

冷链米饭多尺度结构的变化及慢消化淀粉形成机制

Multi-scale structural changes and slowly digestible starch formation of cold-chain cooked rice

王丽丽¹ 赵思明¹ 林亲录²

WANG Li-li¹ ZHAO Si-ming¹ LIN Qin-lu²

程云辉³ 周梦舟⁴ 张宾佳¹

CHENG Yun-hui³ ZHOU Meng-zhou⁴ ZHANG Bin-jia¹

(1. 华中农业大学, 湖北 武汉 430070; 2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004;

3. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 4. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068)

(1. Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China; 3. Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 4. Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

摘要: 研究利用体外消化方法证实短期冷藏(1 d)明显提升了米饭中慢消化淀粉的含量(达 40% 左右)。由小角 X 射线散射等多尺度结构的分析结果可知, 短期冷藏过程显著降低了米饭中微米尺度孔隙的尺寸, 并诱导分子链段重组形成规整程度较低的短程螺旋、长程淀粉晶体和非周期性纳米结构, 由此促进了米饭中慢消化态结构域的形成。然而, 延长冷藏时间则增加非周期性结构等不同尺度结构的规整程度, 致使部分慢消化淀粉转化为抗消化组分, 但未明显改变米饭淀粉的其他消化特性。

关键词: 冷链; 米饭; 贮藏时间; 多尺度结构; 淀粉消化特性

Abstract: The digestion results showed that a short-term (1 d) refrigeration allowed a significant increase in the content of slowly digestible starch by about 40%. As inspected by combined techniques such as small angle X-ray scattering, the short-term storage reduced the micron scale pore size, and allowed starch and protein chain reassembly into relatively flawed structures such as short-range orders, long-range starch crystallites and nonperiodic nanostructure; these structural changes resulted in the formation of structural domains with slowly digestible

features. However, further prolonging the storage time strengthened the perfection of the reassembled structures, thus transforming partial slowly digestible fractions and negligibly influencing other digestion features. The present results could facilitate the production of high-quality cold chain cooked rice with demanded starch digestibility.

Keywords: cold chain; cooked rice; storage time; multi-scale structure; starch digestibility

随着冷链物流行业的迅速发展, 冷链食品已占据中国食品市场的 25% 以上^[1]。作为简便经济、即开即食、食用人群广泛的冷链产品, 冷链米饭是将蒸煮后米饭的中心温度迅速降低至 10 °C 以下, 并在后续的各个流通环节中使米饭中心温度保持在 10 °C 以下的方便主食。感官品质及营养品质优良的冷链米饭具有十分广泛的市场需求, 但冷链米饭中的淀粉往往呈现较高的消化速率及快消化组分含量, 致使餐后血糖水平高, 易于加剧肥胖、糖尿病等代谢性疾病的风险^[2-3]。因而, 适宜降低淀粉的消化速率对生产低血糖指数的高品质冷链米饭具有重要意义。

米饭主要是由淀粉、蛋白质等营养组分构成的凝胶体系, 组分分子在不同尺度组装形成短程有序结构、结晶结构、纳米结构和凝胶网络, 决定着米饭中淀粉的消化特性。前期研究显示, 米饭中淀粉长链比例的增加, 有利于降低淀粉的消化速率^[4], 而且其有序晶体含量越多、非周

基金项目: 国家重点研发计划课题(编号: 2018YFD0400802)

作者简介: 王丽丽, 女, 华中农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 张宾佳(1988—), 男, 华中农业大学副教授, 博士。

E-mail: zhangbj@mail.hzau.edu.cn

收稿日期: 2021-04-30

期性结构越致密,慢消化淀粉的含量越高^[5-6]。实际上,冷链米饭在流通与消费过程中往往历经3 d以内的低温贮藏;且已有研究^[7-8]表明贮藏过程可诱导蒸煮后的凝胶态淀粉链段组装形成螺旋、结晶等结构,从而改变淀粉的消化速率、慢消化组分含量等特征。据此分析,控制冷链米饭的贮藏时间等条件因素可修饰米饭的多尺度结构,进而调控冷链米饭中淀粉的消化特性。然而,目前关于冷链米饭的研究多集中于加工及配送过程中的产品品质的变化^[9-13],仍未系统揭示冷藏过程如何影响米饭的多尺度结构及淀粉消化特性。

试验拟以冷链籼米饭为研究对象,利用体外消化方法考察冷藏时间对米饭的淀粉消化速率和慢/抗消化淀粉含量的影响,综合运用扫描电镜、小角X射线散射、X射线衍射、红外光谱等技术,研究冷链贮藏过程中米饭的微观质地、纳米结构、结晶结构、短程有序结构等不同尺度结构的变化。在此基础上,从米饭多尺度结构水平探讨短期贮藏(时间为1 d)如何强化米饭中慢消化淀粉组分的形成,为冷链米饭的淀粉消化特性调控及营养品质提升建立了一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

