



稻米抗性淀粉含量及其环境稳定性分析

张春龙, Channarong PHONGSAI, 张江丽, 于洋, 苏耀华, 杨米, 高亮, 普世皇,
李娟, 金寿林, 谭学林, 文建成

(云南农业大学稻作研究所, 昆明 650201)

摘要: 【目的】食用高抗性淀粉含量稻米虽利于提高慢性病人群的健康水平, 但培育出的高抗性淀粉含量水稻品种还较少。开展水稻种质资源抗性淀粉含量及其环境稳定性的研究, 为高抗性淀粉含量水稻种质资源发掘和生产应用提供参考依据。【方法】参照爱尔兰 Megazyme 公司提供的方法测定稻米抗性淀粉含量, 用 PAST 软件完成种质含量分布作图。通过一年多点试验评价抗性淀粉含量的环境稳定性, 利用 DPS 软件完成含量方差分析。依据国家标准 GB/T15683-2008 分析了稻米直链淀粉含量。【结果】对 1 206 份水稻种质稻米抗性淀粉含量分析, 结果表明, 绝大部分水稻种质稻米抗性淀粉含量低, 含量低于 2.5% 的占 87.6%, 高于 10% 的仅占约 0.2%。稻米抗性淀粉和直链淀粉含量存在显著正相关, 但在高直链淀粉含量种质中未出现抗性淀粉含量高的品系, 却在低直链淀粉含量种质中发现 3 份抗性淀粉含量高于 10% 的品系, 其中 1 个优质软米品种 Diangu2 的抗性淀粉和直链淀粉含量分别为 10.12% 和 12.3%, 综合农艺性状优良, 米饭食味性好。在 3 个不同环境种植 18 个不同抗性淀粉含量的品系, 结果显示有 13 个品系的含量不受种植环境差异的影响, 另 5 个品系的含量受环境影响, 稻米的抗性淀粉含量除了受基因型影响外, 还受种植环境、以及基因型与环境互作的影响。【结论】水稻种质资源稻米抗性淀粉含量普遍很低, 抗性淀粉含量与直链淀粉含量虽存在显著正相关, 但低直链淀粉含量种质中也可能存在高抗性淀粉的品种, 所以培育稻米抗性淀粉含量高且食口性好的品种是可能的。稻米抗性淀粉含量主要受基因型控制, 在不同环境中含量高的品种依然高, 含量低的品种仍然低, 那么高含量的品种可在其适种稻区种植生产大米, 其含量不会被明显影响。

关键词: 水稻; 种质资源; 抗性淀粉; 直链淀粉; 环境稳定性

Evaluation of Rice Germplasms for Grain Resistant Starch Content and Its Environmental Stability

ZHANG ChunLong, Channarong PHONGSAI, ZHANG JiangLi, YU Yang, SU YaoHua, YANG Mi, GAO Liang,
PU ShiHuang, LI Juan, JIN ShouLin, TAN XueLin, WEN JianCheng

(Rice Research Institute of Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: 【Objective】It is beneficial for improving the health of chronic patients to eat high resistant starch (RS) content rice, but variety with high grain RS content is still very rare. Evaluations of rice germplasms for grain RS contents and its environmental stability were carried out in this study, and the results could provide a reference for the discovery of rice germplasm resources with high RS contents and its production. 【Method】Grain RS contents in rice germplasms were detected by the Megazyme method, and used the PAST software to complete the frequency distribution of these contents. The environmental stability of rice RS contents

收稿日期: 2019-02-27; 接受日期: 2019-05-27

基金项目: 云南省重点新产品开发计划 (2015BB015)、云南省院士工作站项目 (2018IC065)

联系方式: 张春龙, E-mail: zhangchl1013@163.com. Phongsai Channarong, E-mail: 3364652018@qq.com. 张春龙和 Phongsai Channarong 为同等贡献作者。通信作者文建成, E-mail: jcwen1117@163.com

