DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251124001
引用格式: 陈佳乐, 任顺成. 红米色素对小麦淀粉慢消化作用的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(6): 209–215.
CHEN JL, REN SC. Study on the effects of red rice pigment on the slow digestion of wheat starch [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(6): 209–215. (in Chinese with English abstract).

红米色素对小麦淀粉慢消化作用的影响研究

陈佳乐, 任顺成*

(新安县公共检验检测中心, 洛阳 471800)

摘 要: 目的 研究向淀粉类食品中有针对性地添加琼北红米色素来改变淀粉类食品的营养功能特性。**方法** 本研究采用碘量法、扫描电子显微镜与快速黏度分析等方法, 系统研究红米色素对淀粉理化特性及消化特性的影响。**结果** 红米色素对淀粉理化特性和消化特性有显著的影响(P<0.05), 红米色素的加入导致淀粉悬浮液 pH 的增大, 色度降低, 提高淀粉 a^*和 b^*, 使体系呈现红褐色; 同时, 显著降低小麦淀粉的碘蓝值, 改变淀粉颗粒的微观结构以及增大淀粉颗粒粒径; 体外消化实验显示, 当色素添加量由 0%增至 1.0%时, 抗性淀粉含量从 48.11%上升至 63.71%, 快消化淀粉含量则由 42.41%降至 28.27%; 同时, 水解敏感值均普遍降低, 淀粉预测血糖指数从 94.40 下降至 73.81。**结论** 红米色素能降低淀粉的碘结合力, 且该效应呈剂量依赖型; 通过非共价相互作用与淀粉结合, 影响淀粉链的空间分布和排列, 破坏淀粉颗粒的结晶结构; 进而造成淀粉对水解酶敏感性下降, 降低淀粉的水解速率, 抑制淀粉体外消化。

关键词: 红米; 色素; 理化特性; 淀粉慢消化

Study on the effects of red rice pigment on the slow digestion of wheat starch

CHEN Jia-Le, REN Shun-Cheng*

(*Xin'an County Public Inspection and Testing Center*, *Luoyang* 471800, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the targeted addition of Qiongbei red rice pigment into starch-based foods for modifying their nutritional and functional properties. **Methods** This study systematically examined the effects of red rice pigment on the physicochemical and digestive characteristics of starch using iodometry, scanning electron microscopy and rapid viscosity analysis. **Results** Red rice pigment significantly influenced the physicochemical and digestive properties of starch (P<0.05). The addition of the pigment increased the pH of starch suspensions, reduced chroma, elevated a^* and b^*, and resulted in a reddish-brown appearance. It also significantly decreased the iodine blue value of wheat starch, altered the microstructure of starch granules, and increased granule size. *In vitro* digestion experiments showed that as pigment concentration increased from 0% to 1.0%, resistant starch content increased from 48.11% to 63.71%, while rapidly digestible starch decreased from 42.41% to 28.27%. Hydrolysis

收稿日期: 2025-11-24
基金项目: 河南省自然科学基金项目(182300410079)
第一作者: 陈佳乐(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: 156498672990@163.com
***通信作者:** 任顺成(1963—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为食品营养与健康。E-mail: scren@163.com

sensitivity values generally declined, and the predicted glycemic index of starch dropped from 94.40 to 73.81. **Conclusion** Red rice pigment reduces the iodine-binding capacity of starch in a dose-dependent manner. It interacts with starch through non-covalent bonds, affecting the spatial distribution and arrangement of starch chains, and disrupting the crystalline structure of starch granules. Consequently, the sensitivity of starch to hydrolytic enzymes decreases, leading to a reduced hydrolysis rate and inhibited *in vitro* digestibility.

KEY WORDS: red rice; pigment; physicochemical properties; starch slow digestion

0 引 言

淀粉作为人类膳食中碳水化合物的主要来源, 广泛存在于日常食品中, 其消化特效与人体餐后血糖水平有着密切的相关性。近年来, 食品中膳食成分与淀粉间的相互作用成为研究热点[1], 通过在淀粉类食品中定向添加功能性物质, 可有效调控其营养特性与代谢行为[2]。