大米:桃花香米,淀粉含量为83.98%(干基),襄阳赛亚米业有限公司;

消化酶:A3176型 α -淀粉酶(活性25 U/mg)和10115型葡萄糖苷酶(活性64 U/mg),美国Sigma-Aldrich公司;

F006-1-1型葡萄糖试剂盒:南京建成生物有限公司;其余化学试剂均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

电饭煲:CFXB50FC5-85型,浙江苏泊尔股份有限公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S型,武汉科尔仪器设备有限公司;

真空冷冻干燥机:FD-1A-50型,北京博医康实验仪器有限公司;

生物扫描电镜:JSM-6390型,日本NTC公司;

傅里叶变换红外光谱仪:IS50型,美国Thermo Scientific公司;

X射线衍射仪:D8 ADVNCE型,德国布鲁克AXS有限公司;

小角X射线散射仪:NanoSTAR型,德国Bruker-AXS公司。

1.2 方法

1.2.1 冷链米饭的制备

称取300 g大米于电饭煲的内

锅中,用蒸馏水淘洗一遍,按照 $m_{\text{米}}:V_{\text{水}}=1.0:1.3$ (g/mL)加入去离子水,利用“精煮模式”进行蒸煮,经蒸煮后米饭的水分质量分数为55.04%。将米饭冷却至37℃,称取30 g新鲜米饭置于液氮中冷冻并进行冷冻干燥,将其余米饭按照30 g/份的量分别置于4℃的冷链环境中贮藏1~3 d,利用液氮冷冻后进行冷冻干燥。冻干后的米饭保留部分完整的米饭粒,其余样品粉碎并过40目筛,置于干燥器中备用。

1.2.2 扫描电子显微镜(SEM) 利用镊子将待测的冻干米饭粒掰开,横断面向上置于粘贴有双面导电胶的样品台上,并将样品台置于离子溅射镀膜仪中镀金,取出样品台并置于样品室中进行观察和拍照,仪器工作电压为15 kV,样品的放大倍数为2 000倍和5 000倍。

1.2.3 小角X射线散射(SAXS) 参照文献[14]并适当改动,以含水量80%的粉碎米浆为测试样品,测试前将样品在26℃平衡2 h,然后将样品置于样品台上,采用Pilatus 1M检测器采集样品的散射数据,检测时间为10 s。以水作为背景,对获得的数据进行背景扣除和归一化处理。样品数据散射角度 q 的范围为0.1~5.0 nm⁻¹。

1.2.4 X射线衍射(XRD) 参照文献[15],将预先平衡好水分的米饭粉末置于样品池中,利用X射线衍射仪检测样品的衍射数据,扫描区域为5°~35°、步长0.02°、步速1 s,光源为0.154 2 nm波长的单色Cu-K α X射线,测试管压30 mV、管流20 mA。

1.2.5 傅里叶变换红外光谱(FTIR) 将样品置于傅里叶红外光谱仪的衰减全反射附件上,在4 cm⁻¹的分辨率下采集样品在400~4 000 cm⁻¹波数范围的谱图,扫描次数为32次。以空气作为背景,使用OMNIC软件对所获得的红外光谱图进行基线校正、归一化处理以及去卷积处理(增强因子为1.9、半峰宽为19 cm⁻¹),然后计算995 cm⁻¹和1 022 cm⁻¹处峰强度的比值。

1.2.6 体外消化特性 参照文献[7],称取含有90 mg淀粉的米饭粉末并置于含有6 mL醋酸钠缓冲溶液(pH 6)和6 mL蒸馏水的离心管中。在37℃的条件下,添加5 mL的混合酶溶液(42 U/mL的 α -淀粉酶和42 U/mL葡萄糖苷酶),开始消化。分别在0.5,10,15,30,45,60,90,120 min等时间节点,取0.1 mL消化溶液并加入至0.9 mL无水乙醇中以终止反应。将混合溶液在4 000 r/min下离心10 min。以1.0 mg/mL的葡萄糖溶液作为标准溶液,用葡萄糖试剂盒(GOPOD试剂)测定消化液的吸光值,根据式(1)计算淀粉消化量随时间的变化。

$$S_D = A_{\text{sample}} \times \frac{0.1 \times 1.0}{A_{\text{glucose}}} \times 10 \times 210 \times \frac{100\%}{90} \times \frac{162}{180}, \quad (1)$$

式中:

S_D ——淀粉消化率,%;

