

# 红米多酚对体外碳水化合物消化和吸收的影响

胡柏, 张宇, 张晖, 王立, 钱海峰, 齐希光

(江南大学食品学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 本研究对红米麸皮中多酚进行了提取, 并通过筛选大孔树脂及对应洗脱剂浓度确定了纯化红米多酚的条件, 鉴定了红米多酚的主要成分, 探究了红米多酚对碳水化合物在小肠消化吸收过程中涉及的消化酶活性以及葡萄糖吸收的影响。结果表明, 大孔树脂 HPD400A 对红米多酚具有较高的吸附率与解吸率, 乙醇浓度 70% 可达到红米多酚解吸率 0.97。红米多酚的主要成分为原花青素。红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、麦芽糖酶、蔗糖酶活性均有抑制作用, 红米多酚浓度越高, 抑制作用越强。红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、乳糖酶活性抑制的  $IC_{50}$  分别为 3.61  $\mu\text{g/mL}$ 、2.81 mg/mL、5.48 mg/mL、6.55 mg/mL。红米多酚对离体小肠葡萄糖吸收同样存在抑制作用, 红米多酚浓度越高, 抑制作用越强, 浓度为 2.01 mg/mL 时红米多酚对葡萄糖吸收的抑制率达 72.32%。

**关键词:** 红米多酚; 碳水化合物; 消化酶; 葡萄糖

文章编号: 1673-9078(2015)10-134-139

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.10.023

## Effect of Red Rice Polyphenol on *in Vitro* Carbohydrate Digestion and Adsorption

HU Bai, ZHANG Yu, ZHANG Hui, WANG Li, QIAN Hai-feng, QI Xi-guang

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** The extraction of polyphenols from red rice bran was investigated and the purification conditions of red rice polyphenols were established by selecting macroporous resin and eluent concentration. Additionally, the major components of red rice polyphenols were identified, and the effect of red rice polyphenol on the related digestive enzyme activities and glucose adsorption during *in vitro* small intestinal digestion as well as adsorption of carbohydrate was evaluated. The results showed that the adsorption and desorption rates of red rice polyphenol were relatively high when using macroporous resin HPD400A, and the desorption rate of red rice polyphenol could reach 0.97 with ethanol at a concentration of 70%. The main contents of red rice polyphenol are proanthocyanidins. Red rice polyphenol could inhibit the activities of  $\alpha$ -amylases,  $\alpha$ -glucosidase, maltase, and sucrase, with 50% inhibitory concentration ( $IC_{50}$ ) values of 3.61  $\mu\text{g/mL}$ , 2.81 mg/mL, 5.48 mg/mL, and 6.55 mg/mL, respectively. Furthermore, the higher the concentration of red rice polyphenols was, the stronger the inhibitory effect became. Additionally, red rice polyphenols could inhibit *in vitro* intestinal glucose uptake; the higher the concentration of red rice polyphenols was, the stronger the inhibitory effect became. At the concentration of 2.01 mg/mL, the inhibition rate of red rice polyphenols against glucose uptake was 72.32%.

**Key words:** red rice polyphenol; carbohydrates; digestive enzymes; glucose

红米因其糙米米皮红色而得名, 红米稻在我国古代就有种植<sup>[1]</sup>, 在众多的水稻资源中, 红米资源排第 2 位。在中国保存的水稻种质资源中, 有色稻种占 10% 左右, 其中红米稻种质有 8963 份<sup>[2]</sup>, 占据有色稻种的首位。红米不但芳香爽口, 而且大量研究表明它们的营养比较全面合理, 是比较理想的保健食品资源之一<sup>[3]</sup>。中医认为有滋阴补肾、明目活血等功效, 化学分

收稿日期: 2014-11-18

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划课题 (2012BAD34B08)

作者简介: 胡柏 (1989-), 女, 研究生, 研究方向: 谷物功能成分

通讯作者: 张晖 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 谷物功能成分

析表明红米麸皮具有较高的总酚含量, 且总酚中原花青素占很大比例<sup>[4]</sup>。多酚是分子内含有多个与一个或几个苯环相联羟基化合物的一类植物成分总称, 具有抗氧化<sup>[5-6]</sup>、抗肿瘤<sup>[7]</sup>、降血脂、抑制  $\alpha$ -淀粉酶<sup>[8]</sup>等作用。在红米资源利用方面, 有研究将红米运用于方便米饭、谷物饮料、米酒、婴幼儿食品中。关于红米的功能, 有研究表明红米可降低兔主动脉粥样斑块面积, 提高血清及肝脏抗氧化能力, 提高红细胞超氧化物歧化酶活性, 具抗动脉硬化功能<sup>[9]</sup>; 另有研究表明红米中多酚物质可以增强细胞抗氧化活性, 对血癌、宫颈癌、胃癌细胞生长表现出强大的抑制效果<sup>[4]</sup>。

