

网络出版时间: 2026-03-16
网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20260313.1807.006>

412 个小麦种质资源黑胚病抗性鉴定与抗病位点检测

王璐倩¹, 宋改利¹, 姜玉梅¹, 张 锋², 唐建卫¹, 董纯豪¹,
袁雨豪¹, 黄振朴¹, 殷贵鸿¹, 李巧云¹

(1. 河南农业大学国家小麦工程技术研究中心/河南农业大学农学院/小麦玉米两熟高效生产全国重点实验室, 河南郑州 450046;
2. 河南赛德种业有限公司/河南省高抗白粉病小麦育种工程技术研究中心, 河南郑州 450001)

摘 要: 黑胚病(black point disease, BP)严重影响小麦生产, 种植抗病品种是减轻 BP 危害的重要措施, 而抗源缺乏的现状制约着 BP 抗性改良进程。为获得 BP 优异抗源, 用黄淮麦区小麦 BP 优势致病菌麦根腐平脐蠕孢(*Bipolaris sorokiniana*)对 412 份小麦种质资源进行接菌鉴定, 并用已报道的 16 个 BP 抗性相关标记对其进行分子检测。结果表明, 412 份供试材料中, 无免疫或高抗种质, 4 份表现中抗(1.0%), 轻感、中感与高感的材料分别有 95 份(23.1%)、209 份(50.7%)与 104 份(25.2%)。16 个标记中, 13 个在不同材料间呈现多态性, 与 BP 抗性连锁的只有 3 个, 为 *wmc170*、*BP-4A-d20* 与 *Xbarc10*, 分别是抗 BP 位点 *QBP-Usg. 2A*、*QBB.hau-4A* 与 *QBB.hau-5A* 的连锁标记; *QBB.hau-4A* 的抗病效应较好, 其单独存在或与其它位点聚合, 可以显著降低小麦黑胚率($P < 0.01$)。4 份中抗材料(山农 530070、ZC223、05CV078 与山农 38)可作为小麦 BP 抗性改良资源, 标记 *BP-4A-d20* 可用于抗 BP 育种。

关键词: 小麦; 黑胚病; 麦根腐平脐蠕孢; 抗病种质; 分子标记
中图分类号: S512.1; S330 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-1041(2026)04-0425-08

Identification of Wheat Germplasm Resistance to Black Point Disease and Molecular Detection of Resistance Loci

WANG Luqian¹, SONG Gaili¹, JIANG Yumei¹, ZHANG Feng², TANG Jiangwei¹,
DONG Chunhao¹, YUAN Yuhao¹, HUANG Zhenpu¹, YIN Guihong¹, LI Qiaoyun¹

(1. National Engineering Research Centre for Wheat/College of Agronomy/State Key Laboratory of High-Efficiency Production of Wheat-Maize Double Cropping, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450046, China;
2. Henan Saide Seed Co., Ltd./Engineering and Technology Research Center of Wheat Breeding for High Resistance to Powdery Mildew in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Black point disease(BP) severely affects wheat production, and planting disease-resistant varieties is an important measure to mitigate the damage caused by BP. However, the current lack of resistance sources restricts the improvement of BP resistance. To obtain superior resistance sources for BP, this study inoculated 412 wheat germplasm with the dominant pathogen of BP in the Huanghuai wheat region, *Bipolaris sorokiniana*, and conducted molecular testing using 16 reported BP resistance-related markers. The results showed that among the 412 tested materials, there were no immune or highly resistant germplasm; 4 showed moderate resistance(1.0%), while 95(23.1%), 209(50.7%), and 104(25.2%) exhibited mild susceptibility, moderate susceptibility, and high susceptibility, respectively. Of the 16 markers, 13 showed polymorphism among different materials, with only 3 tightly linked to BP resistance: *wmc170*, *BP-4A-d20*, and *Xbarc10*. These correspond to the resistance loci

收稿日期: 2025-04-10 修回日期: 2025-06-12
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32171983); 2023 年度河南省重点研发项目(231111112900)
第一作者 E-mail: 2217610103@qq.com(王璐倩)
通讯作者 E-mail: liqiaoyun@henau.edu.cn(李巧云); yinguihong@henau.edu.cn(殷贵鸿)

QBP-Usq. 2A, *QBB. hau-4A*, and *QBB. hau-5A*, respectively, with *QBB. hau-4A* exhibiting a better disease resistance effect. Its presence alone or in combination with other loci can significantly reduce the black point rate in wheat ($P < 0.01$). The 4 moderately resistant materials (Shannong 530070, ZC223, 05CV078, and Shannong 38) can serve as resistance sources for improving BP resistance in wheat, and *BP-4A-d20* marker can be used for BP resistance breeding.

Keywords: Wheat; Black point; *Bipolaris sorokiniana*; Resistant germplasm; Molecular marker

小麦黑胚病(BP)是指小麦籽粒胚及其周围出现黑色或褐色斑点^[1],不仅影响籽粒外观品质、降低收购等级^[2],还抑制种子发芽和幼苗生长^[3],降低小麦籽粒营养与加工品质^[4-6]。此外,一些黑胚病的致病菌可产生真菌毒素,影响粮食安全和食品安全^[7-8]。因此,许多国家对小麦中的黑胚率有严格的限制。例如,澳大利亚规定,仓储小麦种子的黑胚率不能超过5%^[9]。根据中国现行的小麦质量标准(GB1351-2023),黑胚粒被归类为不完善粒,1等和2等小麦的不完善粒含量应低于6.0%,3等和4等小麦则应低于8.0%。