A_{sample} ——样品吸光值；

A_{glucose} ——葡萄糖标准品的吸光值；

10×210 ——21 mL 的消化液中取 0.1 mL 并与 0.9 mL 无水乙醇混合所涉及的换算系数；

$162/180$ ——淀粉葡萄糖单元与游离葡萄糖的质量比。

通过一阶动力学方程[式(2)]和 LOS 方法[the logarithm of the slope; 式(3)]进一步转换分析米饭淀粉的消化特性。

$$C_t = C_{\infty} (1 - e^{-k \times t}), \quad (2)$$

$$\ln \frac{dC_t}{dt} = -k \times t + \ln(C_{\infty} \times k), \quad (3)$$

式中：

C_t —— t 时刻米饭淀粉的水解量，%；

C_{∞} ——消化结束时淀粉消化量的估算值，%；

k ——消化速率常数， min^{-1} 。

根据计算出的消化数据 ($\ln[(C_{i+2} - C_i)/(t_{i+2} - t_i)]$) 和除最后两点外的时间点 $[(t_{i+2} + t_i)/2]$ 获得 LOS 图。根据 $\ln(dC_t/dt)$ 与时间 t 数据的斜率变化反映消化速率不同的阶段，并根据一阶动力学方程的非线性曲线的拟合得到相应阶段的淀粉消化速率 k 。同时，按照 Englyst 方法^[16]，计算快消化淀粉 (rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉 (slowly digestible starch, SDS) 以及抗消化淀粉 (resistant starch, RS) 的含量。

1.3 数据分析处理

采用 Excel 2010 和 SAS 9.2 进行数据统计分析，显著性分析水平为 $P < 0.05$ ，样品数据均表述为均值 $\pm$ 标准偏差的形式。

2 结果与分析

2.1 微观形貌

图 1 为冷藏前后米饭断面形貌的 SEM 图片。由图 1

可知，新鲜米饭 (0 d) 中不存在大米原料的淀粉颗粒，在丁毅等^[17]的研究中也有类似现象。样品呈三维多孔样的疏松质地，表明蒸煮过程中的水热效应充分破坏了淀粉及蛋白质自身的有序结构，促使淀粉糊化和蛋白质变性从而形成三维凝胶网络状质地。在冷藏环境中存放 1 d 能够降低米饭质地中孔洞的尺寸，这是由于贮藏过程中米饭的淀粉与蛋白质分子逐渐从凝胶网络壁中溶出，致使凝胶网络结构部分塌陷，从而形成更为均一的微观质地。延长贮藏时间进一步弱化了米饭的多孔样质地，但程度相对较小。

2.2 纳米结构

图 2 为不同冷藏时间米饭的小角 X 射线散射图谱。由图 2(a) 可知，蒸煮后的新鲜米饭未呈现天然淀粉层状结构的散射峰^[18-19]，但在 0.5 nm^{-1} 附近出现了强度较低的宽散射峰，这是由于蒸煮过程中的水热效应完全破坏了大米原料中的天然淀粉层状结构^[20]，但新鲜米饭中仍存在少量由淀粉及蛋白质分子组装形成的有序结构，此类有序结构在纳米尺度上与无定型区域组装构成了非周期性的纳米结构^[6]。

由图 2(b) 可知，冷藏 1 d 后米饭散射峰的位置向小角度偏移至 0.3 nm^{-1} 处，且其强度明显增加，表明淀粉及蛋白质分子在贮藏过程中形成了更多的有序结构，这些结构结合无定型区域形成了尺寸更大且更为规整的非周期性结构^[21]。同时，与新鲜米饭不同，冷藏后的米饭在 3.9 nm^{-1} 也出现了明显的散射峰，这是由于淀粉的短程有序结构 (双螺旋) 与 36 个水分子借助氢键组装形成了 B 型淀粉晶体的六方晶胞^[7]。延长冷藏时间适度增加了两个散射峰的强度，但并未明显改变散射峰的位置。由此可知，增加冷藏时间促使米饭形成了更为规整的结晶结构及非周期性结构，但变化程度较低且非周期性结构的尺寸未能进一步增加。

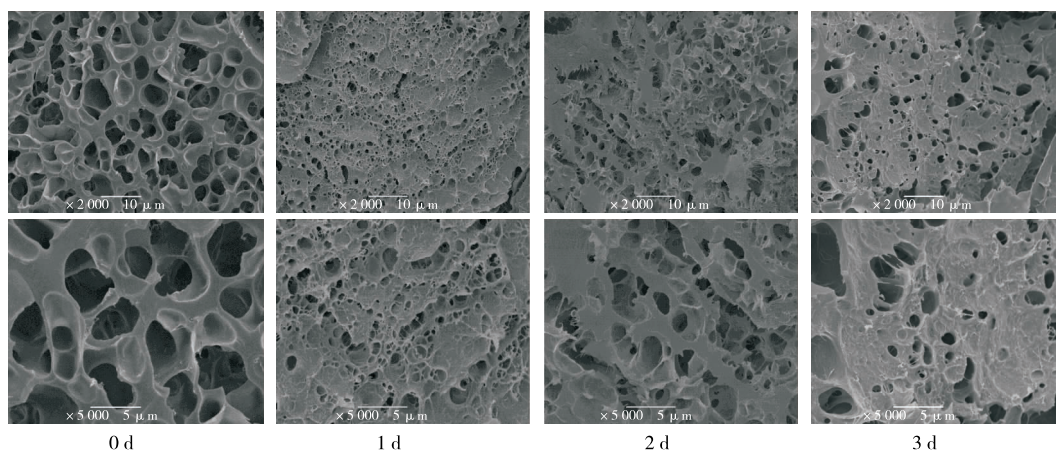


图 1 不同冷藏时间米饭的扫描电子显微镜图片

Figure 1 SEM graphs of cooked rice with cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

