

抗性淀粉种类对大鼠肠道代谢产物和血脂的影响

冯铄涵, 蹇宇, 张璐, 李勇, 沈祥森, 阚建全*
(西南大学食品科学学院, 重庆市农产品加工及贮藏重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 以不同种类抗性淀粉(RS2、RS3、RS4)为研究对象, 采用动物实验法, 研究其对大鼠肠道代谢产物和血脂的影响。研究表明: RS2、RS3、RS4均有控制体质量、降低肠道pH值、增加盲肠组织和盲肠内容物质量、增加盲肠内容物含水量、增加盲肠内容物中短链脂肪酸(SCFA)含量、降低盲肠内容物中氨含量以及调节血脂等方面的生理功能。其中, 在控制体质量方面, RS4体质量增加量最小; 在调节大鼠肠道代谢产物方面, RS3效果最优; 在调节血脂方面, RS3对血清甘油三酯的降低效果最显著, 平均降低水平可达30%左右, 而RS4对血清胆固醇的调节效果最优。

关键词: 抗性淀粉种类; 大鼠; 肠道代谢产物; 血脂

Effects of Different Types of Resistant Starch on Intestinal Metabolites and Serum Lipids in Rats

FENG Shuo-han, QIAN Yu, ZHANG Lu, LI Yong, SHEN Xiang-sen, KAN Jian-quan*
(Chongqing Key Laboratory of Products Processing and Storage, College of Food Science,
Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Rats were fed different types of resistant starch (RS) to study the effect of RS on intestinal metabolites and serum lipids. The results showed that RS2, RS3 and RS4 had physiological functions to reduce body weight, lower intestinal pH, increase cecum tissue weight, the weight, moisture content, short-chain fatty acid content and ammonia content of the cecal contents, and regulate blood lipid level. RS4 could result in the smallest body weight gain and showed the greatest serum cholesterol-reducing effect. RS3 had the best regulatory effect on intestinal metabolites and was the most effective in lowering serum triacylglycerol (by approximately 30% at average).

Key words: resistant starch; rats; intestinal metabolites; serum lipids

中图分类号: Q493.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)19-0289-06

根据联合国粮农组织(FAO)1992年的定义, 抗性淀粉(resistant starch, RS)指的是“不被健康人体小肠所吸收的淀粉及其降解物的总称”^[1]。根据其形态及物理化学性质可分为4种^[2]: RS1物理包埋淀粉(physically trapped starch); RS2抗性淀粉颗粒(resistant starch granules); RS3老化淀粉(retrograded starch); RS4化学改性淀粉(chemically modified starch)。RS对机体的健康作用同其在肠道内的分解及其降解产物有关, RS由于酶抗性使得它只有很少的一部分被小肠消化吸收, 大部分进入大肠内发酵产生短链脂肪酸(short-chain fatty acid, SCFA), 并产生CO₂、CH₄和H₂等气体^[3]。研究证实RS具有控制体质量、预防糖尿病、降脂、

预防结肠癌、促进无机盐吸收等方面的生理功能^[4]。不同种类的RS在肠道中有着不同的发酵模式, 因此对肠道环境和血脂产生的影响也不相同^[5]。如Andrieux等^[6]发现RS2减少丙酸的含量而RS3增加丙酸含量; Birkett等^[7]发现RS3相比RS2对粪中氨含量的降低作用更明显等。目前对RS生理功能的研究多是只研究RS2或比较RS2和RS3, 而在同时比较RS2、RS3和RS4方面缺乏数据。

本研究采用大鼠动物实验法, 以不同种类的抗性淀粉(RS2、RS3、RS4)为研究对象, 研究其对于肠道代谢产物和血脂的影响, 从而为以后进一步研究抗性淀粉的结肠发酵作用和血脂调节机制提供实验数据。

收稿日期: 2011-08-19

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC2011JJA80001)

作者简介: 冯铄涵(1987—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养学。E-mail: fengshuohan3@yahoo.com.cn

*通信作者: 阚建全(1965—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品化学与营养学、食品生物技术。E-mail: ganjq1965@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

Hylon VII (RS2, RS含量为53%)、Novelose 2480 (RS4, RS含量为80%) 美国国民淀粉公司; 成年SD大鼠32只(合格证号为: SCXK(渝)2007-005) 重庆腾鑫比尔实验动物销售有限公司。

1.1.2 试剂

乙醇、盐酸、氢氧化钠、柠檬酸、钨酸钠、硫酸、苯酚、硝普钠、次氯酸钠(分析纯) 成都市科龙化工试剂厂; 乙酸、巴豆酸(标准品, 纯度>99.7%) 英国Johnson Matthey公司; 丙酸、丁酸、异丁酸(标准品, 纯度>99%) 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司; 血清总胆固醇(TC)测定试剂盒、血清甘油三酯(TG)测定试剂盒、血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)测定试剂盒、血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)测定试剂盒 上海北海生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

PHS-3C精密pH计 上海大普仪器有限公司; JA2003电子天平 上海精天电子仪器有限公司; SYQ-DSX-280A手提式压力蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂; DHG-9240电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司; 1-15PK冷冻离心机 美国Sigma公司; WH-1微型漩涡混合器 上海沪西分析仪器有限公司; 722-P可见分光光度计 上海显科仪器有限公司; GC-2010气相色谱仪 日本岛津公司; Stabilwax-DA色谱柱 美国Restek公司; 日立7020全自动生化分析仪 日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 实验设计

