熊若愚,杨瑞芳,曹黎明.不同血糖指数粳稻的淀粉多尺度结构差异研究[J].江西农业大学学报,2025,47(5):1214-1223.
XIONG R Y,YANG R F,CAO L M.Study on difference of multi-scale structure of *japonica* rice starch with different glycemic index [J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(5):1214-1223.

江西农业大学百廿华诞专刊特约稿

不同血糖指数粳稻的淀粉多尺度结构差异研究

熊若愚[1,2],杨瑞芳[1,2],曹黎明[1,2*]

(1.上海市农业科学院 作物育种栽培研究所,上海 201304;2.农业农村部粮油作物种质创新与遗传改良部省共建重点实验室,上海 201304)

摘要:【目的】解析不同血糖指数粳稻的淀粉多尺度结构特征,为低血糖指数水稻品种选育提供理论依据。【方法】通过离子色谱、凝胶色谱、^{1}H核磁共振及X-射线衍射等结构分析方法,以上海郊区典型的低血糖指数粳稻"优糖稻2号"(高抗性淀粉含量)、中血糖指数粳稻"申优28"(优质粳稻)及高血糖指数粳稻"沪软1212"(粳型软米)3类品种为供试品种,系统阐明稻米淀粉多尺度结构特征差异。【结果】与沪软1212品种相比,申优28和优糖稻2号品种的直链淀粉含量分别显著增加107.2%和262.7%,支链淀粉含量分别显著降低9.9%和28.0%,而总淀粉和蛋白质含量在品种间无显著差异。优糖稻2号品种的抗性淀粉含量较沪软1212和申优28品种均高出15.7个百分点。淀粉链长分布及分支度结果表明,与沪软1212品种相比,申优28和优糖稻2号品种的fb_2链、fb_3链及支链淀粉平均链长分别显著降低5.3%~13.6%、8.5%~37.8%和2.7%~15.2%;而fa链、$(fa+fb_1)/(fb_2+fb_3)$及淀粉分支度分别显著降低1.6%~34.8%、10.0%~30.0%和19.7%~44.7%。淀粉结晶构型及颗粒粒径分布结果表明,沪软1212和申优28品种为A型结晶构型且相对结晶度高,而优糖稻2号品种为B型结晶构型且相对结晶度低,淀粉颗粒粒径小。【结论】低血糖指数粳稻优糖稻2号具有高直链淀粉含量、高抗性淀粉含量、高直链淀粉长链比例、高支链淀粉长链比例及较长的平均链长的特征,低支链淀粉短链比例、低淀粉分支度比例以及B型结晶构型的特征。

关键词:粳稻;血糖指数;淀粉;多尺度结构
中图分类号:S511.2$^+$2　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)05-1214-10
CSTR:32399.14.aauj.2025104

收稿日期:2025-03-26　　**修回日期:**2025-04-23
基金项目:上海市科委农业科技领域项目(24N22800100)和上海市水稻产业技术体系建设项目(沪农科产字(2025)第3号)
Project supported by the Shanghai Agricultural Science and Technology Innovation Project (24N22800100) and Agriculture Research System of Shanghai, China (202503)

作者简介:熊若愚,助理研究员,博士,orcid.org/0000-0002-7091-0363,xiongruoyu08@163.com;*通信作者:曹黎明,研究员,博士,博士生导师;1996年本科毕业于江西农业大学土壤与农业化学专业;1999年硕士毕业于江西农业大学作物栽培学与耕作学专业;2014年博士毕业于江西农业大学作物栽培学与耕作学专业;上海市领军人才,上海市水稻产业技术体系首席专家;主持育成粳稻新品种"申优28"入选国家超级稻品种,创立的杂交粳稻全程机械化制种技术入选全国农业主推技术;先后获省部级科技成果一等奖5项、二等奖2项;获全国农业农村系统先进个人等荣誉称号;主要从事水稻高产优质栽培研究,orcid.org/0000-0001-5315-9224,clm079@163.com。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

Study on difference of multi-scale structure of *japonica* rice starch with different glycemic index

XIONG Ruoyu[1,2], YANG Ruifang[1,2], CAO Liming[1,2*]

(1. Institute of Crop Breeding and Cultivation, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201304, China; 2. Ministry and Province Co-construciton Key Laboratory of Germplasm innovation and Genetic Improvement of Grain and Oil Crops, Ministry of Agriculture and Rural Affairs)

Abstract: [**Objective**] The characteristics of multi-scale structure of japonica rice starch with different glycemic index were analyzed to provide theoretical basis for breeding and cultivation management of rice varieties with low glycemic index. [**Method**] Using ion chromatography, gel chromatography, ^{1}H nuclear magnetic resonance, and X-ray diffraction analysis methods, low glycemic index *japonica* rice 'Youtangdao 2' (High resistant starch content), middle glycemic index *japonica* rice 'Shenyou 28' (High quality *japonica*), and high glycemic index *japonica* rice 'Hulan 1212' (*japonica* soft rice) were selected to analyze the differences in the multi-scale structural characteristics of rice starch. [**Result**] Compared with the Huruan 1212, which had a high glycemic index, the amylose content of the Shenyou 28 and Youtangdao2 increased significantly by 107.2% and 262.7%, respectively. Conversely, the amylopectin content decreased significantly by 9.9% and 28.0%. Notably, the total starch and protein contents did not exhibit significant differences among the varieties. Additionally, the resistant starch content of 'Youtangdao 2' was 15.7% higher than that of both 'Hulan 1212' and 'Shenyou 28'. The results of the starch chain length distribution and branching indicated that the fb_2 chain, fb_3 chain, and amylopectin average chain length in 'Shenyou 28' and 'Youtangdao 2' were significantly reduced by 5.3%~13.6%, 8.5%~37.8%, and 2.7%~15.2%, respectively, compared with 'Huruan 1212'. Additionally, the fa chain, the ratio of $(fa + fb_1)/(fb_2 + fb_3)$, and the starch branching degree were significantly decreased by 1.6%~34.8%, 10.0%~30.0%, and 19.7%~44.7%, respectively. The results of the starch crystal configuration and granule size distribution indicated that the 'Huruan 1212' and 'Shenyou 28' exhibited an A-type crystal configuration with high relative crystallinity. In contrast, 'Youtangdao 2' displayed a B-type crystal configuration characterized by low relative crystallinity and a smaller granule size. [**Conclusion**] Low glycemic index *japonica* rice 'Youtangdao' 2 exhibits a high content of amylose, resistant starch, long chain ratio of amylose, long chain ratio of amylopectin and average chain length. Additionally, it demonstrates the low short chain ratio of amylopectin and low starch branching ratio, characterized by a B-type crystalline configuration.

