米饭冷藏时间对老年人胃排空和体外动态消化特性的影响

张 苹[1]，伍 鹏*[1]，段 续[2]，陈晓东[1]

（1. 苏州大学 化工与环境工程学院，江苏 苏州 215123；2. 河南科技大学 食品与生物工程学院，河南 洛阳 471023）

摘要：作者旨在定量研究衰老引起的胃肠生理条件变化对米饭的胃排空和动态消化特性的影响。基于老年人与年轻人胃肠道生理条件的差异，利用动态体外人胃消化系统构建了老年人胃生理消化环境，考察了4 ℃下米饭冷藏时间（6、24、48 h）对胃排空和淀粉水解动力学的影响；结合静态浸泡实验，分析了冷藏米饭的水分质量分数、质构和微观结构的变化。结果表明，随着冷藏时间的增加，静态浸泡过程中米饭的微观结构更加致密，米饭的持水力显著下降，而压痕硬度明显提高；冷藏48 h后，胃半排空时间（$t_{1/2}$）从303.3 min显著增加到630.6 min，而淀粉消化率从15.4%下降为7.4%。研究结果表明，米饭经较长时间冷藏后，在老年人的消化环境中胃排空速度延缓，淀粉水解速率显著降低。该研究为深入理解米饭在老年人胃内的消化特性，选择和优化食物加工及贮藏方式，开发更加适合老年人的淀粉类主食提供理论指导。

关键词：冷藏米饭；老年人胃肠道；体外动态消化；胃排空；微观结构

中图分类号：TS 201.4　**文章编号：**1673-1689(2023)03-0094-08　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.011

Effect of Cold Storage Time on Gastric Emptying and *in Vitro* Dynamic Digestion Characteristics of Cooked Rice for the Elderly

ZHANG Ping[1]，*WU Peng*[*1]，*DUAN Xu*[2]，*CHEN Xiaodong*[1]

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Soochow University, Suzhou 215123, China; 2. College of Food Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: The objective of this study was to quantitatively investigate the effects of changes in gastrointestinal physiological conditions caused by aging on gastric emptying and dynamic digestion characteristics of cooked rice for the elderly. Based on the differences in the gastrointestinal physiological conditions between the elderly and young adults, the gastric physiological digestive environment of the elderly was constructed by the dynamic *in vitro* human gastric digestive system. Then, the effects of cold storage time (6, 24, 48 h) at 4 ℃ on the gastric emptying and starch hydrolysis kinetics of the cooked rice during dynamic *in vitro* gastric digestion for the elderly were investigated. The changes of water content, texture and microstructure of the refrigerated rice were analyzed by static immersion tests. The results showed that with the increase of cold storage duration,

收稿日期：2022-08-10

基金项目：江苏省自然科学基金项目（BK20220492）。

* **通信作者：**伍 鹏（1988—），男，博士，讲师，主要从事食品体外仿生消化吸收方面的研究。E-mail：p.wu@suda.edu.cn

a denser microstructure of cooked rice was shown during static soaking, leading to a significantly decreased water holding capacity of rice and the significantly increased indentation hardness of rice. Accordingly, the gastric emptying half-time ($t_{1/2}$) significantly increased from 303.3 min to 630.6 min, and the starch digestibility decreased from 15.4% to 7.4% after 48 h cold storage. The results showed that the gastric emptying rate of the cooked rice after long-term cold storage would potentially be delayed and the rate of starch hydrolysis might be significantly reduced in the digestive environment of the elderly. This study has provided theoretical guidance for understanding of rice digestion for the elderly and the selection and optimization of food processing/storage methods, contributing to the development of starch-based staple food more suitable for the elderly.

Keywords: refrigerated rice, gastrointestinal tract in the elderly, *in vitro* dynamic digestion, gastric emptying, microstructure

人口老龄化对经济和社会的发展提出前所未有的挑战,已成为当今世界普遍关注的问题。世界卫生组织将年龄高于 60 周岁的人群定义为老年人[1]。我国人口基数庞大,是世界上人口老龄化速度最快的国家之一。因此,深入研究老年人体内食物消化、胃排空和营养成分释放的过程和机理,强化对老年人膳食营养的指导和干预,精准设计和开发满足老年人营养和健康需求的食品具有重要意义。衰老通常伴随着老年人胃肠道生理功能的下降,主要包括胃肠道蠕动减弱、胃酸分泌和胃蛋白酶分泌减少等[2-3]。然而,有关这些变化对老年人消化食物和胃排空特性影响的定量研究较为缺乏。