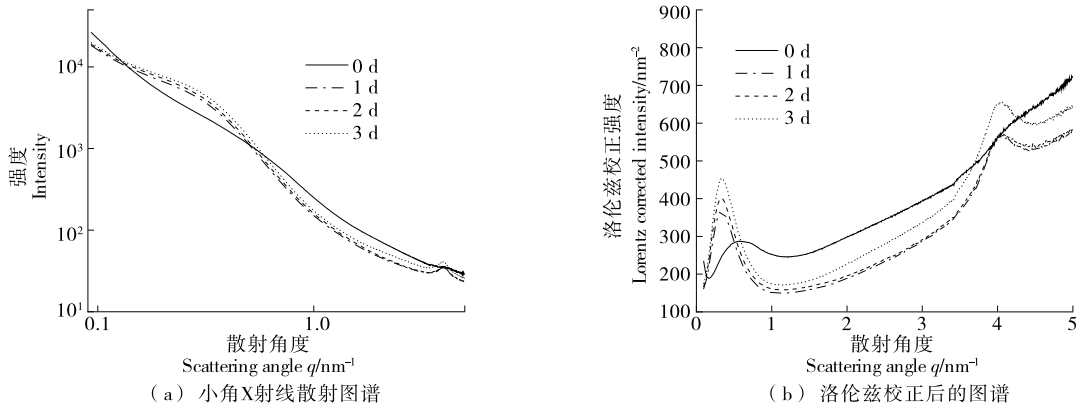


图2 不同冷藏时间米饭的小角X射线散射图谱及洛伦兹校正后的图谱
Figure 2 Original and Lorentz corrected SAXS patterns of cooked rice with cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

2.3 结晶结构

图3为不同冷藏时间米饭的X射线衍射图谱。新鲜米饭(0 d)未呈现大米原料的A型淀粉结晶结构衍射峰^[22-23],主要以非晶态的形式存在,仅在 2θ 衍射角度 20° 附近呈现十分微弱的衍射峰。因此,蒸煮过程中的水热效应大幅破坏了大米结构中的分子水平氢键网络,致使大米中原有的A型淀粉晶体消失,仅存在少量的热稳定性较高的V型淀粉晶体^[8]。

与新鲜米饭相比,冷藏1 d后米饭的V型结晶峰适度增强,并在衍射角度 17° 附近呈现微弱的衍射峰;由此可知,米饭中的淀粉链段在冷藏过程中重组形成了B型淀粉晶体及V型淀粉晶体,这与前期研究中贮藏前后热加工淀粉结晶结构的变化规律相近^[21]。然而,冷藏前后衍射图谱中B型晶体特征峰强度的变化幅度,明显低于小角散射图谱中B型晶体特征峰强度的变化。这与以下原因有关:同步辐射装置的小角散射图谱对结构的测试分辨率明显优于实验室装置的衍射图谱,而且淀粉分子具有十分典型的液晶特性^[24],其链段可在小角散射测

试的水环境中转化为近晶态,从而使冷藏过程中淀粉结晶结构的变化易于被观测到。延长冷藏时间对米饭X射线衍射图谱特征的影响较小,这与小角X射线散射结果的变化规律相似,即进一步增加冷藏时间并未大幅度强化米饭的结晶结构。

2.4 短程有序结构

图4为冷藏不同时间米饭在 $800\sim 1\,200\text{ cm}^{-1}$ 范围内的红外光谱图,此范围的图谱与C—O及C—C伸缩振动有关,可用于表征淀粉构象及其与水分子的相互作用^[25]。研究证实,淀粉红外谱图中 $1\,022\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收强度与无定型态淀粉的相对含量呈正相关, 995 cm^{-1} 附近的吸收强度与淀粉螺旋等短程有序结构的含量具有正相关关系^[26-27],相应红外吸收峰强度之比($R_{995\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$)可用于表征淀粉类样品中短程有序结构的相对含量^[28-29]。

经蒸煮后米饭的 $R_{995\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 明显降低,即蒸煮过程的水热效应亦明显破坏了淀粉的螺旋内氢键作用,从而大幅减少米饭中淀粉短程有序结构的含量。课题

