剂以及光环境调控等绿色防控措施具有较大的应用潜力，但其田间稳定性、适用时期和配套技术仍需进一步优化。总体

来看，未来瓜类白粉病防控应从单一药剂防治转向“病原监测-抗病育种-健康栽培-绿色替代-精准用药-抗性治理”相结合的综合治理模式。

5.2　展望

第一，加强瓜类白粉病病原生物学与群体遗传研究。未来需进一步明确不同生态区、不同寄主作物和不同栽培模式下白粉病菌的优势种类、生理小种组成及其动态变化规律，建立连续化、区域化的病原监测体系。同时，应结合基因组学、转录组学和群体遗传学手段，解析 *P. xanthii* 等优势病原的致病机制、寄主专化特征及小种分化的遗传基础，为抗原利用和抗病机制研究提供理论支撑。

第二，完善病害发生规律研究与预测预警体系。瓜类白粉病的流行受温度、湿度、光照、通风、栽培密度和菌源基数等多因素共同驱动。后续研究应围绕设施小气候与病害流行之间的定量关系，构建适用于不同瓜类作物和不同产区的病害预测模型。尤其应加强对温湿度变化、空气水汽压差、昼夜干湿交替和植株冠层结构等关键因子的研究，形成可服务生产的早期预警和精准防控技术。

第三，加快抗病种质挖掘与分子育种应用进程。抗病品种是瓜类作物白粉病绿色防控的基础，但目前不同抗原对不同生理小种的抗性稳定性仍存在差异。未来应加强西瓜、甜瓜、黄瓜和南瓜抗白粉病种质资源的系统鉴定，挖掘广谱、稳定、可聚合利用的抗病基因和 QTL，开发紧密连锁的分子标记，推进分子标记辅助选择、基因聚合育种和抗病材料创制，提高抗病品种在不同产区和不同小种背景下的应用稳定性。

第四，构建绿色防控与抗药性治理协同体系。针对设施瓜类作物周年栽培和高频用药导致的抗药性风险，应加强常用杀菌剂敏感性监测和抗性机制研究，明确不同药剂类型的抗性风险等级，指导生产中科学轮换和合理复配。同时，应进一步筛选和评价生防菌剂、植物源药剂、诱抗剂、天然产物、紫外光调控和设施环境调控等绿色替代技术，明确其最佳使用时期、作用机制和配套模式，形成以农业防治为基础、生物防治为补充、化学防治为应急保障的综合防控体系，从而实现瓜类作物白粉病减药控害和绿色可持续治理。

参考文献

[1] 于晓野.喷施 $KHCO_3$ 对甜瓜白粉病的防效研究[D].山东泰安：山东农业大学，2022.

[2] 甘露，马含月，高京草，等.瓜类蔬菜白粉病抗性诱导及抗性遗传研究进展[J].中国瓜菜，2021，34(3)：1-6.

[3] 刘欣，程瑞，徐兵划，等.西瓜抗白粉病研究进展[J].中国瓜菜，2024，37(11)：1-9.

[4] 黎豪，龚诗琦，宋慧娟，等.南瓜白粉病研究进展[J].中国瓜菜，2021，34(2)：8-11.

[5] 王洪伟.基于气敏传感技术检测的网纹甜瓜白粉病预警研究[D].长春：吉林农业大学，2023，48.

[6] 张云玲.黄瓜染色体片段替换系对灰霉病和白粉病抗性的初步鉴定[D].山东泰安：山东农业大学，2022.

[7] 唐淑荣，管观秀，刘淑艳.中国白粉菌目分类学研究现状[J].菌物研究，2018，16(3)：138-149.

[8] 程鸿，孔维萍，苏永全，等.我国甜瓜白粉病研究进展及生理小种的初步鉴定[J].长江蔬菜，2011(18)：1-5.

[9] 王娟，宫国义，郭绍贵，等.北京地区瓜类蔬菜白粉病菌生理小种分化的初步鉴定[J].中国蔬菜，2006(8)：7-9.

[10] 王晓敏，王禄星，宋建宇，等.宁夏西瓜、甜瓜白粉病病原菌鉴定及抗性种质资源筛选[J].甘肃农业大学学报，2021，56(5)：83-91.

[11] Wang Z Y，Du Y J，Li S H，et al. A complete genome sequence of *Podosphaera xanthii* isolate YZU573，the causal agent of powdery mildew isolated from cucumber in China[J]. Pathogens ，2023，12(4)：12040561.