由于人体或动物实验存在重复性差、成本高、周期长和伦理限制等缺点,近年来,应用体外仿生消化模型跟踪食物的消化过程和结构变化受到了广泛关注。尽管文献中已报道了多种体外消化模型,但针对老年人设计的消化模型及其应用仍非常有限。Levi 等 2014 年报道了第一个基于健康老年人(70~75 岁)的胃肠道生理参数而建立的静态体外消化模型,该模型由两个串联的生物反应器分别模拟胃和十二指肠。并且研究了乳蛋白溶液在老年人和年轻人胃肠条件下的消化特性,结果表明衰老影响特定乳清蛋白的消化率和多肽的释放种类[4]。作者所在课题组前期采用体外动态仿生胃系统,对传统藏族饮食(糌粑)[5]和脱脂奶[6]在模拟老年人和年轻人胃消化环境下的胃排空和消化特性进行了定量研究。结果表明,在老年人消化条件下,糌粑的胃半排空时间(103.4 min)显著高于年轻人(83.1 min),蛋白质水解程度较低[5]。

米饭是亚洲人的主食之一。近年来,方便、快捷、经济的冷藏盒饭为人们生活带来了极大的便利,占据了冷链食品较大的市场份额。研究表明,低温冷藏会促使米饭中的淀粉回生,增加长链淀粉的比例,形成稳定有序的结晶和凝胶网络结构,从而减缓淀粉的水解,提高抗性淀粉含量[7-8]。因此,食用冷藏米饭在一定程度上有利于稳定餐后血糖,降低肥胖症、糖尿病等代谢性疾病的风险。作者采用模拟老年人胃消化环境的动态体外人胃消化系统,考察了 4 ℃环境下冷藏时间(6、24、48 h)对米饭的胃排空速度和淀粉水解动力学的影响;结合静态浸泡实验,分析了冷藏米饭的水分质量分数、质构和微观结构的变化,为深入理解冷藏时间对老年人胃环境中米饭消化特性的影响机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

东北长粒香大米:益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司产品;氯化钾、磷酸二氢钾、碳酸氢钠、氯化钠、六水氯化铁、碳酸铵、碳酸钠、盐酸、酒石酸钾钠、苯酚、无水亚硫酸钠、硫酸钠:国药集团化学试剂有限公司产品;麦芽糖标准品、3,5-二硝基水杨酸:上海麦克林生化科技有限公司产品;α-淀粉酶(A1031)、胃蛋白酶(P7125)、胰酶(P7545)、胆盐(48305):美国 Sigma-Aldrich 公司产品。

1.2 主要仪器与设备

GZX-GF101-4-BS-Ⅱ电热恒温鼓风干燥箱:上海跃进医疗器械有限公司产品;GSDW122B 隔水炖锅:广东天际电器股份有限公司产品;FP3010 食物

料理机:德国博朗公司产品;MP511pH 计:上海三信仪器有限公司产品;MC1000 离子溅射仪、SU1510 电子扫描显微镜:日立高新技术有限公司产品;Neofuge 18R 台式高速冷冻离心机:上海力申科学仪器有限公司产品;MV06513 多功能读板机:美谷分子仪器有限公司产品;CR-SP504 纯水/超纯水系统:力新仪器(上海)有限公司产品。

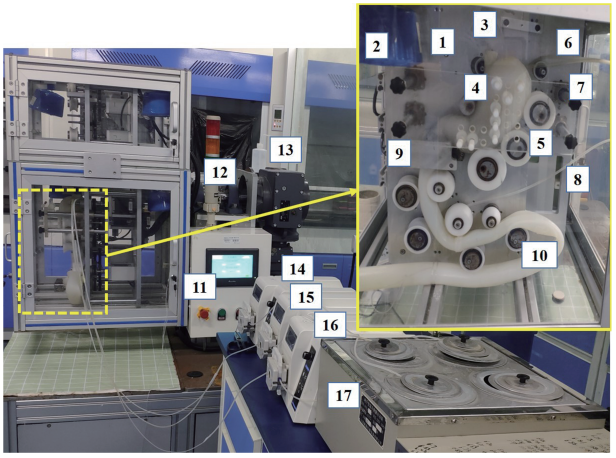
1.3 实验方法

1.3.1 模拟消化液的制备 模拟消化液由母液、酶、$CaCl_2$ 和水组成。母液由 0.5 mol/L KCl、0.5 mol/L KH_2PO_4、1 mol/L $NaHCO_3$、2 mol/L NaCl、0.15 mol/L $MgCl_2·6H_2O$、0.5 mol/L $(NH_4)_2CO_3$ 等盐溶液组成。模拟年轻人唾液(simulate saliva fluid,SSF)和模拟胃液(simulate gastric fluid,SGF)的具体配制方法见文献[9]。根据相关文献报道,老年人与年轻人唾液组成基本一致,胃蛋白酶活性约为年轻人的 75%,胃酸分泌速率较低,胃内 pH 变化幅度较高[4,10]。因此,胃蛋白酶在老年人 SGF 中的最终酶活由年轻人的 4 000 U/mL 缩减为 3 000 U/mL,pH 则由年轻人的 1.6±0.1 提高至 3.0±0.1。所有的模拟消化液现用现配,使用前均于 37 ℃保温。