近年来,随着气候变化、品种更替与栽培措施的改善,小麦黑胚病的发生有加重趋势,引起了社会的广泛关注^[10-11]。李新华等^[12]对2023年在新乡地区收获的33个黄淮麦区推广小麦品种或区域试验品系进行黑胚率调查,发现供试材料全部感黑胚病。研究表明,麦根腐平脐蠕孢(*Bipolaris sorokiniana*)引起的黑胚病可导致小麦籽粒的总淀粉与支链淀粉含量降低,直链淀粉含量增加,A型淀粉粒体积与数目增加,峰值黏度、低谷黏度、稀懈值、回生值等面粉黏度参数显著降低,导致淀粉品质劣化^[13]。种植抗病品种是防治黑胚病经济有效的措施,国内外不少学者开展了相关研究。Conner等^[14]依据自然大田的黑胚率,从16个春小麦品种中筛选出Glenlea、Era等7个抗病品种,对其接种*B. sorokiniana*与链格孢(*Alternaria alternata*)进行抗性鉴定后发现,仅Glenlea与Era抗*A. alternata*黑胚病,Benito抗*B. sorokiniana*黑胚病,说明同一品种对两种致病菌的抗性不同。王会伟等^[10]在自然大田条件下对44份河南省小麦推广品种和选育的新品系进行黑胚率检测,筛选出豫优1号、陕229等6个抗病品种(系)。Li等^[3]依据2010—2012年自然大田的黑胚率,从403份小麦种质中筛选出山农4143、PIC423等抗病种质151份,占供试材料的37.5%。

Liu等^[15]、王祥向^[16]、Lü等^[17]、Tang等^[18]、

李新华等^[12]对共1750多份小麦种质的黑胚率调查结果显示,抗病品(种)系占6.2%。说明抗病种质资源较缺乏,这在很大程度上制约着小麦黑胚病抗性改良的进程。此外,已筛选的抗性材料多数基于自然大田条件下的黑胚率,由于不同年份与地点的气象因子、致病菌等影响因素不同,调查结果的一致性较差。如Li等^[19]对自然大田筛选的151份抗黑胚病小麦种质分别接种了包括*B. sorokiniana*与*A. alternata*在内的6种黑胚病病原菌,只有3.9%与52.2%的供试材料抗*B. sorokiniana*与*A. alternata*黑胚病。可见,筛选抗黑胚病材料应进行多环境的接种鉴定。

本研究以黄淮麦区小麦黑胚病的主要致病菌*B. sorokiniana*为病原菌,对412份小麦种质进行抗性鉴定与农艺性状调查,并利用已报道的16个黑胚病抗性QTL的连锁标记对其进行分子检测,以筛选出抗黑胚病种质和可用的分子标记,为小麦抗黑胚病育种提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与种植

供试的412份小麦种质由河南农业大学小麦遗传育种实验室提供,包括周麦22、扬麦158、百农207等审定品种143个,地方及国外品种3个(中国春、苏麦3号和Sunco),宛原白1号、山农4143、周8425B等高产系266个。

黑胚病抗性鉴定试验于2022—2023年度和2023—2024年度(下文分别简称2023与2024年)在河南省新乡市原阳县河南农业大学国家小麦工程技术研究中心试验田进行。小麦按小区种植,小区长2.0 m,宽3.6 m,行距0.3 m,每材料种植2行,行长2 m,每行100粒种子,2次重复,每重复按材料编号顺序人工开沟点播。虫害防治、施肥、除草、灌溉等管理同一般育种田。

1.2 黑胚病菌接种

致病菌为本课题组(国家小麦工程技术研究中心小麦遗传育种课题组)分离鉴定的*B. soro-*

kiniana 强致病菌株 Ta-BP33^[20]。

致病菌扩繁与孢子液制作参考王丝雨等^[21]的方法进行。将保存在马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基上的 Ta-BP33 在无菌条件下切成 0.3 cm² 左右的小块儿,置于含有 PDA 培养基的培养皿中,于 25 ℃ 培养箱中暗培养 10~12 d(菌落变黑,PDA 上布满分生孢子)。每皿加 5 mL 灭菌蒸馏水,用载玻片将孢子刮下后用 4 层纱布过滤得到孢子液,借助血球计数板计算其浓度,最终浓度调整为 5×10⁴ 个·mL⁻¹。用本课题组建立的“孢子液喷洒、套袋保湿”的专利技术进行接菌鉴定^[22]。即选择花期一致的穗子挂牌标记,在开花后 10 d,将孢子液均匀喷洒在穗子上;套上透明塑料袋保湿(每袋 5 穗),每个材料接菌 15 穗并挂牌标记。5 d 后将塑料袋去掉,自然成熟。

1.3 黑胚粒调查与抗性评价

小麦成熟期及时收获接种病菌穗,晒干后手

工脱粒,统计病粒数(褐色/黑色病斑直径> 1 mm)与总粒数,计算黑胚率(BPI)并进行抗性评价,BPI=病粒数/总粒数×100%。6 级抗性评价标准:免疫(I),BPI=0;高抗(HR),BPI<2.0%;中抗(HR),2.0%≤BPI<5.0%;轻感(SS),5.0%≤BPI<14.9%;中感(HS),15.0%≤BPI<30.0%;高感(HS),BPI≥30.0%^[3]。

1.4 分子标记检测

参照 Doyle 等^[23]报道的 CTAB 法提取不同小麦种质的基因组 DNA,于 TE 缓冲液中 4 ℃ 贮存。

利用 16 个与 BPQ TLs 连锁的分子标记(表 1)对供试材料进行分子检测。PCR 反应体系为 10 μL:2×Tag Master Mix (No Dye) 5 μL,上、下游引物(10 μmol·L⁻¹)各 0.5 μL,1.0 μL 模板(50 ng·μL⁻¹),3 μL 的 ddH₂O。PCR 扩增程序:95 ℃ 预变性 3 min;95 ℃ 变性 15 s,55~63 ℃ 退火 30 s(具体见表 1),72 ℃ 延伸 30 s,35 个循环;72 ℃ 延伸 5 min,4 ℃ 保存。

表 1 16 个小麦黑胚病抗性相关 QTL 连锁标记
Table 1 16 molecular markers related to QTL for black point resistance