国内外研究主要针对红米的抗氧化活性,但很少研究红米中多酚物质对碳水化合物消化及吸收的影响。本实验筛选了纯化红米多酚的大孔树脂及洗脱剂,采用大孔树脂及凝胶柱 LH-20 纯化红米麸皮中多酚,并采用体外实验研究了该多酚对碳水化合物消化过程中肠道消化酶类活性的影响,同时用外翻肠囊法研究了红米多酚对葡萄糖吸收情况的影响,探究红米多酚通过减缓碳水化合物消化分解及抑制葡萄糖吸收两种方式达到减缓人体摄食后血糖升高速度的作用的可能性,为红米资源的开发利用提供了基础数据,有利于挖掘红米资源在预防及控制糖尿病方面的使用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

红米,建平县源丰有机杂粮有限公司;大孔树脂,河北宝恩生物科技有限公司;交联葡聚糖凝胶 LH-20,西格玛奥德里奇贸易有限公司;葡萄糖测定试剂盒,南京建成生物科技有限公司;其他试剂均采用分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

碾米机,佐竹机械(苏州)有限公司;立式高速冷冻离心机,日立(中国)有限公司;酸度计 Delta 320 梅特勒-托利多(上海)仪器有限公司;分光光度计 722S,无锡科达智能仪器有限公司;旋转蒸发器,瑞士步琦工业有限公司;恒流泵,上海沪西分析仪器有限公司;SKY-110WX 苏坤摇床,上海沪粤明科学仪器有限公司。

### 1.2 红米多酚纯化与提取

#### 1.2.1 红米多酚粗提取

采用碾米机将红米脱皮,得红米麸皮,用正己烷( $m:V=1:5$ )脱脂两次,脱脂后麸皮用布氏漏斗抽滤去正己烷,再自然风干至有机溶剂完全挥发。所得麸皮粉用丙酮/水/乙酸比例为 70:29.5:0.5 的溶剂( $m:V=1:5$ )振荡提取红米多酚两次,合并上清液,旋蒸去有机溶剂。

#### 1.2.2 大孔树脂及洗脱剂筛选

采用静态吸附法从大孔树脂 ADS17、HPD826、HPD100、D101、HPD400、HPD750、HPD400A、NKA9、HPD722 中筛选对红米多酚吸附及解吸能力最强的大孔树脂,吸附温度 25 °C,吸附时间 12 h。用 30%、40%、50%、60%、70%、80%、90% (体积分数,即  $V_{乙醇}:V_{溶液}$ ) 乙醇从筛选出的大孔树脂中静态解吸红米多酚,解吸温度 25 °C,解吸时间 12 h。

#### 1.2.3 大孔树脂纯化红米多酚

将红米多酚粗提物水溶液上样大孔树脂 HPD400A 柱,柱温 25 °C,上样速度 0.5 BV/h (1 BV 为一个柱体积)。上样后用蒸馏水冲洗柱子,流速 2 BV/h,冲至洗出液 pH 为 5.5 左右。再用 2 BV 70% 乙醇洗脱红米多酚,洗脱速度 1 BV/h,将得到的溶液旋蒸去有机溶剂。

#### 1.2.4 凝胶柱 LH-20 纯化红米多酚

将大孔树脂纯化后的红米多酚溶液上样 LH-20 柱,上样速度 0.5 BV/h,依次用 4 BV 30% 甲醇、50% 乙醇冲洗柱,洗脱速度 2 BV/h,最后用 3 BV 70% 丙酮洗脱红米多酚,洗脱速度 0.5 BV/h。洗脱过程中,将洗脱液收集并测定洗脱液 280 nm 下吸光值。将得到的溶液旋蒸去有机溶剂,所得水溶液经冷冻干燥得红米多酚固体粉末。

