

春小麦品种川育 19 抗叶锈性遗传分析

袁军海,沈凤英,吴伟刚,张爱香

(河北北方学院 植物保护系,河北 宣化 075131)

摘要: 对春小麦品种川育 19 的抗叶锈性进行了遗传分析,以期为小麦抗叶锈病育种提供理论指导。作为父本,川育 19 分别与感病品种 Thatcher 及小麦抗叶锈病近等基因系 *Lr1* 和 *Lr3* 的载体品系 Tc * 6/Centenario 和 Tc * 6/ Democrat 杂交,获得 F₁、F₂、F₃ 后,分别在苗期和成株期进行抗病性测定。在苗期,接种致病类型 BGD/HL, Thatcher × 川育 19 杂交组合的 F₂ 符合 15(抗病):1(感病) 的分离比例,而其余 2 个杂交组合的 F₂ 均全部抗病,说明川育 19 含有显性遗传的抗叶锈病基因 *Lr1* 和 *Lr3*,并相互独立控制对致病类型 BGD/HL 的抗病性;接种致病类型 FBC/GN(或 SHJ/GL),Thatcher × 川育 19 杂交组合的 F₂ 符合 3(抗病):1(感病) 的分离比例,而 Tc * 6/Centenario(*Lr1*) × 川育 19 [或 Tc * 6/Democrat(*Lr3*) × 川育 19] 杂交组合的 F₂ 全部抗病,说明川育 19 含有呈显性遗传的抗叶锈病基因 *Lr1*(或 *Lr3*)且控制对致病类型 FBC/GN(或 SHJ/GL)的抗病性。在成株期,上述 3 个杂交组合的 F₂ 均符合 9(抗病):7(感病) 的分离比例,说明川育 19 的成株期抗病性由 2 对互补遗传的显性抗叶锈病基因控制,且 *Lr1* 和 *Lr3* 在成株期不起作用。

关键词: 春小麦; 川育 19; 叶锈病; 抗病性; 遗传分析

中图分类号: S435.121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2018)02-0067-06

Genetics of Leaf Rust Resistance of Spring Wheat Chuanyu 19

YUAN Junhai, SHEN Fengying, WU Weigang, ZHANG Aixiang

(Department of Plant Protection, Hebei North University, Xuanhua 075131, China)

Abstract: The genetics of leaf rust resistance of spring wheat Chuanyu 19 was studied to provide the theoretical basis for wheat leaf rust resistance breeding. As the male parent, Chuanyu 19 was crossed with Thatcher, a leaf rust susceptible cultivar, and Tc * 6/Centenario and Tc * 6/Democrat, the carrier lines of leaf rust resistance near-isogenic lines *Lr1* and *Lr3* respectively, and the plants of F₁, F₂ and F₃ were evaluated with different pathotypes of wheat leaf rust both at seedling stage and adult stage. In the measurement with the pathotype BGD/HL at seedling stage, segregation of Thatcher × Chuanyu 19 F₂ plants fitted an expected ratio of 15(resistant):1(susceptible), and no susceptible plant was found in the F₂ individuals of the rest two crosses. This indicated that Chuanyu 19 had two dominant resistance genes *Lr1* and *Lr3*, which conferred resistance to the pathotype BGD/HL independently. When inoculated with the pathotype FBC/GN (or SHJ/GL), the Thatcher × Chuanyu 19 F₂ plants segregated to fit a ratio of 3(resistant):1(susceptible), and the Tc * 6/Centenario(*Lr1*) × Chuanyu 19 [or Tc * 6/Democrat(*Lr3*) × Chuanyu 19] F₂ plants were all resistant, indicating that Chuanyu 19 had the dominant leaf rust resistance gene *Lr1* (or *Lr3*), which conferred resistance to the pathotype FBC/GN (or SHJ/GL). At adult stage, segregation of F₂ plants of all three crosses fitted a ratio of 9(resistant):7(susceptible), which suggested that two complementary dominant leaf rust resistance genes accounted for the adult-plant resistance of Chuanyu 19, and the resistance of *Lr1* and *Lr3* was ineffective at adult-plant stage.