[12] 包海清，许勇，杜永臣，等.海南三亚地区葫芦科作物白粉病菌生理小种分化的鉴定 [J].长江蔬菜，2008(1)：49-51.

[13] 顾海峰，张旭，张文芳，等.上海地区西甜瓜白粉病菌生理小种的鉴定[J].上海农业学报，2010，26(4)：155-158.

[14] 苏瑞，王惠林，高强，等.新疆部分地区籽用西瓜、甜瓜白粉病菌生理小种鉴定[J].中国蔬菜，2013(10)：90-94.

[15] 魏尊苗，高鹏，王学征，等.黑龙江省葫芦科白粉病菌 RAPD 分析[J].菌物学报，2011，30(4)：587-597.

[16] 咸丰，张勇，马建祥，等.陕西关中地区瓜类白粉病菌生理小种的鉴定[J].西北农林科技大学学报(自然科学版)，2010，38(10)：115-120.

[17] 徐兵划，汪国莲，仲秀娟，等.瓜类白粉病菌生理小种鉴定及抗白粉病甜瓜品种筛选[J].江苏农业科学，2022，50(23)：102-109.

[18] 李苹芳，朱凌丽，羊杏平，等.江浙沪甜瓜白粉病菌及其生理小种的鉴定[J].中国瓜菜，2015，28(6)：16-20.

[19] 张波，王利波，崔四川，等.吉林省薄皮甜瓜主产区白粉病菌生理小种的初步鉴定[J].吉林蔬菜，2011(6)：100-101.

[20] 莫龙飞，孙建磊，高超，等.山东地区甜瓜白粉病生理小种的鉴定[J].中国瓜菜，2021，34(4)：36-40.

[21] 袁悦，任俭，王转茸，等.武汉地区甜瓜白粉病病原菌生理小种鉴定[J].长江蔬菜，2022(22)：65-69.

[22] 郑耘.新疆甜瓜白粉病及品种抗病性研究[D].乌鲁木齐：新疆农业大学，2000，70.

[23] 刘东顺，程鸿，孔维萍，等.甘肃甜瓜主产区白粉病菌生理小种的鉴定[J].中国蔬菜，2010(6)：28-32.

[24] 张莉，张慧君，张建农，等.甘肃甜瓜白粉病病原种及生理小种的鉴定[J].甘肃农业大学学报，2011，46(2)：87-91.

[25] 屈淑平，綦聪，王云莉，等.南瓜白粉病病原菌及种质资源抗性鉴定[J].东北农业大学学报，2018，49(12)：9-17.

[26] 刘秀波，张俊华，崔崇士.南瓜白粉病病原菌鉴定及抗性鉴定方法研究[J].中国瓜菜，2006，19(1)：10-13.

[27] 马鸿艳，魏尊苗，祖元刚，等.2009—2010年黑龙江省主要瓜类作物白粉病菌生理小种鉴定[J].植物保护学报，2011，38(3)：287-288.

[28] 严佳丽，楚箫，黎豪，等.长沙地区南瓜白粉病病原菌及种质资源抗性的鉴定[J].中国瓜菜，2022，35(4)：20-26.

[29] 高婷，李梅，朱彩华，等.云南昆明地区南瓜白粉病病原菌生理小种鉴定[J].中国瓜菜，2024，37(1)：76-80.

[30] 李书颉，王萍，杨永升，等.籽用美洲南瓜白粉病病原菌生理小种鉴定及抗性遗传分析[J].中国蔬菜，2020(11)：72-79.

[31] 张梦蕾，王萍，廉勇.籽用美洲南瓜抗白粉病性状的遗传规律及基因定位分析[J].北方农业学报，2024，52(5)：38-48.

[32] 刘雪丽.CsLRR1调控黄瓜白粉病抗性的分子机制解析[D].江苏扬州：扬州大学，2021.

[33] Elad Y G，Dor B，Dalia R，et al. Nutrient status of cucumber plants affects powdery mildew（*Podosphaera xanthii*）[J]. Plants，2021，10(10)：2216.

[34] Zaiton S，Paul M，Minchinton E J，et al. The influence of temperature and vapour pressure deficit on conidia germination and germ tube production in an Australian *Podosphaera xanthii* isolate[J]. European Journal of Plant Pathology，2023，166(3)：315-328.

