

张修威,袁婷婷,牛猛,等.小麦麦麸阿拉伯木聚糖的体外降脂作用研究[J].华中农业大学学报,2021,40(5):179-186.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.022

# 小麦麦麸阿拉伯木聚糖的体外降脂作用研究

张修威,袁婷婷,牛猛,张宾佳,贾才华,许燕,赵思明

华中农业大学食品科学技术学院,武汉 430070

**摘要** 采用碱提法从小麦麦麸中提取水不溶性阿拉伯木聚糖(water-unextractable arabinoxylan, WUAX)和水溶性阿拉伯木聚糖(water-extractable arabinoxylan, WEAX),探究 WUAX 和 WEAX 的胆酸盐结合力和胰脂肪酶抑制活性,以揭示不同结构类型小麦麦麸阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX)的体外降脂作用。结果显示,WEAX 对胆酸盐的结合率低于 15%,WUAX 对胆酸盐的结合力高于 WEAX。WUAX 对牛磺胆酸钠和甘氨酸钠盐的结合率分别达到 52.87% 和 38.30%;使用 Freundlich 方程对等温吸附曲线进行拟合,WUAX 对牛磺胆酸钠和甘氨酸钠盐的  $1/n$  分别为 0.51 和 1.30,表明相较于甘氨酸钠盐,WUAX 对牛磺胆酸钠的结合更加紧密。与胆酸盐结合力相反,WEAX 对胰脂肪酶的抑制率显著高于 WUAX,WEAX 对胰脂肪酶的抑制率随其质量浓度的增加而增加,在质量浓度为 30 mg/mL 时,最高抑制率为 35.93%。另外,反应速率曲线和 Lineweaver-Burk 曲线结果表明 WEAX 对胰脂肪酶的抑制是可逆性抑制,抑制类型是混合型抑制。WUAX 和 WEAX 的体外降脂作用存在差异,这与二者不同的结构特性相关。

**关键词** 麦麸;阿拉伯木聚糖;体外降脂;胆酸盐;胰脂肪酶;抑制类型

**中图分类号** TS 210.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0179-08

随着人们生活水平的不断提高和日常摄入高脂饮食比例的增加,肥胖人群所占的比例逐渐增大,与其相关疾病的发病率也在随之升高<sup>[1]</sup>。肥胖被普遍认为是心血管疾病、高血脂等病症的主要诱发因素<sup>[2]</sup>。脂肪摄入与吸收量和脂肪酶活性是影响脂质代谢的重要因素。前期研究表明<sup>[3]</sup>,减少脂肪吸收量与抑制脂肪酶活性是干预和预防肥胖的重要途径。食物组分通过结合体内胆酸盐能够促进血液中胆固醇的代谢,从而起到控制血脂水平的作用;抑制脂肪酶的活性可以减少食物中甘油三酯的水解从而降低胆固醇的产生,达到控制血脂的目的。

阿拉伯木聚糖(arabinoxylan, AX)是一种广泛存在于谷物中的多糖,是谷物细胞壁的重要组成部分。小麦是我国的主要农作物之一,每年小麦加工所产生的副产品中麦麸占了绝大部分<sup>[4]</sup>。麦麸中 AX 的含量可达 25% 左右<sup>[5]</sup>。根据 AX 溶解性的不同可分为水溶性 AX(water-extractable arabinoxylan, WEAX)和水不溶性 AX(water-unextractable

arabinoxylan, WUAX)。在小麦中,WEAX 占 AX 总量的 25%~30%,具有高黏性。剩余的 AX 为 WUAX,具有较高的持水能力<sup>[6]</sup>。AX 作为一种重要的膳食纤维,具有调节肠道菌群、控制血糖水平、降血脂<sup>[7]</sup>、调节代谢、抗氧化活性<sup>[8]</sup>等生理功能。

已有研究<sup>[9-12]</sup>表明,麦麸 AX 具有调节血脂代谢的作用,补充 AX 可以改善餐后血脂水平和降低体内总胆固醇水平、抵消高脂饮食引起的肠道环境紊乱、预防肥胖症状和减轻体质量。目前关于 AX 调节血脂代谢的机制尚不明确,对不同类型的 AX 如 WUAX 和 WEAX 降脂活性的研究鲜见报道。本研究以小麦麦麸 WUAX 和 WEAX 为研究对象,探究 2 种 AX 的胆酸盐结合力和胰脂肪酶抑制活性,阐释 AX 结构对其降脂作用的影响,为植物多糖调节血脂代谢机制的研究提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

全麦粉,购于河南省大程粮油集团股份有限公

收稿日期:2021-05-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1604001)

张修威, E-mail:1071199080@qq.com

通信作者:牛猛, E-mail:nmjay@mail.hzau.edu.cn

司;牛磺胆酸钠(sodium taurocholate hydrate,STC)、甘氨酸胆酸钠盐(sodium glycocholate hydrate,SGC)、胰脂肪酶(猪)(9001-62-1,30 000 U/g)、碱性蛋白酶(9014-01-1,200 U/mg)和高温 $\alpha$ -淀粉酶(9001-19-8,20 000 U/mL)均购于上海源叶生物科技有限公司;淀粉葡萄糖苷酶(9032-08-0,70 U/mg)购于阿拉丁生化科技股份有限公司;地衣聚糖酶(N/A,5 000 U/mL)购于爱尔兰 Megazyme 公司。以上试剂为分析纯。