QTL	染色体 Chr.	标记 Marker	正向引物 Forward primer (5'-3')	反向引物 Reverse primer (5'-3')	退火温度 T _m /℃	产物 Product/bp	抗源 Sources	参考文献 Reference
<i>QBP-Usq. 2B</i>	1D	<i>wmc429</i>	CGTAAAGATTTTCATTT- GGCG	AACGGCAGCTTGAAAA- CATAG	57.0	227	Tasman	[24]
<i>QBP-Usq. 4A</i>	2A	<i>wmc170</i>	ACATCCACGTTTATGTT- GTTGC	TTGGTTGCTCAACGTT- TACTTC	58.5	229	Cascades	[24]
<i>QBP-Usq. 1D</i>	2B	<i>gwm501</i>	GGCTATCTCTGGCGCTA- AAA	TCCACAAACAAG- TAGCGCC	60.0	172	Sunco	[24]
<i>QBP-Usq. 3D</i>	2D	<i>gwm484</i>	ACATCGCTCTTCACAAAC- CC	AGTTCCGGTCATG- GCTAGG	61.0	352	Cascades	[24]
<i>QBP-Usq. 2D</i>	3A	<i>wms2</i>	CTGCAAGCCTGTGAT- CAACT	CATTCTCAAAT- GATCGAACA	57.0	127	PI610750	[24]
<i>QBP-Usq. 2A</i>	3D	<i>gwm341</i>	TTCAGTGGTAGCG- GTCGAG	CCGACATCTCATGGATC- CAC	62.0	153	Sunco	[24]
<i>QBP-Usq. 7A</i>	4A	<i>gwm610</i>	CTGCCTTCTCCATGGTTT- GT	AATGGCCAAAGGTTAT- GAAGG	59.0	167	Sunco	[24]
<i>QBB. hau-4A</i>	4A	<i>BP-4A-d20</i>	ACAACCTGAATGCATC- CAATGCTGC	GCAGTACTGACCTCCTG	58.0	292	山农 4143 Shannong 4143	[25]
<i>QBB. hau-5A</i>	5A	<i>Xbarc10</i>	GCGTGCCACTGTAACCTT- TAGAAGA	GCGAGTTGGAATTATTT- GAATTAAACAAG	57.0	283	宛原白 1 号 Wanyuanbai 1	[25]
<i>QBB. hau-5A. 1</i>	5A	<i>Wms304</i>	AGGAAA- CAGAAATATCGCGG	AGGACTGTGGGAAT- GAATG	55.0	217	PZSCL6	[26]
<i>QBB. hau-5B. 1</i>	5B	<i>BP-5B-d4</i>	GCTCCACGGCTTGTTG	TACATGGCGGTTTCGC- CGAGGAATT	57.0	252	Yuyou 1	[26]
<i>QBB. hau-5B. 2</i>	5B	<i>BP-5B-d6</i>	TAAGGATTGTGCCTGCG	GCCATCTACACGCTCCG- GCGAATT	55.0	225	Yuyou 1	[26]
<i>QBB. hau-5D. 1</i>	5D	<i>Xgwm174</i>	GGGTTCCTATCTGGTA- AATCCC	GACACACATGTTCTGC- CAC	55.0	420	Yuyou 1	[26]
<i>QBB. hau-5D. 2</i>	5D	<i>Xwmc799</i>	CGTACGTACGCCTGTAC- CCTTG	AATCTTGGGCGTCTA- ATCTTTTGC	61.0	364	Yuyou 1	[26]
<i>QBP. hau-3A</i>	7A	<i>gwm60</i>	TGTCTACACGACCACGT	GCATTGACAGATGCA- CACG	59.5	210	Cascades	[24]
<i>OBP. hau-7D</i>	7D	<i>wms295</i>	GTGAAGCAGACCCACAA- CAC	GACGGCTGCGACGTAGAG	63.0	259	PI610750	[24]

PCR 产物用 8% 的聚丙烯酰胺凝胶电泳分离,银染后照相观察并记录。所用引物序列均由上海生工生物有限公司合成。

1.5 农艺性状与抗病性调查

生长习性、株高、开花期等农艺性状以及白粉病、条锈病的记载参照《农作物品种区域试验技术规程·小麦》(NY/T 1301-2007)的标准进行;茎基腐病白穗率在播种期接种病麦粒,花后 25 d 左右调查记录;抗冻性于 1 月份根据受冻叶片的面积记录,轻微冻害记为 1,受冻叶片面积小于 25.0% 记为 2,25.0%~50.0% 记为 3,大于 50.0% 记为 4。

1.6 数据分析

用 Excel 2000 整理数据,用 SPSS 20.0 的 Duncan's 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 小麦种质黑胚病抗性分析

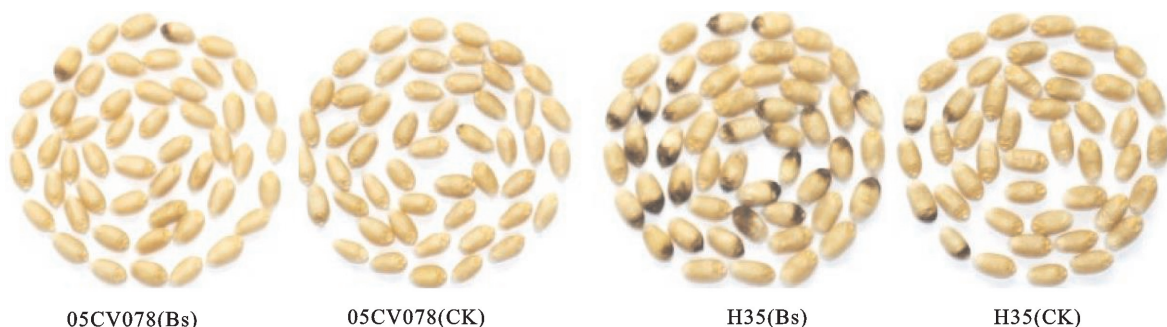
在 *B. sorokiniana* 侵染下,供试种质 2 年的黑胚率介于 2.8% (05CV078, 2024)~64.9% (WYHYS, 2024) 之间,2023 和 2024 年的平均发病率分别为 22.7% 和 23.0%,不同种质间黑胚率存在显著差异($P<0.01$,表 2,图 1)。未检出免疫与高抗种质;表现中抗的有 4 份,为山农 530070、ZC223、05CV078 和山农 38,占供试种质的 1.0%;轻感种质 95 份 (23.1%);中感与高感种质分别有 209 份 (50.7%) 和 104 份 (25.2%),其中 WYHYS、宛原白 1 号、H35 等 7 份材料 2 年的平均黑胚率超过 50.0%。可见,在接种 *B. sorokiniana* 的条件下,99.0% 的供试种质表现感病(表 2)。