收稿日期:2017-08-16

基金项目:河北省自然科学基金项目(C2014405014);河北北方学院创新人才项目(CXRC1312)

作者简介:袁军海(1969-),男,河北无极人,教授,博士,主要从事植物抗病性与病害流行研究。

E-mail:yuanjunhai@163.com

Key words: Spring wheat; Chuanyu 19; Leaf rust; Disease resistance; Genetic analysis

叶锈病是我国小麦的重要病害,主要发生在小麦生长的中后期,因夏孢子堆的出现造成发病部位水分过度散失,最终导致小麦减产甚至死亡。小麦叶锈病的主要防治措施有种植抗病品种和喷洒化学药剂。其中,种植抗病品种经济、有效、简便且对环境安全,更易被种植者采用。基于孟德尔遗传规律的经典遗传分析,可以明确抗病基因的显隐性、对数和相互作用关系等,一直是培育抗病品种的理论基础,但由于该分析一般需要 3~4 a 的时间,所以更适宜对重要材料进行深入研究。我国关于小麦抗叶锈病遗传分析方面的研究始于 20 世纪 90 年代^[1],到目前为止,用于筛选分子标记的相关研究较多^[2~3],而真正较为深入的、传统意义上的遗传分析仍然很少^[4],难以对抗病育种形成系统的理论指导。川育 19 由中国科学院成都生物研究所选育,区试代号为 46648-1,系谱为川育 5 号/墨 460//绵阳 26,属春性、早熟品种,综合农艺性状较好^[5~6]。2003—2009 年,分别在北京冬麦区接种优势致病类型、在张家口春麦区自然发病,多次进行抗病性测定发现,该品种对叶锈病一直表现为慢病。通过基因推导认为,川育 19 含有 *Lr1*、*Lr3* 和其他未知基因^[7]。本试验在此基础上,结合等位性验证,分别在苗期和成株期进行抗病性测定,对川育 19 的抗叶锈性进行了遗传分析,以期为小麦抗叶锈病育种提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

小麦品种川育 19 最初由中国科学院成都生物研究所提供,小麦抗叶锈病近等基因系 *Lr1* 和 *Lr3* 的载体品系 *Tc * 6/Centenario* 和 *Tc * 6/ Democrat* 最初由国际小麦玉米改良中心(CIMMYT)提供,感病对照品种为 Thatcher;小麦叶锈病菌致病类型 BGD/HL、FBC/GN、PHT/RP、SHJ/GL、THT/TP,从采自我国不同地区的小麦叶锈病标样中分离鉴定而来,按照 Long 等^[8]和 Singh^[9]提出的密码规则命名。上述材料均由农业科学院植物保护研究所麦病组繁殖、保存并提供。

1.2 试验方法

配制了 Thatcher × 川育 19、*Tc * 6/Centenario*(*Lr1*) × 川育 19 和 *Tc * 6/Democrat*(*Lr3*) × 川育 19 共 3 个杂交组合。获得 F_1 代种子后,随机选取 6~8 粒播种,花期套袋自交,6~8 株所获得的种子混合