## 1.2 仪器与设备

HH-4 恒温水浴锅,RE-52AA 旋转蒸发器,DF-101S 恒温加热磁力搅拌器,BSA124S 分析天平,SF-TDL-5A 离心机,FD-1-50 冷冻干燥机,722N 可见分光光度计,Thermo Multiskan Go 全自动酶标仪。

## 1.3 WEAX 和 WUAX 的提取

1)粗 AX 提取。将全麦粉过筛(孔径 0.15 mm)得到麦麸,将麦麸在 4 °C 下用蒸馏水浸泡 1 h,随后将湿润的麦麸用蒸馏水洗涤多次,进一步去除残留的小麦粉。将洗涤后的湿麦麸置于 50 °C 烘箱 12 h,称取烘干的麦麸 150 g 与 2.25 L 0.15 mol/L NaOH 溶液(包括 0.5%  $H_2O_2$ )在 80 °C 下反应 90 min 后离心(4 000 r/min,30 min),将上清液调整至 pH 值为 4.5 后同样条件再次离心。蒸发浓缩上清液至原体积的 1/4 左右后使用乙醇沉淀(乙醇最终体积分数为 65%),离心(4 000 r/min,30 min)后得到上清液。

2)WUAX 提取。在上清液中加入碱性蛋白酶

以去除蛋白,40 °C 水浴 40 min,然后煮沸灭酶,使用透析袋(孔径 0.1 nm)将上清液用去离子水透析 72 h,冷冻干燥得到 WUAX。

3)WEAX 提取。在上清液加入 Sevrage 试剂(氯仿:正丁醇=4:1,V/V)至所占比例为 20%,剧烈振荡 1 h,离心收集水层,重复 5~6 次。然后将水层冷冻干燥得到粗多糖,将其溶于去离子水,加入高温 $\alpha$ -淀粉酶,95 °C 水浴反应 2 h,煮沸 15 min 灭活后冷却至室温,再加入淀粉葡萄糖苷酶,在 55 °C 下反应 4 h,煮沸 30 min,使酶失活后,离心(4 000 r/min,15 min),使用透析袋(孔径 0.1 nm)将上清液用去离子水透析 36 h,冷冻干燥得到一次酶解多糖。将一次酶解多糖配制成 1 L 质量分数 0.5% 的溶液,加入地衣聚糖酶,40 °C 水浴反应 1 h;煮沸 10 min 灭酶后,离心(4 000 r/min,30 min),上清液经过透析袋(孔径 0.1 nm)透析 36 h,冷冻干燥最终得到 WEAX<sup>[13]</sup>。

## 1.4 胆酸盐结合力测定

1)胆酸盐标准曲线。参考周小理等<sup>[14]</sup>的研究方法并稍做改动,分别移取 0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mL 的 1 mmol/L STC 和 SGC 标准溶液置于 10 mL 的具塞试管中,在 620 nm 波长处测定胆酸盐溶液吸光值,绘制标准曲线。

由图 1 可知,STC 的标准曲线是  $y=0.73949x+0.00123$ ,相关系数  $R^2=0.999\ 66$ ,SGC 的标准曲线是  $y=0.70016x+0.03825$ ,相关系数  $R^2=0.997\ 84$ ,二者均具有良好线性关系。

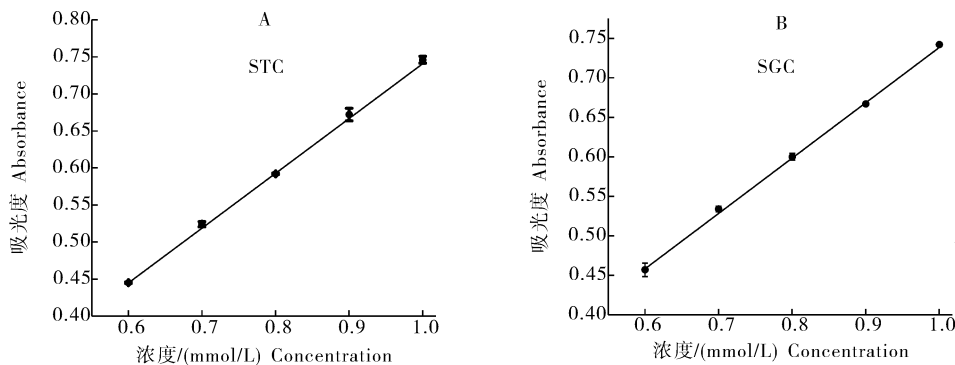


图 1 胆酸盐标准曲线

Fig.1 The standard curve of cholate

2)WUAX 和 WEAX 胆酸盐结合率的测定。分别称取 250、375、500、625、750 mg WEAX 和 WUAX 置于 50 mL 的具塞试管中,加入 5 mL 的蒸

馏水,放入 37 °C 的摇床中,振荡 1 h 充分混匀,加入 10 mL 的 1 mmol/L 的 STC 和 SGC 溶液,振荡混匀,37 °C 下水浴 1 h,离心(4 000 r/min,30 min),收

集上清液。利用标准曲线计算未吸附胆酸盐的含量,从而得到胆酸盐结合率。

3)反应时间对胆酸盐结合量的影响。反应时间分别设置为20、30、40、60、90和120 min,称取500 mg的AX,按照本文“1.4 2)”的步骤测定未吸附胆酸盐的含量,根据胆酸盐结合率的高低,得出最佳反应时间。