KAN 等[3]研究发现, 浆果提取物能显著延缓淀粉的消化速率并降低其消化程度, 有助于提高抗性淀粉含量, 调节血糖水平。另有研究表明[4−5], 天然植物活性成分可通过氢键、范德华力等非共价作用与淀粉分子结合, 占据其疏水空腔, 改变晶体结构, 从而影响淀粉的理化特性和消化特性。琼北红米作为海南丰富的水稻资源中的一个品种, 分布于海南北部, 种植历史悠久, 被当地人作为传统谷物长期种植和食用。前期实验中[6], 利用大孔树脂可将红米色素中原花青素纯度提高至 74.53%±2.79%, 鉴定后可知色素中原花青素是以(表)儿茶素为结构单元构成的原花青定聚合物, 具有较强的抗氧化能力。红米种皮沉积的色素是红米发挥生物活性的关键, 且具有作为食品添加剂的潜力。目前关于红米色素提取物的研究多集中于其抗氧化能力[7], 而降糖作用以及相关的开发利用研究却鲜有报道。本研究探讨了琼北红米色素对小麦淀粉理化特性和消化特性的影响, 探究了红米色素与淀粉之间相互作用机制, 拟为红米色素在血糖调节相关功能食品中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红米(由海南璟益农业开发有限公司提供); 红米色素(按前期工艺提取、精制、冻干后得到的色素粉末)。

α-葡萄糖苷酶(700000 U/mL)、无水葡萄糖、小麦淀粉(上海源叶生物科技有限公司); *α*-淀粉酶(50 U/mg, 上海谱科生物技术有限公司); 无水乙醇、碘化钾、碘、醋酸钠(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)试剂(实验室自制)。

1.2 实验仪器

FA 1004 电子分析天平(精度 0.001 g, 上海上平仪器公司); FXB 101-1 电热鼓风干燥箱(上海树立仪器仪表有限公司); FW 135 高速万能粉碎机(北京市永光明医疗仪器有限公司); FSH-2A 可调高速均质机(上海标本模型厂制造); PHS-3C 雷磁酸度计(上海仪电科学仪器股份有限公司); SHZ-82 数显水浴恒温振荡器(金坛华峰仪器有限公司); WSC-S 测色色差计(上海仪电物理光学仪器有限公司); TA-XT-PLUS 物性测试仪(英国 StableMicroSystem 公司); TDL-5A 台式低速离心机(江苏省金坛市医疗仪器厂); UV-1600B 紫外分光光度计(上海美谱达仪器有限公司); GL-20G-II 高速冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂); RVA-TM 快速粘度分析仪(瑞典 PERTEN 公司); BT-9300S 激光粒度分布仪(丹东百特仪器有限公司); Sigma 300 扫描电子显微镜(德国卡尔蔡司股份公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 淀粉悬浊液 pH 的测定

参考 PALINA 等[8]的方法, 精确称取 1.0 g 小麦淀粉样品(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%、2.0%, *m*/*m*, 下同)溶解于 20 mL 去离子水中, 磁力搅拌 10 min 后测定淀粉悬浊液 pH。

1.3.2 淀粉色度的测定

参考李明娟等[9]的方法, 精确称取 0.5 g 小麦淀粉样品(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%)于 25 mL 烧杯中, 加入 5 mL 醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L、pH=5.2), 沸水浴加热 30 min, 待样品冷却至室温后, 进行冷冻干燥处理, 收集冻干粉末供后续实验使用。

使用色差仪对冻干粉末样品的颜色特征进行分析, 根据公式(1)计算色差(Δ*E*):

$$\Delta E=(\Delta L)+(\Delta a)+(\Delta b) \quad (1)$$

式中: Δ*L*、Δ*a* 和 Δ*b* 分别表示了两组样品在的亮度(*L*)、红绿度(*a*)及黄蓝度(*b*)的差值。

1.3.3 淀粉-碘结合能力的测定

参考 REN 等[10]的方法, 精确称取 0.1 g 小麦淀粉样品(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%)于 25 mL 试管中, 加入 5 mL 醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L、pH=5.2), 振荡均匀后置于沸水浴中加热 30 min, 冷却静止至室温, 移取 1 mL 上清液, 加入 0.1 mL 碘液(0.2%碘、2%碘化钾), 用去离子水定容至 10 mL 并振荡均匀, 避光反应 15 min 后, 于 500~900 nm 波长下测定其紫外吸收光谱, 碘结合力通过吸光度 A_{635}/A_{520} 计算得出。

1.3.4　粒径的测定

参考靳宇丹等[11]的方法, 精确 0.5 g 小麦淀粉样品(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%), 用去离子水将样品配制为 1%的淀粉溶液, 磁力搅拌 20 min 后使用激光粒度仪测定其粒度分布。分散剂折射率设置为 1.33, 遮光率设置为 3%~6%。

1.3.5　淀粉糊化特性的测定

参考 HUO 等[12]的方法, 精确 3.0 g 小麦淀粉样品(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%), 将 25 mL 去离子水与样品一同置于专用测试铝盒内, 搅拌均匀后测定。糊化仪程序设定为: 恒温 50 ℃保持 1 min, 随后 8 min 内升温至 95 ℃并维持 5 min, 再经 8 min 降温至 50 ℃后恒温 2 min, 初始搅拌速度为 960 r/min, 随后下降至 160 r/min, 数据利用快速粘度分析配套软件 TCW3 进行采集和分析。