4 份中抗黑胚病种质的农艺性状表现良好,其中山农 38 的株高、开花期与河南省小麦品种区试和生产试验的对照品种周麦 18 及百农 207 接近,且茎基腐病白穗数较少(表 3)。

2.2 部分种质抗黑胚病基因分析

以 4 份中抗种质 ZC223、山农 38、05CV078 和山农 530070 以及 4 个高感种质宛原白 1 号、H35、Wheatear 和豫农 931 为材料,利用已报道的与抗病 QTL 连锁的 16 个分子标记(表 1)对其进行检测。结果表明,*gwm610* 等 3 个标记在 8 个材料间无多态性,*Xgwm174*、*wmc170* 等 13 个标记有多态性。13 个多态性标记中,标记 *wmc170*、*BP-4A-d20* 和 *Xbarc10* 不仅在抗、感材料间有多态性,且 4 份抗病种质的基因型一致,4 份感病种质的基因型一致,故认为其与小麦黑胚病抗性基因连锁(图 2),这 3 个标记对应的 QTL 分别是 *QBP-Usq. 2A* [23]、*QBB. hau-4A* 和 *QBB. hau-5A* [24]。

利用标记 *wmc170*、*BP-4A-d20* 与 *Xbarc10* 对 412 份种质进行检测(图 3),结果(表 4)表明,当供试种质仅携带 1 个抗病 QTL 时,以 *QBB. hau-4A* 的抗病效果较好,其两年的平均黑胚率为 16.3%,显著低于未携带此 QTL 的种质 (25.9%, $P<0.05$);聚合两个 QTL 的种质间比较,以 *QBB. hau-4A + QBB. hau-5A* 的抗病效果较好,其平均黑胚率为 16.4%,与聚合 3 个 QTL 种质的黑胚率接近 (16.2%),都显著低于无抗性 QTL 种质的平均黑胚率。可见,3 个 QTL 中,以 *QBB. hau-4A* 的抗病效应较好,无论其单独存在或与其它抗病位点聚合,均能明显降低小麦黑胚率。



Bs: 接种 *B. sorokiniana* 菌株 Ta-BP33; CK: 喷洒灭菌蒸馏水的对照。

Bs: Inoculated with Ta-BP33 of *B. sorokiniana*; CK: Treated with sterilized distilled water(control).