1.3.2 冷藏米饭的制备 将水和米以质量比 1:2 混合后,使用隔水炖锅的米饭模式蒸煮 30 min,焖 10 min,冷却 8 min。将冷却后的米饭置于密封袋内,冷藏于 4 ℃的冰箱内,冷藏时间分别为 6、24、48 h。

1.3.3 动态体外人胃消化系统的设置 应用的动态体外人胃消化系统(dynamic *in vitro* human stomach,DIVHS)不仅具备真实人胃的解剖结构特征,而且能较高程度还原真实人胃的运动状态和生化环境[11-13]。该设备借助 3D 打印技术,制作与人胃尺寸、形态和内部褶皱结构相似的硅胶胃模型。偏心轮和滚筒、幽门挤压板、电机、皮带和皮带轮系统的组合构成了机电驱动系统;偏心轮和滚轮周期性地向下滚动,模拟胃体和胃窦的蠕动收缩;幽门挤压板模拟幽门的挤压与收缩,通过定期改变固定支撑板和幽门挤压板之间的间隙实现幽门的筛分功能;辅助排空装置通过调整其倾斜角度从-45°到+45°("-"和"+"分别表示逆时针和顺时针旋转)来调节重力效应实现排空(见图 1)。

米饭体外消化流程以 Kong 等的方法为基础进行改进[14]。将米饭在食品料理加工机 8 档转速(2 667 r/min)下剪切 15 s,称取 208 g 破碎后的米饭与 41.6 mL 模拟唾液混合反应 30 s 后,在 5 min 内将食团送入胃模型,胃液分泌流量程序见图 2[15]。



1:固定板;2:保温灯;3:温度传感器;4:硅胶人胃模型;5:滚轮/偏心轮;6:SGF 分泌管;7:HCl 分泌管;8:SIF 分泌管;9:幽门挤压板;10:十二指肠模型;11:操作面板;12:辅助排空装置;13:电机;14:HCl 分泌蠕动泵;15:SGF 分泌蠕动泵;16:SIF 分泌蠕动泵;17:水浴锅。

图 1 DIVHS 的装置图

Fig. 1 Device diagram of the DIVHS system

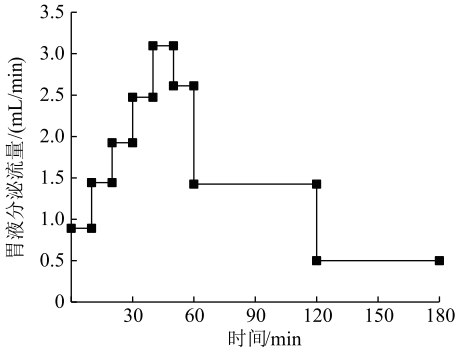


图 2 DIVHS 系统中模拟胃液的分泌流量

Fig. 2 Secretion flow of simulated gastric fluid in the DIVHS system

在已确定的年轻人消化模型参数下[11,16],对文献中相关数据进行整理[5],老年人消化过程参数见表 1,胃排空辅助装置的参数见表 2。

1.3.4 胃排空速率的测定 胃内容物残留率定义为胃内食糜干物质质量(g)占初始食物样品干物质质量(g)的比例[11]。样品重复测定 3 次,计算公式如下:

$$y_t=\frac{m_{in}}{m_s} \quad (1)$$

式中:y_t 为 t 时刻胃内容物残留率;m_{in} 为胃内食糜干物质质量,g;m_s 为初始食物样品干物质的质量,g。

应用 Siegel 等优化后的 Elashoff 幂指模型[17]，分析拟合食物在胃内的排空过程，公式如下：

$$y_t=1-(1-e^{-kt})^{\beta} \quad (2)$$

$$t_{1/2}=-\frac{1}{k}\times\ln(1-0.5^{\frac{1}{\beta}}) \quad (3)$$

式中：y_t 为 t 时刻胃内容物残留率；k 为每分钟的胃排空率，min^{-1}；β 为与拟合曲线形状有关的常数，$\beta>1$ 为摄入食物后初期有明显的滞后，$\beta<1$ 为摄入食物后初期无明显滞后行为。