1.3.6　扫描电镜观察

参考 ZHENG 等[13]的方法并适当修改, 称取 1.0 g 小麦淀粉(分别添加红米色素 0%、1.0%)溶解于 10 mL 去离子水中, 沸水浴糊化处理 30 min 后冷却至室温, 冷冻干燥后研磨成粉过 100 目筛。将制备好的粉末样品固定于样品台并实施喷金处理, 置在扫描电子显微镜下, 放大 1000 倍观察样品表面微观结构。

1.3.7　淀粉体外消化的测定

(1)葡萄糖标准曲线的绘制

配制 1 mg/mL 的葡萄糖标准溶液, 依次向试管中加入葡萄糖标准溶液(0~1.4 mL)和 2 mL DNS 试剂, 振荡混匀后置于沸水浴中反应 5 min, 冷水浴冷却后定容至 25 mL, 于 540 nm 处测定吸光度, 得标准曲线回归方程为 Y=0.6607X–0.0103 (r^2=0.9985)。

(2)体外模拟淀粉消化的测定

参考 ENGLYST 等[14]的方法: 精确称取 0.1 g 小麦淀粉(分别添加红米色素 0%、0.2%、0.4%、0.7%、1.0%)于 25 mL 试管中, 加入 5 mL 醋酸钠缓冲液(0.2 mol/L、pH=5.2), 振荡混匀后沸水浴加热 30 min, 冷却静止至室温; 将糊化淀粉于 37 ℃水浴中平衡 15 min 后, 加入 5 mL、37 ℃预热的混合酶液(α-淀粉酶:α-葡萄糖苷酶=30:100, V:V), 在 37 ℃下水浴振荡准确计时, 分别于 0、20、40、60、120、180 min 吸取 1 mL 水解液, 立即加入 5 mL 无水乙醇终止反应, 经 3500 r/min 离心 10 min 后, 移取 1 mL 上清液, 采用 DNS 法测定其中葡萄糖含量。水解率按公式(2)~(5)计算[15]:

$$\mathrm{RDS}/\% = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{\mathrm{TS}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\mathrm{SDS}/\% = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{\mathrm{TS}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\mathrm{RS}/\% = [1 - (\mathrm{RDS} + \mathrm{SDS})] \times 100\% \quad (4)$$

$$\mathrm{SH}/\% = \frac{G_{\mathrm{T}} \times 0.9}{\mathrm{TS}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: G_0 为淀粉酶解前的葡萄糖含量, mg; G_{20}、G_{120}、G_T 分别对应酶解 20、120、T min 时的葡萄糖含量, mg; TS 为酶解前样品中淀粉总含量, mg。快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)、抗性淀粉(resistant starch, RS)、淀粉水解率(starch hydrolysis rate, SH)。

1.3.8　淀粉消化动力学和血糖指数的测定

参考 CAO 等[16]的方法测定淀粉体外消化动力学, 公式(6)为淀粉水解曲线一级动力学反应方程:

$$C_t = C_\infty(1 - e^{-k}) \quad (6)$$

式中: C_t 为 t 时刻时淀粉水解液中葡萄糖质量浓度, mg/mL, C_∞表示水解终点葡萄糖质量浓度, mg/mL, k 为一级反应动力学常数, min^{-1}。

采用 Origin 2021 中 BoxLucas1 模型拟合曲线得到 C_∞ 和 k, 按公式(7)计算淀粉水解曲线下面积(area under the starch hydrolysis curve, AUC)[17]:

$$\mathrm{AUC} = C_\infty(t_f - t_0) - (C_\infty/k)(1 - \exp)[-k(t_f - t_0)] \quad (7)$$

式中: t_0 和 t_f 分别为是消化起始时间(0 min)和消化终止时间(180 min)。

根据公式(8)~(9)计算样品的水解指数(hydrolysis index, HI)和预估血糖指数(glycemic index, GI)[17]:

$$\mathrm{HI}/\% = \mathrm{AUC_G}/\mathrm{AUC_W} \times 100\% \quad (8)$$

$$\mathrm{GI} = 0.862\mathrm{HI} + 8.198 \quad (9)$$

式中: $\mathrm{AUC_G}$ 和 $\mathrm{AUC_W}$ 分别表示样品组和空白组淀粉曲线下面积。

1.4　数据处理

通过 SPSS 24.0 和 Microsoft Excel 2016 进行数据处理与统计分析, 利用 Origin 2021 进行绘图和图像拟合。

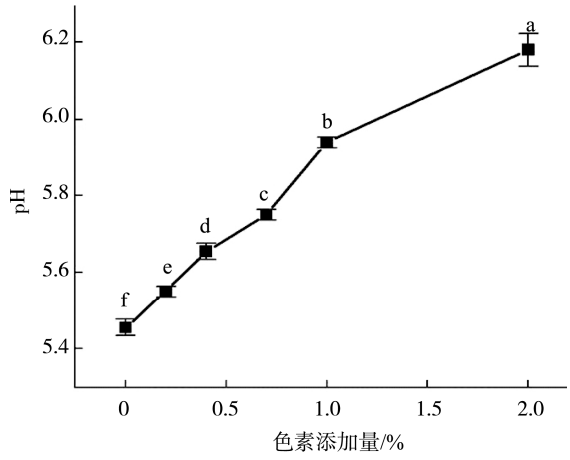
2　结果与分析

2.1　红米色素对淀粉悬浊液 pH 的影响

如图 1 所示, 随红米色素添加浓度的增加, 小麦淀粉悬浊液的 pH 显著上升。当色素添加量为 0.2%~2.0%时, pH 体系最大提高 0.65 个单位, 表明红米色素能够改变溶液 pH。研究表明红米色素中所含的原花青素等酚类物质富含酚羟基, 能够与淀粉分子发生相互作用, 并在水合过程中竞争结合水分子, 从而引起体系 pH 的显著改变[18]。研究表明淀粉体系 pH 的变化通常伴随颗粒表面电位的改变, 进而影响其连续网状结构与功能特性[19]。

2.2　红米色素对淀粉色度的影响

如表 1 所示, 红米色素添加量对小麦淀粉色度产生显著影响, 糊化与未糊化小麦淀粉间的颜色差异不大, 但添加红米色素的糊化淀粉的 L 随色素添加量增加显著降低(P<0.05), 表明样品亮度逐渐变暗。同时, 各色素组的 a^*、b^*及 ΔE 均显著上升, 表明小麦淀粉颜色明显偏红、偏黄,



注: 不同小写字母表示组内之间存在显著性差异(P<0.05)。图 4 同。

图 1 红米色素对淀粉悬浊液 pH 的影响

Fig.1 Effects of red rice pigment on the pH of starch suspension

整体色差增大。该现象主要源于红米色素本身为红褐色，其添加直接改变了体系的呈色特征。郑妍等[20]在将莲原花青素应用于面包的研究中也发现类似规律，面包芯颜色随之变深、偏红，与本研究结果一致。

2.3 红米色素对淀粉-碘结合力的影响

如图 2 所示，碘试剂与样品混合后体系呈蓝色，且在紫外吸收光谱 580 nm 处出现特征吸收峰，表明淀粉与碘发生了络合反应[21]。与空白组相比，不同添加量的红米色素均能剂量依赖性地降低该特征峰的强度。当红米色素添加量为 0.2%~1.0%时，碘蓝值(A_{635})下降幅度达 1.51，而碘结合力(A_{635}/A_{520})则呈现先升高后降低的趋势；该变化可能与直链淀粉和支链淀粉的结构差异有关：直链淀粉提供较多螺旋空腔用于结合，而支链淀粉因空间位阻作用影响相对有限；随着红米色素含量的增加，色素优先与支链淀粉结合形成复合物，当红米色素添加量较高时，其优先与直链淀粉结合形成复合物，竞争性抑制碘与直链淀粉的结合，因此导致碘结合力先升高后降低[22–23]。结果表明，红米色素能够有效竞争淀粉分子上的结合位点，抑制淀粉-碘复合物的生成。

表 1 红米色素对淀粉色度的影响

Table 1 Effects of red rice pigment on the chromaticity of starch

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
小麦淀粉(未糊化)	98.3±0.3^a	0.3±0.1^e	1.2±0.1^f	0
小麦淀粉(糊化)	98.7±0.1^a	0.4±0.1^e	1.7±0.1^e	0.6±0.2^e
小麦淀粉+0.2%红米色素(糊化)	93.4±0.3^c	2.6±0.2^d	3.7±0.1^d	5.9±0.3^d
小麦淀粉+0.4%红米色素(糊化)	91.6±0.1^d	4.2±0.1^c	7.6±0.2^c	10.0±0.3^c
小麦淀粉+0.7%红米色素(糊化)	89.4±0.2^e	5.4±0.3^b	11.3±0.1^b	14.4±0.3^b
小麦淀粉+1.0%红米色素(糊化)	86.5±0.4^f	7.8±0.2^a	12.8±0.2^a	18.1±0.2^a