图 1 接种 *B. sorokiniana* 的抗、感小麦种质

Fig. 1 Resistant and susceptible germplasms inoculated with *B. sorokiniana*

表 2 供试种质的黑胚病抗性分布
Table 2 Resistance of wheat germplasms to black point

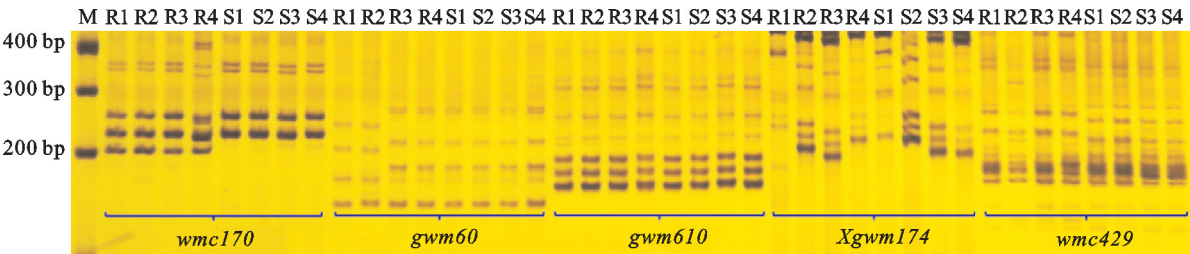
黑胚率范围 BPI range/%	抗性 Resis- tance	平均 BPI Mean of BPI/%	种质数 目(占比) Germplasm s(ratio/%)	小麦种质 Wheat germplasms
2.0~4.9	MR	4.4D	4 (1.0)	05CV078、ZC223、山农 530079(Shannong 530070)、山农 38(Shannong 38)
5.0~14.9	SS	10.3C	95 (23.1)	资 0869、西农 238、宁麦 9 号、豫麦 35、郑麦 136、网 93、碧蚂 1 号、蕪 8901、温麦 8 号、周麦 19 号、濮麦 9 号、温麦 10 号、04ZP17、良星 66、宁麦 13、宁麦 20、济麦 4 号、荃麦 725、宁麦 24、许科 316、豫农 915、豫农 916、安农 0711、汪麦 803、冀麦 765、生选 5 号、豫农 906、生选 6 号、西农 585、豫农 905、渦麦 66、淮麦 21、CIM-15、西农 528、宛麦 66、郑麦 366、农大 2011、宛麦 19、绵资 02-12、豫农 922、11-696、许研 5 号、豫麦 668、济麦 21、扬麦 15、绵麦 827、CA0816、济麦 44、SP1777-1-2、华育 198、闾麦 257、宁 08-30、豫保 1 号、赛德麦号、山农 4143、百农 607。 Zi 0869, Xinong 238, Ningmai 9, Yumai 35, Zhengmai 136, Wang 93, Bima 1, Gao 8901, Wenmai 8, Zhoumai 19, Pumai 9, Wenmai 10, 04ZP17, Liangxing 66, Ningmai 13, Ningmai 20, Jimai 4, Quanmai 725, Ningmai 24, Xuke 316, Yunong 915, Yunong 916, Annon 0711, Wangmai 803, Jimai 765, Shengxuan 5, Yunong 906, Shengxuan 6, Xinong 585, Yunong 905, Womai 66, Huaimai 21, CIM-15, Xinong 528, Wanmai 66, Zhengmai 366, Nongda 2011, Wanmai 19, Mianzi 02-12, Yunong 922, 11-696, Xuyan 5, Yumai 668, Jimai 21, Yangmai 15, Mianmai 827, CA0816, Jimai 44, SP1777-1-2, Huayu 198, Tunmai 257, Ning 08-30, Yubao 1, Saidemai 5, Shannong 4143, Bainong 607.
15.0~30.0	MS	21.5B	209 (50.7)	丰德存麦 8 号、驻麦 305、卫麦 68、山农 28 号、CIM-1、蕪优 9415、宛 1204、苏夫、蕪优 5218、周麦 40、豫农 211、宁麦 27、扬麦 158、华麦 0772、宁麦资 119、豫农 607、Add 4v、山农 29 号、陈明 1 号、航麦 186、CIM-22、鑫华 818、阿夫、轮选 149、莱州 187、11-239、西农 9112、山农 737、武汉 1 号、百农 1306、太学 518、西农 239、浩麦 1 号、SP1776-5-1、12 家联、西农 511、5-257、济麦 22、贵农 22、周麦 22、益科麦 5 号、15HN008、10M8、N553、04ZP16、宛麦 1326、CIM-16、农大 753、西农 926、481/274、衡观 35、YN926B、10M16、NMA5001、封麦 6 号、YN919、宛麦 988、徐农 0029、周麦 36、郑麦 7698、西农 529、新麦 1817、偃展 4110、百农 419、豫农 810、抗线虫 2-3、09X15、邓麦 298、中金 33、13DP33、浚麦 802、豫农 611、YN945、智利 2 号、中麦 170、冀麦 5265、YN909、PIC421、徐麦 35、平安 11 号、洛麦 31、丰德存麦 21、小偃 22、金优 18、抗线虫 37-1、岗 01、NMA5004。 Fengdecunmai 8, Zhumai 305, Weimai 68, Shannong 28, CIM-1, Gaoyou 9415, Wan 1204, Sufu, Gaoyou 5218, Zhoumai 40, YN 211, Ningmai 27, Yangmai 158, Huanmai 0772, Ningmai 119, YN 607, Add 4v, Shannong 29, Chenming 1, Hangmai 186, CIM-22, Xinhua 818, Afu, Lunxuan 149, Laizhou 187, 11-239, Xinong 9112, Shannong 737, Wuhan 1, Bainong 1306, Taixue 518, Xinong 239, Haomai 1, SP1776-5-1, 12Jialian, Xinong 511, 5-257, Jimai 22, Guinong 22, Zhoumai 22, Yikemai 5, 15HN008, 10M8, N553, 04ZP16, Wanmai 1326, CIM-16, Nongda 753, Xinong 926, 481/274, Hengguan 35, YN926B, 10M16, NMA5001, Fengmai 6, YN919, Wanmai 988, Xunong 0029, Zhoumai 36, Zhengmai 7698, Xinong 529, Xinmai 1817, Yanzhan 4110, Bainong 419, YN 810, KXC2-3, 09X15, Dengmai 298, Zhongjin 33, 13DP33, Xunmai 802, YN611, YN945, Zhili 2, Zhongmai 170, Jimai 5265, YN909, PIC421, Xumai 35, Pingan 11, Luomai 31, Fengdecunmai 21, Xiaoyan 22, Jinyou 18, KXC37-1, Gang 01, NMA5004.
>30.0	HS	37.8A	104 (25.2)	宛原白 1 号、H35、WYHYS、豫农 931、资 0821、10M23、温麦 168、洛夫林 13、11-229、郑麦 20、豫农 806、珍麦 3 号、11-504、锦麦 23、宁麦资 67、山农 981 豫农 201、扬麦 14、驻麦 6097、豫农 516、濮兴 5 号、淮麦 29、Wheatear、濮兴 10 号、宛 270、BP57-1、郑麦 1860、周麦 16、济南 31、CIM-18、中育 1023、扬麦 20、PIC420、济程 2 号、丰德存麦 13、衡 4399、06CT461、10M33、西农 622、轮选 166、Chancellor、赛德麦 11、中育 1123、项麦 182、11-275、赛德麦 19、洛早 19、新矮早 818、L01378、郑优 6 号、宁麦 13、YN35096、YN177、新麦 28、矮丰 66、YN4446、郟丰 168、洛早 28、荷兰大籽、徐麦 9169、郟丰 170、赛德麦 1 号、陇麦 135、濮麦 206、安农 7959、洛麦 38、豫麦 50、百农 107、山前麦、中麦 23、花培 8 号、矮孟牛 V、周麦 11、皖麦 52、Yuma、矮孟牛、YN941、10M24、抗线虫 37-2、阿美乐尔、YN944、濮麦 4-168、鄂麦 170、鄂麦 526、浚麦 0821。 Wanyuanbai 1, H35, WYHYS, YN 931, Zi 0821, 10M23, Wenmai 168, Luofulin 13, 11-229, Zhengmai 20, YN 806, Zhenmai 3, 11-504, Jinmai 23, Ningnaizi 67, Shannong 981, YN201, Yangmai 14, Zhumai 6097, YN 516, Puxing 5, Huaimai 29, Wheatear, Puxing 10, Wang 270, BP57-1, Zhengmai 1860, Zhoumai 16, Jinan 31, CIM-18, Zhongyu 1023, Yangmai 20, PIC420, Jicheng 2, Fengdecunmai 13, Heng 4399, 06CT461, 10M33, Xinong 622, Lunxuan 166, Chancellor, SDM 11, Zhongyu 1123, Xiangmai 182, 11-275, SDM 19, Luohan 19, Xinaizao 818, L01378, Zhengyou 6, Ningmai 13, YN35096, YN177, Xinmai 28, Aifeng 66, YN4446, Yanfeng 168, Luohan 28, Helandazi, Xumai 9169, Yanfeng 170, SDM 1, Longmai 135, Pumai 206, Annon 7959, Luomai 38, Yumai 50, Bainong 107, Shanqianmai, Zhongmai 23, Huapei 8, AimengniuV, Zhoumai 11, Wanmai 52, Yuma, AMN, YN941, 10M24, KXC37-2, Afuluoer, YN944, Luomai 4-168, Emai 170, Emai 526, Xunmai 0821.