$t_{1/2}$ 是衡量胃排空速率的重要指标，代表了食物在胃内的半排空时间，半排空时间越短，排空速率越快[17]。当 $y_t=0.5$ 时，可按公式(3)计算 $t_{1/2}$。

表 1　模拟老年人消化参数

Table 1　Simulated digestive parameters in the elderly

消化阶段	参数
口腔阶段	淀粉酶活性 150 U/mL
	搅拌速度 100 r/min
胃阶段	蛋白酶活性 3 000 U/mL
	模拟胃液分泌流量见图 2
	胃蠕动频率 2 次/min
	幽门开口 0~2 mm
	幽门挤压速率 2 mm/s
	0.5 mol/L HCl 分泌流量 80 μL/min

表 2　DIVHS 系统的辅助排空装置的倾斜角度

Table 2　Inclination angle of the auxiliary emptying device in the DIVHS system

时间段	倾斜角度/(°)
0~55 min	−30
56~80 min	−22.5
81~120 min	−18.75
121~140 min	−11.25
141~150 min	0
151~180 min	+7.5

1.3.5　淀粉水解率的测定　二硝基水杨酸(DNS)显色剂参照文献[18]配制，在 540 nm 处测量吸光度，以麦芽糖为标准液。计算方法如下：

$$H=\frac{0.95\times M_C\times V}{m\times S\times(100-M)}\times 100\% \quad (4)$$

式中：H 为不同消化时刻的淀粉水解率，%；M_C 为食糜中的麦芽糖质量浓度，g/mL；V 为食糜体积，mL；m 为米饭样品体外消化时的质量，g；S 为米饭样品的总淀粉质量分数，g/hg(以干样质量计)；M 为米饭样品的水分质量分数，g/hg(以样品质量计)；0.95 为麦芽糖质量转换成淀粉的化学计量常数。

1.3.6　静态浸泡实验　冷藏不同时间的米饭样品与模拟唾液(37 ℃)混合 2 min 后，加入模拟胃液(37 ℃)持续浸泡 0、60、120、180 min。

1)水分质量分数和压痕硬度　不同浸泡时间后米饭样品的湿基水分质量分数通过计算干燥前后质量差与零时刻湿基质量的百分比得出。选取 1 颗完整米饭颗粒，质构仪探头垂直压缩样品，速率设置为 50 μm/s，最大压缩深度为 300 μm[19]。在垂直压缩测试过程中通过数据采集软件记录最大压缩力，以最大压缩力计算得出压痕硬度，公式如下：

$$H=\frac{F}{\pi r^2} \quad (5)$$

式中：H 为压痕硬度，kPa；F 为施加的载荷，mN；r 为圆柱形压头的接触半径，mm。

2)微观结构　取消化前与胃液浸泡 3 h 后的米饭，放入−80 ℃冰箱中预冻 24 h，再于真空冷冻干燥机中冻干 24 h。使用 SEM 观察样品前先进行喷金操作，SEM 的加速电压为 15 kV，工作距离为 17 mm。

2　结果与讨论

2.1　米饭静态浸泡过程中水分质量分数和压痕硬度的变化

图 3 为新鲜米饭与冷藏米饭在静态浸泡实验过程中水分质量分数的变化。在静态浸泡期间，胃液持续向米饭颗粒内部扩散，前 60 min 内，水分质量分数显著上升；随着米饭对胃液的吸收达到饱和，水分质量分数趋于平衡。新鲜米饭在浸泡前后水分质量分数由 68.9%上升至 82.9%，而冷藏 48 h 米饭仅增加 9.2%，表明冷藏米饭的持水能力显著下降。这可能是由于冷藏后米饭内部的淀粉颗粒更加紧密，阻碍了胃液向米饭内部的扩散[20]。

新鲜米饭和冷藏米饭在静态浸泡期间压痕硬度的变化趋势相同(见图 4)，即米饭颗粒的压痕硬度随着浸泡时间的延长逐渐降低。冷藏米饭的压痕硬度始终显著高于新鲜米饭，新鲜米饭与冷藏 48 h 米饭的压痕硬度分别减少了 91.3%和 57.7%，这是由于冷藏后的米饭淀粉回生形成更加致密的结构，阻碍了胃液对颗粒的软化作用[8]；而新鲜米饭由于持续吸收胃液，质地更柔软。胃酸通过扩散进入食物颗粒内部，降低颗粒硬度和内聚力，是固体食物