Keywords: *japonica* rice; glycemic index; starch; multi-scale structure

【研究意义】随着东南沿海地区居民生活水平的提高以及饮食结构的变化,糖尿病等慢性疾病的发病率呈上升趋势[1]。截至2021年,我国糖尿病患者已达1.4亿,其中II型糖尿病占比约90%[2]。粳稻作为我国东南沿海稻麦轮作区及单季粳稻区的主要粮食作物,也是上海市民的主要口粮。降低粳稻的血糖生成指数(glycemic index,GI)对于预防和控制糖尿病具有重要意义[3]。研究[4]表明,低GI粳稻通常具有较高的直链淀粉和抗性淀粉含量,不仅可以降低餐后血糖波动,减少糖尿病等慢性疾病的风险,还能够提高饱腹感,有助于控制体质量。因此,深入探究不同GI粳稻的主成分-淀粉的多尺度结构差异,不仅有助于深入理解淀粉的消化代谢机制,还能够为低GI粳稻品种的选育、改良及功能性食品加工提供理论指导及参考依据。【前人研究进展】GI值是衡量食物中碳水化合物对血糖水平影响的重要指标[5]。具有较低GI值的食物在人体消化过程中葡萄糖释放速度较慢,有助于维持血糖稳定[6]。水稻淀粉的结构特征,如直链淀粉含量、支链淀粉的链长分布、结晶度和颗粒形态等特征对稻米GI值有显著影响[7]。直链淀粉和

支链淀粉是稻米淀粉的2种组成成分。直链淀粉由α-1,4-糖苷键连接的葡萄糖单元构成,结构相对简单[8]。相比之下,支链淀粉是一种高度分支的多糖,根据聚合度的不同可分为fa链、fb_1链、fb_2链和fb_3链,其结构复杂性导致在消化过程中表现出不同的特性[9]。研究[10]表明,支链淀粉长链比例较高、短链比例较低的淀粉往往具有更低的GI值。淀粉颗粒的结晶度是影响GI值的另一个关键因素。研究[11]表明,粳稻淀粉的结晶度与其GI值呈负相关,结晶度较高的淀粉颗粒在消化过程中更难以被酶水解,从而降低GI值。此外,淀粉大颗粒表面积相对较小,与酶的接触面积有限,消化速率减缓[12]。

【本研究切入点】以往的研究通常认为稻米的不同直链淀粉含量是水稻血糖指数的决定性因子,往往忽略了直链淀粉/支链淀粉链长分布、淀粉结晶构型及颗粒形态等因子的影响[8]。随着低GI水稻的需求不断增加,解析其淀粉多尺度结构将对低血糖指数功能型稻米的开发起到重要作用。【拟解决的关键问题】本研究选取低、中、高3种典型的GI粳稻为研究对象,通过全面解析淀粉组分、全链长分布、支链淀粉链长分布、分支度、结晶度及颗粒粒径分布,明确不同GI粳稻的淀粉多尺度结构差异,旨在为低GI粳稻的育种及优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年5—11月在上海市农业科学院庄行综合试验基地(30°53′N,121°22′E)进行。表层土壤0~20 cm深度的理化性质为:pH 6.3,土壤有机质18.5 g/kg,硝态氮4.7 mg/kg,铵态氮21.5 mg/kg,速效磷40.3 mg/kg,速效钾129.3 mg/kg。

1.2 试验材料

供试品种为上海农业科学院自主培育的3个粳稻品种,即低血糖指数粳稻品种优糖稻2号(常规粳稻,降糖稻1号×秀水123)、中血糖指数粳稻品种申优28(杂交粳稻,申21A×申恢26-28)和高血糖指数粳稻品种沪软1212(常规粳稻,金丰/大华香粳×南粳46)。

1.3 试验设计

采用田间大区试验,每个粳稻供试品种为一个处理,每个小区面积为20 m^2,3次重复。所有供试品种均于5月20日播种,6月20日移栽,10月30日收获。基质育秧,人工移栽,每穴3苗,行株距为25 cm×14 cm。大田施用纯氮折合270 kg/hm^2、磷肥(P_2O_5)150 kg/hm^2、钾肥(K_2O)150 kg/hm^2。氮肥为尿素(N含量46.4%),m(分基肥):m(分蘖肥):m(穗肥)=4:3:3,磷肥用作基肥一次施用,钾肥分基肥和穗肥均等施用。基肥于移栽前1 d施用,分蘖肥于移栽后7 d施用,穗肥于幼穗分化二期施用。田间水分管理及病虫害防治按当地优质丰产栽培模式要求进行。水稻收获后晒至含水量为13.5%,取200 g去杂后的稻谷经糙米机去壳,精米机去除糊粉层得到精米,过筛后得到整精米待测。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 总淀粉含量