[35] 曹莹，唐宗云，魏建荣，等.喷水对温室甜瓜白粉病的防治效果[J].寒旱农业科学，2023，2(4)：356-359.

[36] 史琳烨，周瑞雯，赵钰琦，等.南京地区设施甜瓜白粉病的发生概况及防治技术研究[J].上海蔬菜，2024(5)：74-77.

[37] Mandal M K，Suren H，Kousik C. Elucidation of resistance signaling and identification of powdery mildew resistant mapping loci（*ClaPMR2*）during watermelon-*Podosphaera xanthii* interaction using RNA-Seq and whole-genome resequencing approach[J]. Scientific Reports，2020，10：14038.

[38] 谭鸣.基于全基因组关联分析的黄瓜抗白粉病关键基因鉴定[D].江苏扬州：扬州大学，2021.

[39] 黎豪.南瓜白粉病接种体系优化及抗白粉病种质资源筛选研究[D].长沙：湖南农业大学，2021.

[40] 谭静.环江县西瓜白粉病的为害症状特点及防控对策[J].南方园艺，2023，34(3)：63-66.

[41] 王静欣，马顺尧.黄瓜白粉病绿色防控技术[J].世界热带农业信息，2024(10)：25-27.

[42] Seo C T，서태철，Kim H J，et al. Ventilation at supra-optimal temperature leading high relative humidity controls powdery mildew，silverleaf whitefly，mite and inhibits the flowering of korean melon in a greenhouse cultivation[J].생물환경조절학회지，2022，31(1)：43-51.

[43] 王悦目，东保柱，孟焕文，等.一种高温闷棚防治甜瓜白粉病的方法[J].农业与技术，2024，44(3)：75-78.

[44] Pedro U L，Galvin A，Borba R O，et al. Effective management of powdery mildew in cantaloupe plants using nighttime applications of UV light[J]. Plant Disease，2023，107(8)：2483-2489.

[45] Suthaparan A，Stensvand A，Solhang K A，et al. Suppression of cucumber powdery mildew by supplemental UV-B radiation in greenhouses can be augmented or reduced by background radiation quality[J]. Plant Disease，2014，98(10)：1349-1357.

[46] 吴凤芝，周新刚.不同作物间作对黄瓜病害及土壤微生物群落多样性的影响[J].土壤学报，2009，46(5)：899-906.

[47] 赵索.蔬菜不同轮作方式对甜瓜病害的影响[J].安徽农学通报，2014，20(6)：66-68.

[48] 贾慧.不同修复材料对设施土壤理化性状、酶活性及黄瓜生长发育的影响[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2022.

[49] Jia H W，Wang Z F，Kang X，et al. Adding sulfur to soil improved cucumber plants resistance to powdery mildew[J]. Agronomy，2024，14(8)：1799.

[50] Eugenio Á，Ángeles M M，Domingo F M，et al. Influence of the diffusivity and transmittance of a plastic greenhouse cover on the development of fungal diseases in a cucumber crop[J]. Agronomy，2022，12(11)：2743.

[51] 于宝桓.海南省白沙县黄瓜主要病虫害调查及其绿色防控技术[D].长沙：湖南农业大学，2022.

[52] 付瑞敏，邢文会，张红，等.复合微生物拮抗菌剂的研制及其在大棚甜瓜生产中的应用[J].广东农业科学，2015，42(2)：68-71.

[53] 谢心悦，贾慧慧，杨海清，等.芽孢杆菌BJ-10的鉴定及其抑菌活性与防病作用[J].北京农学院学报，2020，35(2)：1-5.

[54] 李亚莉，齐立本.南瓜白粉病拮抗内生细菌 *Bacillus cereus* B4-2的分离鉴定及生防效果[J].中国瓜菜，2024，37(8)：51-56.

[55] 安福涛，刘欣宇，孙富余.6种植物源农药在黄瓜白粉病防治中的应用效果[J].中国植保导刊，2023，43(5)：63-65.

[56] 李发康，李培，李兴昱，等.5种中草药提取液对裸仁美洲南瓜白粉病的防治效果[J].中国蔬菜，2020(3)：56-60.

[57] Eman E，E. Abdellatef M A E. Haridy M S A，et al. Evaluation of natural products and chemical compounds to improve the control strategy against cucumber powdery mildew[J]. European Journal of Plant Pathology，2022，165(2)：385-400.