即为 F_2 群体,再从中随机选取 180 粒种子播种,每粒种子的后代作为 1 个 F_3 株系。

苗期抗病性测定在小型塑料盒内进行,预先放入营养土,种子穴播,穴深 1 cm、穴距 5 cm,每穴 5~7 粒种子。杂交亲本川育 19、*Tc * 6/Centenario*(*Lr1*)、*Tc * 6/Democrat*(*Lr3*) 和 Thatcher 分别播种 5~7 粒种子,各杂交组合的 F_1 和 F_2 分别播种 8 粒和 600 粒种子, F_3 播种 150 个株系,每个株系约 70 粒种子。当小麦第一叶片充分展开时,先用清水去蜡,然后喷洒含 0.05% 吐温 20 的夏孢子粉悬浮液,放入保湿桶内,在室温、黑暗条件下保湿约 16 h,然后置于 RXZ-280B 型人工气候箱(宁波江南仪器厂生产)中培养,条件为:温度 18 ℃、相对湿度 95% 以上、光照强度 12 000 lx,每天光照 14 h。10~12 d 后,当感病对照充分发病时,按照 Roelfs^[10]确定的侵染型标准,划分为 0、;、1、2、X、3、4 等 7 个级别调查;若同时出现 2 种侵染型,则多者列前少者列后,如“;1”表示以“;”为主,还有少量“1”,根据前者判断抗病或感病类型;X 表示同时出现“;”、“1”、“2”、“3”和“4”等侵染型中的 3 个或 3 个以上类型。将 7 个级别转换为抗感反应,具体为 0—免疫、;—近免疫、1—高度抗病、2 和 X—中度抗病、3—中度感病、4—高度感病,遗传分析时 0~X 归为抗病类型,3~4 归为感病类型。由于工作量较大, F_3 仅判断整个株系属全部抗病、抗感分离或全部感病,未做单株调查。

成株期抗病性测定在河北北方学院南校区农场进行。小区宽 2.2 m、长 11 m,行距 0.333 3 m,即每小区 34 行,两端为保护行,中间每隔 10 行设 1 行诱发行,其余 30 行为鉴定行。各鉴定行横向分为 3 部分:左、右各 1 m 播种待鉴定材料,中间留出约 0.2 m 空间,与各鉴定行垂直方向,纵向播种 1 行诱发行。保护行和诱发行品种均为 Thatcher。杂交亲本均条播 1 行,行长 1 m;各杂交组合播种量同苗期,但 F_1 和 F_2 均点播,株距 10 cm, F_3 条播,每个株系行长 1 m。小麦返青后拔节前,选择晴天无风的傍晚,用致病类型 PHT/RP 和 THT/TP 的等比混合菌种接种。先在植株基部浇水至土壤含水量过饱和,然后将叶片用清水去蜡、喷洒含 0.05% 吐温 20 的夏孢子粉悬浮液,最后盖塑料膜保湿,次日日出前揭膜。管理同一般大田。待感病对照品种充分发病后,调查各植株旗叶的抗感反应和严重度。抗感反应根据 Roelfs^[10]确定的侵染型标准调查后转换为抗感反应

类型;严重度根据 Peterson 等^[11]确定的方法估测,记为 0~100%。

2 结果与分析

2.1 供试小麦品种(系)抗叶锈性测定

川育 19 在苗期对 PHT/RP 和 THT/TP 表现高度感病,对其他供试致病类型均表现免疫,在成株期

表现感病,但严重度仅为 5%~10%。在苗期,Lr1 的载体品系 Tc * 6/Centenario 对致病类型 BGD/HL 和 FBC/GN,及 Lr3 的载体品系 Tc * 6/ Democrat 对 BGD/HL 和 SHJ/GL,均表现为近免疫,其他组合均表现为高度感病;二者在成株期均表现为高度感病。Thatcher 在苗期和成株期均表现为高度感病(表 1)。

表 1 供试小麦品种(系)抗叶锈性测定结果

供试品种(系)	苗期抗病性					成株期抗病性	
	BGD/HL	FBC/GN	PHT/RP	SHJ/GL	THT/TP	严重度/%	抗感反应
川育 19	0	0	3 ⁺	0	3 ⁺	5~10	高度感病
Tc * 6/Centenario(Lr1)	0;	0;	3 ⁺	3 ⁺	3 ⁺	≥80	高度感病
Tc * 6/Democrat(Lr3)	;	3 ⁺	3 ⁺	0;	3 ⁺	≥80	高度感病
Thatcher	3 ⁺	≥80	高度感病				