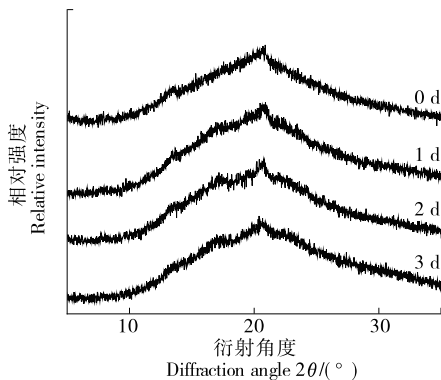


图3 不同冷藏时间米饭的X射线衍射图谱

Figure 3 XRD patterns of cooked rice with cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

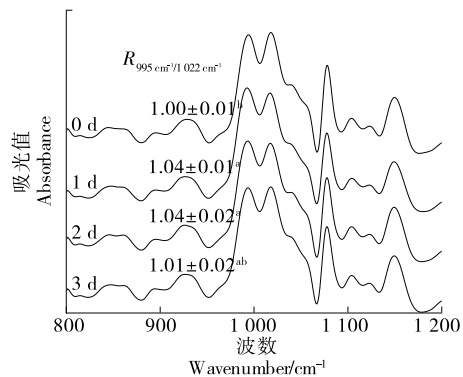


图4 不同冷藏时间米饭的傅里叶变换红外光谱图

Figure 4 FTIR patterns of cooked rice with cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

组^[6]近期研究也表明,蒸煮作用能够明显破坏糙米饭中淀粉的短程有序结构比例。较之新鲜米饭,贮藏 1 d 后米饭的 $R_{995\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 明显升高(见图 4),即冷藏过程促进了淀粉分子重组装及短程有序结构的形成。进一步延长冷藏时间未能明显增加 $R_{995\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}}$ 的数值,该结果与结晶结构及纳米尺度结构的变化规律相近,即增加冷藏时间主要是提升短程有序结构的规整程度但对其相对含量的影响较小。

2.5 消化特性

冷藏前后米饭的淀粉消化数据及其拟合曲线与 LOS 数据见图 5,样品的消化特征参数如表 1 所示。新鲜米饭呈现消化速率明显不同的两个阶段(阶段一的消化速率 k_1 高于阶段二的消化速率 k_2)。前期研究也证实提取后的淀粉在消化过程中也可能呈现单个阶段、两个阶段或 3 个阶段^[30-33]。由表 1 可知,冷藏过程降低了米饭的消化速率 k_1 ,促使米饭中的部分快消化淀粉 RDS 转化为慢消化淀粉 SDS,但未明显改变阶段二的消化速率 k_2 及抗消化淀粉 RS 含量。冷藏 1 d 后米饭的慢消化淀粉含量达到 40% 左右。随着冷藏时间延长至 2 d,米饭的消化速率 k_1 与 k_2 、快消化淀粉 RDS 含量等特征参数未发生明显改变,但其部分慢消化淀粉 SDS 转化为抗消化淀粉 RS;

进一步延长冷藏时间则未明显改变米饭的消化特征参数。由此可见,改变冷链米饭的贮藏时间能够调控冷链米饭的消化特性,1 d 的短期冷藏能够明显降低米饭的消化速率 k_1 ,并显著提升其慢消化淀粉 SDS 含量。该现象的形成机制可基于冷链米饭多尺度结构的变化规律以及淀粉消化的理论进行探讨。

米饭中淀粉的消化由 α -淀粉酶、葡萄糖苷酶等淀粉酶共同完成,酶分子在米饭结构中的迁移及酶—淀粉链段复合物的形成决定着淀粉的消化速率等特征^[34-35]。上述结果显示,蒸煮过程中的水热效应明显破坏了大米中的蛋白体和淀粉的颗粒结构、层状结构、结晶结构和短程有序结构,淀粉及蛋白质分子从原有的多尺度结构中解组装,并结合水分子形成了多孔状的凝胶体系。与新鲜米饭相比,短期冷藏过程(1 d)能够降低米饭质地中微孔的尺寸,诱导分子重组装形成规整程度较低的短程有序结构、B+V 型淀粉晶体及尺寸更大的非周期性纳米结构,促使米饭中形成了更多的慢消化态的多尺度结构域,减缓了结构中酶分子的迁移及酶分子—淀粉链复合物的形成,由此降低米饭的淀粉消化速率并增加其慢消化淀粉含量,但未明显促进抗消化淀粉的生成。然而,延长冷藏时间虽未显著改变米饭的微观形态和其他尺度结构的