4)AX添加量对胆酸盐结合量的影响。分别称取250、375、500、625、750 mg的AX,依照本文“1.4 3)”得出的最佳反应时间,再按照本文“1.4 2)”的步骤测定未吸附胆酸盐的量,根据胆酸盐结合量的大小,得出最适AX添加量。

5)胆酸盐的等温吸附曲线。根据之前试验结果分别得出最佳反应时间和最适AX添加量,分别加入浓度为0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 mmol/L的胆酸盐溶液,按照本文“1.4 2)”的步骤计算胆酸盐结合量,绘制等温吸附曲线。

对于吸附等温线用Freundlich方程进行拟合作图,公式(1)如下:

$$\ln Q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_f \quad (1)$$

式(1)中, $Q_e$ 为平衡结合量,mg/g; $C_e$ 为平衡浓度; $n$ 为特征常数; $K_f$ 为平衡吸附常数。

## 1.5 胰脂肪酶活性抑制率测定方法

根据黄琳翔等<sup>[15]</sup>的方法,配制Tris-HCl缓冲液、胰脂肪酶溶液和4-硝基苯棕榈酸酯(PNPP)溶液。向96孔板中加入胰脂肪酶和缓冲液或AX样品,37℃下反应30 min,添加PNPP,37℃下反应5 min,采用酶标仪每隔1 min测定1次吸光度,共测定20次。绘制“吸光度-时间”曲线,曲线的斜率即抑制胰脂肪酶的反应速率,胰脂肪酶抑制率计算公式如下:

$$\text{胰脂肪酶抑制率} = \left(1 - \frac{K_1}{K_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中, $K_0$ 为空白组的斜率, $K_1$ 为样品组的斜率。

1)WUAX和WEAX对胰脂肪酶抑制率测定。分别选取质量浓度为5、10、20、30、40 mg/mL的WUAX和WEAX,PNPP溶液的质量浓度为2.5 mg/mL,胰脂肪酶的质量浓度为100 mg/mL按照表1的添加量和顺序加入到96孔板,在37℃下反应30 min,每隔1 min测定1次吸光度,共测20次,每个编号每种质量浓度均做3次平行。

表1 各物质添加量

Table 1 Addition amount of each substance

组别 Group	脂肪酶/ $\mu\text{L}$ Lipase	AX/ $\mu\text{L}$	Tris-HCl/ $\mu\text{L}$	PNPP/ $\mu\text{L}$
空白组 Control group	50	0	100	100
样品组 Test group	50	100	0	100

2)AX对胰脂肪酶的抑制可逆性分析。设置胰脂肪酶的质量浓度分别为50、75、100、125、150 mg/mL,AX质量浓度设定为5、30 mg/mL,按照本文“1.5 1)”的步骤测定反应速率,绘制胰脂肪酶反应速率-胰脂肪酶质量浓度曲线及拟合方程。

3)AX对胰脂肪酶的抑制作用类型分析。PNPP的质量浓度分别设置为1.25、2.50、3.75、5.00 mg/mL,AX质量浓度设定为5、30 mg/mL。通过Lineweaver-Burk双倒数方程绘制曲线并拟合,从而得到胰脂肪酶抑制类型,公式如下:

$$\frac{1}{v} = \frac{K_m}{v_{\max}} \left(1 + \frac{[I]}{K_i}\right) \frac{1}{[S]} + \left(1 + \frac{[I]}{K_{is}}\right) \frac{1}{v_{\max}} \quad (3)$$

式(3)中, $v$ 为胰脂肪酶反应速率,A/min; $v_{\max}$ 为最大反应速率,1/min; $K_m$ 表示米氏常数; $[I]$ 为AX质量浓度,mg/mL; $[S]$ 为PNPP质量浓度,mg/mL。

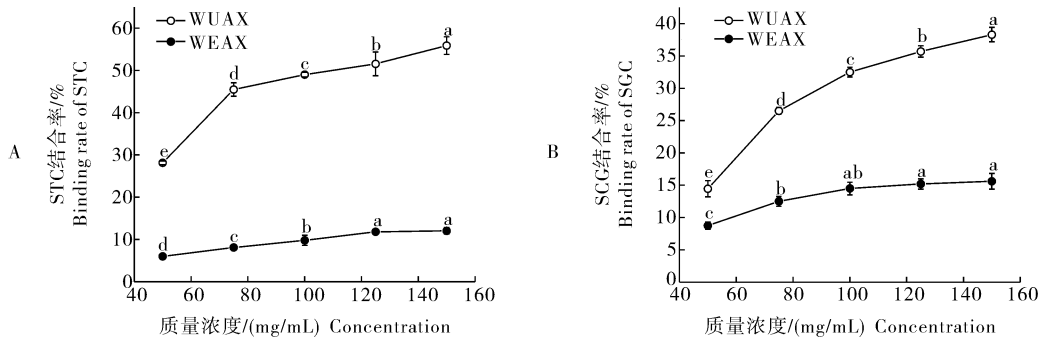
## 1.6 数据分析

所有指标的测试平行实验不少于3次,使用SPSS 22.0计算平均值和标准差,通过单因素方差分析和多重比较对数据进行显著性分析,当 $P < 0.05$ 时判定数据间具有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 AX体外胆酸盐结合力分析