2.2 川育 19 苗期抗叶锈病遗传分析

对 Thatcher × 川育 19 杂交组合接种致病类型 BGD/HL,8 株 F₁ 均表现抗病,F₂ 共测定 523 株,484 株归为抗病类型、39 株归为感病类型,符合 15(抗病):1(感病)的期望比例,说明川育 19 对致病类型 BGD/HL 的抗病性由 2 对独立遗传的显性抗叶锈病基因控制;F₃ 共测定 150 个株系,其中 58 个株系全部抗病、80 个株系抗感分离、12 个株系全部感病,符合 7(全部抗病):8(抗感分离):1(全部感病)的期望比例,可验证 F₂ 的结果(表 2)。对 Tc * 6/Centenario(Lr1) × 川育 19 杂交组合接种致病类型 BGD/HL,F₂ 共测定 517 株,全部抗病,说明川育 19 含有 Lr1,或群体尚小未出现感病植株。若为后者,则 Tc * 6/Centenario(Lr1) × 川育 19 杂交组合至少含有 4 对独立遗传的显性抗叶锈病基因,才能满足 517(抗病):0(感病)的分离情况,即川育 19 中至少含有 3 对显性抗叶锈病基因,但这与相同情况下 Thatcher × 川育 19 杂交组合的分离情况不符合,故否定此可能性,认为川育 19 含有 Lr1。同理可推断川育 19 亦含有 Lr3。综合判断,在 Thatcher × 川育 19 杂交组合中,控制对致病类型 BGD/HL 抗病性的 2 对显性抗叶锈病基因是川育 19 所含有的 Lr1 和 Lr3。

对 Thatcher × 川育 19 杂交组合接种致病类型 FBC/GN,6 株 F₁ 均抗病,F₂ 的分离符合 3(抗病):1(感病)的期望比例,说明川育 19 对 FBC/GN 的抗病性由 1 对显性抗叶锈病基因控制,F₃ 的分离情况可验证上述结果(表 2)。相同情况下对于 Tc * 6/Centenario(Lr1) × 川育 19 杂交组合,538 株 F₂ 全部抗病,同上述分析,可认为川育 19 含有 Lr1。即在 Thatcher × 川育 19 杂交组合中,控制对致病类型 FBC/GN 抗病性的 1 对显性抗叶锈病基因是 Lr1。

相同条件下,Tc * 6/Democrat(Lr3) × 川育 19 杂交组合的 F₂ 符合 3(抗病):1(感病)的分离比例,考虑到 FBC/GN 对 Lr3 有毒性而对 Lr1 无毒性(表 1),故起作用的 1 对显性抗叶锈病基因是川育 19 所含有的 Lr1,否则,若川育 19 含有其他对 FBC/GN 有抗病作用的基因,则与相同情况下 Thatcher × 川育 19 杂交组合的分离情况无法相互验证。同理可推断,在 Thatcher × 川育 19 和 Tc * 6/Centenario(Lr1) × 川育 19 杂交组合中,控制对致病类型 SHJ/GL 抗病性的 1 对显性抗叶锈病基因均为川育 19 所含有的 Lr3。

2.3 川育 19 成株期抗叶锈病遗传分析

对 Thatcher × 川育 19 杂交组合,6 株 F₁ 均表现为中度抗病,且严重度均低于 30%;F₂ 共测定 557 株,其中 65 株中度抗病、228 株中度感病至感病,且严重度均低于 30%,可归为抗病类型,20 株中度感病至感病,且严重度为 31%~60%,考虑到在生产上尚有一定应用价值,也归为抗病类型,其余 188 株中度感病至感病及 56 株感病,且严重度均高于 60%,可归为感病类型,313 株抗病、244 株感病,符合 9(抗病):7(感病)的期望比例,说明在 Thatcher × 川育 19 杂交组合中,成株期的抗病性由 2 对互补遗传的显性抗叶锈病基因控制;根据上述 F₂ 的抗病与感病的分界线判断,F₃ 有 13 个株系全部抗病、77 个株系抗感分离、60 个株系全部感病,符合 1(全部抗病):8(抗感分离):7(全部感病)的期望比例,可验证 F₂ 的结果(表 3)。