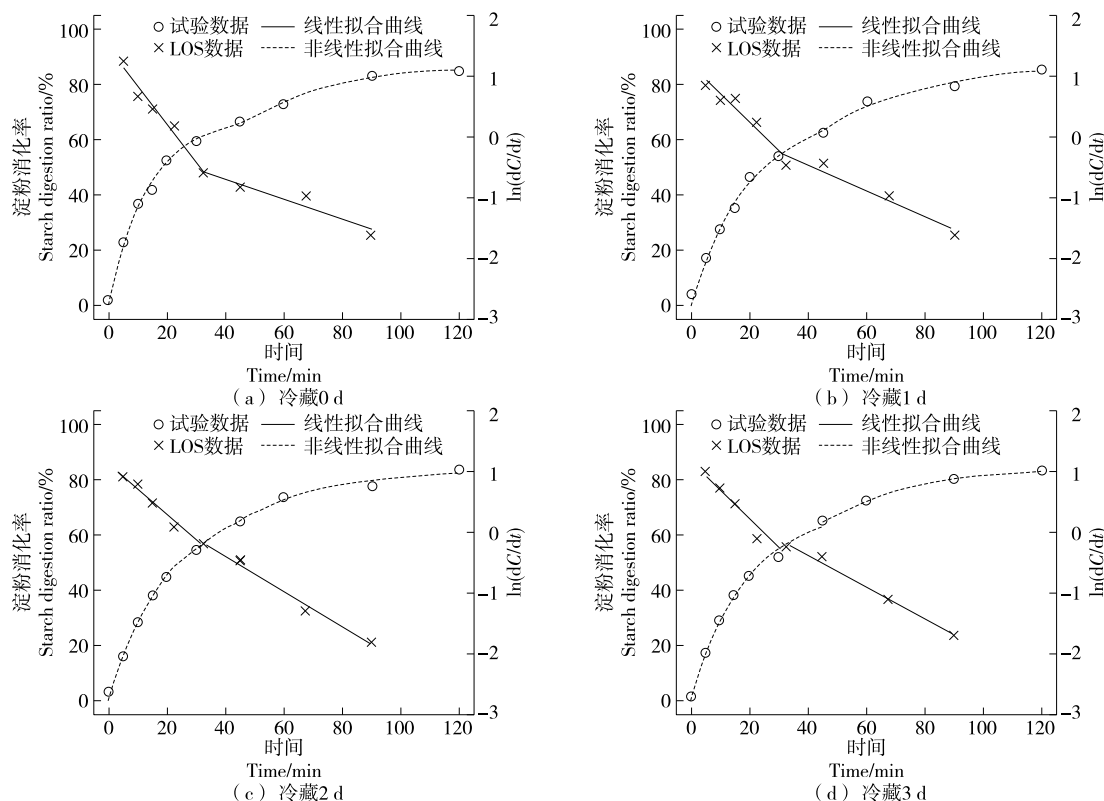


图 5 不同冷藏时间米饭的淀粉消化曲线、LOS 曲线和非线性拟合曲线

Figure 5 Starch digestion plots, LOS plots and non-linear fitting profiles of cooked rice undergoing cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

表 1 不同冷藏时间米饭的消化特征参数[†]

Table 1 Digestion features of cooked rice undergoing cold storage for varied time periods (0, 1, 2, and 3 d)

冷藏时间/d	$k_1/(\times 10^{-2} \text{ min}^{-1})$	$k_2/(\times 10^{-2} \text{ min}^{-1})$	RDS	SDS	RS
0	7.7±0.6 ^a	3.0±0.2 ^a	51.874±0.143 ^a	33.972±0.863 ^c	14.154±0.721 ^b
1	5.6±0.6 ^b	2.8±0.0 ^a	45.406±1.147 ^b	40.030±0.500 ^a	14.564±0.567 ^b
2	5.2±0.6 ^b	3.3±0.2 ^a	45.601±0.685 ^b	37.441±0.234 ^b	16.958±0.920 ^a
3	5.4±0.1 ^b	3.1±0.2 ^a	45.798±0.340 ^b	37.599±0.081 ^b	16.603±0.422 ^a

[†] k_1 为阶段一的消化速率; k_2 为阶段一、阶段二的消化速率;RDS 为快速消化淀粉;SDS 为缓慢消化淀粉;RS 为抗性淀粉。同列小写字母不同表示数据间存在显著性差异($P<0.05$)。

相对比例,但提升了米饭中非周期性纳米结构、淀粉晶体、短程有序结构等的规整程度,促使部分慢消化态结构区域转化为抗消化态结构域,抑制了消化酶分子活性位点对部分淀粉糖苷链段的吸附水解,导致慢消化淀粉含量降低和抗消化淀粉含量增加。