整精米研磨后称取100 mg于离心管,加2 mL体积分数80%乙醇,混匀,70℃放置2 h,冷却。加2 mL去离子水,混匀,12 000 r/min离心10 min,弃上清。加4 mL体积分数80%乙醇,混匀,12 000 r/min离心10 min,弃上清,重复2次。加1.5 mL α-淀粉酶,沸水浴13 min,冷却。加0.05 mL淀粉葡萄苷酶及1.5 mL GOPOD试剂,涡旋混匀,50 ℃孵育20 min,于510 nm处测吸光度[13]。

1.4.2 直/支链淀粉及蛋白质含量

直链淀粉含量的测定方法参照国家标准GB/T 17891—2017《优质稻谷》。支链淀粉含量为总淀粉含量与直链淀粉含量的差值。蛋白质含量的测定采用凯氏定氮法,测定精米米粉中的含氮量,再乘以换算系数5.95。

1.4.3 抗性淀粉含量

取米粉200 mg,加4 mL α-胰淀粉酶,37 ℃摇床孵育16 h。加4 mL无水乙醇,12 000 r/min离心10 min,弃上清。用2 mL和6 mL体积分数50%乙醇各洗1次,12 000 r/min离心10 min,弃上清。加2 mL 2 mol/L KOH,冰上悬摇20 min。加8 mL 1.2 mol/L醋酸钠缓冲液和0.1 mL淀粉葡萄苷酶,50 ℃孵育30 min。取0.05 mL反应液至新管,加1.5 mL GOPOD试剂,50 ℃孵育20 min,于510 nm处测定吸光值。

1.4.4　淀粉分支度

取已纯化淀粉 5 mg 于 EP 管,加入 1 mL D6-DMSO,80 ℃加热过夜;12 000 r/min 离心 10 min,取上清液加入到核磁管中上机检测。采用 ^{1}H 核磁共振分析方法,对样品分支度分布进行检测,所用仪器为 Bruker BioSpin GmbH,扫描次数为 32,共振射频为 500.23 MHz,核磁谱为 ^{1}H[14]。

1.4.5　支链淀粉链长分布

取已纯化淀粉 10 mg 进行样品前处理后上机测定。色谱系统采用的是 Thermo ICS 5000+离子色谱系统(ICS5000+,Thermo Fisher Scientific,USA),利用电化学检测器对淀粉进行分析检测。采用 Dionex™ CarboPac™ PA200(250 mm×4.0 mm,10 μm)液相色谱柱,进样量为 5 μL[15]。

1.4.6　全链长分布

取已纯化淀粉 5 mg 进行样品前处理后上机测定。色谱系统采用的是凝胶色谱-示差系统。液相系统为 U3000(Thermo,USA),示差检测器为 OPTILAB T-rex(Wyatt technology,CA,USA)。根据化合物的性质,采用合适分子量范围的凝胶排阻色谱柱 Plael 10 μm MIXED-B(300 mm×7.5 mm),Plgel 5 μm MIXED-D(300 mm×7.5 mm);柱温 80 ℃;进样量为 100 μL;流动相 A(0.5% LiBr,DMSO);流速 0.5 mL/min;洗脱梯度:等度 80 min[16]。

1.4.7　淀粉结晶度

取已纯化淀粉 100 mg 于载物台上压紧,上机检测。采用 X 射线衍射仪(Tokyo,Japan Rigaku Miniflex 600)进行分析。上机参数:探测器,HyPic-400MF 二维混合像素阵列探测器,功率 600 W,管电压 40 kV,X-射线管 Cu,波长为 1.540 6 Å,扫描范围为 4°~60°,步长 0.01°,扫描速度 5 °/min[17]。

1.4.8　淀粉颗粒粒径分布

取已纯化淀粉 100 mg 于带有去离子水的 EP 管中,上机检测。采用马尔文激光粒度仪 Mastersizer 3000(Malvern Instruments Ltd,Worcestershire,UK)进行湿法检测,配备 Hydro LV 湿法分散器,采用无规则结构模型,以水为溶剂,遮光系数为 1.333 0,淀粉遮光系数为 1.50;遮光度范围为 5%~8%。

1.5　数据处理

数据采用 Excel 2021 进行整理,SPSS 25.0 软件进行统计和分析处理,SigmaPlot 14.0 软件进行绘图,结果为平均值±标准误差。

2　结果与分析

2.1　不同血糖指数粳稻组分差异

不同血糖指数粳稻的籽粒组分差异如表 1 所示。总淀粉和蛋白质含量在品种间无显著差异,但直链淀粉、支链淀粉及抗性淀粉含量存在显著差异。与沪软 1212 品种相比,申优 28 和优糖稻 2 号品种的直链淀粉含量分别显著增加 107.2% 和 262.7%;而支链淀粉含量则呈相反的趋势,且分别显著降低 9.9% 和 28.0%。此外,优糖稻 2 号的抗性淀粉含量较沪软 1212 和申优 28 品种高 15.7%。

表 1　不同血糖指数粳稻品种籽粒组分差异

Tab.1　The difference of grain composition of *japonica* rice with different glycemic index

品种 Cultivar	总淀粉含量/% Total starch content	直链淀粉含量/% Amylose content	支链淀粉含量/% Amylopectin content	抗性淀粉含量/% Resistant starch content	蛋白质含量/% Protein content
沪软 1212 HR 1212	82.9±0.9^a	8.3±0.0^c	74.6±0.9^a	0.2±0.0^b	7.5±0.3^a
申优 28 SY 28	84.5±2.6^a	17.2±0.0^b	67.2±2.6^b	0.2±0.0^b	7.9±0.3^a
优糖稻 2 号 YTD 2	83.8±2.3^a	30.1±0.6^a	53.7±2.7^c	15.9±0.8^a	7.7±0.2^a

同一列中不同品种间不同小写字母表示在 P<0.05 水平差异显著。

Different lowercase letters between different cultivars in the same column are significantly different at P<0.05.