1)WUAX和WEAX的胆酸盐结合率。由图2可看出,WEAX对STC和SGC的结合率低于15%。当WEAX质量浓度低于100 mg/mL时,结合率随质量浓度的增加而增大,且具有显著性差异( $P < 0.05$ );当WEAX质量浓度高于100 mg/mL时,结合率变化趋于平缓,无显著性差异( $P > 0.05$ )。WUAX对STC和SGC的结合率显著高于WEAX,结合率随着WUAX质量浓度增加而增大,具有显著性差异( $P < 0.05$ ),当WUAX质量浓度为150 mg/mL时,对STC和SGC的结合率分别达到52.87%和38.30%。



同一曲线中不同字母表示具有显著性差异,  $P < 0.05, n = 3$ , 下同。Different letters in the same curve indicate significant differences,  $P < 0.05, n = 3$ , the same as below.

图 2 WUAX 和 WEAX 对胆酸盐 STC(A) 和 SCG(B) 的结合率

Fig.2 Binding rates of different proportions of WUAX and WEAX to cholate STC(A) and SCG(B)

2) WUAX 对胆酸盐的吸附动力学分析。由图 3 所示, 在 0~40 min 内 WUAX 对 STC 的结合率随反应时间延长而增加, 具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 在 40 min 后结合率变化趋势无显著性变化 ( $P > 0.05$ )。在 0~90 min 内, WUAX 对 SGC 的结合率随反应时间的延长而增加, 具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 在 90 min 后, 结合率变化趋于平缓。在 40 min 时, WUAX 对 STC 的结合率为 49.50%。在 90 min 时, WUAX 对 SGC 的结合率为 32.33%。

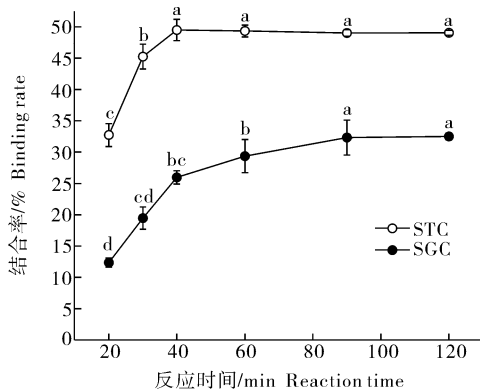


图 3 WUAX 对胆酸盐的吸附动力学曲线

Fig.3 Adsorption kinetics of WUAX to cholate

3) WUAX 添加量对胆酸盐结合量的影响。分别选取 40 min 和 90 min 为 WUAX 对 STC 和 SGC 的结合时间, 进行胆酸盐结合量测定。由图 4 可知, 当 WUAX 添加量低于 375 mg 时, 对胆酸盐的结合量随其添加量的增加而增加, 当 WUAX 添加量高于 375 mg 时, 胆酸盐的结合量呈现下降的趋势。当 WUAX 添加量为 375 mg 时, 对 STC 和 SGC 的结合量最大, 分别为 6.12、3.45 mg/g。

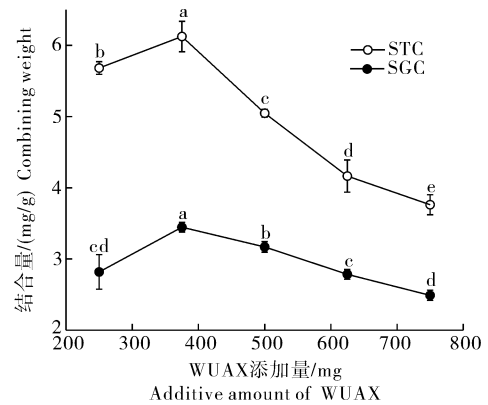


图 4 WUAX 添加量对胆酸盐结合量的影响  
Fig.4 Effect of WUAX supplemental level on cholate binding amount

4) WUAX 对胆酸盐的等温吸附曲线及拟合方程分析。选取 WUAX 添加量为 375 mg 进行胆酸盐等温吸附曲线测定。由图 5 可知, 随着胆酸盐浓度的升高, WUAX 对胆酸盐的结合量逐渐增加, 结合速率呈先增加后减缓的趋势。WUAX 对 STC 的结合量高于 SGC。

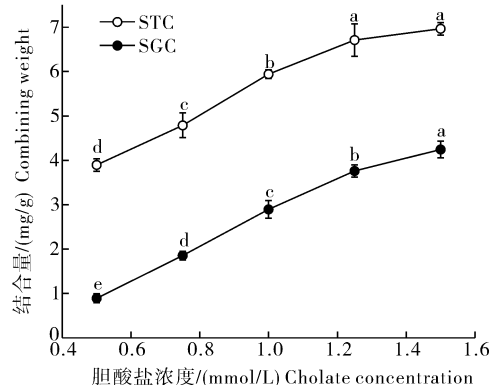


图 5 WUAX 对胆酸盐等温吸附曲线

Fig.5 Isothermal adsorption curve of WUAX for cholate

如图 6 所示, WUAX 结合 STC 的拟合方程为  $\ln Q_e = 0.51 \ln C_e + 1.7567$ , 结合 SGC 的拟合方程为  $\ln Q_e = 1.31 \ln C_e + 0.9883$ 。