were tested by planting at multiple locations within one year, and its variance analysis were performed with DPS software. Grain amylase contents were tested according to the national standard GB/T15683-2008. 【Result】The initial evaluations on RS contents of 1206 rice germplasms demonstrated that for most these rice with RS content were very low, and about 87.6% of the rice were less than 2.5%, only about 0.2% were higher than 10%. There was a significant positive correlation between rice RS and amylose content, but high RS variety was not discovered in high amylose germplasms. However, three varieties with RS content higher than 10% were screened in low amylose content germplasms, and one of them was a good quality soft rice variety Diangu2, which has RS and amylose content of 10.12% and 12.3%, respectively. It carried out regional tests for eighteen varieties with different RS contents planting at three very differ environmental conditions. The result of environmental stability analysis indicated that the contents of thirteen varieties were affected by differences in planting area, of the others were affected. Totally, the contents were affected by genotype, planting environment and genotype-by-environment interactions. 【Conclusion】In this research, most rice resources have low RS content, and also detected a significant positive correlation between rice grain RS and amylose content. Therefore, it is possible to develop rice variety with high RS starch and good taste, according the high RS varieties were identified in low amylose content germplasms. The RS content was mainly affected by genotype, so the varieties with high RS contents were high at different environments, and the lows' were still low. Then, the varieties with high RS content can grow in its suitable areas to produce rice, and the contents could not be significantly affected.

Key words: rice (*Oryza sativa* L.); germplasm resource; resistant starch; amylose; environmental stability

0 引言

【研究意义】水稻是人类长期进化过程中选择的重要粮食作物,其淀粉含量高达籽粒重量的 75%—85%^[1],为世界人口提供了约 25%的能量^[2]。稻米淀粉通常分为直链淀粉和支链淀粉,根据其消化分为快速消化性、慢速消化性和抗性淀粉。而抗性淀粉是在健康小肠中不能被消化吸收的淀粉或者其水解产物^[3]。食用抗性淀粉含量高的大米对糖尿病患者的血糖指数控制功效显著^[4-6],还具有一定功效的降血脂和控制体重^[6]、以及改善肠道环境^[7]的生理功能。抗性淀粉通过上消化道进入结肠并被细菌发酵,产生一些能减少结肠癌前体的重要代谢物^[8]。因此,培育高抗性淀粉含量的水稻品种,是代谢综合症的人群的理想新食物,而且食用它还不用改变人们的饮食习惯。【前人研究进展】据报道,稻米中可消化淀粉含量非常高^[9-10],不被消化的抗性淀粉含量通常低于 2%^[11],但还是培育出一些高抗性淀粉含量水稻品种,如浙江大学培育的突变体 RS111 热米饭抗性淀粉含量为 10.0%^[12],国际水稻研究所的突变体 AE 为 8.25%^[13],云南省农业科学院的“功米 3 号”抗性淀粉含量在 10%以上^[14],上海市农业科学院的“降糖稻 1 号”^[13]和新品系 SBE3^[15]分别达 14.86%和 10%。在性状遗传上,抗性淀粉含量受主效和微效基因控制^[14],除了受基因型控制^[16-17],还受到种植条件的影响^[18]。抗性淀粉含量与直链淀粉含量有关^[8,19],也与支链淀粉密切相关^[20]。【本研究切入点】目前高抗性淀粉含量的水稻新品

种多是采用物理化学诱变或者是生物技术手段培育而成^[12-13,15],在自然水稻种质中发现的不多。且含量高的品种表现产量较低,口感较差,消费者普遍接受困难^[21]。云南是中国拥有稻区生态类型最复杂和稻种资源最丰富的省份,也可能存在高抗性淀粉含量品种。

【拟解决的关键问题】本研究基于云南丰富的水稻种质资源,开展水稻抗性淀粉含量及其环境稳定性研究,为高抗性淀粉含量水稻种质资源评价和生产应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

共计 1 206 份品种(系),均为云南农业大学稻作研究所于 2015—2018 年开展籼稻育种收集和创制,包括云南软米品种及其改良的软米材料 110 份、香稻品种及其改良的香米材料 118 份、杂交稻亲本材料 475 份及其测配新组合 503 个。其中,用于环境稳定性分析的不同抗性淀粉含量的 18 个品系选自分析的 110 份软米材料。

1.2 试验种植

不同类型种质材料均种植于元阳县,按顺序排列种植,单穴单苗,无重复,成熟按品种(系)分收。基因型与环境互作试验于 2017 年种植于 3 个不同生态环境元阳县、勐海县和广南县,各点按随机区组排列,单穴单苗,2 次重复,行距 26.0 cm,株距 20.0 cm,每小区 13.32 m²。元阳县(海拔 300 m、年均气温 24.4℃、年雨量 1 189.1 mm)1 月播种,3

月移栽，6 月成熟收获；勐海县（海拔 1 150 m、年均气温 18.7℃、年雨量 1 341.0 mm）2 月播种，4 月移栽，8 月成熟收获；广南县（海拔 1 250 m、年均气温 18.0℃、年降雨量 1 042.1 mm）4 月播种，5 月移栽，9 月成熟收获。试验田肥力均匀，肥水管理与当地大田生产一致。