#### 1.2.5 红米多酚总酚含量测定

总酚含量的测定采用 Folin-Ciocalte 法,用没食子酸做标准物<sup>[10]</sup>。

#### 1.2.6 红米多酚原花青素含量测定

原花青素含量测定采用香草醛-硫酸法,用 (+)-儿茶素做标准物<sup>[11]</sup>。

### 1.3 红米多酚对碳水化合物消化影响测定

#### 1.3.1 大鼠肠道消化酶提取

大鼠用乙醚致昏迷后脱颈处死,取上段小肠,置 0.9% ( $m:V=0.9:1$ ) NaCl 溶液中漂洗,翻转小肠内腔,用 0.9% NaCl 溶液漂洗。用滤纸拭干小肠,称重,加入 0.9% NaCl 溶液 ( $m:V=2:5$ ) 用匀浆器 4 °C 下匀浆,所得液 4 °C 下以 8000 r/min (1 r/min=1 转/分钟) 离心 8 min,取上清液即为肠道酶提取液,置于 -80 °C 冰箱冷冻备用。

#### 1.3.2 红米多酚抑制 $\alpha$ -淀粉酶活性试验

分别在试管中加入浓度为 1.1  $\mu\text{g/mL}$ 、2.1  $\mu\text{g/mL}$ 、4.2  $\mu\text{g/mL}$ 、8.4  $\mu\text{g/mL}$ 、12.6  $\mu\text{g/mL}$ 、17  $\mu\text{g/mL}$ 、25  $\mu\text{g/mL}$ 、50  $\mu\text{g/mL}$ 、101  $\mu\text{g/mL}$  的红米多酚 0.5 mL,非抑制管中加入 0.5 mL 0.1 mol/L pH=6.8 的 PBS 缓冲液。分别加入 0.5 mL 0.5 U/mL 的猪胰  $\alpha$ -淀粉酶溶液,37 °C 下预反应 15 min。随后向含相同浓度多酚的管中分别加入 1 mL 1% 的可溶性淀粉溶液(反应管)反应 5 min 后加 1 mL DNS 溶液终止反应或先加 1 mL DNS 溶液,随后立即加入 1 mL 1% 的可溶性淀粉溶液(对照管)。各管与沸水浴中加热 15 min 后,立即用冰水冷却。冷却后各管加入 10 mL 蒸馏水稀释溶液并混匀,用紫外分光光度计在 540 nm 波长下测吸光度。红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶的抑制率按下式计算:

$$\text{抑制率 (\%)} = \left(1 - \frac{A_0 - A_0'}{A_1 - A_1'}\right) \times 100$$

式中:  $A_1$ 、 $A_1'$ 、 $A_0$ 、 $A_0'$ 分别为非抑制管反应管、非抑制管对照管、多酚抑制反应管、多酚抑制对照管的吸光值)。

### 1.3.3 红米多酚抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性试验

分别在试管中加入浓度为 0.078 mg/mL、0.156 mg/mL、0.313 mg/mL、0.625 mg/mL、1.25 mg/mL、2.5 mg/mL、5 mg/mL、10 mg/mL、20 mg/mL 的红米多酚 1 mL, 非抑制管中加入 1 mL 0.1 mol/L pH=6.8 的 PBS 缓冲液。分别加入 1 mL 用 PBS 缓冲液稀释 4 倍的肠道酶提取液, 37 °C 下预反应 30 min。随后向含相同浓度多酚的管中分别加入 1 mL 2 mmol/L 的 pNPG 溶液 (反应管) 或 PBS 缓冲液 (对照管), 反应 30 min。用 2 mL 0.2 mol/L 的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液终止反应, 用紫外分光光度计在 400 nm 波长下测吸光度。红米多酚对  $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制率按下式计算:

$$\text{抑制率 (\%)} = \left(1 - \frac{A_0 - A_0'}{A_1 - A_1'}\right) \times 100$$

式中:  $A_1$ 、 $A_1'$ 、 $A_0$ 、 $A_0'$ 分别为非抑制管反应管、非抑制管对照管、多酚抑制反应管、多酚抑制对照管的吸光值)。

### 1.3.4 红米多酚抑制双糖酶活性试验

分别在试管中加入浓度为 0.078 mg/mL、0.156 mg/mL、0.313 mg/mL、0.625 mg/mL、1.25 mg/mL、2.5 mg/mL、5 mg/mL、10 mg/mL、20 mg/mL 的红米多酚 50  $\mu\text{L}$ , 非抑制管中加入 1 mL 0.1 mol/L pH=6.8 的 PBS 缓冲液。分别加入 50  $\mu\text{L}$  肠道酶提取液, 37 °C 下预反应 30 min。随后向含相同浓度多酚的管中分别加入 50  $\mu\text{L}$  56 mmol/L 的麦芽糖溶液或蔗糖溶液 (反应管) 或 PBS 缓冲液 (对照管), 若底物为麦芽糖反应 30 min, 若底物为蔗糖反应 60 min。用 100  $\mu\text{L}$  无水乙醇终止反应, 用葡萄糖氧化酶法测定反应液中葡萄糖浓度, 在 505 nm 波长下测定吸光值。红米多酚对双糖酶的抑制率按下式计算:

$$\text{抑制率 (\%)} = \left(1 - \frac{A_0 - A_0'}{A_1 - A_1'}\right) \times 100$$

式中:  $A_1$ 、 $A_1'$ 、 $A_0$ 、 $A_0'$ 分别为非抑制管反应管、非抑制管对照管、多酚抑制反应管、多酚抑制对照管的吸光值)。

## 1.4 大鼠外翻肠囊吸收试验

健康大鼠禁食一夜后, 用乙醚致大鼠昏迷, 脱颈处死, 取空肠及回肠段。用 0 °C 台氏液灌流离体小肠, 直至流出液不再浑浊。将离体小肠剪成每段 7 cm, 用细玻璃棒将肠段翻转, 使肠粘膜在外。用手术线将肠

囊一端扎紧, 另一端扎在一 2 cm 长塑料管上, 即为实验肠囊。用移液枪像肠囊塑料管端内加入 1 mL 空白台氏液, 将其放入已有无多酚台氏液或多酚浓度 0.6 mg/mL、1.2 mg/mL、1.8 mg/mL 台氏液的试管中, 持续向试管中通入 95%  $\text{O}_2$ /5%  $\text{CO}_2$  混合气, 将试管放入 37 °C 恒温水浴中。分别于 20、30、40、60、80、90 min 从肠囊中取样 100  $\mu\text{L}$ , 同时补足 100  $\mu\text{L}$  空白台氏液。用葡萄糖氧化酶法测定样品中葡萄糖, 于 505 nm 波长下测定吸光值。

## 1.5 数据分析

试验所涉及到的测定结果均做 3 次平行, 采用 Origin 8.6 软件进行数据统计分析和作图, 用 spss 进行方程和显著性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 红米多酚提取与纯化

#### 2.1.1 大孔树脂筛选

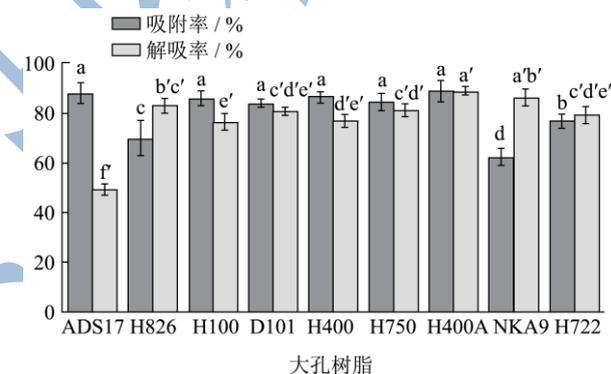


图 1 不同大孔树脂对红米多酚吸附率及解吸率

Fig.1 Adsorption and desorption rates of red rice polyphenols in different macroporous resins

由图 1 可见, 大孔树脂 HPD400A 对红米多酚粗提物吸附率为 0.89, 解吸率为 0.89, 与其他大孔树脂相比, 同时具有较高的吸附率与解吸率, 具有良好的吸附及解吸性能, 所以选择 HPD400A 作为红米多酚纯化树脂。

#### 2.1.2 洗脱剂筛选

由图 2 可知, 大孔树脂 HPD400A 红米多酚解吸率随乙醇浓度增加而增大, 乙醇浓度为 70% 时, 红米多酚解吸率为 0.97。乙醇浓度达到 70% 后, 解吸率增大的趋势变平缓。从解吸率与洗脱剂成本角度考虑, 选择 70% 乙醇做为红米多酚洗脱剂。

#### 2.1.3 纯化过程中红米多酚纯度

交联葡聚糖凝胶 LH-20 凝胶层析图如图 1 所示, 收集 170~220 mL 洗脱液, 旋蒸去有机溶剂后冷冻干燥

即为最终纯化的红米多酚。采用 Foiln-Ciocalte 法测定总酚含量，红米多酚总酚含量与红米多酚质量比即为红米多酚纯度。各纯化步骤红米多酚纯度如表 1 所示，最终得到红米多酚的纯度为 90.8%。该多酚中原花青素含量占 71.8%。