颗粒在胃腔内物理破碎、消化和释放营养成分的关键步骤[21]。

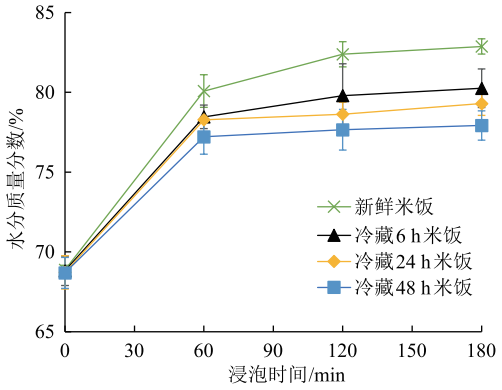


图 3　新鲜米饭和冷藏米饭在静态浸泡期间水分质量分数的变化

Fig. 3　Changes in moisture mass fraction of the freshly cooked rice and refrigerated cooked rice during static soaking

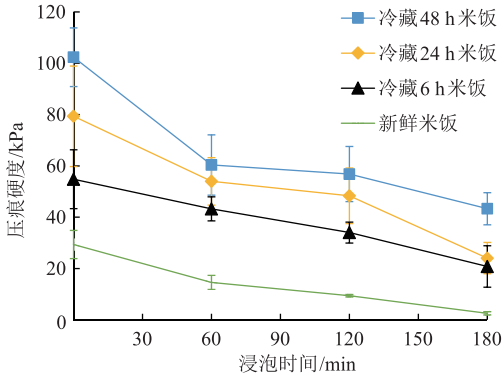


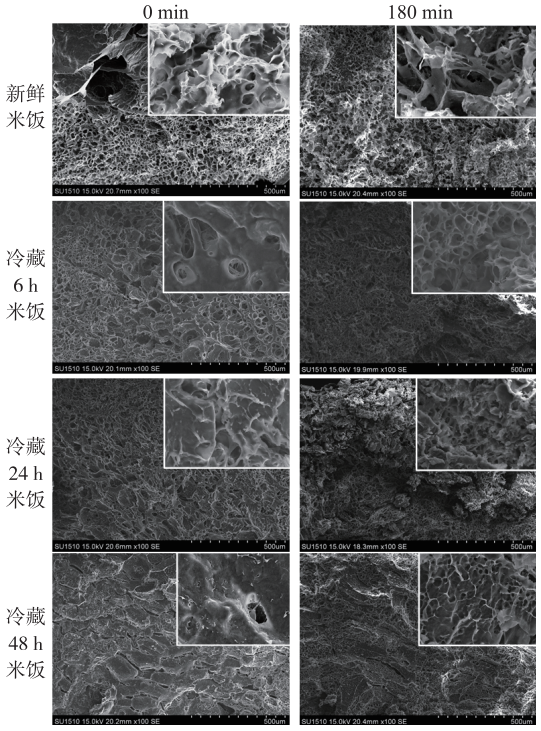
图 4　新鲜米饭和冷藏米饭在静态浸泡期间压痕硬度的变化

Fig. 4　Changes in indentation hardness of the freshly cooked rice and the refrigerated cooked rice during static soaking

2.2　米饭的微观结构分析

图 5 显示了新鲜米饭和冷藏米饭消化前(0 min)和静态浸泡后(180 min)的 SEM 图像。消化前的图像表明新鲜米饭具有明显的松散孔洞，这与 Tian 等报道的一致[21]，冷藏米饭颗粒的横截面显示出完整而紧凑的结构，冷藏 48 h 后的米饭微孔最小，这是由于更长的储存时间有助于形成更多淀粉微晶，使其更紧密[22]。

经过胃液浸泡 180 min 后，米饭颗粒的横截面上均出现了孔洞和褶皱，这是唾液淀粉酶和胃蛋白酶水解淀粉颗粒与蛋白质所形成的网络结构[23]。米饭蒸煮过程中会破坏颗粒淀粉的有序结构，从而导致淀粉对酶消化的敏感性增加。新鲜米饭被唾液和胃液浸泡后，酶可以更容易进入米饭颗粒内，导致内部结构更加松散，出现巨大的孔洞；而米饭在冷藏环境下产生了双螺旋或微晶等有序结构[24]，增加了淀粉对酶水解的抵抗力，使得浸泡后的颗粒内部仍具有较为紧密的结构[8]。



0 min 为消化前的米饭样品，180 min 为胃液浸泡 180 min 后的米饭样品；图像标尺为 500 μm。

图 5　新鲜米饭和冷藏米饭在模拟胃液中静态浸泡 180 min 前后的 SEM 图像

Fig. 5　SEM images of the freshly cooked rice and the refrigerated cooked rice stored for different times before and after static soaking in simulated gastric fluid for 180 min