1.3 方法

成熟收获种子，晾干，去瘪谷和杂质，用精米机碾磨出精米，后用搅拌机打成米粉，过筛（100 目）备用。

1.3.1 稻米抗性淀粉含量测定 准确称取（100±5）mg 米粉样品，每品种（系）3 次重复，根据 Megazyme 公司抗性淀粉测定试剂盒说明书操作，加入胰 a-淀粉酶（10 mg·mL⁻¹）和 AGM（3 IU·mL⁻¹）的混合工作溶液，放置于 37℃ 水浴摇床中孵育 16 h，用 GOPOD 试剂在分光光度计波长 510 nm 处测定吸光值，并计算出各品种（系）抗性淀粉含量。

1.3.2 稻米直链淀粉含量测定 依据国家标准 GB/T15683-2008《大米直链淀粉含量的测定》分析稻米直链淀粉含量。利用分析纯淀粉标准品配置不同梯度浓度溶液，于 720 nm 波长测定吸光度，获得标准曲线。准确称取（100±5）mg 米粉样品，每品种（系）3 次重复，通过沸水浴，并加入 I₂-KI 溶液等一系列反应，于 720 nm 波长测定吸光度，并通过标准曲线最终获得样品中的直链淀粉含量。

1.4 数据统计

利用 Excel 软件统计稻米抗性淀粉和直链淀粉含量平均值，用 PAST 软件分析种质含量分布，利用 DPS 软件进行方差分析。

2 结果

2.1 水稻种质稻米抗性淀粉含量变异

通过对 1 206 份不同类型水稻种质稻米的抗性淀粉含量分析，结果表明，水稻种质的抗性淀粉含量存在明显差异（表 1 和图 1）。在 110 份软米种质中，稻米抗性淀粉平均含量 0.61%，含量高于 5.00%的有 4 份，其中 2 份的抗性淀粉含量分别为 12.70%和 10.12%；在 118 份香稻种质中，抗性淀粉平均含量为 0.34%，含量高于 5.00%仅有 1 份；杂交稻亲本材料 475 份，抗性淀粉平均含量为 0.76%，含量高于 5.00%的有 2 份，其中 1 份含量为 12.84%；在 503 个杂交稻组合中，抗性淀粉平均含量为 1.49%，含量高于 5.00%的有 11 个，最高含量为 6.66%。

从所检测材料稻米抗性淀粉含量分布（图 1）看，含量小于 2.50%的品种有 1 056 份，占总数的 87.6%，含量在 2.50%—5.00%的有 132 份，占 11.0%，含量在 5.00%—7.50%的有 15 份，占 1.2%，含量在 7.50%—10.00%的有 0 份，含量高于 10.00%的有 3 份，占 0.2%。总之，绝大部分种质的稻米抗性淀粉含量低，含量高于 10.00%的非常少见。

表 1 水稻种质稻米抗性淀粉含量平均值
Table 1 Average value of grain RS contents in rice germplasms

种质 Accession	年份 Year	样本数 Number of samples	平均值 Mean (%)	变幅 Range (%)
软米 Soft rice	2015	47	1.09	0.01—12.70
	2016	63	0.25	0.00—10.12
香稻 Aroma rice	2015	34	0.96	0.02—5.31
	2016	84	0.09	0.00—3.12
杂交稻亲本 Parents of hybrid rice	2015	42	0.52	0.01—12.84
	2016	95	0.17	0.00—2.80
	2018	338	0.96	0.00—5.23
杂交稻 Hybrid rice	2015	101	1.37	0.02—6.33
	2016	102	0.12	0.00—0.98
	2017	178	1.89	0.24—4.39
	2018	122	2.19	0.03—6.66
合计 Total		1206	1.01	0.00—12.84