2.2 不同血糖指数粳稻支链淀粉链长分布及分支度差异

不同血糖指数粳稻支链淀粉链长分布呈双峰曲线，在聚合度为12和45左右的位置出现一大一小的2个波峰(图1)。不同品种间fa链含量由高到低依次为沪软1212、申优28、优糖稻2号，而fb_2和fb_3链含量则呈相反的趋势，且各品种间差异显著(表2)。与申优28品种相比，沪软1212和优糖稻2号品种fb_1链含量分别显著增加4.5%和5.0%。总的来说，与沪软1212品种相比，申优28和优糖稻2号品种的$(fa+fb_1)/(fb_2+fb_3)$值分别显著降低10.0%和30.0%；而支链淀粉平均链长则分别显著增加2.7%和15.2%，且申优28和优糖稻2号品种间差异同样显著。此外，与沪软1212品种相比，申优28和优糖稻2号品种的α-1,6糖苷键分别显著降低19.7%和44.7%，而α-1,4糖苷键则分别显著增加1.6%和3.7%。

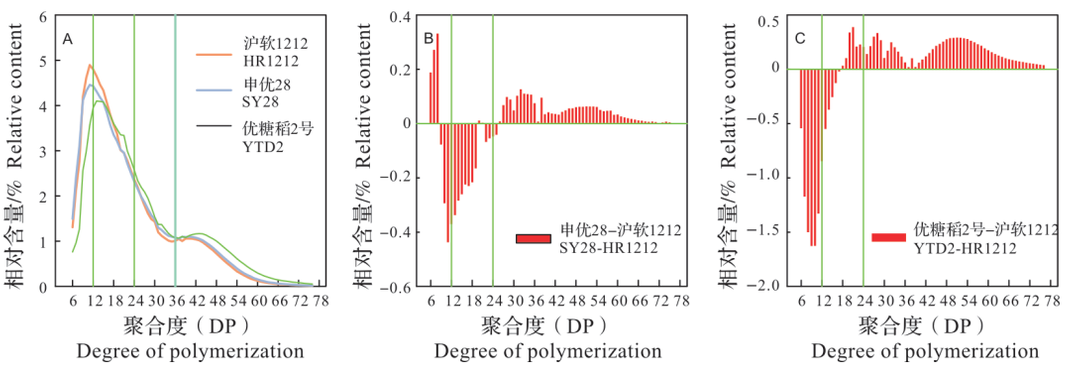


图1 不同血糖指数粳稻支链淀粉链长分布(A)及其链长差异(B、C)

Fig.1 Amylopectin chain length distribution(A)and the difference(B,C)in *japonica* rice with different glycemic index

表2 不同血糖指数粳稻支链淀粉链长分布及分支度差异

Tab.2 The difference of amylopectin chain length distribution and starch branching degree in *japonica* rice with different glycemic index

品种 Cultivar	fa链/% fa chain	fb_1链/% fb_1 chain	fb_2链/% fb_2 chain	fb_3链/% fb_3 chain	短链/长链 $(fa+fb_1)/(fb_2+fb_3)$	平均链长/% Average chain length	α-1,4糖苷键/% α-1,4 linkage	α-1,6糖苷键/% α-1,6 linkage
沪软1212 HR 1212	24.7±0.0^a	41.9±0.0^a	16.9±0.0^c	16.4±0.0^c	2.0±0.0^a	22.4±0.0^c	92.4±0.6^c	7.6±0.6^a
申优28 SY 28	24.3±0.1^b	40.1±0.2^b	17.8±0.2^b	17.8±0.0^b	1.8±0.0^b	23.0±0.0^b	93.9±0.7^b	6.1±0.7^b
优糖稻2号 YTD 2	16.1±0.1^c	42.1±0.0^a	19.2±0.0^a	22.6±0.0^a	1.4±0.0^c	25.8±0.0^a	95.8±0.0^a	4.2±0.0^c

同一列中不同品种间不同小写字母表示在$P<0.05$水平差异显著。

Different lowercase letters between different cultivars in the same column are significantly different at $P<0.05$.

表3 不同血糖指数粳稻淀粉结晶度及全链长分布差异

Tab.3 The difference in starch crystallinity and full chain length distribution of *japonica* rice with different glycemic index

品种 Cultivars	衍射角相对强度/% Relative diffraction intensity						相对结晶度/% Degree of crystallinity	结晶类型 Crystal pattern	全链长分布/% Full chain length distribution		
	5°	15°	17°	18°	20°	23°			第一波峰面积 Peak area 1	第二波峰面积 Peak area 2	第三波峰面积 Peak area 3
沪软1212 HR 1212	–	4.2	8.3	7.3	4.0	5.5	22.66	A	74.6	18.9	6.5
申优28 SY 28	–	4.6	15.9	0.7	2.5	7.5	23.80	A	63.9	18.6	17.5
优糖稻2号 YTD 2	0.7	1.9	10.5	–	8.6	2.6	19.57	B	56.6	25.0	18.4

2.3　不同血糖指数粳稻淀粉结晶度及全链长分布差异

沪软1212和申优28均为A型结晶构型,在15°、17°、18°、20°和23°处有明显的衍射峰;而优糖稻2号则呈B型结晶构型,主要在5.6°、17°、22°和24°出现明显的特征峰(表3,图2)。相对结晶度由大到小依次为申优28、沪软1212、优糖稻2号。凝胶渗透色谱分析表明,粳稻全链长存在3个峰,第一波峰面积(支链淀粉短链)由大到小依次为沪软1212、申优28、优糖稻2号,第二波峰面积(支链淀粉长链)由大到小依次为优糖稻2号、沪软1212、申优28,第三波峰面积(直链淀粉链长)由大到小依次为优糖稻2号、申优28、沪软1212。