2.3　体外动态消化过程中胃 pH 的变化

采用 DIVHS 模拟老年人消化米饭过程中，胃内 pH 变化情况见图 6。4 组米饭的 pH 在胃内的变化趋势均呈现先增大后减小的趋势。这取决于食物的缓冲能力，胃内 pH 在初始阶段呈现迅速上升的现象，随着模拟胃液的不断分泌以及食糜不断从胃内排出，胃内起缓冲作用的食物不断减少，致使 pH 随消化时间延长逐渐下降，这种变化趋势与相关文献报道的一致[25]。

消化过程中，冷藏米饭的 pH 均高于新鲜米饭，

这可能是由于二者的化学组成差异造成的。与新鲜米饭相比，冷藏后的米饭内部淀粉回生引起淀粉颗粒凝胶化，消化这些成分可能会消耗较多的胃酸[26]，导致冷藏米饭 pH 较高；同时，冷藏米饭持水能力较低，胃液易被排出，进一步形成胃内 pH 较高的现象[27]。

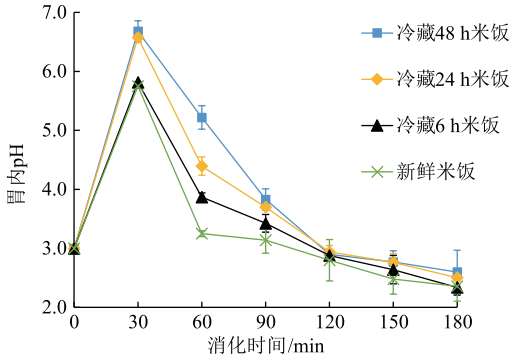


图 6　DIVHS 消化过程中 pH 变化

Fig. 6　Changes of pH during digestion in the DIVHS system

2.4　胃排空速率的比较

从图 7 可知，无论是新鲜米饭还是冷藏米饭，胃内米饭的残留率均随着时间的增加而减少。比较不同冷藏时间米饭的曲线可知，米饭的冷藏时间越长，胃内容物残留率越高，排空的滞后现象越明显，这归因于其具有较高硬度，难以被破碎成更小的颗粒，触发幽门的筛分功能[27-28]。

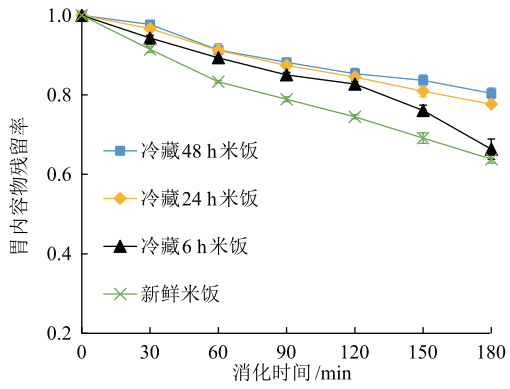


图 7　DIVHS 消化过程中胃内容物残留率变化

Fig. 7　Changes of dry matter retention ratio during digestion in the DIVHS system

为定量描述和比较不同米饭的胃排空速率，采用改进的 Elashoff 幂指数模型对胃内米饭的残留率数据进行拟合。拟合参数见表 3。通常 β 大于 1，表示初始排空速度延迟，而该值与各时间段排空的差异也有关。表中可看到，冷藏 6 h 米饭的 β 大于 1，这是因为相较于 120 min 后的排空，初期的排空更加滞后；而另外 3 组初期与后期的排空几乎维持平稳的状态，因此 β 小于 1。比较干物质的半排空时间（$t_{1/2}$），新鲜米饭为 303.3 min，远远低于冷藏 48 h 米饭的 630.6 min；通过对比 k 发现，冷藏 48 h 米饭 k 最小，表明其排空速率最小，在老年人消化模型下更难被破碎，导致半排空时间较长。

表 3　利用改进的 Elashoff 幂指数模型拟合米饭胃排空参数

Table 3　Modified Elashoff´s model parameters for gastric emptying of the dry matter of cooked rice under simulated elderly digestion conditions

样品	k/min^{-1}	β	$t_{1/2}$/min	r^2
新鲜米饭	0.001 9±0.000 2^{a}	0.834 4±0.044 7^{a}	303.3±10.8^{a}	0.996
冷藏 6 h 米饭	0.002 8±0.000 7^{a}	1.268 7±0.232 7^{a}	313.6±32.7^{a}	0.961
冷藏 24 h 米饭	0.001 4±0.000 2^{a}	0.979 9±0.056 0^{a}	501.1±28.4^{b}	0.995
冷藏 48 h 米饭	0.001 0±0.000 3^{a}	0.906 7±0.114 2^{a}	630.6±98.4^{b}	0.977