对 Tc * 6/Centenario(Lr1) × 川育 19 杂交组合,5 株 F₁ 均表现为中度抗病,除 1 株严重度为 31%~60% 外,其余 4 株均低于 30%;根据上述分析确定的 F₂ 的抗感分界线判断,F₂ 有 317 株抗病、225 株感病,符合 9(抗病):7(感病)的期望比例;F₃ 有 5 个

表 2 川育 19 苗期抗叶锈病遗传分析

杂交组合	致病类型	世代	各侵染型分布株数			总株数	植株或系统数	感病分离	比例	χ^2	P
			0	;1	1						
Thatcher × 川育 19	BGD/HL	F ₁	5	3	9	30	523	484	—	0	0.25 ~ 0.50
		F ₂	387	82	15	—	3 895	58	—	39	15:1
		F ₃	2 478	1 141	276	1	5 049	—	—	—	7:8:1
FBC/GN	FBC/GN	F ₁	6	31	1	115	858	—	—	—	0.25 ~ 0.50
		F ₂	283	97	117	1	2	2 401	37	—	—
		F ₃	1 652	631	15	1	4	4 821	—	73	—
SHJ/GL	SHJ/GL	F ₁	6	1	1	239	1 409	—	—	—	0.22267
		F ₂	308	105	11	143	2 487	2 630	—	40	0.75 ~ 0.90
		F ₃	2 204	716	36	18	99	542	7	—	—
Tc * 6/Centenario(Lrl) × 川育 19	BGD/HL	F ₁	489	27	1	3	286	1 058	4 880	—	—
		F ₂	417	93	28	—	55	1 998	2 053	—	—
		F ₃	284	95	9	19	127	534	388	—	—
Tc * 6/Democrat(Lr3) × 川育 19	BGD/HL	F ₁	496	74	3	—	—	573	573	—	—
		F ₂	303	85	6	2	17	107	520	396	—
		F ₃	446	107	12	—	—	565	565	—	—

表 3 川育 19 成株期抗叶锈病遗传分析

杂交组合	世代	各严重度(%)和抗感反应分布株数						总株数	抗病分离	感病分离	期望比例	χ^2	P
		1 ~ 30	31 ~ 60	61 ~ 80	≥81	1 ~ 30	31 ~ 60	61 ~ 80	≥81	—	—	—	
Thatcher × 川育 19	F ₁	6	228	20	188	56	557	6	6	—	—	0	0.000 3 > 0.95
	F ₂	65	—	—	—	—	—	313	13	77	—	244	9:7
	F ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	1:8:7 1.937 1 0.25 ~ 0.50
Tc * 6/Centenario(Lrl) × 川育 19	F ₁	4	219	45	183	42	542	5	5	—	—	0	—
	F ₂	53	—	—	—	—	—	317	—	—	—	225	9:7
	F ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Tc * 6/Democrat(Lr3) × 川育 19	F ₁	5	207	18	211	27	573	5	5	—	—	0	—
	F ₂	43	—	—	—	—	—	335	—	—	—	238	9:7 1.013 2 0.25 ~ 0.50
	F ₃	12	—	—	—	—	—	15	81	54	54	1:8:7	5.914 3 0.05 ~ 0.10

注: S. 感病; MS - S. 中度感病至感病。

株系全部抗病、75个株系抗感分离、70个株系全部感病,也符合1(全部抗病):8(抗感分离):7(全部感病)的期望比例。说明Tc * 6/Centenario(*Lr1*) × 川育19杂交组合在成株期的抗病性亦由2对互补遗传的显性抗叶锈病基因控制,与Thatcher × 川育19杂交组合相同,同时也说明在Tc * 6/Centenario(*Lr1*) × 川育19杂交组合中,抗病性由川育19提供,Tc * 6/Centenario(*Lr1*)的抗病性在成株期不起作用,可验证表1结果。同理,Tc * 6/ Democrat(*Lr3*) × 川育19杂交组合在成株期的抗病性也由川育19提供的2对互补遗传的显性抗叶锈病基因控制,Tc * 6/ Democrat(*Lr3*)的抗病性在成株期亦不起作用。