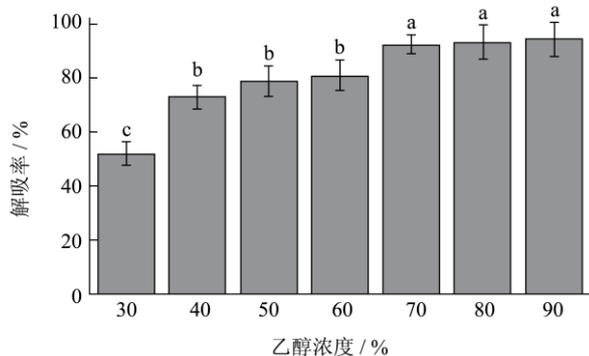


图 2 不同浓度乙醇对红米多酚解吸率的影响

Fig.2 Effects of different ethanol concentrations on the desorption rate of red rice polyphenols

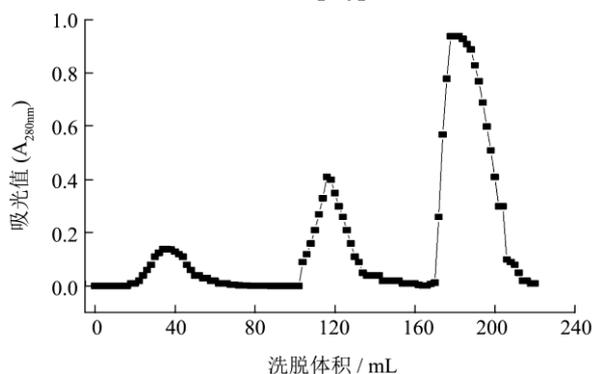


图 1 交联葡聚糖凝胶 LH-20 凝胶层析图

Fig.1 Sephadex LH-20 gel chromatogram

表 1 纯化过程中红米多酚纯度

Table 1 Purity of red rice polyphenols during purification

多酚纯化程度	粗提物	大孔树脂纯化	LH-20 纯化
多酚纯度/%	13.9±0.64	64.1±1.77	90.8±2.13

## 2.2 红米多酚对碳水化合物消化影响

### 2.2.1 红米多酚对 α-淀粉酶活性影响

α-淀粉酶是 α-1,4 内切葡萄糖苷酶，是淀粉进行最初消化的酶类。由图 4 可见，红米多酚对 α-淀粉酶存在抑制作用，且抑制率随红米多酚浓度增大而增高，当红米多酚浓度为 0.101 mg/mL 时，对 α-淀粉酶抑制率达 90.87%。当多酚浓度增大到一定程度时，抑制率增长趋于平缓。由图 4 进行多元非线性拟合，得回归方程： $Y=33.5X^3+3571.9X^2-70107.5X+399701$ ， $R^2=0.93$ ，由此方程可以求出红米多酚对 α-淀粉酶的半抑制浓度为 3.61 μg/mL。

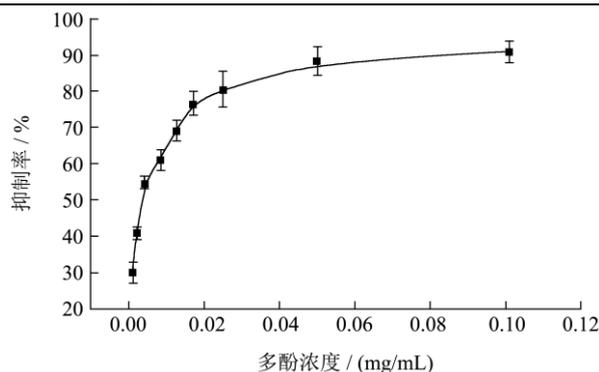


图 4 不同浓度红米多酚对 α-淀粉酶活性的影响

Fig.4 Effects of red rice polyphenols with different concentrations on α-amylase activity

### 2.2.2 红米多酚对 α-葡萄糖苷酶活性影响

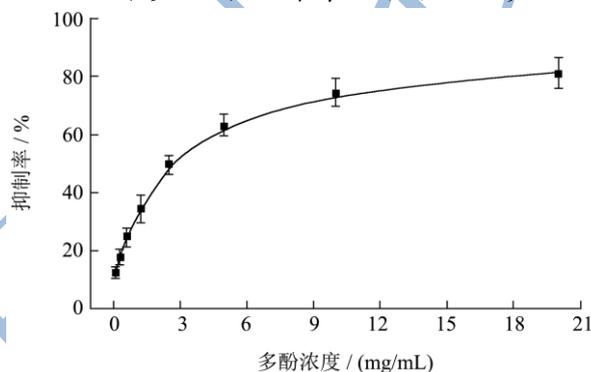


图 5 不同浓度红米多酚对 α-葡萄糖苷酶活性的影响

Fig.5 Effects of red rice polyphenols with different concentrations on α-glucosidase activity