[58] 罗雁馨，曹行行，沈婷婷，等.微生物菌剂对退砂地土壤改良及西瓜品质的调控作用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(11)：79-91.

[59] 刘新社，陈妍.生物农药对设施和露地黄瓜白粉病的防效及其品质和产量的影响[J].河南农业科学，2019，48(3)：95-99.

[60] Sarhan D A E，Abd-Elsyed F H M，Ebrahiem Y M A. Biological control of cucumber powdery mildew（*Podosphaera xanthii*）（Castagne）under greenhouse conditions[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control，2020，30(12)：634-639.

[61] Hafez M Y，El-Nagar S A，Elzaawely A A，et al. Biological control of *Podosphaera xanthii* the causal agent of squash powdery mildew disease by upregulation of defense-related enzymes[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control，2018，28(1)：1-8.

[62] 王悦目.拱棚甜瓜白粉病绿色防控技术筛选集成和应用[D].呼和浩特：内蒙古农业大学，2023.

[63] Németh M Z，Seress D，Nonomura T. Fungi parasitizing powdery mildew fungi：Ampelomycesstrains as biocontrol agents against powdery mildews[J]. Agronomy，2023，13(8)：1991.

[64] 黄逸群.中药渣厌氧发酵液对黄瓜白粉病的防治作用及机理研究[D].内蒙古包头：内蒙古科技大学，2024.

[65] Rur M，Rämert B，Hökeberg M，et al. Screening of alternative products for integrated pest management of cucurbit powdery mildew in Sweden[J]. European Journal of Plant Pathology，2018，150（1）：127-138.

[66] 杜宇，冯东萍，王敏，等.西瓜白粉病防治药剂筛选研究[J].长江蔬菜，2026（6）：84-88.

[67] 马雪莉，高龙银，赵京岚，等.50%苯醚甲环唑·硫磺水分散粒剂对西瓜白粉病的田间防治效果[J].北方园艺，2016（19）：132-134.

[68] 张伯虎，孟延，贾凯峰，等.拱棚甜瓜白粉病药剂防治试验[J].中国瓜菜，2018，31（11）：40-42.

[69] 陈瑾，罗余平，赖瑞联，等.24%氟茚唑菌胺·四氟醚唑悬乳剂对黄瓜白粉病和黄瓜靶斑病田间防治效果[J].农药，2021，60（12）：917-920.

[70] 饶贵珍，龚停锋，吴亚宏，等.三种药剂防治南瓜白粉病药效试验[J].长江蔬菜，2009（23）：38-39.

[71] 罗大成，李培玲，李海静，等.新型杀菌剂氟苯醚酰胺对黄瓜白粉病菌室内毒力及田间药效[J].西北农业学报，2021，30（4）：625-628.

[72] 海飞，袁水霞，刘圣明.嘧菌酯与戊唑醇组合对黄瓜白粉病的防效及安全性评价[J].中国瓜菜，2022，35（6）：86-91.

[73] 李健荣，刘媛，马景，等.设施甜瓜白粉病农药减量化防控效果研究[J].蔬菜，2024（7）：56-60.

[74] Alejandra V，Álvaro P，Laura R，et al. Resistance to the SDHI fungicides boscalid and fluopyram in *Podosphaera xanthii* populations from commercial cucurbit fields in Spain[J]. Journal of Fungi，2021，7（9）：733.

[75] Qin P，Fan J R，Min W，et al. Evaluation of the risk of development of resistance to QoI fungicide ZJ0712 in *Podosphaera xanthii* under greenhouse conditions[J]. Phytopathology Research，2022，4（1）：00123.

[76] 任璐，赵彬彬，韩巨才，等.黄瓜白粉病菌对甲基硫菌灵的敏感性及室内抗性突变体生物学性状[J].植物保护学报，2015，42（2）：176-181.

[77] 许敏，王戎杰，王丽萍，等.10种杀菌剂防治黄瓜白粉病田间药效试验[J].山西农业科学，2022，50（7）：1050-1055.

[78] 王帅宇，杨文，贾峰勇，等.防治黄瓜白粉病轮换药剂的筛选[J].中国植保导刊，2021，41（5）：84-86.

[79] Mindrati D F，Dian A K，Tomoyuki K，et al. Ultraviolet-B irradiation induces resistance against powdery mildew in cucumber（*Cucumis sativus* L.）through a different mechanism than that of heat shock-induced resistance[J]. Agronomy，2022，12（12）：3011.