3 结论与讨论

川育19含有呈显性遗传的*Lr1*和*Lr3*,在苗期分别控制对致病类型FBC/GN和SHJ/GL的抗病性,且2对基因相互独立遗传,均控制对致病类型BDG/HL的抗病性;*Lr1*和*Lr3*的抗病性在成株期不起作用,川育19的成株期抗病性由2对互补遗传的显性抗叶锈病基因控制。

*Lr1*和*Lr3*在我国小麦品种中的出现频率分别约为13.42%和9.17%^[12]。由于较早的、广泛性的应用,导致病原物中相应的毒性基因频率上升,反过来克服抗病基因的抗病性,故*Lr1*和*Lr3*在我国早已经失效。我国首次正式报道小麦叶锈菌群体毒性时,*Lr1*和*Lr3*的毒性频率已分别达到30.02%和89.10%^[13],而在近期的许多报道中,二者均已达95%以上^[14-15]。美国的情况也很相似^[16]。但与合适的基因组合起来,*Lr1*和*Lr3*尚可发挥“残存”的抗病性,提高整体抗病能力。如*Lr1*和*Lr34*在成株期的抗病性分别为90S和T-20M(T表示微量侵染型,M表示混合侵染型,分别与本研究中的近免疫侵染型“;”和中度抗病侵染型“X”近似),将二者组合在同一品系中抗病性为T-5M^[17];*Lr1*、*Lr3*和*Lr13*在成株期的抗病性分别为80S、70S和60MR(MR表示中度抗病),而*Lr1*和*Lr13*组合起来的抗病性为20MR-30MS,*Lr3*和*Lr13*组合起来的抗病性为10MR^[18]。

在已正式命名的抗叶锈病基因中,仅*Lr27*和*Lr31*呈显性遗传且互补起作用^[19-20]。陈万权等^[21]用我国叶锈菌优势致病类型测定发现,*Lr27*+*Lr31*在成株期出现0(免疫)和65S2种情况,怀疑是种子混杂所致,但在许多关于小麦叶锈菌群体毒性分析中,*Lr27*+*Lr31*的毒性频率均在60%以上^[15,21-22],故65S的鉴定结果更可信,说明*Lr27*+*Lr31*的抗病

性在我国已基本失效。而川育19在成株期的表现为5~10S,仅后期出现少量感病孢子堆,前期接近免疫,说明其抗病性仍比较有效。当然,也可能出现*Lr27*+*Lr31*与*Lr13*或*Lr34*等基因互作提高抗病性的情况,但若如此,川育19在成株期的抗病性应呈现3对及3对以上抗病基因分离的情况。所以,川育19中控制成株期抗病性的2对互补遗传的显性抗叶锈病基因更可能是新基因。

抗感分界线的划分是遗传分析的关键之一。本试验的苗期结果,明显分为2部分,分别与抗病亲本和感病亲本的侵染型接近,没有中间类型,或中间类型很少,且考虑到所有可能的期望比例后,划归抗病类型或感病类型均对最终结果无影响,直接根据F₂即可判断抗感分界线。但成株期的结果,中间类型较多,如果仍仅根据F₂判断,可能存在多个抗感分界线,能够分别符合各自的期望比例。对此,杨作民^[23]认为,根据F₃系统的不同分离情况反过来划分F₂单株类别,才是较合理的做法,这也是本试验进行抗感分界线划分时遵循的基本原则。