注：每列中上标的不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

2.5　淀粉水解率的比较

图 8 为模拟老年人胃消化阶段的淀粉水解率变化曲线，不同组别的变化趋势一致。消化初期，胃内 pH 较高，食团携带的唾液淀粉酶仍具有活性并水解淀粉，淀粉水解率呈现较快的增长趋势[29]。随着胃液的不断分泌，胃内 pH 逐渐下降，淀粉酶活性受到抑制，而胃蛋白酶对淀粉的水解有限，导致淀粉水解率的增加趋于平缓[14]。对比不同组别的淀粉水解率，冷藏米饭的紧密结构影响了淀粉的水解效率，导致新鲜米饭的水解程度始终高于冷藏米饭，消化 180 min 时，新鲜米饭与冷藏 48 h 米饭的淀粉水解率分别为 15.4% 和 7.4%，差异显著（$P<0.05$）。这表明冷藏米饭可能会产生较低的血糖效应，一定程度上有益于肥胖症与高血糖患者的健康[30]。

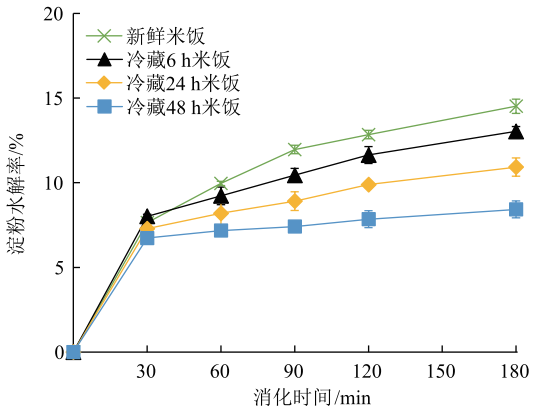


图 8　米饭在 DIVHS 消化过程中的淀粉水解曲线

Fig. 8　Starch hydrolysis of rice during digestion in the DIVHS system

3 结　语

基于 DIVHS 系统,定量研究了冷藏时间对模拟老年人胃消化环境下胃排空米饭和淀粉消化特性的影响。结果显示,米饭冷藏时间越久,淀粉回生程度越高,微观结构越致密,导致胃内容物滞留率越高,淀粉水解速率越低。与新鲜米饭相比,冷藏 48 h 后米饭的胃半排空时间增加了 2 倍;胃消化 180 min 时,新鲜米饭与冷藏 48 h 米饭的淀粉水解率分别为 15.4%和 7.4%,具有显著性差异。表明较长时间的冷藏可能会显著延缓老年人胃排空米饭的速度,增加饱腹感,同时会降低米饭淀粉的消化速率。

参考文献:

[1] 陈艳玫,刘子锋,李贤德,等. 2015—2050 年中国人口老龄化趋势与老年人口预测[J]. 中国社会医学杂志,2018,35(5):480-483.

[2] ALY S,EMAD K. Age-related gastric changes[J]. **Journal of Surgery**,2016,4(2):20-26.

[3] BAI J P,BURCKART G J,MULBERG A E. Literature review of gastrointestinal physiology in the elderly,in pediatric patients,and in patients with gastrointestinal diseases[J]. **Journal of Pharmaceutical Sciences**,2016,105(2):476-483.

[4] LEVI C S,LESMES U. Bi-compartmental elderly or adult dynamic digestion models applied to interrogate protein digestibility[J]. **Food and Function**,2014,5(10):2402-2409.

[5] LI L,BAIMA C,JIANG J,et al. *In vitro* gastric digestion and emptying of tsampa under simulated elderly and young adult digestive conditions using a dynamic stomach system[J]. **Journal of Food Engineering**,2022,327(8):1-11.

[6] ZHANG P,IQBAL S,DENG R,et al. Impact of elderly gastrointestinal alterations on gastric emptying and enzymatic hydrolysis of skim milk:an *in vitro* study using a dynamic stomach system[J]. **Food Chemistry**,2022,402(2):1-9.

[7] WANG S,COPELAND L. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility:a review[J]. **Food and Function**,2013,4(11):1564-1580.

[8] CHUNG H J,LIM H S,LIM S T. Effect of partial gelatinization and retrogradation on the enzymatic digestion of waxy rice starch [J]. **Journal of Cereal Science**,2006,43(3):353-359.

[9] MINEKUS M,ALMINGER M,ALVITO P,et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus[J]. **Food and Function**,2014,5(6):1113-1124.