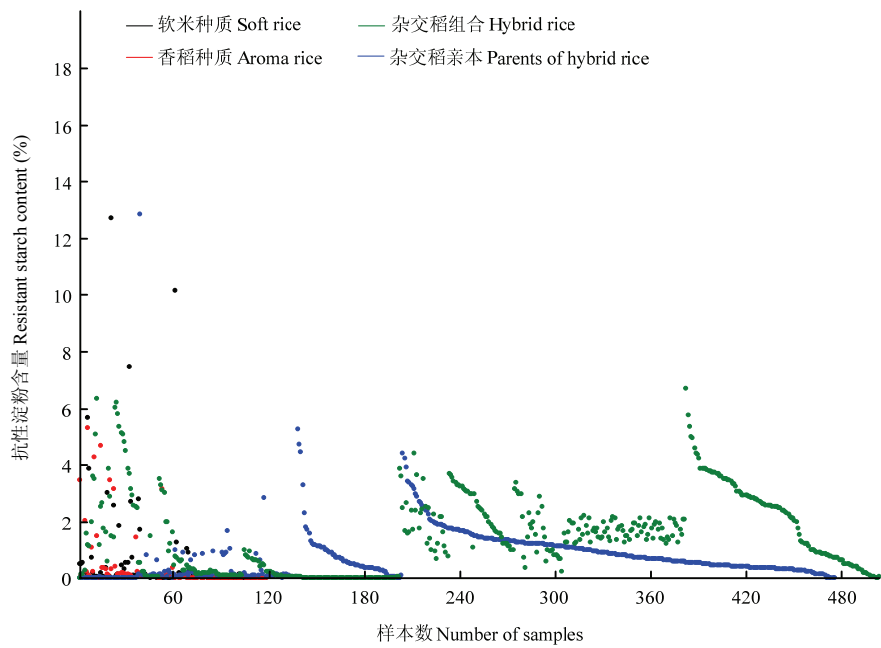


图 1 水稻种质稻米抗性淀粉含量分部图

Fig. 1 Frequency distribution of grain RS contents in rice germplasms

2.2 稻米抗性淀粉和直链淀粉含量的相关性

相关性分析结果表明,在所检测的 708 份水稻种质稻米中,抗性淀粉和直链淀粉含量相关系数为

$r=0.1586$, P 值为 $2.24E-05$, 达到极显著水平。从含量分布(图 2)看,有 23 份高直链淀粉含量种质,含量分布在 25.08%—32.00%,抗性淀粉平均含量为 1.66%,

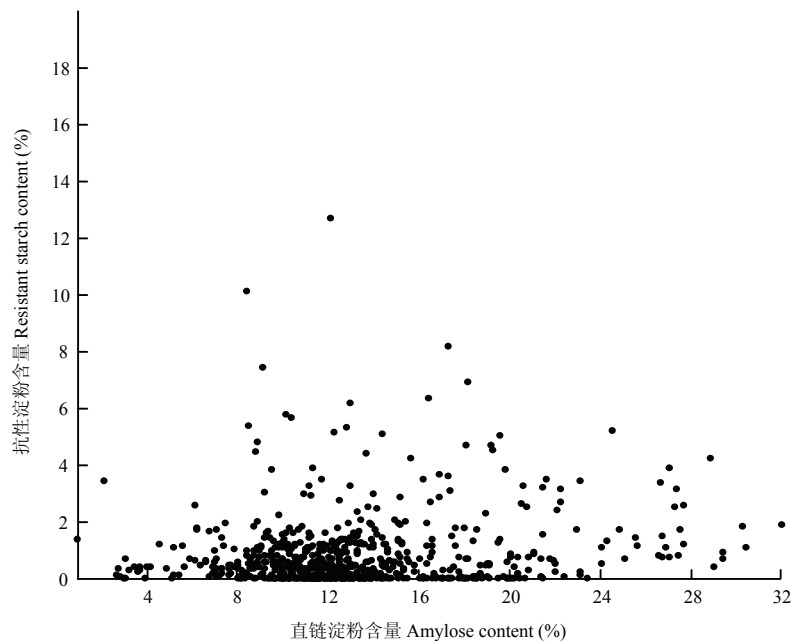


图 2 水稻种质稻米抗性淀粉和直链淀粉含量的分布图

Fig. 2 Distribution of grain RS and amylose contents in rice germplasms

变幅为 0.41%—4.20%；有 41 份中等直链淀粉含量种质，含量为 20.04%—24.86%，它们的抗性淀粉平均含量为 1.18%，变幅为 0.01%—5.22%；有 644 份低直链淀粉含量种质，含量低于 20.00%，其抗性淀粉平均含量为 0.75%，变幅范围为 0.00—12.71%。

虽然稻米抗性淀粉和直链淀粉含量存在显著正相关，但在高和中等直链淀粉含量的种质中都没有出现抗性淀粉含量高于 10.00%的品种（系），却在低直链淀粉含量的软米种质中出现 2 份抗性淀粉含量高于