致谢:中国农业科学院植物保护研究所的刘太国研究员和冯晶副研究员参与部分工作,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 赤国彤,王焕如,朱之培.7个小麦品种抗叶锈病遗传研究初报[J].河北农业大学学报,1991,14(4):76-78.
- [2] 王佳真,李在峰,李星,等.小麦品系5R618抗叶锈病基因的初步定位[J].植物遗传资源学报,2014,15(6):1348-1351.
- [3] 张培培,周悦,董海焦,等.周麦11、西农1163-4抗叶锈病基因与周8425B中*LrZH84*的关系[J].江苏农业科学,2015,43(10):33-36.
- [4] 袁军海,陈万权.春小麦品种青春221抗叶锈性遗传分析[J].植物保护学报,2013,40(1):20-26.
- [5] 刘正德,姚革,蒋滨,等.四川省小麦条锈病、白粉病、赤霉病抗性鉴定及抗原筛选[J].西南农业学报,2005,18(3):291-294.
- [6] 伍玲,朱华忠,邓丽,等.1997—2007年通过四川省区试审定的小麦品种述评[J].西南农业学报,2008,21(3):562-569.
- [7] 袁军海,刘太国,陈万权.中国47个小麦新品种(系)苗期抗叶锈病基因推导[J].中国农业科学,2007,40(9):1925-1935.
- [8] Long D L, Kolmer J A. A North American system of nomenclature for *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* [J]. Phytopathology, 1989, 79(5):525-529.
- [9] Singh R P. Pathogenicity variations of *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* and *P. graminis* f. sp. *tritici* in wheat-growing areas of Mexico during 1988 and 1989[J]. Plant Disease, 1991, 75(7):790-794.
- [10] Roelfs A P. Race specificity and methods of study[M]//

- Bushnell W R, Roelfs A P. The cereal rust I . Origins, specificity, structure, and physiology. New York: Academic Press, 1985:134.
- [11] Peterson R F, Campbell A B, Hannah A E. A diagrammatic scale for estimating rust intensity on leaves and stems of cereals [J]. Canadian Journal of Research (Section C), 1948, 26(4):496-500.
- [12] 袁军海,陈万权.中国小麦主要抗叶锈病基因的有效性评价[J].麦类作物学报,2011,35(7):794-801.
- [13] 郭爱国,赤国彤,杨文香,等.1990年河北省小麦叶锈菌群体的毒性分析[J].河北农业大学学报,1992,15(1):43-46.
- [14] 赵盼盼,孟庆芳,郭楠,等.2009—2011年河南省小麦叶锈菌毒性结构分析[J].河南农业科学,2013,42(4):91-94.
- [15] 原宗英,武英鹏,刘敏捷.山西省小麦叶锈菌致病类型及毒性监测[J].山西农业科学,2017,45(3):448-450.
- [16] Kolmer J A, Hughes M E. Physiologic specialization of *Puccinia triticina* on wheat in the United States in 2013 [J]. Plant Disease, 2015, 99(10):1261-1267.
- [17] German S E, Kolmer J A. Effect of gene *Lr34* in the enhancement of resistance to leaf rust of wheat [J]. Theoretical and Applied Genetics, 1992, 84(1):97-105.
- [18] Kolmer J A. Enhanced leaf rust resistance in wheat conditioned by resistance gene pairs with *Lr13* [J]. Euphytica, 1992, 61(1):123-130.
- [19] Singh R P, McIntosh R A. Complementary genes for reaction to *Puccinia recondita tritici* in *Triticum aestivum*. I . Genetic and linkage studies [J]. Canadian Journal of Genetics and Cytology, 1984, 26(6):723-735.
- [20] Singh R P, McIntosh R A. Complementary genes for reaction to *Puccinia recondita tritici* in *Triticum aestivum*. II . Cytogenetic studies [J]. Canadian Journal of Genetics and Cytology, 1984, 26(6):736-742.
- [21] 陈万权,秦庆明.国际上已知小麦抗叶锈病基因在中国的可利用性研究[J].中国农业科学,2002,35(7):794-801.
- [22] Liu T G, Chen W Q. Race and virulence dynamics of *Puccinia triticina* in China during 2000—2006 [J]. Plant Disease, 2012, 96(11):1601-1607.
- [23] 杨作民.小麦对条锈病抗性遗传的研究[J].作物学报,1981,7(2):81-90.