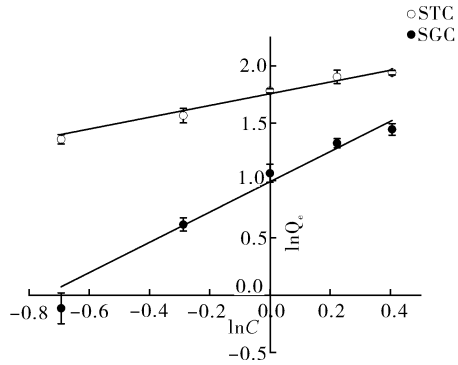


图 6 WUAX 对胆酸盐的等温吸附拟合曲线  
Fig.6 Isothermal adsorption fitting curve of WUAX for cholate

### 2.2 AX 体外抑制胰脂肪酶活性评价

1) WEAX 和 WUAX 对胰脂肪酶活性的抑制。

由图 7 可知, 当 WUAX 质量浓度大于 5 mg/mL 时, 对胰脂肪酶的抑制率变化趋于平缓, 无显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 当 WUAX 质量浓度为 30 mg/mL 时, 抑制率为 18.30%。WEAX 对胰脂肪酶的抑制率随着质量浓度增加而增加, 具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 当 WEAX 质量浓度为 30 mg/mL 时, 对胰脂肪酶抑制率为 35.66%。WEAX 对胰脂肪酶的抑制能力高于 WUAX。

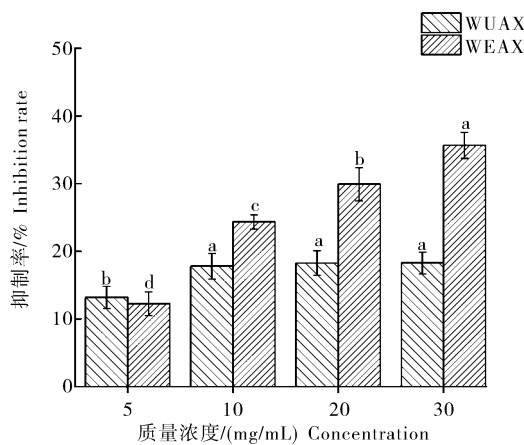


图 7 WUAX 和 WEAX 对胰脂肪酶的抑制率  
Fig.7 Pancreatic lipase inhibition rates of WUAX and WEAX

如图 8 所示, 当 WEAX 质量浓度低于 30 mg/mL 时, 随着质量浓度的增加, 其对胰脂肪酶的

抑制率也随之增加。当 WEAX 的质量浓度高于 30 mg/mL 时, 其对胰脂肪酶的抑制率变化趋于平缓。当 WEAX 质量浓度为 30 mg/mL 时, 对胰脂肪酶的抑制率达 35.93%。

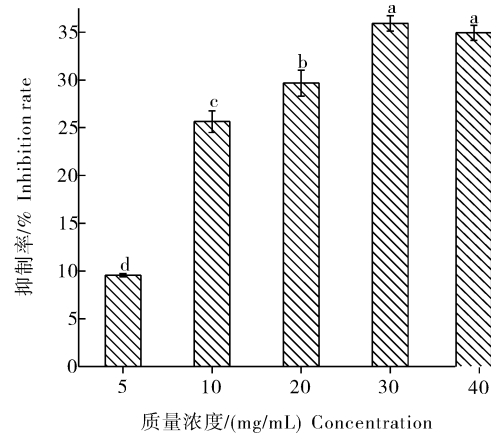


图 8 WEAX 质量浓度对胰脂肪酶的抑制率  
Fig.8 Inhibition rate of pancreatic lipase by WEAX concentration

2) WEAX 对胰脂肪酶抑制可逆性分析。

由图 9 可知, WEAX 质量浓度在 5 mg/mL 和 30 mg/mL 时, 拟合曲线交于原点, 故 WEAX 对胰脂肪酶的抑制是可逆性抑制, 随着 WEAX 质量浓度的增加, 其斜率降低, 并且反应速率曲线都通过坐标原点。

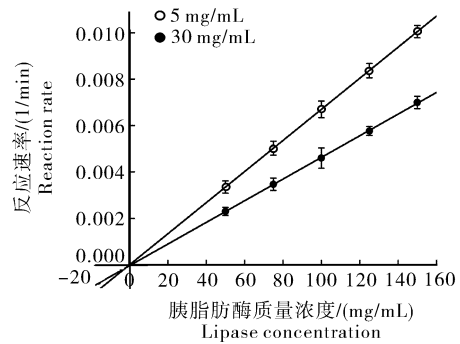


图 9 WEAX 对胰脂肪酶抑制的可逆性  
Fig.9 Reversibility of pancreatic lipase induced by WEAX

3) WEAX 对胰脂肪酶的抑制类型分析。

由图 10 可知, 随着 WEAX 的质量浓度从 5 mg/mL 增加至 30 mg/mL, 拟合曲线的斜率增大, 即  $1/v$  增大,  $v_{max}$  减小, 在横坐标的截距也随之增大, 即  $K_m$  增大。拟合后 2 条拟合曲线交于第二象限, 说明 WEAX 对胰脂肪酶的抑制类型是混合型抑制。