10.00%的品种，这两份材料的直链淀粉含量分别为 12.13%和 12.30%。其中一个为云南优质软米品种 Diangu2，其抗性淀粉和直链淀粉含量分别为 10.12%和 12.30%，综合农艺性状优良，米质分析达农业部优质米标准 3 级。

2.3 种植环境差异对稻米抗性淀粉含量的影响

通过方差分析，结果显示，稻米的抗性淀粉含量除了受基因型影响外，还受种植环境、以及基因型与环境互作的影响（表 2 和表 3）。在海拔 1 250 m 广南

表 2 不同 3 个种植环境条件下稻米抗性淀粉平均含量变化
Table 2 Average variation of rice grain RS contents under at three very environmental conditions

编号 Number	抗性淀粉含量 RS content (%)				稳定性分析 Stability analysis	
	元阳 Yuanyang	勐海 Menghai	广南 Guangnan	平均值 Mean	F 值 F value	P 值 P value
GE1	12.70	12.86	13.32	12.96	5.0696	0.0265
GE2	10.12	10.34	9.81	10.09	9.8893	0.0022
GE3	6.32	7.43	7.58	7.11	0.4244	0.5162
GE4	5.64	5.46	5.70	5.60	2.3932	0.1250
GE5	4.95	4.67	4.99	4.87	4.4032	0.0383
GE6	2.03	4.08	4.40	3.50	0.9075	0.3430
GE7	2.14	4.25	4.25	3.55	7.4400	0.0075
GE8	0.17	0.26	0.33	0.25	0.1012	0.7510
GE9	0.12	0.33	0.35	0.27	0.0177	0.8943
GE10	0.30	0.43	0.45	0.39	0.0036	0.9522
GE11	0.14	0.36	0.37	0.29	0.0414	0.8392
GE12	0.40	0.59	0.60	0.53	0.0323	0.8577
GE13	0.15	0.34	0.43	0.31	0.0609	0.8056
GE14	0.13	0.20	0.23	0.19	0.0092	0.9238
GE15	0.23	0.46	0.48	0.39	0.0318	0.8587
GE16	0.86	1.66	1.56	1.36	2.5379	0.1142
GE17	0.24	1.54	2.42	1.40	9.5812	0.0025
GE18	0.15	0.30	0.37	0.28	0.0293	0.8644
平均 Mean	2.60	3.09	3.20	2.96		

表 3 不同 3 个种植环境条件下稻米抗性淀粉含量的方差分析
Table 3 Variance analysis of genotype and environmental interactions for rice grain RS contents growing at three different environmental conditions

变异来源 Source of variation	自由度 df	平方和 SS	均方 MS	F 值 F value	P 值 P value
区组 Block	6	0.3414	0.0569	1.4380	0.2074
环境 Environment (E)	2	11.0282	5.5141	8.9501	0.0008
品种 Genotype (G)	17	2223.2205	130.7777	212.2693	0.0000
品种×环境 G×E	34	20.9472	0.6161	15.5717	0.0000
误差 Error	102	4.0356	0.0396		
总和 Total	161	2259.5728			

县种植时, 18 个品系稻米抗性淀粉平均含量最高, 为 3.20%, 其次是种植在海拔 1 150 m 勐海县, 为 3.09%, 而在海拔 300 m 的元阳县最低, 为 2.60%。其中 GE1、GE2、GE5、GE7 和 GE17 的含量受环境影响差异达显著, 其他 13 个品系的含量受环境影响差异不显著。虽然, 稻米抗性淀粉含量受到种植环境、以及基因型与环境互作的影响, 但基因型的影响还是主要的, 所以种植在 3 个不同环境中含量高的品系依然是高, 低含量的品系仍然是低。

3 讨论

3.1 水稻种质稻米抗性淀粉含量普遍低

通过对收集和改良的 1 206 份水稻种质稻米抗性淀粉含量检测, 发现含量低于 2.50% 的种质占 87.60%, 高于 10.00% 的仅占 0.20%。这与前人的结论一致, 目前市场销售稻米的抗性淀粉含量通常在 1.00%—2.00%^[11], 大多数水稻品种的抗性淀粉含量低于 3.00%^[22-23], 而且在 905 份云南地方稻种质稻米的平均含量也很低, 仅为 0.75%^[24]。由于抗性淀粉分子结构复杂, 仅认为抗性淀粉形成与食物直链淀粉含量^[25]、以及直链淀粉/支链淀粉含量的比率大小^[26-27]等都有关系。蜡质基因 *Wx* 是水稻稻米抗性淀粉含量的主效基因^[28], 与水稻抗性淀粉含量相关的 4 个候选基因都是与直链淀粉和支链淀粉合成有关的基因^[29]。