BPI: 黑胚率;平均 BPI 数值后大写字母表示不同类型间差异显著($P<0.01$);占比:该类型种质数占 412 份种质的百分比。
BPI: Black point incidence. Different uppercases following data of mean of BPI indicate significant difference between different types of germplasms($P<0.01$). Ratio means the percentages of the number of same type accounting for the total 412 germplasms.

表 3 4 份中抗黑胚病小麦种质的主要农艺性状
Table 3 Main agronomic traits of the four wheat germplasms resistant to black point

小麦种质 Wheat germplasm	黑胚率 Black point incidence/%	生长习性 Growth habit	抗冻性 Frost resistance	株高 Plant height/ cm	开花期 Anthesis (month-day)	白粉病 Powdery mildew	条锈病 Stripe rust	茎基腐病 白穗数 White ears of Fusarium crown rot	千粒重 1 000-grain weight/g	粒色 Seed color
山农 530070 Shannong 530070	4.7	2	3.0	71.4	4-16	2	3	7	44.1	白
ZC223	4.5	3	3.0	90.9	4-15	2	5	4	45.2	红
05CV078	3.9	2	3.0	78.0	4-19	5	2	1	41.8	白
山农 38 Shannong 38	4.7	2	3.0	78.4	4-19	4	3	1	44.5	白
周麦 18 Zhoumai 18	16.3	2	3.0	75.5	4-19	3	3	3	47.5	白
百农 207 Bainong 207	18.1	2	3.0	79.6	4-21	3	3	1	43.8	白

周麦 18 与百农 207 是河南省小麦品种审定中的对照。
Zhoumai 18 and Bainong 207 are the control in wheat cultivar approval in Henan Province.

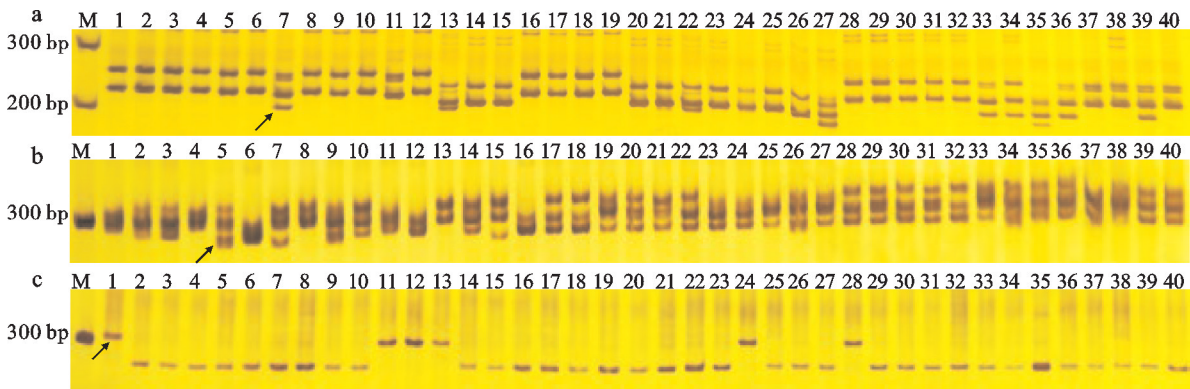


M:分子量标准; R1、R2、R3 和 R4 分别是中抗 ZC223、山农 38、05CV078 和山农 530070; S1、S2、S3 和 S4 分别是感病种质宛原白 1 号、H35、Wheatear 与 WYH 预试。

M: DNA ladder; R1, R2, R3, and R4 indicate the resistant wheat germplasm ZC223, Shannong 38, 05CV078, and Shannong 530070, respectively; S1, S2, S3, and S4 indicate the susceptible germplasm Wanyuanbai 1, H35, Wheatear, and WYHYS, respectively.

图 2 部分标记对抗、感小麦种质的分子检测

Fig. 2 PCR amplification profiles of the resistant and susceptible wheat germplasm using five markers



M:分子量标准; 1~40:小麦种质; 箭头所示为抗病基因。

M: DNA ladder; 1~40: Wheat germplasm. Arrows indicate DNA fragments of the resistant genotype.

图 3 分子标记wmc170 (a)、Xbarc10 (b)与BP-4A-d20 (c)对部分小麦种质的扩增图

Fig. 3 PCR amplification profiles of the markers wmc170 (a), Xbarc10 (b), and BP-4A-d20 (c) in some wheat germplasm

表 4 携带抗黑胚病 QTL 种质的黑胚率

Table 4 Black point incidence carrying the QTLs for resistance to black point disease

QTL 位点 Quantitative trait loci	种质数 Germplasm number	占比 Ratio/%	黑胚率 Black point incidence/%		
			2023	2024	Mean
<i>QBP-Usq. 2A</i>	60	14.6	19.8±1.3 *	21.0±1.7	20.4±1.4
<i>QBB. hau-4A</i>	19	4.6	17.1±2.0 *	15.5±1.0 * *	16.3±1.7 *
<i>QBB. hau-5A</i>	119	28.9	22.7±0.8	23.6±1.1	23.2±0.9
<i>QBB. hau-4A + QBP-Usq. 2A</i>	7	1.7	17.1±1.7 *	18.0±1.9 *	17.5±1.4 *
<i>QBP-Usq. 2A + QBB. hau-5A</i>	44	10.7	20.3±1.5	19.8±1.6	20.4±1.4
<i>QBB. hau-4A + QBB. hau-5A</i>	8	1.9	17.2±1.7 *	15.8±1.1 * *	16.4±1.6 *
<i>QBB. hau-4A + QBP-Usq. 2A + QBB. hau-5A</i>	3	0.7	15.9±0.6 * *	16.5±1.8 *	16.2±1.6 *
None	152	36.9	25.8±1.0	25.9±1.1	25.9±1.2

黑胚率数据为均值±标准误; * 与 * * 分别表示在 0.05 与 0.01 水平上与该 QTL 的种质间差异显著。

Data of black point incidence are expressed as mean ± S.E; * and * *: Significant differences compared to the genotypes without the resistance QTLs at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