(上接第 31 页)

表 3 3 种类型冷水红糙米中 17 种氨基酸含量 %

氨基酸种类	丰两优 4 号 (CK)	小粒无芒	大粒短芒	大粒长芒
天冬氨酸(ASP)	9.24	13.65	14.57	13.98
谷氨酸(GLU)	8.49	13.68	12.46	13.42
胱氨酸(CYS)	0.48	0.48	1.44	0.55
丝氨酸(SER)	2.76	4.05	3.96	4.30
甘氨酸(GLY)	2.62	4.87	4.22	3.31
组氨酸(HIS)	-	0.18	0.40	-
精氨酸(ARG)	3.71	6.13	7.63	6.14
★苏氨酸(THR)	4.62	6.04	6.62	6.36
丙氨酸(ALA)	3.30	4.84	4.72	5.06
脯氨酸(PRO)	3.25	4.64	4.33	4.42
酪氨酸(TYR)	1.34	1.78	1.77	1.66
★缬氨酸(VAL)	2.81	4.22	4.31	4.31
蛋氨酸(MET)	0.95	1.24	1.35	0.93
★异亮氨酸(ILE)	2.00	2.98	3.11	3.06
★亮氨酸(LEU)	6.55	8.16	8.01	8.24
★苯丙氨酸(PHE)	2.68	3.92	4.15	4.07
★赖氨酸(LYS)	1.55	2.69	2.87	2.70

注:★为必需氨基酸,未检出的氨基酸检出限为 86.14 mg/kg。

5 结论与讨论

神农架冷水红脂肪含量、氨基酸总量等比对照丰两优 4 号高很多,比一般大米具有更高的营养价值;种植地点海拔高,气温低,米皮红色更深,较一般色浅红皮米的抗癌、抗氧化价值更大;加之种植在神农架这种无污染、天然纯绿色条件下,可开发成名优特产红米,提高冷水红品牌的附加值和种植者收入。神农架冷水红的蛋白质和直链淀粉含量较高,其口

感可能较差,米质偏硬,不易煮熟,实际食用过程中也存在这样的问题,另外株高太高,容易倒伏,解决这些问题还需要对其进行进一步的遗传改良。通过农艺性状、营养成分等指标分析发现,冷水红材料提纯保存的理想类型是大粒短芒型。

参考文献:

- [1] 孙明茂,韩龙植,李圭星,等.水稻花色苷含量的遗传研究进展 [J].植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 239-245.
- [2] 柏鹤,马小定,曹桂兰,等.不同类型特种稻种质营养及功能性成分含量的差异 [J].植物遗传资源学报, 2017, 18(6):1013-1022.
- [3] Koide T, Kamei H, Hashimoto Y, et al. Antitumor effect of hydrolyzed anthocyanin from grape rinds and red rice [J]. Cancer Biother Radio Pharm, 1996, 11(4): 273-278.
- [4] 修茹燕,程祖锌,王龙平,等.富含花色苷的发芽黑米速食粥加工工艺优化 [J].食品科学, 2016, 41(5): 175-179.
- [5] 中华人民共和国卫生部.食品中脂肪的测定:GB/T 5009.6—2003[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [6] 中华人民共和国卫生部.大米直链淀粉含量的测定:GB/T 15683—2008/ISO 6647-1:2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [7] 郭立泉,辛若竹,鲍钧镝,等.大米中直链淀粉含量快速测定方法的探讨 [J].粮食与饲料工业, 2010(12): 39-41.
- [8] 于永红,朱智伟,程方民.稻米的脂肪 [J].中国稻米, 2006(3):12-13.