3.2 培育兼具直链淀粉含量低和口感好的品种是可行的

许多研究也检测到抗性淀粉与直链淀粉存在显著正相关^[19-20,30], 所以高抗性淀粉含量的稻米, 其直链淀粉含量也高, 适口性也就变差。本研究也发现抗性淀粉与直链淀粉存在显著相关性, 但在高直链淀粉含量种质中没有检测到抗性淀粉含量 10.00% 以上品种, 当然这可能与检测样品数较少有关。然而, 非常幸运在低直链淀粉含量种质中筛选到 3 份抗性淀粉含量超过 10.00% 的品种 (系), 有一个是米饭适口性好的软米品种。这意味着在水稻种质资源筛选高抗性淀粉含量, 同时兼具直链淀粉含量低和口感好的品种是可行的。

3.3 稻米抗性淀粉含量的环境稳定性

把抗性淀粉含量差异的水稻种质种植在云南 3 个不同环境条件下, 发现稻米抗性淀粉含量既受基因型影响, 还受种植环境以及基因型与环境互作的影响, 而且随种植海拔增高, 其含量有所提高。这与前人的结论一致, 稻米抗性淀粉含量主要受基因型控制^[14,16],

还受种植密度和施肥条件差异的影响^[18], 在高海拔地区种植更利于抗性淀粉形成^[31]。虽然稻米抗性淀粉含量受到种植环境以及基因型与环境互作的影响, 但基因型的影响还是主要的, 种植在 3 个不同环境中含量高的品系依然是高, 低含量的品系仍然是低。那么在适合种植稻区推广应用高抗性淀粉含量的品种, 其含量不会出现大幅度的变化。当然, 种植在最佳适种环境, 以及采用合理的栽培技术措施, 对提高稻米的抗性淀粉含量也可能是有帮助的。

4 结论

水稻种质资源稻米抗性淀粉含量普遍很低, 其含量主要受基因型影响, 在适合种植稻区推广应用高抗性淀粉含量的品种, 其含量不会出现大幅度的变化。

References

- [1] 田丹青, 沈希宏, 舒小丽, 吴殿星. 稻米淀粉的理化特性及其应用现状和进展. 核农学报, 2010, 24(1): 93-97.
TIAN D Q, SHEN X H, SHU X L, WU D X. Physicochemical properties of rice starch and its application status and progress. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 24(1): 93-97. (in Chinese)
- [2] 黎舒佳, 高谨, 李家洋, 王永红. 独脚金内酯调控水稻分蘖的研究进展. 植物学报, 2015, 50(5): 539-548.
LI S J, GAO J, LI J Y, WANG Y H. Advances in studies on the regulation of rice tiller by strigolactone. *The Plant Journal*, 2015, 50(5): 539-548. (in Chinese)
- [3] ENGLYST H N, CUMMINGS J H. Digestion of the polysaccharides of some cereal foods in the human small-intestine. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1985, 42(5): 778-787.
- [4] KWAK J H, PAIK J K, KIM H I, KIM O Y, SHIN D Y, KIM H J, LEE J H, LEE J H. Dietary treatment with rice containing resistant starch improves markers of endothelial function with reduction of postprandial blood glucose and oxidative stress in patients with prediabetes or newly diagnosed type 2 diabetes. *Atherosclerosis*, 2012, 224(2): 457-464.
- [5] 施标, 孙志敏, 白建江, 杨瑞芳, 张晓峰, 朴钟泽. “优糖米”对 II 型糖尿病人餐后血糖的影响. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 1-6.
SHI B, SUN Z M, BAI J J, YANG R F, ZHANG X F, PIAO Z Z. The effect of “Youtangmi” on postprandial blood glucose in type II diabetic patients. *Journal of the Chinese Cereals*, 2014, 29(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] 方长云, 胡贤巧, 卢林, 段彬伍. 稻米抗性淀粉的研究进展. 核农