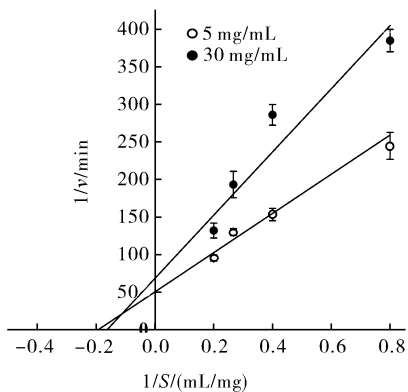


图 10 WEAX 对胰脂肪酶的 Lineweaver-Burk 方程拟合曲线

Fig.10 Lineweaver-Burk equation fitting curve of pancreatic lipase by WEAX

### 3 讨论

本研究以小麦麦麸 WUAX 和 WEAX 为对象,研究了 2 种具有不同结构特性的 AX 对胆酸盐的结合力和胰脂肪酶抑制活性。结合胆酸盐实验结果表明,WUAX 结合胆酸盐的能力强于 WEAX。Lin 等<sup>[16]</sup>研究发现胆酸盐结合力会随着其中不溶性纤维含量的增多而升高,这可能是 WUAX 对 STC 和 SGC 的结合力高于 WEAX 的原因。WUAX 对 STC 结合率和结合量大于 SGC,与段振等<sup>[17]</sup>研究结果相同。相较于 SGC 侧链上的甘氨酸羧基,STC 侧链基团的磺酸基的极性更强,更容易暴露结合位点,在不聚集的状态下更易被多糖结合<sup>[18-19]</sup>。WUAX 对胆酸盐的结合量随其添加量的增加而增加,当添加量为 375 mg 时,胆酸盐结合量最大。刘荣等<sup>[20]</sup>研究表明水溶性黑木耳多糖对胆酸盐的结合量会随着多糖添加量的增加而达到峰值,与本试验结果相似。此时溶液中的 WUAX 达到饱和,当添加量继续增大时会因为 WUAX 的黏度增大而使得其结合量下降<sup>[21]</sup>。WUAX 对 STC 的结合量高于 SGC,这与纪秀凤等<sup>[22]</sup>对于红树莓籽花青素结合胆酸盐的实验结果相似。WUAX 的等温吸附曲线拟合方程的相关系数  $R^2$  分别是 0.971 2 和 0.972 4,说明拟合方程具有线性关系,符合 Freundlich 方程。在 Freundlich 方程中, $1/n$  代表浓度或添加量对结合量影响的强弱, $1/n$  越小,结合性能越好。当  $0.1 < 1/n \leq 0.5$  时,代表容易结合;当  $0.5 < 1/n \leq 1$  时,表明不易结合;当  $1/n > 1$  时,表明结合困难。WUAX 对 STC 和 SGC 拟合方程的  $1/n$  分别为

0.51 和 1.31,说明相对于 SGC,WUAX 较易与 STC 结合<sup>[23]</sup>。

胰脂肪酶抑制活性实验结果表明:WEAX 对胰脂肪酶的抑制能力高于 WUAX,这可能因为 WEAX 所形成的高黏性溶液能更有效降低胰脂肪酶的活性<sup>[6]</sup>。WEAX 对胰脂肪酶的抑制率随着质量浓度增加先升高后趋于平缓,黄琳翔等<sup>[15]</sup>和周巧杰等<sup>[24]</sup>试验结果中胰脂肪酶抑制率变化与本研究一致,原因可能是 WEAX 与胰脂肪酶的结合达到饱和状态使得抑制率趋于平缓。根据酶和抑制剂的结合特性,可分为可逆性抑制和不可逆性抑制,酶反应速率曲线经过原点的为可逆性抑制,不经过原点的是不可逆性抑制<sup>[25]</sup>。WEAX 对胰脂肪酶是可逆性抑制,与酶结合是通过非共价键的形式,从而影响酶的活性<sup>[26]</sup>。酶的反应速率曲线变化趋势及交点与于洋君等<sup>[27]</sup>和张静等<sup>[28]</sup>研究可逆性抑制结果一致。Lineweaver-Burk 方程拟合曲线结果表明 WEAX 对胰脂肪酶的抑制类型是混合型抑制。Liu 等<sup>[26]</sup>研究了红米多酚对胰脂肪酶活性的抑制,结果表明抑制类型为混合型抑制,与本研究得出的抑制类型相符合。混合型抑制即 WEAX 作为酶抑制剂,既可以与游离的酶反应,又可以与酶和底物的复合物反应,从而抑制胰脂肪酶的活性<sup>[29]</sup>。

综上所述,WUAX 对胆酸盐的结合力显著高于 WEAX,而 WEAX 对胰脂肪酶抑制活性高于 WUAX。这些体外降脂作用的差异与 2 种 AX 的结构特性不同有关。基于此,笔者所在课题组后续将进一步对 AX 结构与降脂作用的关系进行研究,为 AX 降脂机制的探究提供参考。

### 参考文献 References

- [1] 姚铁俊,姚惠源.全谷物食品及其健康因子的现代营养学研究现状与展望[J].粮食与食品工业,2015,22(2):3-8.YAO Y J, YAO H Y.Current status and prospect of modern nutriology research on whole-grain food and its health factors[J].Cereal & food industry,2015,22(2):3-8(in Chinese with English abstract).
- [2] YU Y L,SUN X M,GAO F.Inhibitory effect of polyphenols extracts from peanut shells on the activity of pancreatic lipase *in vitro* [J].Asian journal of chemistry,2014,26(11):3401-3403.
- [3] BIALECKA-FLORJANCZYK E,FABISZEWSKA A U,KRZYCZ-KOWSKA J,et al.Synthetic and natural lipase inhibitors[J].Mini reviews in medicinal chemistry,2018,18(8):672-683.