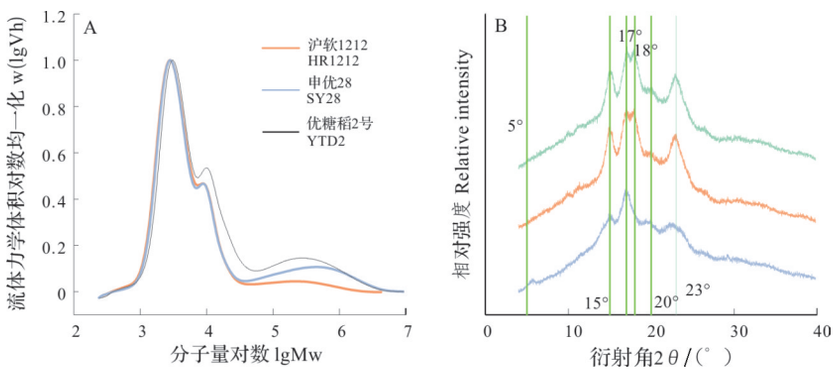


图2　不同血糖指数粳稻淀粉全链长分布(A)及结晶构型(B)差异

Fig.2　The difference in starch full chain length distribution(A)and crystal configuration(B)in *japonica* rice with different glycemic index

2.4　不同血糖指数粳稻淀粉颗粒粒径分布差异

不同血糖指数粳稻品种的淀粉颗粒粒径分布均为单峰曲线(图3)。沪软1212和优糖稻2号品种的体积颗粒分布的峰值约为10 μm,而申优28约为18 μm;3个品种的表面积分布及数量分布波峰分别为7 μm和3 μm。与申优28品种相比,沪软1212和优糖稻2号品种的体积、表面积及数量平均粒径均分别显著降低30.5%~31.6%、21.4%~23.1%和3.6%~16.4%,且沪软1212和优糖稻2号间在数量平均粒径值上差异显著(表4)。10%和50%累积粒径由大到小依次为申优28、优糖稻2号、沪软1212,而90%累积粒径由大到小依次为申优28、沪软1212、优糖稻2号。

表4　不同血糖指数粳稻淀粉颗粒粒径分布差异

Tab.4　The difference of starch granule size distribution of *japonica* rice with different glycemic index

品种 Cultivars	体积平均粒径/μm *D* [4,3]	表面积平均粒径/μm *D* [3,2]	数量平均粒径/μm *D* [1,0]	10%累积粒径/μm *D*x(10)	中值粒径/μm *D*x(50)	90%累积粒径/μm *D*x(90)
沪软1212 HR 1212	12.1±0.1^{b}	9.0±0.5^{b}	5.3±0.1^{b}	5.0±0.1^{c}	10.6±0.3^{c}	21.5±0.3^{b}
申优28 SY 28	17.7±0.4^{a}	11.7±0.1^{a}	5.5±0.1^{a}	5.9±0.1^{a}	15.2±0.2^{a}	33.5±0.2^{a}
优糖稻2号 YTD 2	12.3±0.3^{b}	9.2±0.2^{b}	4.6±0.1^{c}	5.2±0.1^{b}	11.2±0.1^{b}	21.2±0.2^{b}

同一列中不同品种间不同小写字母表示在P<0.05水平差异显著。

Different lowercase letters between different cultivars in the same column are significantly different at P<0.05.

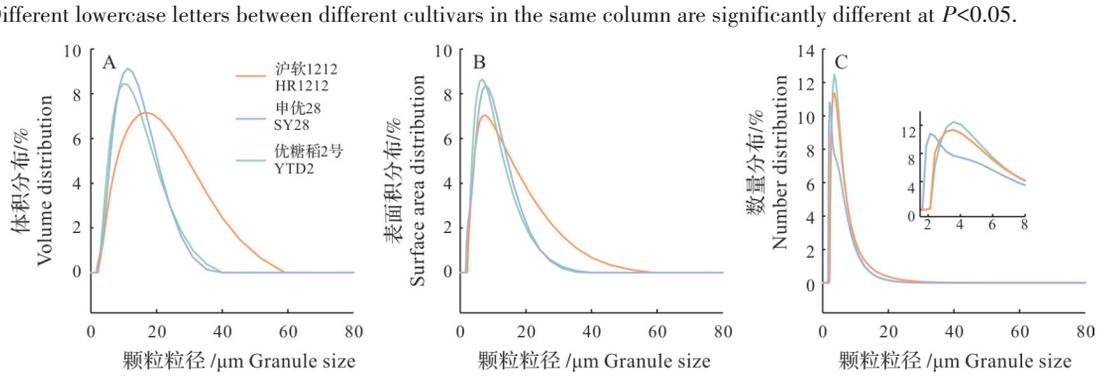


图3　不同血糖指数粳稻品种淀粉颗粒体积分布(A),表面积分布(B)和数量分布(C)差异

Fig.3　The difference in starch granule volume distribution(A),surface area distribution(B)and number distribution(C)of *japonica* rice with different glycemic index