α-葡萄糖苷酶可以水解糖中的 α-1,4 糖苷键，将糖类分解从而生成可被人体吸收利用的葡萄糖。由图 5 可见，随着红米多酚浓度增加，对 α-葡萄糖苷酶活性的抑制作用增强。当红米多酚浓度为 20 mg/mL 时，其对 α-葡萄糖苷酶的抑制率达 81.3%。在浓度 10 mg/mL 以上，抑制作用上升比较缓慢。由图 5 进行多元非线性拟合，得回归方程： $Y=12.36X^3+17.91X^2-1.64X+0.05$ ， $R^2=0.99$ ，由此方程可以求出红米多酚对 α-葡萄糖苷酶的半抑制浓度为 2.81 mg/mL。

### 2.2.3 红米多酚对双糖酶活性影响

在消化过程中，碳水化合物水解后生成的单糖可以自由通过肠壁上皮细胞而被吸收利用，但淀粉的其他水解产物如麦芽糖、麦芽三糖和极限糊精则无法直接被肠壁吸收，必须由肠粘膜双糖酶水解成单糖后吸收利用。图 6 为不同浓度红米多酚对麦芽糖酶、蔗糖酶活性抑制率曲线，由图可知，红米多酚对麦芽糖酶、蔗糖酶活性的抑制率均随红米多酚浓度增加而增大。当红米多酚浓度为 40 mg/mL 时，其对麦芽糖酶的抑制率达 98.67%，对蔗糖酶的抑制率达 96.04%。在浓

度 5 mg/mL 以上, 红米多酚对麦芽糖酶及蔗糖酶活性抑制作用上升比较缓慢。由图 6 进行多元非线性拟合, 得麦芽糖酶抑制率回归方程:  $Y = -4.09X^3 + 12.84X^2 - 0.53X + 0.007$ ,  $R^2 = 0.99$ , 由此方程可以求出红米多酚对麦芽糖酶的半抑制浓度为 5.48 mg/mL; 蔗糖酶抑制率回归方程:  $Y = 0.49X^3 + 9.99X^2 - 0.34X + 0.003$ ,  $R^2 = 0.99$ , 由此方程可以求出红米多酚对蔗糖的半抑制浓度为 6.55 mg/mL。

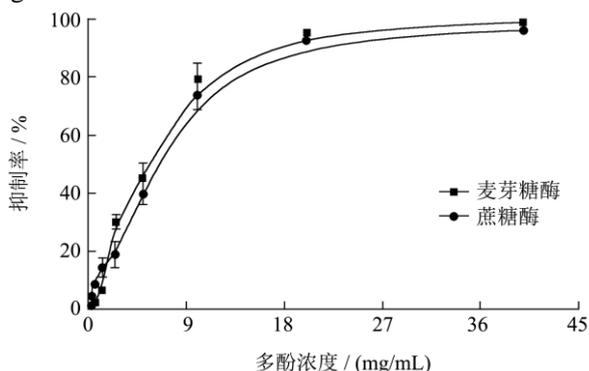


图 6 不同浓度红米多酚对麦芽糖酶、蔗糖酶活性的影响

Fig.6 Effects of red rice polyphenols with different concentrations on maltase and sucrase activities

由图 4、5、6 可知, 红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、麦芽糖酶活性均有抑制作用, 其抑制作用均存在剂量-效应关系, 红米多酚浓度越高, 抑制作用越强。这是因为多酚中含有的大量活性酚羟基可以通过疏水键及多位点氢键与酶产生非特异性结合而形成复合物, 使酶内部疏水腔结构有所瓦解, 肽链伸展程度增加, 酶分子构象发生改变, 从而产生降低酶活性作用<sup>[12-15]</sup>。