抗病种质资源是进行抗性改良与抗病机理研究的基础,优异抗源缺乏是目前制约抗黑胚病小

麦育种的主要因素之一^[1]。本研究对 412 份小麦种质进行了黑胚病抗性鉴定,仅筛选到 4 份中抗种质,说明目前种植的小麦品种的黑胚病抗性普遍较差,这与前人的研究结果一致^[10,14-19]。

本研究筛选的4份中抗种质可作为小麦黑胚病抗性改良的抗源,尤其是山农38,其株高、开花期等农艺性状与河南省小麦区试对照品种接近,且其茎基腐病(*Fusarium crown rot*, FCR)白穗数较少。FCR是近年来小麦生产中的新兴而频发的病害^[27],FCR白穗数少且抗黑胚病品系为广谱抗病新品种培育提供了良好的抗源。

本研究供试材料中,有34份前人对其抗性进行了鉴定^[19,28],其中17份在不同研究中的抗性评价结果一致,16份鉴定结果不完全一致,尤其是小麦品系国麦2号的变化较大,在不同研究中的评价结果从中抗到中感。推测原因主要是与病菌种类及生长环境有关,尤其是抽穗到灌浆期的温度、湿度等气象因子对黑胚率的影响较大^[29-30]。

与前人研究相比,本研究筛选的抗黑胚病材料较少,如在王会伟等^[10]、Lü等^[17]研究中分别有13.6%与20.0%的供试材料表现抗病,而本研究中抗病材料仅为1.0%。这可能是因为其他学者的研究多数是在自然大田环境下进行的,由于条件不适宜或病菌致病力较低,黑胚率较低;而本研究进行了接菌鉴定,且所用病原菌*B. sorokiniana*的致病性较强,故表现抗病的种质资源较少。一些学者的研究也表明了这一点,如Conner等^[14]发现,在自然大田条件下,17份春性小麦种质中有7份表现抗黑胚病,而接菌鉴定时,仅筛选到1份抗*B. sorokiniana*材料。可见,黑胚病的发生受致病菌、气象条件等多种因素的影响,为筛选到真正的抗黑胚病种质,需要进行多年多点的接菌鉴定。

根据本研究结果与前人报道^[14,19],在接种*B. sorokiniana*条件下黑胚率较高,而抗性评价采用自然大田条件下的分级标准,导致筛选到的抗病材料过少,此时可以考虑适当放宽评价标准。根据我们前期对165份抗、感黑胚病小麦种质接种*B. sorokiniana*鉴定的结果,接菌样品的黑胚率平均比自然大田收获的样品高13.6%^[19],结合笔者多年进行黑胚病研究的经验,接种*B. sorokiniana*条件下,黑胚率低于10.0%的材料在自然大田条件下有良好的抗性表现,故在接种*B. sorokiniana*鉴定条件下,抗病品种的标准可以将黑胚率低于5.0%放宽到低于10.0%。

小麦黑胚病主要在灌浆期发生、发展,其抗性鉴定只能在灌浆期进行,鉴定结果在成熟脱粒后才能观察^[25],不仅持续时间长,而且致病菌的培

养、孢子液制作、接种、脱粒、调查等环节繁琐,耗费大量的人力物力,很难做到对大量育种后代进行准确的抗性鉴定,所以,分子标记辅助选择(MAS)对于小麦黑胚病抗性改良尤为重要。不少学者进行了黑胚病抗性QTL的研究^[15,24-26],但是目前没有见到育种中可用的分子标记。本研究利用16个已报道黑胚病抗性QTL的连锁标记对种质进行检测,筛选到1个可以显著降低黑胚率的位点*QBB. hau-4A*。在鉴定的412份种质中,有15个两年平均黑胚率低于10.0%、不携带所检测抗性QTL的小麦种质,如ZC223、金麦1号、宁麦20、百农607等,为抗黑胚病新基因挖掘提供了良好的抗源;携带*QBB. hau-4A*的3份中抗种质(05CV078、山农530070与山农38),为通过MAS进行黑胚病抗性改良提供了较为理想的材料。

鉴于本研究筛选到的抗黑胚病小麦种质较少,可能没有全面反映不同QTL的抗病效应。在进一步的研究中,应增加试验材料的数量和来源范围,特别是收集国外抗黑胚病小麦种质,继续筛选抗病种质并较为全面的评价已报道QTLs的抗病效应,为抗性育种提供更多的抗源与实用分子标记。

参考文献:

- [1]李巧云,高 闯,张芳芳,等. 小麦黑胚病抗性位点检测研究进展[J]. 河南农业大学学报,2022,56(1):1.
LI Q Y, GAO C, ZHANG F F, et al. Advances in detection of resistance loci to black point disease in wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, 56(1): 1.
- [2]FERNANDEZ M R, WANG H, SINGH A K. Impact of seed discolouration on emergence and early plant growth of durum wheat at different soil gravimetric water contents [J]. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 2014, 36(4): 509.
- [3]LI Q Y, QIN Z, JIANG Y M, et al. Screening wheat genotypes for resistance to black point and the effects of diseased kernels on seed germination [J]. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2014, 121(2): 79.
- [4]刘建军,解培厚,赵振东,等. 小麦籽粒黑胚发生及其对产量和品质的影响[J]. 山东农业科学, 1997, 29(4): 43.
LIU J J, XIE P H, ZHAO Z D, et al. Occurrence of black embryo in wheat grain and its effect on yield and quality [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 1997, 29(4): 43.
- [5]LORENZ K. Effects of blackpoint on grain composition and baking quality of New Zealand wheat [J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1986, 29(4): 711.
- [6]常共宇,曾 实,郝令军. 黑胚病对小麦品质的影响[J]. 河南农业科学, 2006, 35(11): 55.
CHANG G Y, ZENG S, HAO L J. Influence of black point on wheat grain quality [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2006, 35(11): 55.
- [7]APOGA D, ÅKESSON H, JANSSON H B, et al. Relationship