[10] LEVI C S,GOLDSTEIN N,PORTMANN R,et al. Emulsion and protein degradation in the elderly:qualitative insights from a study coupling a dynamic *in vitro* digestion model with proteomic analyses[J]. **Food Hydrocolloids**,2017,69(8):393-401.

[11] WANG J,WU P,LIU M,et al. An advanced near real dynamic *in vitro* human stomach system to study gastric digestion and emptying of beef stew and cooked rice[J]. **Food and Function**,2019,10(5):2914-2925.

[12] 伍鹏,王娟,王晶晶,等. 基于仿生胃肠道模型的发酵乳中益生菌存活率评价[J]. 食品与发酵工业,2021,47(12):147-153.

[13] PENG Z,WU P,WANG J,et al. Achieving realistic gastric emptying curve in an advanced dynamic *in vitro* human digestion system:experiences with cheese-a difficult to empty material[J]. **Food and Function**,2021,12(9):3965-3977.

[14] KONG F,SINGH R P. A human gastric simulator(HGS) to study food digestion in human stomach[J]. **Journal of Food Science**,2010,75(9):627-635.

[15] MALAGELADA J R,GO V L,SUMMERSKILL W. Different gastric,pancreatic,and biliary responses to solid-liquid or

homogenized meals[J]. **Digestive Diseases and Sciences**，1979，24(2)：101-110.

[16] IQBAL S，ZHANG P，WU P，et al. Evolutions of rheology，microstructure and digestibility of parboiled rice during simulated semi-dynamic gastrointestinal digestion[J]. **LWT−Food Science and Technology**，2021，148(2)：1-10.

[17] SIEGEL J，URBAIN J，ADLER L，et al. Biphasic nature of gastric emptying[J]. **Gut**，1988，29(1)：85-89.

[18] HU R，LIN L，LIU T，et al. Reducing sugar content in hemicellulose hydrolysate by DNS method：a revisit[J]. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**，2008，2(2)：156-161.

[19] HU W，CORBERA-SABATE C，CHEN X D，et al. Poroviscoelasticity of whey protein hydrogels at different length and time scales[J]. **Food Hydrocolloids**，2017，72(11)：237-246.

[20] BHATTARAI R R，DHITAL S，WU P，et al. Digestion of isolated legume cells in a stomach-duodenum model：three mechanisms limit starch and protein hydrolysis[J]. **Food and Function**，2017，8(7)：2573-2582.

[21] TIAN Y，ZHAO J，XIE Z，et al. Effect of different pressure-soaking treatments on color，texture，morphology and retrogradation properties of cooked rice[J]. **LWT−Food Science and Technology**，2014，55(1)：368-373.

[22] XIE Y Y，HU X P，JIN Z Y，et al. Effect of temperature-cycled retrogradation on *in vitro* digestibility and structural characteristics of waxy potato starch[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**，2014，67(6)：79-84.

[23] KHATUN A，WATERS D L，LIU L. The impact of rice protein on *in vitro* rice starch digestibility [J]. **Food Hydrocolloids**，2020(12)：1-9.

[24] ZHOU X，LIM S T. Pasting viscosity and *in vitro* digestibility of retrograded waxy and normal corn starch powders [J]. **Carbohydrate Polymers**，2012，87(1)：235-239.

[25] BLANQUET S，ZEIJDNER E，BEYSSAC E，et al. A dynamic artificial gastrointestinal system for studying the behavior of orally administered drug dosage forms under various physiological conditions[J]. **Pharmaceutical Research**，2004，21(4)：585-591.

[26] MENNAH-GOVELA Y A，BORNHORST G M，SINGH R P. Acid diffusion into rice boluses is influenced by rice type，variety，and presence of α-amylase[J]. **Journal of Food Science**，2015，80(2)：316-325.

[27] LIU W，JIN Y，WILDE P J，et al. Mechanisms，physiology，and recent research progress of gastric emptying[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**，2021，61(16)：2742-2755.

[28] WU P，DENG R，WU X，et al. *In vitro* gastric digestion of cooked white and brown rice using a dynamic rat stomach model[J]. **Food Chemistry**，2017，237(12)：1065-1072.

[29] BORNHORST G M，SINGH R P. Gastric digestion *in vivo* and *in vitro*：how the structural aspects of food influence the digestion process[J]. **Annual Review of Food Science and Technology**，2014，5(1)：11-32.

[30] HOAD C L，RAYMENT P，SPILLER R C，et al. *In vivo* imaging of intragastric gelation and its effect on satiety in humans[J]. **The Journal of Nutrition**，2004，134(9)：2293-2300.