### 2.3 红米多酚对小肠葡萄糖吸收的影响

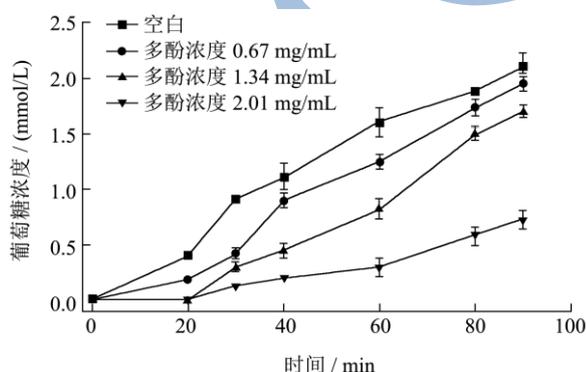


图 7 不同浓度红米多酚对小肠葡萄糖吸收的影响

Fig.7 Effects of red rice polyphenols with different concentrations on intestinal adsorption of glucose

图 7 代表不同红米多酚对小肠葡萄糖吸收的影响。由图 7 可见, 肠囊内葡萄糖累积吸收量随时间呈增加趋势, 在各时间段, 葡萄糖累积吸收量随红米多

酚浓度增加而降低, 并且可以发现红米多酚浓度越高, 葡萄糖的平均吸收率越低。随着红米多酚浓度的增加, 小肠对葡萄糖吸收量降低, 浓度为 2.01 mg/mL 红米多酚在 100 min 时对葡萄糖吸收的抑制率达 72.32%。

单糖的吸收是碳水化合物同化利用的最后步骤, 小肠中大部分被吸收的葡萄糖通过肠上皮细胞  $Na^+$ -葡萄糖共转运进被吸收利用。小肠上分别着不同的  $Na^+$ -葡萄糖共转运载体亚型。小肠内葡萄糖转运过程中, 位于小肠刷状缘的 SGLT-1 载体分别与葡萄糖及  $Na^+$  耦连, 形成复合物后顺  $Na^+$  浓度梯度方向进入细胞, 期间  $Na^+$  浓度受钠钾 ATP 酶控制, 以维持细胞内外  $Na^+$  浓度平衡。位于肠基底膜的协助扩散转运载体 GLUT-2, 随肠粘膜细胞内葡萄糖聚集, 延葡萄糖浓度梯度协助葡萄糖转运, 使葡萄糖进入组织间隙液, 完成葡萄糖在小肠内的吸收<sup>[16-18]</sup>。推测红米多酚抑制小肠葡萄糖吸收是因为红米多酚抑制了钠钾 ATP 酶活性, 降低了肠内  $Na^+$  浓度梯度, 最终抑制依赖  $Na^+$  的葡萄糖吸收摄取<sup>[19]</sup>。

### 3 结论

本文研究了红米多酚对碳水化合物消化过程中重要消化酶活性的影响, 并研究了红米多酚对碳水化合物消化后产生葡萄糖的肠内吸收的影响, 期望为红米多酚对碳水化合物消化吸收的影响情况提供一些数据。红米多酚的主要成分为原花青素, 红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、麦芽糖酶、蔗糖酶活性均有抑制作用, 其抑制作用均存在剂量-效应关系, 红米多酚浓度越高, 抑制作用越强。红米多酚对  $\alpha$ -淀粉酶、 $\alpha$ -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、乳糖酶活性抑制的  $IC_{50}$  分别为 3.61  $\mu$ g/mL、2.81 mg/mL、5.48 mg/mL、6.55 mg/mL。红米多酚对消化酶的抑制作用是因为多酚中大量活性酚羟基通过疏水键及氢键与酶结合, 改变酶分子构象, 降低酶活性, 从而影响碳水化合物消化。红米多酚对葡萄糖吸收同样存在抑制作用, 多酚浓度越高, 抑制吸收作用越强。浓度为 2.01 mg/mL 红米多酚对葡萄糖吸收的抑制率达 72.32%。红米多酚对碳水化合物消化及吸收的抑制作用可以减缓体内葡萄糖的生成与利用速度, 从而减缓人体血糖升高的速度, 对糖尿病起到一定的预防及控制作用。红米多酚影响碳水化合物消化吸收机理仍需进一步研究。

### 参考文献

[1] 魏振承,唐小俊,张名位,等.红米营养饮料加工工艺研究[J].食品工业科技,2013,9:210-213  
WEI Zhen-cheng,TANG Xiao-jun,ZHANG Ming-wei, et al.