- between production of the phytotoxin prehelminthosporol and virulence in isolates of the plant pathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana* [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, 108(6): 519.
- [8] PALACIOS S A, SUSCA A, HAIDUKOWSKI M, *et al.* Genetic variability and fumonisin production by *Fusarium proliferatum* isolated from durum wheat grains in Argentina [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 201: 35.
- [9] REES R G, MARTIN D J, LAW D P. Black point in bread wheat: Effects on quality and germination, and fungal associations [J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1984, 24(127): 601.
- [10] 王会伟, 邢小萍, 袁虹霞, 等. 小麦品种(系)的黑胚病抗性评价[J]. 麦类作物学报, 2006, 26(3): 132.
WANG H W, XING X P, YUAN H X, *et al.* Evaluation on the resistance of wheat varieties (lines) to black point [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(3): 132.
- [11] 李巧云, 徐凯歌, 牛吉山. 小麦黑胚病抗性遗传研究进展[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(2): 152.
LI Q Y, XU K G, NIU J S. Research advance in inheritance of wheat resistance to black point [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(2): 152.
- [12] 李新华, 张珂, 欧行奇, 等. 黄淮麦区小麦品种(系)黑胚病抗性研究[J]. 农学报, 2025, 15(2): 8.
LI X H, ZHANG K, OU X Q, *et al.* Study on resistance of wheat varieties to wheat black point kernel in Huang-Huai wheat area [J]. *Journal of Agriculture*, 2025, 15(2): 8.
- [13] 宋改利, 王璐倩, 屈柯飞, 等. *Bipolaris sorokiniana* 黑胚病对中筋小麦淀粉含量、粒度分布与糊化特性的影响[J]. 作物学报, 2025, 51(8): 2164.
SONG G L, WANG L Q, QU K F, *et al.* Effect of *Bipolaris sorokiniana*-induced black point disease on starch content, particle size distribution, and pasting properties of medium-gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(8): 2164.
- [14] CONNER R L, DAVIDSON J G N. Resistance in wheat to black point caused by *Alternaria alternata* and *Cochliobolus sativus* [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1988, 68(2): 351.
- [15] LIU J D, HE Z H, RASHEED A, *et al.* Genome-wide association mapping of black point reaction in common wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *BMC Plant Biology*, 2017, 17(1): 220.
- [16] 王祥向. 四川地区小麦黑胚病病原分离鉴定及黑胚籽粒分级评价[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
WANG X X. Genome-wide association study for Black point resistance in a large germplasm collection of Chinese wheat landraces [D]. Yaan, Sichuan Agricultural University, 2020: 21.
- [17] LÜ G G, DONG Z D, WANG Y D, *et al.* Identification of genetic loci of black point in Chinese common wheat by genome-wide association study and linkage mapping [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(7): 2005.
- [18] TANG H, TAN Z, WANG X X, *et al.* Genome-wide association study of kernel black point resistance in Chinese wheat landraces [J]. *Plant Disease*, 2022, 106(5): 1428.
- [19] LI Q Y, LI M Y, JIANG Y M, *et al.* Assessing genetic resistance in wheat to black point caused by six fungal species in the Huang-Huai wheat area of China [J]. *Plant Disease*, 2020, 104(12): 3131.
- [20] XU K G, JIANG Y M, LI Y K, *et al.* Identification and pathogenicity of fungal pathogens causing black point in wheat on the North China Plain [J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2018, 58(2): 159.
- [21] 王丝雨, 李巧云, 姜玉梅, 等. 小麦山农 4143 抗黑胚病遗传分析及抗性遗传位点检测[J]. 植物病理学报, 2021, 51(2): 225.
WANG S Y, LI Q Y, JIANG Y M, *et al.* Genetic analysis and detection of resistance loci for black point in wheat genotype Shannong 4143 [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2021, 51(2): 225.
- [22] 李巧云, 倪永静, 姜玉梅, 等. 联合鉴定小麦对 *Bipolaris sorokiniana* 黑胚病与叶枯病抗性的方法[P]. 国家发明专利, ZL 2015105396457, 河南农业大学, 2019-8-23.
LI Q Y, NI Y I, JIANG Y M, *et al.* A method for joint identification of resistance of wheat to *Bipolaris sorokiniana* black point disease and leaf blight [P]. National Invention Patent, ZL 2015105396457, Henan Agricultural University, 2019-8-23.
- [23] PAHLICH E, GERLITZ C. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue [J]. *Phytochemistry*, 1980, 19: 11.
- [24] LEHMENSIEK A, CAMPBELL A W, SUTHERLAND M W, *et al.* QTLs for black-point resistance in wheat and the identification of potential markers for use in breeding programmes [J]. *Plant Breeding*, 2004, 123(5): 410.
- [25] LI Q Y, HU R Y, GUO Z F, *et al.* SNP-based identification of QTL for resistance to black point caused by *Bipolaris sorokiniana* in bread wheat [J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(3): 767.
- [26] GAO C, SONG G L, QU K F, *et al.* Quantitative trait loci for resistance to black point caused by *Bipolaris sorokiniana* in bread wheat [J]. *Molecular Breeding*, 2023, 43(2): 10.
- [27] 李巧云, 郭振峰, 尹钊, 等. 194 份小麦品种(系)苗期茎基腐病抗性鉴定与抗病位点检测[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(3): 330.
LI Q Y, GUO Z F, YIN Z, *et al.* Identification of wheat cultivars (lines) resistance to *Fusarium crown rot* at seedling stage and molecular detection of resistance loci [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(3): 329.
- [28] 李海泳, 李梦钰, 高闯, 等. 小麦对 *Bipolaris sorokiniana* 黑胚病与苗期叶枯病抗性的相关性[J]. 河南农业科学, 2023, 52(8): 96.
LI H Y, LI M Y, GAO C, *et al.* Correlation analysis between the resistance of wheat to black point and leaf blight at seedling stage caused by *Bipolaris sorokiniana* [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(8): 96.
- [29] MOSCHINI R C, SISTERNA M N, CARMONA M A. Modelling of wheat black point incidence based on meteorological variables in the southern Argentinean Pampas region [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2006, 57(11): 1151.
- [30] LI Q Y, WANG S Y, CHANG S W, *et al.* Key periods and effects of meteorological factors affecting incidence of wheat black point in the Yellow and Huai wheat area of China [J]. *Crop Protection*, 2019, 125: 104882.