- [4] 黄雯莉,赵航,树林一,等.阿拉伯木聚糖治疗肥胖的研究进展[J].中国食物与营养,2019,25(5):52-56. HUANG W L, ZHAO H, SHU L Y, et al. Advancement research on arabinoxylan for treatment of obesity[J]. Food and nutrition in China, 2019, 25(5): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- [5] 苏东民,李雪,苏东海,等.小麦阿拉伯木聚糖及其功能性质研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2012,33(4):85-90. SU D M, LI X, SU D H, et al. Research progress on wheat arabinoxylans and its functional properties[J]. Journal of Henan University of Technology (natural science edition), 2012, 33(4): 85-90 (in Chinese with English abstract).
- [5] FREDERIX S A, Van HOEYMISSEN K E, COURTIN C M, et al. Water-extractable and water-unextractable arabinoxylans affect gluten agglomeration behavior during wheat flour gluten-starch separation[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2004, 52(26): 7950-7956.
- [7] MENDIS M, SIMSEK S. Arabinoxylans and human health[J]. Food hydrocolloids, 2014, 42: 239-243.
- [8] SARMA S M, SINGH D P, SINGH P, et al. Finger millet arabinoxylan protects mice from high-fat diet induced lipid derangements, inflammation, endotoxemia and gut bacterial dysbiosis[J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 106: 994-1003.
- [9] TONG L T, ZHONG K, LIU L Y, et al. Effects of dietary wheat bran arabinoxylans on cholesterol metabolism of hypercholesterolemic hamsters[J]. Carbohydrate polymers, 2014, 112: 1-5.
- [10] NEYRINCK A M, POSSEMIERS S, DRUART C, et al. Prebiotic effects of wheat arabinoxylan related to the increase in bifidobacteria, *Roseburia* and *Bacteroides/Prevotella* in diet-induced obese mice [J/OL]. PLoS One, 2011, 6(6): e20944 [2021-05-12]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030944>.
- [11] SARMA S M, SINGH D P, SINGH P, et al. Finger millet arabinoxylan protects mice from high-fat diet induced lipid derangements, inflammation, endotoxemia and gut bacterial dysbiosis[J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 106: 994-1003.
- [12] SCHIOLDAN A G, GREGERSEN S, HALD S, et al. Effects of a diet rich in arabinoxylan and resistant starch compared with a diet rich in refined carbohydrates on postprandial metabolism and features of the metabolic syndrome[J]. European journal of nutrition, 2018, 57(2): 795-807.
- [13] WANG P, HOU C D, ZHAO X H, et al. Molecular characterization of water-extractable arabinoxylan from wheat bran and its effect on the heat-induced polymerization of gluten and steamed bread quality[J]. Food hydrocolloids, 2019, 87: 570-581.
- [14] 周小理,黄琳,周一鸣.苦荞水溶性蛋白体外吸附胆酸盐能力的研究[J].食品科学,2011,32(23):77-81. ZHOU X L, HUANG L, ZHOU Y M. *In vitro* binding of bile salts by water-soluble proteins from Tartary buckwheat grains [J]. Food science, 2011, 32(23): 77-81 (in Chinese with English abstract).
- [15] 黄琳翔,施乐乐,蔡志英,等.黑木耳中抑制胰脂肪酶活性物质的提取工艺及体外抑制效果[J].菌物学报,2020,39(2):441-451. HUANG L X, SHI L L, CAI Z Y, et al. Extraction technology and inhibitory effects *in vitro* of substances inhibiting pancreatic lipase activities from fruiting body of *Auricularia heimuer* [J]. Mycosystema, 2020, 39(2): 441-451 (in Chinese with English abstract).
- [16] LIN T T, FERNÁNDEZ-FRAGUAS C. Effect of thermal and high-pressure processing on the thermo-rheological and functional properties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flours [J/OL]. LWT, 2020, 127: 109325. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109325>.
- [17] 段振.石榴皮不溶性膳食纤维的提取、体外降血脂活性研究及咀嚼片制备[D].西安:陕西师范大学,2018. DUAN Z. Extraction of insoluble dietary fiber, lipid activity of pericarpium granati and preparation of chewing tablets [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [18] ZORNJAK J, LIU J Z, ESKER A, et al. Bulk and interfacial interactions between hydroxypropyl-cellulose and bile salts: impact on the digestion of emulsified lipids [J/OL]. Food hydrocolloids, 2020, 106: 105867 [2021-05-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105867>.
- [19] 胡凯.茶叶功能性成分体外降血脂的机制研究[D].广州:华南理工大学,2011. HU K. The mechanism study of lowering plasma cholesterol by functional ingredients of tea *in vitro* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011 (in Chinese with English abstract).
- [20] 刘荣,王蕾,栾淑莹,等.水溶性黑木耳多糖体外结合胆酸盐能力的分析[J].食品工业科技,2015,36(17):358-361. LIU R, WANG L, LUAN S Y, et al. *In vitro* binding of bile salts by water-soluble AAP [J]. Science and technology of food industry, 2015, 36(17): 358-361 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘萍,祁兴普,刘靖,等.芋头多糖提取工艺优化及其体外结合脂类和胆酸盐能力研究[J].食品与机械,2016,32(10):132-136,199. LIU P, QI X P, LIU J, et al. Optimization of polysaccharide extraction from taro and its binding capacities of lipid and bile salts *in vitro* [J]. Food & machinery, 2016, 32(10): 132-136, 199 (in Chinese with English abstract).
- [22] 纪秀凤,刘海春,吕长鑫,等.红树莓籽原花青素提取及其结合胆酸盐能力评价[J].食品研究与开发,2019,40(7):90-97. JI X F, LIU H C, LÜ C X, et al. Extraction of proanthocyanidin from red raspberry seed and evaluation of its capacities of binding bile salts [J]. Food research and development, 2019, 40(7): 90-97 (in Chinese with English abstract).
- [23] 牛黎莉,王晓璇,王星,等.大孔树脂对枸杞皮渣类胡萝卜素吸附性能的比较[J].食品工业科技,2014,35(19):119-123. NIU L L, WANG X X, WANG X, et al. Comparison of the sorption characteristics of macroporous resin to carotenoids of Chinese wolfberry skins [J]. Science and technology of food industry, 2014, 35(19): 119-123 (in Chinese with English abstract).
- [24] 周巧杰,吴子健,胡佩卿,等.苦瓜皂甙的提取及其对胰脂肪酶