3 讨 论

3.1 不同血糖指数粳稻的籽粒组分及淀粉链长差异

淀粉是稻米主要的碳水化合物，约占稻米干重的70%~80%，在精米中可达80%~90%[18]。稻米总淀粉及蛋白质含量由其遗传因素决定，且易受温光因子及栽培方式等的影响[19]。不同类型水稻品种的蛋白质含量存在较大差异，较高的蛋白质含量可能会影响稻米的加工品质、食味品质以及米饭的硬度和黏度[20]。蛋白质还能与淀粉相互作用或降低α-淀粉酶的活性，从而显著影响消化率，从而降低血糖反应[21]。在本研究中，不同血糖指数粳稻品种间的总淀粉及蛋白质含量均无显著差异。近年来，由于水稻育种目标从以往的“高产”转向“高产优质”，优质食味型水稻大面积推广。这些优质稻通常具有高淀粉含量、低蛋白质含量及直链淀粉含量等稳定特征[22]，水稻育种的趋同性可能是不同血糖指数粳稻总淀粉及蛋白质含量变化系数低的主要原因。直链淀粉和支链淀粉含量是影响稻米品质及消化特性的重要因素。前人研究[23]表明，高直链淀粉含量及低支链淀粉含量的稻米通常具有较高的硬度，导致食味品质较差。然而，由于直链淀粉分子间的相互作用较弱，形成的凝胶结构较为松散，这使得它易被淀粉酶分解，从而降低淀粉消化速率及血糖指数[24-25]。本研究结果与之一致，优糖稻2号的直链淀粉含量显著高于申优28及沪软1212品种，且其血糖指数较低，这进一步验证了直链淀粉含量与血糖指数的负相关关系。除直链淀粉含量外，淀粉全链长及支链淀粉链长分布是否同样影响血糖指数，需要进一步分析和研究。

随着对淀粉多尺度结构（即精细结构）认识的深入，稻米食味品质的评估已不再仅仅依赖于直链淀粉和蛋白质含量指标[8]。即使是直链淀粉含量相同的稻米，其食味品质也可能存在显著差异，这主要是由淀粉全链长及支链淀粉链长分布的不同所致[26]。一般来说，支链淀粉短链（聚合度DP 6~24）比例较高、支链淀粉长链（DP 25~76）及直链淀粉长链（DP>100）比例较低的稻米，会表现出较高的黏度和较低的硬度，从而具有较优的食味品质，但血糖指数较高[27]。本研究结果与之一致，优糖稻2号品种具有高直链淀粉含量、高支链淀粉长链比例、高直链淀粉长链比例和较长的支链淀粉平均链长，同时具有较低的α-1,6糖苷键（淀粉分支度），因此其抗性淀粉含量较高，血糖指数较低。此外，支链淀粉侧链较短、分支度较高，形成了空间位阻，阻碍其与脂质形成单螺旋复合物，而直链淀粉分支度低，易于脂质形成复合体，从而抑制淀粉的消化，这可能也是导致优糖稻2号血糖指数低的原因[6]。总的来说，笔者认为在评价不同类型水稻品种血糖指数的差异时，应充分考虑淀粉分支度、直链淀粉长链比例、支链淀粉长链比例及平均链长等指标，综合考虑这些指标相比于仅考虑直链淀粉含量这一单一指标更精确合理。在稻米中，抗性淀粉主要来源于天然抗性淀粉（RS2）和回生淀粉（RS3）[28]。直链淀粉因其线性结构和较少的分支，分子间可以形成紧密的氢键，这使得直链淀粉在冷却或储存过程中容易重新形成晶体结构，从而增加淀粉抗性[9]。相比之下，支链淀粉由于其高度分支的结构，在回生过程中形成抗性淀粉的可能性较低[29]。因此，优糖稻2号品种抗性淀粉含量较高的原因，不仅是其天然抗性淀粉含量较高，还因为其低淀粉分支度、高直链淀粉长链比例、高支链淀粉长链比例及较长的平均链长，这些特性使得淀粉在回生后抗性淀粉含量增加，从而有助于降低血糖反应。这些发现强调了在稻米品质改良和品种选育过程中，需要综合考虑淀粉的多尺度结构特征，以培育出既具有优良食味品质又有助于健康（低血糖指数）的稻米品种。

3.2 不同血糖指数粳稻的淀粉结晶及颗粒粒径差异

稻米淀粉的结晶度是影响其消化特性的关键因素[11]。稻米淀粉为半结晶结构，由结晶区和无定形区交替组成[23]。高结晶度的淀粉颗粒因结构更为紧密，消化酶难以渗透进入结晶区域，故而消化速率降低[30]。因此，高结晶度的稻米淀粉往往具有较低的血糖生成指数，这有助于控制血糖水平[30]。然而，本研究的结果与之相反，沪软1212和申优28品种的相对结晶度均高于低GI的粳稻品种优糖稻2号，但其血糖指数却更低。这一现象可能与淀粉的结晶类型密切相关。以往研究多集中于比较具有相同结晶类型、不同淀粉结构，尤其是不同直链淀粉含量的传统A型结晶水稻[31]。而优糖稻2号品种则表现出B型结晶构型，其X射线衍射特征峰出现在5.6°、17°、22°和24°。支链淀粉双螺旋结构主要有2种结晶排列方式，即单斜结晶（A型）和六方结晶（B型），后者淀粉小体尺寸较大，可容纳更多的水分子，因此结构较为