3 结论

试验从多尺度结构变化的角度系统研究了贮藏过程中冷链米饭中慢消化淀粉组分形成的机制。结果显示,时间为 1 d 的短期冷藏能够明显强化米饭中慢消化淀粉组分的形成。由结构分析数据可知,短期冷藏过程一方面促使米饭中的分子链段重组装形成短程有序结构(淀粉螺旋等)、长程淀粉晶体以及尺寸更大的非周期性纳米结构,另一方面降低了米饭中微米尺度上的孔隙尺寸,即微观质地的均一性提升。此类结构变化强化了米饭中慢消化态结构域的形成,促使部分快消化淀粉转化为慢消化淀粉并降低米饭中淀粉的消化速率,相应米饭的慢消化淀粉比例可达 40% 左右。与此不同,更长时间的冷藏过程则提升了米饭微观质地的均一性和短程有序结构、淀粉晶体以及非周期性纳米结构的规整程度,诱导部分慢消化态结构区域转化为抗消化态结构域。

参考文献

[1] 戴晋,张运栋,秦素研. 冷链食品产业发展现状与技术创新分析[J]. 物流技术与应用, 2018, 23(增刊 1): 65-67.

[2] FUENTES-ZARAGOZA E, RIQUELME-NAVARRETE M J, SANCHEZ-ZAPATA E, et al. Resistant starch as functional ingredient: A review[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942.

[3] LEHMANN U, ROBIN F. Slowly digestible starch-its structure and health implications: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(7): 346-355.

[4] ALHAMBRA C M, DE GUZMAN M K, DHITAL S, et al. Long glucan chains reduce in vitro starch digestibility of freshly cooked and retrograded milled rice[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 86: 108-116.

[5] FU Tian-tian, NIU Li-ya, LI Yun, et al. Effects of tea products on in vitro starch digestibility and eating quality of cooked rice using domestic cooking method[J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9 881-9 891.

[6] WANG Li-li, ZHAO Si-ming, KONG Jin-xi, et al. Changing cooking mode can slow the starch digestion of colored brown rice: A view of starch structural changes during cooking[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 226-232.

[7] LI Nan-nan, CAI Ze-xi, GUO Yan, et al. Hierarchical structure and slowly digestible features of rice starch following microwave cooking with storage[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 475-483.

[8] ZHANG Bin-jia, CHEN Ling, ZHAO Yue, et al. Structure and enzymatic resistivity of debranched high temperature-pressure treated high-amylose corn starch[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 57(3): 348-355.

[9] 毛海华,程裕东,周颖越,等. 定温流通条件下温度波动对冷藏米饭安全性的影响研究[J]. 食品科学, 2006, 27(12): 142-145.

[10] 余世锋,马莺. 贮藏温度和时间对五常大米米饭品质的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 250-254.

[11] 陈健敏. 盒装米饭冷链储运及冷链微波复热品质变化和控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 70-71.

[12] 曾宪泽. 冷链盒装米饭加工和配送过程中品质控制的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012: 48-49.

[13] 吴晓娟,许东,董界,等. 方便米饭安全生产关键监管数据标准化方法的研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 91-96, 107.

[14] TAN Xiao-yan, LI Xiao-xi, CHEN Ling, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch[J]. Carbohydrate Polymers Scientific & Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2017, 161: 286-294.

[15] QIAO Dong-ling, TU Wen-yao, ZHANG Bin-jia, et al. Understanding the multi-scale structure and digestion rate of water chestnut starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 91: 311-318.

[16] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): 33-50.

[17] 丁毅,华泽田,王芳,等. 梗稻蛋白质与蒸煮食味品质的关系[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 42-46.

[18] BLAZEK J, GILBERT E P. Effect of enzymatic hydrolysis on native starch granule structure[J]. Biomacromolecules, 2010, 11(12): 3 275-3 289.

[19] WANG Hong-wei, ZHANG Bin-jia, CHEN Ling. Understanding the structure and digestibility of heat-moisture treated starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 1-8.

(下转第 42 页)