- 抑制活性的研究[J].食品研究与开发,2020,41(10):69-74.
- ZHOU Q J, WU Z J, HU P Q, et al. Extraction of *Momordica* saponins and its inhibitive ability on pancreatic lipase[J]. Food research and development, 2020, 41(10): 69-74 (in Chinese with English abstract).
- [25] 耿江枫. 苦丁茶冬青胰脂肪酶抑制活性成分研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2016. GENG J F. Pancreatic lipases inhibition active constituents from *Ilex Kudingcha* C. J. Tseng[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [26] LIU M, HU B, ZHANG H, et al. Inhibition study of red rice polyphenols on pancreatic  $\alpha$ -amylase activity by kinetic analysis and molecular docking[J]. Journal of cereal science, 2017, 76: 186-192.
- [27] 于洋君, 伍菱, 何君竹, 等. 对羟基肉桂酸乙酯对胰脂肪酶的抑制作用及机制[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 94-99. YU Y J, WU L, HE J Z, et al. Inhibitory effect and mechanism of ethyl p-hydroxycinnamate on pancreatic lipase[J]. Science and technology of food industry, 2021, 42(9): 94-99 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张静, 米佳, 禄璐, 等. 黑果枸杞花色苷提取物对胰脂肪酶活性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(5): 8-14. ZHANG J, MI J, LU L, et al. Effect of anthocyanins extract from *Lycium ruthenicum* murr. fruit on pancreatic lipase activity[J]. Food science, 2020, 41(5): 8-14 (in Chinese with English abstract).
- [29] YANG M H, CHEN C M, HU Y H, et al. Inhibitory kinetics of DABT and DABPT as novel tyrosinase inhibitors[J]. Journal of bioscience and bioengineering, 2013, 115(5): 514-517.

## Effects of wheat bran arabinoxylan on lipid reduction *in vitro*

ZHANG Xiuwei, YUAN Tingting, NIU Meng, ZHANG Binjia, JIA Caihua, XU Yan, ZHAO Siming

College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** Alkaline extraction was used to extract water-unextractable arabinoxylan (WUAX) and water-extractable arabinoxylan (WEAX) from wheat bran. The bile salt binding capacity and pancreatic lipase inhibitory activity of WUAX and WEAX were investigated to reveal the effects of wheat bran arabinoxylan (AX) with different types of structure on lipid reduction *in vitro*. The results showed that the binding rate of WEAX to bile salt was less than 15%, and the binding capacity of WUAX to bile salt was stronger than that of WEAX. The binding rate of WUAX to sodium taurocholate hydrate and sodium glycocholate hydrate was 52.87% and 38.30%, respectively. The Freundlich equation was used to fit the isothermal adsorption curves, and the  $1/n$  of WUAX to sodium taurocholate hydrate and sodium glycocholate hydrate was 0.51 and 1.30, respectively, indicating that compared with sodium glycocholate, WUAX bound to sodium taurocholate more tightly. Contrary to the binding capacity of bile salt, WEAX had a significantly higher inhibition rate on pancreatic lipase than WUAX. The inhibition rate of WEAX on pancreatic lipase increased with the increase of the concentration, with the highest inhibitory rate of 35.93% when the concentration was 30 mg/mL. The results of the reaction rate curve and the Lineweaver-Burk curve showed that the inhibition of pancreatic lipase by WEAX was reversible, and the type of inhibition was mixed inhibition. In summary, there are difference in the effect of WUAX and WEAX on lipid reduction *in vitro*, which is related to the difference in the characteristics of structure. It will provide practical reference and theoretical support for further studying the mechanism of lipid metabolism regulated by AX.

**Keywords** wheat bran; arabinoxylan; lipid reduction *in vitro*; bile salt; pancreatic lipase; the type of inhibition

(责任编辑:赵琳琳)