注: 同一列不同字母表示存在显著性差异(P<0.05)，表 2~4 同。

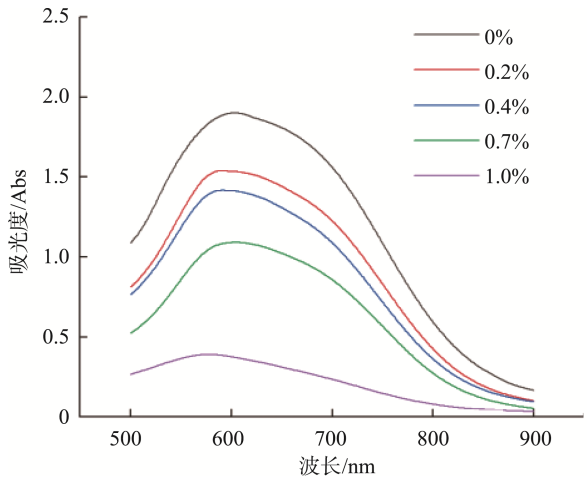


图 2 红米色素对淀粉-碘结合力的影响

Fig.2 Effects of red pigment on starch-iodine binding

2.4 红米色素对淀粉粒径的影响

如表 2 所示，小麦淀粉的平均粒径为 17.60 μm，随红米色素添加量的增加，淀粉粒径各项指标呈剂量依赖性上升，表明红米色素与淀粉复合，影响其空间结构[24]。粒径实验表明红米色素可能通过嵌入直链淀粉螺旋空腔或在其链间桥接，从而影响淀粉颗粒尺寸，并进一步影响其消化行为[25]。

2.5 红米色素对淀粉糊化特性的影响

小麦淀粉的糊化特性表 3 所示。红米色素的添加显著改变了淀粉的糊化行为：体系整体黏度下降，表明其水结合能力减弱；破损值整体上降低，反映了淀粉糊稳定性增强；回生值整体上的降低则说明色素有效抑制了淀粉老化。同时，峰值时间的延长与糊化温度的升高，可能是由于红米色素通过延缓淀粉颗粒溶胀和直链淀粉溶出速率影

表 2　红米色素对小麦淀粉粒径的影响
Table 2　Effects of red rice pigment on the particle size of wheat starch

添加量/%	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	$D_{[4,3]}$/μm	$D_{[3,2]}$/μm
0	4.67	17.20	30.30	17.60	9.20
0.2	4.90	17.70	31.20	18.20	9.51
0.4	5.09	18.00	31.80	18.60	9.68
0.7	5.18	18.20	32.10	18.80	9.77
1.0	5.42	18.60	32.80	19.20	9.91

注: D_{10}、D_{50}、D_{90} 分别表示累积粒度分布达到 10%、50%和 90%时所对应的粒径; $D_{[4,3]}$、$D_{[3,2]}$分别是基于颗粒体积和表面积计算的加权平均粒径。

表 3　红米色素对淀粉糊化特性的影响
Table 3　Effects of red rice pigment on the gelatinization characteristics of starch

添加量/%	峰值黏度 /cp	谷底黏度 /cp	破损值 /cp	最终黏度 /cp	回生值 /cp	峰值时间 /min	糊化温度 /℃
0	2474±19^{a}	1638±9^{a}	836±8^{a}	3445±21^{a}	1807±10^{a}	9.28±0.05^{c}	79.85±1.56^{c}
0.2	2337±14^{b}	1629±16^{a}	708±12^{c}	3340±32^{b}	1711±13^{b}	10.05±0.16^{a}	81.75±1.79^{bc}
0.4	2250±22^{c}	1574±14^{b}	676±9^{d}	3250±29^{c}	1676±28^{c}	9.91±0.11^{ab}	84.35±2.12^{ab}
0.7	2235±34^{c}	1470±31^{c}	765±21^{b}	3202±41^{c}	1732±19^{b}	9.58±0.29^{bc}	85.65±2.56^{ab}
1.0	2164±27^{d}	1485±25^{c}	679±18^{d}	3077±33^{d}	1592±27^{d}	10.11±0.22^{a}	88.25±2.04^{a}

响了糊化过程。研究表明[26–27]生物活性小分子对淀粉糊化的影响主要源于其对直链淀粉重排的抑制, 这一现象在原花青素-马铃薯淀粉[28]及原花青素-大米淀粉体系[29]中均有报道, 红米色素中的原花青素富含酚羟基, 在糊化过程中既能增大水分子与淀粉的接触面积, 又能通过氢键等相互作用与淀粉结合, 从而改变其糊化特性。