松散,结晶区的有序性较低[30]。但B型结晶构型的淀粉在加工和储存过程中可能更容易形成抗性淀粉,这可能是其血糖指数较低的主要原因[32]。此外,优糖稻2号的高直链淀粉长链比例可能阻碍了结晶区支链淀粉双螺旋的结晶排列,同时参与双螺旋的形成并穿插多个结晶片层,虽然相对结晶度较低,但有利于淀粉颗粒晶层结构的稳定,因此糊化温度较高,消化速率较低[25]。未来的研究应进一步解析A型和B型结晶的淀粉分子形成机制及其对淀粉功能性质的影响。不同淀粉颗粒粒径大小与消化酶的相互作用不同,进而影响消化速率和血糖生成指数[12]。前人研究[33]表明,较小的淀粉颗粒因其较大的表面积,增加了与消化酶的接触面积,从而加速消化过程。在本研究中,沪软1212和申优28品种间的比较结果与前人研究一致,但在申优28和优糖稻2号品种间的比较中,结论则不同。与中血糖指数的申优28相比,低血糖指数的优糖稻2号淀粉小颗粒比例相对较高,但其血糖指数却更低。推测这种差异可能与淀粉颗粒的分子构成以及淀粉与蛋白质、脂质等成分形成的复合物有关[23]。具体的形成机制将是未来研究低GI水稻淀粉颗粒与消化特性之间关系的重点。综上,稻米淀粉的结晶度、结晶类型、颗粒粒径以及分子构成等多个因素共同影响其消化特性和血糖生成指数。未来的研究需要综合考虑这些因素,以更全面地理解稻米淀粉的消化特性和健康效应。

值得注意的是,前人研究认为直链淀粉含量越高、支链淀粉长链比例越高及淀粉大颗粒较多的水稻品种,其淀粉颗粒不易充分糊化,崩解值和稻米食味降低;而支链淀粉短链比例高及淀粉小颗粒较多的水稻品种,其淀粉粒易糊化,最高黏度和崩解值较高,稻米的食味品质较优[34]。在本研究中,虽然优糖稻2号品种具有高直链淀粉含量、抗性淀粉含量、直链淀粉长链比例、支链淀粉长链比例及平均链长等分子特征使得其血糖指数降低,但其食味品质可能相对较差。因此,如何平衡“低血糖”与“高食味”是未来水稻育种和栽培亟待解决的重大科学问题。从优化栽培管理的角度来看,未来可从营养元素(氮、磷、钾、硅、铁、锌、镁)、温光调控、水分灌溉、土壤培肥、收获时期、采后加工及蒸煮工艺优化等方面入手,长期开展相关工作,以改善低血糖指数水稻品种米饭的硬度、黏度及弹性等特性,从而改善稻米食味品质。

4　结　论

本研究中,低血糖指数粳稻优糖稻2号品种具有高直链淀粉含量、抗性淀粉含量、直链淀粉长链比例、支链淀粉长链比例及平均链长,低支链淀粉短链及淀粉分支度比例特征。同时,优糖稻2号还具有低相对结晶度和小颗粒比例,B型结晶构型,血糖指数较低。

参考文献 References:

[1] 王朝昕,王夏炜,于德华,等.中国东部沿海地区慢性病流行趋势分析及防治启示[J].中国公共卫生,2017,33(11):1563-1566.
WANG C T,WANG X W,YU D H,et al.Prevalence of non-communicable chronic diseases(NCDs)in eastern coastal China and its implication for NCDs prevention and treatment[J].Chinese journal of public health,2017,33(11):1563-1566.

[2] SUN H,SAEEDI P,KARURANGA S,et al.IDF diabetes atlas:global,regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045[J].Diabetes research and clinical practice,2022,183:109119.

[3] QI X,TESTER R F.Utilisation of dietary fibre(non-starch polysaccharide and resistant starch)molecules for diarrhoea therapy:a mini-review[J].International journal of biological macromolecules,2019,122:572-577.

[4] ZHANG L Y,ZHAO J,LI F,et al.Effects of amylose and amylopectin fine structure on the thermal,mechanical and hydrophobic properties of starch films[J].International journal of biological macromolecules,2024,282:137018.

[5] 李华,吴庆峰,薛晴晴,等.低血糖指数食品的研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2023,44(2):119-126.
LI H,WU Q F,XUE Q Q,et al.Research progress on low-glycemic index foods[J].Journal of Henan university of technology(Natural science edition),2023,44(2):119-126.

[6] 丛海花,张紫薇,宋雪琳,等.粮谷类低血糖生成指数食品研究进展[J].中国粮油学报,2023,38(9):228-235.
CONG H H,ZHANG Z W,SONG X L,et al.Research progress of low glycemic index in cereals[J].Journal of the Chinese cereals and oil association,2023,38(9):228-235.

[7] HUANG M,HU L Q,CHEN J N,et al.In vitro testing indicates an accelerated rate of digestion of starch into glucose of

cooked rice with the development of low amylose rice in China[J].Food chemistry:X,2022,14:100278.

[8] XIONG R Y,TAN X M,YANG T T,et al.Relation of cooked rice texture to starch structure and physicochemical properties under different nitrogen managements[J].Carbohydrate polymers,2022,295:119882.

[9] WANG Y L,OU X Q,MAQTARI Q A,et al.Evaluation of amylose content:structural and functional properties,analytical techniques,and future prospects[J].Food chemistry:X,2024,24:101830.

[10] GEBRE B A,ZHANG C C,LI Z J,et al.Impact of starch chain length distributions on physicochemical properties and digestibility of starches[J].Food chemistry,2024,435:137641.

[11] CHI C D,LI X X,HUANG S X,et al.Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility:a review[J].Trends in food science & technology,2021,109:154-168.

[12] SALMAN C K M,BOLLINEDI H,ANAND A,et al.In vitro glycemic profiling of rice:a dual-index approach using predictive glycemic index and inherent glycemic potential[J].Journal of food composition and analysis,2025,140:107229.

[13] DENG F,LI Q,CHEN H,et al.Relationship between chalkiness and the structural and thermal properties of rice starch after shading during grain-filling stage[J].Carbohydrate polymers,2021,252:117212.

[14] WANG Y,MA Y X,GAO X D,et al.Insights into the gelatinization of potato starch by in situ ^{1}H NMR[J].RSC advances,2022,12(6):3335-3342.

[15] ZHOU W,YANG J,HONG Y,et al.Impact of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato[J].Carbohydrate polymers,2015,122:417-427.