- 学报, 2015, 29(3): 513-520.
- FANG C Y, HU X Q, LU L, DUAN B W. Research progress on rice resistant starch. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(3): 513-520. (in Chinese)
- [7] ROEDIGER W E, MILLARD S H, BIRD A R. Focused gut-mucosal nutrition for diarrheal disease: Improved nutrient therapy. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2001, 10(1): 67-80.
- [8] BIRT D F, BOYLSTON T, HENDRICH S, JANE J L, HOLLIS J, LI L, MCCLELLAND J, MOORE S, PHILLIPS G J, ROWLING M, SCHALINSKE K, SCOTT M P, WHITLEY E M, WHITLEY E M. Resistant starch: Promise for improving human health. *Advances in Nutrition*, 2013, 4(6): 587-601.
- [9] MORITA T, KASAOKA S, HASE K, KIRIYAMA S. Oligo-L-methionine and resistant protein promote cecal butyrate production in rats fed resistant starch and fructooligosaccharide. *The Journal of Nutrition*, 1999, 129(7): 1333-1339.
- [10] MILLER J B, PANG E, BRAMALL L. Rice-a high or low glycemic index food. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 56(6): 1034-1036.
- [11] NIBA L L. Resistant starch: A potential functional food in gradient. *Nutrition & Food Science*, 2002(32): 62-67.
- [12] 杨朝柱, 李春寿, 舒小丽, 张志转, 张磊, 赵海军, 马传喜, 吴殿星. 富含抗性淀粉水稻突变体的淀粉特性. 中国水稻科学, 2005, 19(6): 516-520.
- YANG C Z, LI C SH, SHU X L, ZHANG Z Z, ZHANG L, ZHAO H J, MA C X, WU D X. Starch properties of rice mutant enriched with resistant starch. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(6): 516-520. (in Chinese)
- [13] 孙志敏, 白建江, 朱辉明, 孙春龙, 朴钟泽, 郝再彬. 混配比例及加工方式对“降糖 1 号”稻米产品抗性淀粉含量的影响. 核农学报, 2012, 26(2): 318-323.
- SUN Z M, BAI J J, ZHU H M, SUN C L, PIAO Z Z, HAO Z B. Effect of mixing ratio and processing method on resistant starch content of “Jiangtang 1 hao” rice product. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(2): 318-323. (in Chinese)
- [14] 罗曦, 黄锦峰, 朱永生, 谢鸿光, 吴方喜, 张木清, 张建福, 谢华安. 水稻功米 3 号高抗性淀粉性状的遗传分析. 农业生物技术学报, 2014, 22(1): 10-16.
- LUO X, HANG J F, ZHU Y S, XIE H G, WU F X, ZHANG M Q, ZHANG J F, XIE H A. Genetic analysis of high-resistance starch traits in rice Gongmi No.3. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2014, 22(1): 10-16. (in Chinese)
- [15] 白建江, 张建明, 朴钟泽, 方军, 李刚燮, 王亚, 杨瑞芳. 应用 CRISPR/Cas9 系统编辑水稻 *SBE3* 基因获得高抗性淀粉水稻新品系. 分子植物育种, 2018, 16(5): 1510-1516.
- BAI J J, ZHANG J M, PIAO Z Z, FANG J, LI G X, WANG Y, YANG R F. Application of CRISPR/Cas9 system to edit rice *SBE3* gene to obtain high resistance starch rice new line. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16 (5): 1510-1516. (in Chinese)
- [16] 魏明亮, 杜娟, 曾亚文, 杨树明, 普晓英, 杨涛. 云南稻微核心种质及其回交高代糙米功能成分含量的遗传变异. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2013, 39(2): 121-126.
- WEI M L, DU J, ZENG Y W, YANG S M, PU X Y, YANG T. Genetic variation of functional components in Yunnan rice micro-core germplasm and its backcross high-grade brown rice. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science Edition*, 2013, 39(2): 121-126. (in Chinese)
- [17] ZHOU H J, WANG L J, LIU G F, MENG X B, JING Y H, SHU X L, KONG X L, SUN J, YU H, SMITH S M, WU D X, LI J Y. Critical roles of soluble starch synthase *SSIIIa* and granule-bound starch synthase *Waxy* in synthesizing resistant starch in rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2016, 113(45): 12-18. (in Chinese)
- [18] 杨树明, 曾亚文, 方晓东, 杜娟, 普晓英, 杨涛, 王雨辰, 普正贵. 氮肥和栽插密度对功能型水稻不用基因型的产量和抗性淀粉含量的影响. 西南农业学报, 2009, 22(3): 681-684.
- YANG S M, ZENG Y W, FANG X D, DU J, PU X Y, YANG T, WANG Y C, PU Z G. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the yield and resistant starch content of functional rice without genotype. *Southwest Agricultural Journal*, 2009, 22(3): 681-684. (in Chinese)
- [19] 张芸, 罗曦, 魏林艳, 蔡秋华, 张建福, 谢华安. 不同基因型水稻的抗性淀粉含量与稻米品质性状的相关性及差异性. 福建农业学报, 2016, 31(9): 917-922.
- ZHANG H, LUO X, WEI L Y, CAI Q H, ZHANG J F, XIE H A. Correlation and difference between resistant starch content and rice quality traits in different genotypes of rice. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(9): 917-922. (in Chinese)
- [20] 焦桂爱, 唐绍清, 罗炬, Fitzgerald M, Roferos L T, 胡培松. 水稻抗性淀粉突变体抗性淀粉结构的比较研究. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 645-648.
- JIAO G A, TANG S Q, LUO J, FITZGERALD M, ROFEROS L T, HU P S. Comparative study on the structure of rice resistant starch mutant resistant starch. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(6): 645-648. (in Chinese)
- [21] 杨瑞芳, 白建江, 方军, 曾威, 朴钟泽, 李刚燮. 分子标记辅助