2.6　红米色素对淀粉微观结构的影响

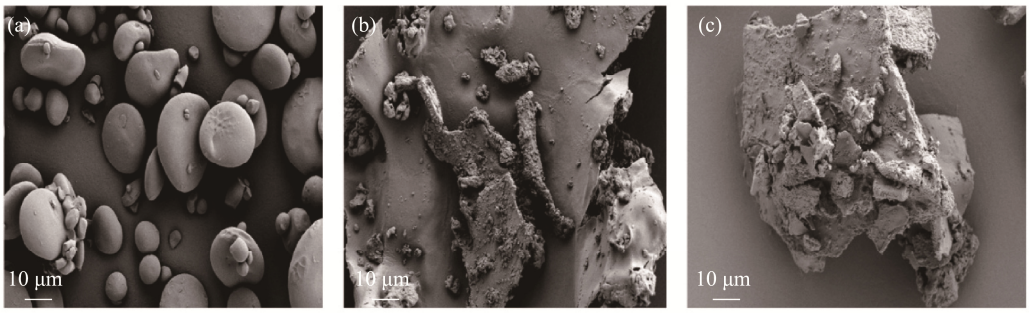
如图 3 所示, 未处理的天然淀粉颗粒表面光滑, 呈现典型的圆形或椭圆形[图 3(a)]; 经糊化处理后, 淀粉颗粒原有形态完全消失, 形成不规则块状结构[图 3(b)], 这是由于淀粉深度凝胶化所引起的, 其表面孔隙源于糊化与冻干过程中水分的逸出[30]; 添加 1%的红米色素后, 糊化淀粉结构进一步被破坏, 表面孔隙增多且粗糙、结构更趋松散[图 3(c)], 这可能是红米色素在糊化过程中进入淀粉颗粒内部空腔或与淀粉颗粒表面复合, 从而改变了淀粉颗粒的微观构型[31]。

2.7　红米色素对淀粉体外消化特性的影响

如图 4(a)所示, 淀粉在初始 20 min 内迅速水解, 20~120 min 期间水解速率减缓, 120 min 后逐渐趋于平衡。空白组的最终水解率接近 65%, 而各实验组的水解率均呈现下降趋势, 且呈剂量依赖性。依据淀粉的消化速率可将其分为 3 类[32], 分别为 RDS、SDS、RS, 如图 4(b)所示, 红米色素的加入能够显著提升 RS 含量, 同时降低 RDS 比例。具体地, 当色素添加量从 0%增至 1.0%时, RDS 由 42.41%下降至 28.27%, RS 则由 48.11%上升至 63.71%。

2.8　红米色素对淀粉消化动力学和血糖指数的影响

表 4 所示为不同浓度红米色素对小麦淀粉消化动力学参数的影响。食物 GI 通常以白面包的体外消化值为参照, 并据此将食品分为 3 类: 高 GI (GI≥70)、中



天然淀粉　　淀粉(糊化)　　淀粉+1%红米色素(糊化)

图 3　样品扫描电子显微镜图
Fig.3　Scanning electron microscope images of the sample

GI (55<GI<70)及低 GI (GI≤55)[33]。本研究究为准确反映红米色素对淀粉的消化性的影响，将空白组的 HI 作为标准参考值(HI=100)，并以此为基础来计算血糖指数[34]。结果表明，随着色素添加量的增加，淀粉水解平衡浓度 C_∞逐渐降低。水解敏感值与动力学常数 k 呈正相关，当色素添加量从 0%提高至 1.0%时，k 相应下降，预测 GI 由 94.40 降至 73.81。综上可知，红米色素可有效降低淀粉对消化酶的敏感程度。

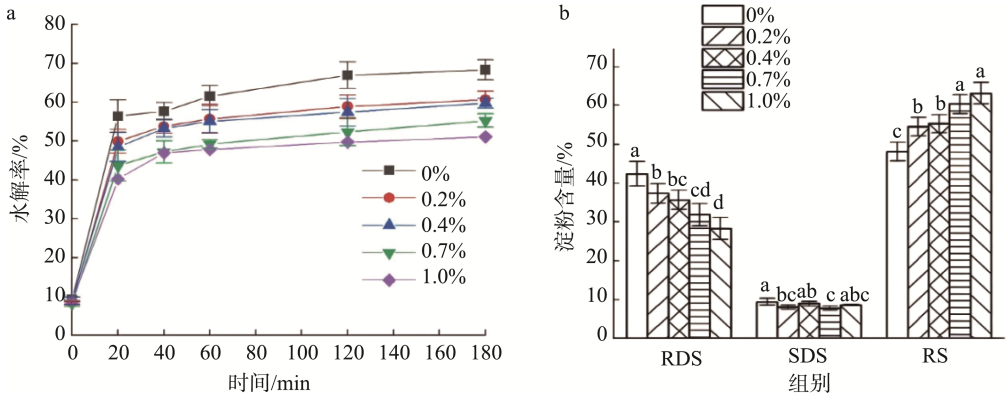


图 4 淀粉体外消化速率(a)和淀粉组分含量图(b)