- optimization of processing technology for red rice beverage [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 9: 210-213
- [2] 孙明茂,韩龙植,李圭星,等.水稻花色苷含量的遗传研究进展[J].*植物遗传资源学报*,2006,2:239-245  
SUN Ming-mao, HAN Long-zhi, LEE Kyu-seong, et al. Advances in genetic research of grain anthocyanins content in rice [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2006, 2: 239-245
- [3] 王丽华,叶小英,李杰勤,等.黑米、红米的营养保健功效及其色素遗传机制的研究进展[J].*种子*,2006,5: 50-54  
WAN Li-hua, YE Xiao-ying, LI Jie-qin et al. Advances in nutritional health benefits of black rice and red rice and their genetic mechanisms [J]. *Seeds*, 2006, 5: 50-54
- [4] Ming-Hsuan Chen, Suk Hyun Choi, Nobuyuke Kozukue, et al. Growth-inhibitory effects of pigmented rice bran extracts and three red bran fractions against human cancer cells: relationships with composition and antioxidative activities [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 36: 9151-9161
- [5] Kapil Sharma. Biotransformation of tea catechins into theaflavins with immobilized polyphenol oxidase [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2009, 56: 253-258
- [6] Alén-Ruiz, M S Garc á-Falc ón. Influence of major polyphenols on antioxidant activity in men c á and brancellaored wines [J]. *Food Chemistry*, 2009, 113: 53-60
- [7] 王修杰,袁淑兰,魏于全.植物多酚的防癌抗癌作用[J].*天然产物研究与开发*,2005,4: 508-517  
WANG Xiu-jie, YUAN Shu-lan, WEI Yu-quan. Cancer preventive effect and anticancer activity of plant polyphenols [J]. *Natural Product Research and Development*, 2005, 4: 508-517
- [8] Gordon J McDougall, Faina Shpiro, Patricia Dobson, et al. Different polyphenolic components of soft fruits inhibit  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 7: 2760-2766
- [9] 陈起萱,凌文华,马静,等.黑米和红米对兔主动脉脂质斑块面积和血脂的影响[J].*卫生研究*,2000(1-6):170-172  
CHEN Qi-xuan, LING Wen-hua, MA Jing, et al. Effects of black and red rice on the formation of aortic plaques and blood lipids in rabbits [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2000(1-6): 170-172
- [10] 高畅,程大海,高欣,等.蓝莓果渣提取物总酚含量及抗氧化活性研究[J].*植物研究*,2010,2:253-256  
GAO Gang, CHEN Da-hai, GAO Xin, et al. Total phenolic content and antioxidant activities of blue berry pomace extracts [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2010, 2: 253-256
- [11] 马瑞. 松针原花青素的提取纯化及成分和功能研究[D].金华:浙江师范大学,2010  
MA Rui. Studies on Extraction, Purification, Ingredient and functionality of procyanidins from pine needles [D]. Jinhua, Zhejiang Normal University, 2010
- [12] 张力平,孙长霞,李俊清,等.植物多酚的研究现状及发展前景[J].*林业科学*,2005,6:157-162  
ZHANG Li-ping, SUN Chang-xia, LI Jun-qing. The present conditions and development trend of plant polyphenols research [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 6: 157-162
- [13] Haslam E. Polyphenol-protein interactions [J]. *Journal of Biochemistry*, 1974, 139: 285-288
- [14] Qiang He, Yuanping, Lv, Kai Yao. Effects of tea polyphenols on the activities of  $\alpha$ -amylase, pepsin, trypsin and lipase [J]. *Food Chemistry*, 2006, 101: 1178-1182
- [15] 林锋,姚江武,陶涛.红茶和绿茶多酚与猪胰腺  $\alpha$ -淀粉酶的荧光猝灭反应[J].*口腔医学研究*,2009,25(2): 156-160  
LIN Feng, YAO Jiang-wu, TAO Tao. Interaction of black tea and green tea polyphenols with porcine pancreatic- $\alpha$ -amylase by fluorescence quenching [J]. *Journal of Oral Science Research*, 2009, 25(2): 156-160
- [16] Rodriguez SM, Guimaraes KC, Matthews JC, et al. Influence of abomasal carbohydrates on small intestinal sodium-dependent glucose cotransporter activity and abundance in steers [J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 10: 3015-3023
- [17] Wright EM. Renal Na(+)-glucose cotransporters [J]. *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.*, 2001, 280: 10-18
- [18] Reuss L. One-hundred years of inquiry: the mechanism of glucose absorption in the intestine [J]. *Annu. Rev. Physiol.*, 2000, 62: 939-946
- [19] Silverstein LJ, Swanson BG, Moffett D. Procyanidin from black beans (*Phaseolus vulgaris*) inhibits nutrient and electrolyte absorption in isolated rat ileum and induces secretion of chloride ion [J]. *Journal of Nutrition*, 1996, 6: 1688-1695