- TGF- β , and IL-10 in murine macrophage cell lines and rat peritoneal macrophages[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 1994, 200(1): 126-134.
- [10] SHUAI K, LIU B. Regulation of JAK-STAT signalling in the immune system[J]. *Nat Rev Immunol*, 2003, 3(11): 900-911.
- [11] HU Y S, HAN X, LIU X H. STAT3: A potential drug target for tumor and inflammation[J]. *Curr Top Med Chem*, 2019, 19(15): 1 305-1 317.
- [12] WANG Y Y, DIAO B Z, ZHONG L H, et al. Maslinic acid protects against lipopolysaccharide/d-galactosamine-induced acute liver injury in mice[J]. *Microb Pathog*, 2018, 119: 49-53.
- [13] 陈磊. 山楂酸对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞的抗炎作用及其机制研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019: 12-17.
- [14] ANNE F McGettrick, LUKE A J O'Neill. How metabolism generates signals during innate immunity and inflammation[J]. *J Biol Chem*, 2013, 288(32): 22 893-22 898.
- [15] GABRYSOVA L, HOWES A, SARAIVA M, et al. The regulation of IL-10 expression[J]. *Curr Top Microbiol Immunol*, 2014, 380: 157-190.
- [16] MARTÍN M C, MARTINEZ A, MENDOZA J L, et al. Influence of the inducible nitric oxide synthase gene (NOS2A) on inflammatory bowel disease susceptibility[J]. *Immuno Genetics*, 2007, 59(11): 833-837.
- [17] BI X X, WANG P, MA Q J, et al. Anti-inflammatory activities and liver protection of alisol F and 25-anhydroalisol F through the inhibition of MAPK, STAT3, and NF- κ B activation in vitro and in vivo[J]. *Molecules*, 2017, 22(6): 951.
- [18] AGGARWAL B B, KUNNUMAKKARA A B, HARIKUMAR K B, et al. Signal transducer and activator of transcription-3, inflammation, and cancer: How intimate is the relationship? [J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2009, 1 171: 59-76.
- [19] SONG L X, TURKSON J, KARRAS J G, et al. Activation of Stat3 by receptor tyrosine kinases and cytokines regulates survival in human non-small cell carcinoma cells[J]. *Oncogene*, 2003, 22(27): 4 150-4 165.
- [20] MA Y F, TANG T, SHENG L L, et al. Aloin suppresses lipopolysaccharide induced inflammation by inhibiting JAK1 STAT1/3 activation and ROS production in RAW264.7 cells[J]. *Int J Mol Med*, 2018, 42(4): 1 925-1 934.
- [21] KOU X J, QI S M, DAI W X, et al. Arctigenin inhibits lipopolysaccharide-induced iNOS expression in RAW264.7 cells through suppressing JAK-STAT signal pathway[J]. *Int Immunopharmacol*, 2011, 11(8): 1 095-1 102.
- [22] LINOSSI E M, CALLEJA D J, NICHOLSON S E. Understanding SOCS protein specificity [J]. *Growth Factors*, 2018, 36 (3/4): 104-117.
- [23] D'AUTRÉAUX B, TOLEDANO M B. ROS as signalling molecules: mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis[J]. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 2007, 8(10): 813-824.

(上接第 23 页)

- [20] ZHANG Bin-jia, GILBERT E P, QIAO Dong-ling, et al. A further study on supramolecular structure changes of waxy maize starch subjected to alkaline treatment by extended-q small-angle neutron scattering[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 133-142.
- [21] LI Nan-nan, WANG Li-li, ZHAO Si-ming, et al. An insight into starch slowly digestible features enhanced by microwave treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 103: 105690.
- [22] NAREE D, PRISANA S, JENSHINN L, et al. Retrogradation and digestibility of rice starch gels: The joint effect of degree of gelatinization and storage[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(6): 1 400-1 410.
- [23] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(5): 182-187, 210.
- [24] WAIGH T A, GIDLEY M J, KOMANSHEK B U, et al. The phase transformations in starch during gelatinisation: A liquid crystalline approach[J]. *Carbohydrate Research*, 2000, 328(2): 165-176.
- [25] AMBIGAIPALAN P, HOOVER R, DONNER E, et al. Retrogradation characteristics of pulse starches [J]. *Food Research International*, 2013, 54(1): 203-212.
- [26] WANG Shu-jun, LI Cai-li, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: A comprehensive review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(5): 568-585.
- [27] SEVENOU O, HILL S E, FARHAT I, et al. Organisation of the external region of the starch granule as determined by infrared spectroscopy[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2003, 31(1/2/3): 79-85.
- [28] 邹金浩, 李燕, 欧阳华峰, 等. 不同薯类淀粉结构性质与粉条品质的关系研究[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 77-82.
- [29] 欧阳梦云, 王燕, 赵传文. RS₃型糯米抗性淀粉制备方法对其结构和理化性质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 14-18.
- [30] QIAO Dong-ling, XIE Feng-wei, ZHANG Bin-jia, et al. A further understanding of the multi-scale supramolecular structure and digestion rate of waxy starch[J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 65: 24-34.
- [31] KIM H R, CHOI S J, PARK C S, et al. Kinetic studies of in vitro digestion of amylase-modified waxy corn starches based on branch chain length distributions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 65: 46-56.
- [32] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 怀山药抗性淀粉理化性质及体外消化性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(11): 41-46.
- [33] 詹锦玲, 孙冰华, 谢雅芸, 等. 马铃薯淀粉颗粒的粒度与酶解特性相关性研究[J]. *食品与机械*, 2017, 33(10): 39-42.
- [34] TOUTOUNJI M R, FARAHNAKY A, SANTHAKUMAR A B, et al. Intrinsic and extrinsic factors affecting rice starch digestibility[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 10-22.
- [35] COLONNA P, LELOUP V, BULÉON A. Limiting factors of starch hydrolysis[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46 (Suppl 2): S17-S32.