Fig.4 *In vitro* digestion rate of starch (a) and starch component content graph (b)

表 4 消化动力学参数

Table 4 Parameters of digestive kinetics

添加量/%	C_∞/%	k/min^{-1}	r^2	HI	GI
0	64.48±3.31^a	0.094±0.035	0.9257	100.00	94.40^a
0.2	57.90±2.63^b	0.093±0.030	0.9409	89.73	85.55^b
0.4	57.05±2.67^b	0.090±0.029	0.9370	88.23	84.25^b
0.7	51.78±2.75^c	0.086±0.029	0.9197	79.83	77.02^c
1.0	49.58±2.58^c	0.081±0.026	0.9202	76.12	73.81^c

3 结 论

红米色素通过改变小麦淀粉的理化特性进而影响其消化特性。色素竞争性地结合于淀粉螺旋结构，抑制淀粉-碘复合物的有序形成并促进淀粉颗粒的聚集与粒径增大；在糊化过程中，色素进一步阻碍淀粉链的溶出与重排，形成表面粗糙、结构松散多孔的凝胶网络。这些结构变化共同导致淀粉糊化稳定性增强，延缓其体外消化速率，显著提升抗性淀粉含量、降低快消化淀粉比例。综上，红米色素通过氢键、疏水作用等非共价相互作用改变淀粉的结构与性质，在开发低血糖指数、慢消化特性的功能性淀粉基食品方面具有应用潜力。

参考文献

[1] 代文婷, 王世萍, 张晶, 等. 多酚与膳食成分的相互作用及应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(6): 120–130.
DAI WT, WANG SP, ZHANG J, *et al*. Research progress on interactions and applications of polyphenols and dietary components [J]. Storage and Process, 2024, 24(6): 120–130.

[2] 郑志浩, 李璐. 燕麦膳食纤维粉的研制及其血糖生成指数测定[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(19): 150–158.
ZHENG ZH, LI L. Preparation of oat dietary fiber powder and determination of its glycemic index [J]. Food Research and Development, 2025, 46(19): 150–158.

[3] KAN L, OLIVIERO T, VERKERK R, *et al*. Interaction of bread and berry polyphenols affects starch digestibility and polyphenols bio-accessibility [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 68: 103924.

[4] DENG N, DENG Z, TANG C, *et al*. Formation, structure and properties of the starch-polyphenol inclusion complex: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 667–675.

[5] 王晏驰, 王唯一, 刘丽, 等. 淀粉-多酚相互作用的机制、结构表征及其对功能特性影响的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 1–14. [2025-11-20]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040125.
WANG YC, WANG WY, LIU L, *et al*. Research progress on the mechanism, structural characterization of starch-polyphenol interactions and their effects on functional properties [J/OL]. Science and Technology of Food Industry, 2025: 1–14. [2025-11-20]. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025040125

[6] 陈佳乐, 任顺成. 琼北红米色素的精制及抗氧化性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 81–88.
CHEN JL, REN SC. Refinement and antioxidant activity of red rice pigment from Northern Hainan [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 81–88.

[7] GOGOI P, SHARMA P, GOUDAR G, *et al*. Phenolic composition and antioxidant potential of Indian pigmented rice landraces cultivated under identical agro-climatic conditions [J]. Journal of Cereal Science, 2025, 122:

104120.

[8] PALINA B, KEVINA, YA K, *et al*. Optimized spectrophotometry method for starch quantification [J]. Analytica, 2022, 3(4): 394–405.

[9] 李明娟, 韦林艳, 张雅媛, 等. 干燥技术对木薯酸淀粉品质特性及颗粒结构的影响[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(6): 154–165.
LI MJ, WEI LY, ZHANG YY, *et al*. Effects of drying techniques on quality characteristics and granular structure of cassava acid-modified starch [J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(6): 154–165.

[10] REN S, LI K, LIU Z. Research on the influences of five food-borne polyphenols on *in vitro* slow starch digestion and the mechanism of action [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(31): 8617–8625.

[11] 靳宇丹, 王涛, 冯伟, 等. 提取方法对大米淀粉结构与理化性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(6): 31–39.
JIN YD, WANG T, FENG W, *et al*. Effects of extraction methods on structure and physicochemical properties of rice starch [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6): 31–39.

[12] HUO J, WANG L, MA J, *et al*. Different effects of polyphenols on hydration, pasting and rheological properties of rice starch under extrusion condition: From the alterations in starch structure [J]. Food Chemistry, 2024, 465(Pt 2): 142002.

[13] ZHENG Y, TIAN J, KONG X, *et al*. Proanthocyanidins from Chinese berry leaves modified the physicochemical properties and digestive characteristic of rice starch [J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127666.

[14] ENGLYST HN, KINGMAN S, CUMMINGS J. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(Suppl 2): S33–S50.