- 选择选育高抗性淀粉水稻新品种. 核农学报, 2015, 29(12): 2259-2267.
- YANG R F, BAI J J, FANG J, ZENG W, PIAO Z Z, LI G X. Molecular marker-assisted selection of new varieties of high-resistance starch rice. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(12): 2259-2267. (in Chinese)
- [22] YANG C Z, SHU X L, ZHANG L L, WANG X Y, ZHAO H J, MA C X, WU D X. Starch properties of mutant rice high in resistant starch. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2006, 54(2): 523-528.
- [23] HU P, ZHAO H J, DUAN Z Y, ZHANG L L, WU D X. Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. *Journal of Cereal Science*, 2004, 40(3): 231-237.
- [24] 曾亚文, 杜娟, 杨树明, 普晓英, 王雨辰, 杨涛, 孙正海, 辛培尧. 云南稻核心种质糙米功能成分栽培型差异及其地带性特征. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3388-3394.
- ZENG Y W, DU J, YANG S M, PU X Y, WANG Y C, YANG T, SUN Z H, XIN P Y. Differences in cultivation characteristics of functional components of brown rice in Yunnan rice germplasm and their zonal characteristics. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 3388-3394. (in Chinese)
- [25] 蹇华丽, 高群玉, 梁世中. 直链淀粉含量对抗性淀粉形成影响的研究. 粮食与油脂, 2002, 10: 5-7.
- QIAN H L, GAO Q Y, LIANG S Z. The effect of amylose content on the formation of resistant starch. *Grain and Fat*, 2002, 10: 5-7. (in Chinese)
- [26] ESCARPA A, GONZÁLEZ M C, MANAS E J. Resistant starch formation: Standardization of a high-pressure-autoclave process. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 1996, 44(3): 924-928.
- [27] CHEN M H, BERGMAN C J, MCCLUNG A M. Resistant starch: Variation among high amylose rice varieties and its relationship with apparent amylose content, pasting properties and cooking methods. *Food Chemistry*, 2017(4): 180-189.
- [28] FITZGERALD M A, RAHMAN S, RESURRECCION A P, CONCEPCION J, DAYGON V D, DIPTI S S, KABIR K A, KLINGNER B, MORELL M K, AND BIRD A R. Identification of a major genetic determinant of glycaemic index in rice. *Rice*, 2011, 4(2): 66-74.
- [29] BAO J S, ZHOU X, XU F F, HE Q, AND PARK Y J. Genome-wide association study of the resistant starch content in rice grains: Genome-wide association study of resistant starch in rice. *Starch/Stärke*, 2017, 60(41): 10302-10311.
- [30] 朱哲, 刘良忠, 黄婷, 王幻, 王松树. 直链淀粉含量及淀粉平均聚合度对抗性淀粉含量影响的研究. 湖北农业科学, 2017, 56(2): 320-324.
- ZHU Z, LIU L Z, HUANG T, WANG H, WANG S S. Study on the effect of amylose content and average degree of starch polymerization on resistant starch content. *Hubei Agricultural Science*, 2017, 56(2): 320-324. (in Chinese)
- [31] 杨涛, 杨武振, 王荔. 02428×合系 35 RILs 群体糙米和发芽糙米 γ -氨基丁酸、抗性淀粉的遗传分析. 植物遗传资源学报, 2015, 16(1): 205-209.
- YANG T, YANG W Z, WANG L. Genetic analysis of γ -aminobutyric acid and resistant starch in brown rice and germinated brown rice of 02428×Hexi35 RILs population. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2015, 16(1): 205-209. (in Chinese)

(责任编辑 李莉)