[16] LIN L,GUO D,ZHAO L,et al.Comparative structure of starches from high-amylose maize inbred lines and their hybrids[J].Food hydrocolloids,2016,52:19-28.

[17] SANDHU K S,SIROHA A K,PUNIA S,et al.Effect of degree of cross linking on physicochemical,rheological and morphological properties of sorghum starch[J].Carbohydrate polymer technologies and applications,2021,2:100073.

[18] YAN H G,ZHANG W W,WANG Y H,et al.Rice LIKE EARLY STARVATION1 cooperates with FLOURY ENDOSPERM6 to modulate starch biosynthesis and endosperm development[J].Plant cell,2024,36(5):1892-1912.

[19] 姚文俊,李言,钱海峰,等.淀粉精细结构与大米蒸煮食味品质相关性的研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(5):321-327.
YAO W J,LI Y,QIAN H F,et al.Research progress on the correlation between starch fine structure and rice cooking and eating quality[J].Food and fermentation industries,2023,49(5):321-327.

[20] 杜雪树,李进波,夏明元,等.稻米蛋白质对稻米品质的影响研究进展[J].湖北农业科学,2020,59(增刊1):44-46.
DU X S,LI J B,XIA M Y,et al.Progress in effect analysis of rice protein on rice quality[J].Hubei agricultural sciences,2020,59(Sup1):44-46.

[21] 刘常念,郭岩,张嘉欣,等.蛋白质/脂质-淀粉相互作用及其对淀粉消化速率减缓作用研究进展[J].食品工业科技,2025,46(9):1-10.
LIU C N,GUO Y,ZHANG J X,et al.Protein/lipid-starch interactions and their effect in slowing down starch digestion rate[J].Science and technology of food industry,2025,46(9):1-10.

[22] WANG H X,BAI J J,ZHAO Q,et al.Changes in rice yield and quality from 1994 to 2023 in Shanghai,China[J].Agronomy,2025,15(3):670.

[23] XIONG R Y,TAN X M,YANG T T,et al.Starch multiscale structure and physicochemical property alterations in high-quality indica rice quality and cooked rice texture under different nitrogen panicle fertilizer applications[J].International journal of biological macromolecules,2023,252:126455.

[24] JUKANTI A K,PAUTONG P A,LIU Q Q,et al.Low glycemic index rice-a desired trait in starchy staples[J].Trends in food science & technology,2020,106:132-149.

[25] 韩文芳,林亲录,赵思明,等.直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J].食品科学,2020,41(13):267-275.
HAN W F,LIN Q L,ZHAO S M,et al.Recent advances in molecular structures of amylose and amylopectin[J].Food science,2020,41(13):267-275.

[26] 吴家青,熊若愚,解嘉鑫,等.稻米食味品质形成及其响应氮素调控作用的研究进展[J].中国稻米,2021,27(2):28-37.
WU J Q,XIONG R Y,XIE J X,et al.Research advances on rice eating grain quality formation and its response to nitrogen

application[J].China rice,2021,27(2):28-37.

[27] 胡丽琴,肖正午,方升亮,等.种植季节对高直链淀粉水稻品种淀粉消化特性的影响[J].作物学报,2024,50(9):2347-2357.
HU L Q,XIAO Z W,FANG S L,et al.Effects of planting season on digestive characteristics of high amylose content rice[J].Acta agronomica Sinica,2024,50(9):2347-2357.

[28] 张春龙,CHANNARONG P,张江丽,等.稻米抗性淀粉含量及其环境稳定性分析[J].中国农业科学,2019,52(17):2921-2928.
ZHANG C L,CHANNARONG P,ZHANG J L,et al.Evaluation of rice germplasms for grain resistant starch content and its environmental stability[J].Scientia agricultura Sinica,2019,52(17):2921-2928.

[29] SERGE P,ERIC B.The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules:a comprehensive review[J].Starch,2010,62(8):389-420.

[30] 康昱健,贾祥泽,郑少婷,等.淀粉颗粒微观结构及结晶调控技术的研究进展[J].食品工业科技,2017,38(19):316-322.
KANG Y J,JIA X Z,ZHENG S T,et al.Research progress in starch micro-architecture and crystal transformation[J].Science and technology of food industry,2017,38(19):316-322.

[31] ZHU D W,FANG C Y,QIAN Z H,et al.Differences in starch structure,physicochemical properties and texture characteristics in superior and inferior grains of rice varieties with different amylose contents[J].Food hydrocolloids,2021,110,106170.

[32] 敖志超,马玉琦,张立然,等.不同晶体类型药食两用植物淀粉粒结构及体外消化研究[J].食品与发酵工业,2022,48(15):200-206.
AO Z C,MA Y Q,ZHANG L R,et al.Starch granules structure and digestion in vitro of different crystal types of medicinal and edible plants[J].Food and fermentation industries,2022,48(15):200-206.

[33] 王梦桔,马春敏,吴巧艳,等.淀粉多尺度结构及物理改性调控淀粉消化特性的研究进展[J].食品工业科技,2024,45(15):443-451.
WANG M J,MA C M,WU Q Y,et al.Research progress on starch digestibility regulated by multi-scale structure and physical modification[J].Science and technology of food industry,2024,45(15):443-451.

[34] 张淑梅,张建明,李丁鲁,等.高抗性淀粉粳稻新品系稻米淀粉链长分布与主要品质特征差异[J].中国农业科学,2009,42(6):2237-2243.
ZHANG S M,ZHANG J M,LI D L,et al.The difference between starch chain length distribution and main quality characteristics of high resistant starch lines of *japonica* rice[J].Scientia agricultura Sinica,2009,42(6):2237-2243.

(责任编辑:张前锋)