[15] 冒钰荣. 低GI黑小麦速食粥的研制及储藏稳定性研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
MAO YR. Development and storage stability of low-GI triticale instant porridge [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

[16] CAO H, HUANG Q, WANG C, *et al*. Effect of compositional interaction on *in vitro* digestion of starch during the milling process of quinoa [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134372.

[17] FERRER-MAIRAL A, PENALVA-LAPUENTE C, IGLESIA I, *et al*. *In vitro* and *in vivo* assessment of the glycemic index of bakery products: Influence of the reformulation of ingredients [J]. European Journal of Nutrition, 2012, 51(8): 947–954.

[18] MINGCONG F, YIXUAN Y, WALEED A, *et al*. Germination-induced changes in anthocyanins and proanthocyanidins: A pathway to boost bioactive compounds in red rice [J]. Food Chemistry, 2023, 433: 137283.

[19] CHATPAPAMON C, WANDEE Y, UTTAPAP D, *et al*. Pasting properties of cassava starch modified by heat-moisture treatment under acidic and alkaline pH environments [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 215: 338–347.

[20] 郑妍, 张馨匀, 隋勇. 莲原花青素对面包品质及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 62–68.
ZHENG Y, ZHANG XY, SUI Y. Effect of lotus proanthocyanidins on bread quality and functional properties [J]. Food Science, 2020, 41(8): 62–68.

[21] 任顺成, 胡海洋, 李柯柯. 多酚对淀粉的热力学特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 18–27.
REN SC, HU HY, LI KK. Effect of polyphenols on thermodynamic properties of starch [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 18–27.

[22] TAKAHAMA U, HIROTA S, YANASE E. Slow starch digestion in the rice cooked with adzuki bean: Contribution of procyanidins and the oxidation products [J]. Food Research International, 2019, 119: 187–195.

[23] 张伟东. 紫红米米糠花色苷对大米淀粉消化和益生特性的影响及吞咽障碍食团的制备与质地评估[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
ZHANG WD. Effects of anthocyanins from purple-red rice bran on starch digestibility and prebiotic properties, and preparation and texture evaluation of dysphagia-oriented food bolus [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.

[24] CHOU S, LI B, TAN H, *et al*. The effect of pH on the chemical and structural interactions between apple polyphenol and starch derived from rice and maize [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(9): 5026–5035.

[25] DI Z, KANGYI Z, DONGXU G, *et al*. Effect of tea polyphenols on the physicochemical, structural and digestive properties of modified high amylose corn starch [J]. Food & function, 2023, 14(11). DOI: 10.1039/D2FO04089A

[26] KOU T, GAO Q. A study on the thermal stability of amylose-amylopectin and amylopectin-amylopectin in cross-linked starches through iodine binding capacity [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 88: 86–91.

[27] CHEN X, ZHU L, ZHANG H, *et al*. A review of endogenous non-starch components in cereal matrix: Spatial distribution and mechanisms for inhibiting starch digestion [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 65(19): 11–16.

[28] ZHANG Z, TIAN J, FANG H, *et al*. Physicochemical and digestion properties of potato starch were modified by complexing with grape seed proanthocyanidins [J]. Molecules, 2020, 25(5): 1123.

[29] 涂园, 李晓玺, 陆萍, 等. 发酵过程中原花青素对大米淀粉多尺度结构及体外消化特性的调控[J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 152–158, 285.
TU Y, LI XX, LU P, *et al*. Regulation of proanthocyanidins on multi-scale structure and *in vitro* digestibility of rice starch during fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 152–158, 285.

[30] WANG M, SHEN Q, HU L, *et al*. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestibility on complex of starch with lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) leaf flavonoids [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 191–199.

[31] NAGULESWARAN S, VASANTHAN T, HOOVER R, *et al*. Amylolysis of amylopectin and amylose isolated from wheat, triticale, corn and barley starches [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 686–693.

[32] WANG C, CHEN R, GONG L, *et al*. Inhibiting hydrolytic enzyme activity and slowing carbohydrate digestion using lotus seed epicarp phenolic extracts [J]. Natural Product Research, 2024, 11–12. DOI: 10.1080/14786419.2024.2426066

[33] 张宇. 燕麦 β-葡聚糖对淀粉消化吸收和血糖的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
ZHANG Y. Effect of oat β-glucan on starch digestion, absorption and blood glucose [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.

[34] 李冰, 张立攀, 王俊朋, 等. 低血糖生成指数面包配方优化及品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(22): 40–48.
LI B, ZHANG LP, WANG JP, *et al*. Optimization and quality analysis of low glycemic index bread formul [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(22): 40–48.

(责任编辑: 蔡世佳　安香玉)