32只健康成年SD大鼠, 雌雄各半, 体质量160~180g。喂养基础饲料适应1周后, 根据体质量将大鼠随机分成4组, 每组8只, 雌雄各半, 单只饲养在不锈钢笼中, 室温维持在(24±2)℃, 相对湿度控制在(50±10)%, 照明时间为昼夜各12h。实验期间4组大鼠分别饲喂不含RS的基础饲料(对照组)、含质量分数10%抗性淀粉的RS2饲料、含质量分数10%抗性淀粉的RS3饲料和含质量分数10%抗性淀粉的RS4饲料, 饲料每周配1次, 置4℃冰箱保存。实验期间大鼠自由进食及饮水, 实验期4周。

1.3.2 饲料配方

根据美国AIN-93G标准^[8]配制基础饲料, 并作为本实验的对照组饲料, 用RS2、RS3和RS4分别代替基础饲料中相应量的玉米淀粉配成不同的实验组饲料, 使每组的RS在整个饲料中所占的比例为10%。其中本实验中所选用的RS2、RS3和RS4分别为RS含量为53%的Hylon VII、

39%的老化淀粉(实验室自制)和80%的Novelose 2480。具体饲料配方见表1。

表1 实验期间大鼠饲料的组成
Table 1 Feed formulations for rats used in study

成分	对照组/g	RS2组/g	RS3组/g	RS4组/g
玉米淀粉	529.486	340.807	273.076	404.486
Hylon VII	—	188.679	—	—
老化淀粉	—	—	256.410	—
Novelose 2480	—	—	—	125.000
酪蛋白	200.000	200.000	200.000	200.000
蔗糖	100.000	100.000	100.000	100.000
大豆油	70.000	70.000	70.000	70.000
纤维	50.000	50.000	50.000	50.000
混合矿物质	35.000	35.000	35.000	35.000
混合维生素	10.000	10.000	10.000	10.000
L-胱氨酸	3.000	3.000	3.000	3.000
氯化胆碱	2.500	2.500	2.500	2.500

注: —, 在饲料中未添加该种组分。

1.3.3 RS3的制备方法^[9]

以Hylon VII为原料, 采用压热-冷却循环结合酸解法制备RS3。制备的具体步骤为: 淀粉溶液质量浓度30g/100mL、压热温度125℃、压热时间30min条件下, 经过3次反复压热-冷却循环, 然后用0.1mol/L柠檬酸酸解处理12h, 制得的RS3得率为39%。

1.3.4 相关指标的分析测定方法

实验4周后, 在空腹过夜条件下断头处死大鼠, 从颈部取血, 血液收集在装有抗凝剂的采血管中, 立即4℃、4000r/min离心15min, 血清分3份分装于2mL离心管中立即放入-70℃冷冻。摘除盲肠并称质量, 剖开刮出内容物, 一部分立即测定pH值, 剩下的置于-20℃冰箱中冷冻保存。用冰冷的生理盐水洗净盲肠内壁, 用滤纸吸干表面的水分称质量并测定其表面积。

1.3.4.1 盲肠内容物质量的测定

盲肠内容物质量/g=盲肠总质量/g-盲肠壁质量/g (1)

1.3.4.2 盲肠壁表面积的测定^[10]

盲肠壁充分展开后固定在A4纸上, 勾出其轮廓, 待纸干燥后将盲肠壁轮廓复写在厚的打印纸上, 然后将纸上的盲肠轮廓图剪下。用精度为0.0001g的电子秤准确称量轮廓图纸质量(m_1)和1cm²的打印纸质量(m_2), 然后按式(2)计算盲肠表面积(cm²)。

$$\text{盲肠表面积/cm}^2 = \frac{m_1/\text{g}}{m_2/(\text{g/cm}^2)} \quad (2)$$

1.3.4.3 饲料效率的测定^[11]

实验前测定每只大鼠的体质量, 实验期间每天记录

采食量,实验结束时测定每只大鼠体质量。计算出4周的实验期内大鼠体质量增加量和总的饲料采食量,通过式(3)计算。

$$\text{饲料效率}/(\text{g}/100\text{g}) = \frac{\text{大鼠体质量增加量}/\text{g}}{\text{饲料采食量}/\text{g}} \times 100 \quad (3)$$

1.3.4.4 pH值的测定^[12]

取0.5g新鲜盲肠内容物,10倍的蒸馏水稀释,用微型漩涡振荡器匀浆后迅速用pH计进行测定。

1.3.4.5 短链脂肪酸的测定^[13]

采用气相色谱(GC)法的内标法测定,以巴豆酸为内标物。盲肠内容物解冻后,迅速称取约0.2g(精确至0.001g)样品于离心管中,加入2mL含有5mmol/L巴豆酸的10mmol/L NaOH溶液,用微型漩涡振荡器匀浆后放入4℃静置3h后,4℃离心15min,取上清液经孔径为0.22μm的乙酸纤维膜过滤后用气相色谱仪进行分析。

分析条件为:色谱柱(30m×0.25mm, 0.5μm);柱温:95.5℃,5℃/min升至150℃,保留7min;进样温度:220℃;检测温度:230℃;进样量:1μL;无分流;柱流量:0.95mL/min;氢气流量:40.0mL/min,尾吹流量:30.0mL/min,空气流量:400.0mL/min。

1.3.4.6 盲肠内容物中氮含量的测定^[14]

盲肠内容物解冻后,迅速称取约0.500g盲肠内容物,记录质量为 m 。加入体积分数为10%的钨酸钠溶液、0.5mol/L硫酸溶液和蒸馏水,记录总体积 V ,用微型漩涡振荡器匀浆。加入显色剂1(0.5mol/L苯酚和0.001mol/L硝普钠)混匀后,再加入显色剂2(0.625mol/L氢氧化钠和0.03mol/L次氯酸钠),室温静置30min后于625nm波长处测定吸光度 A 。对照标准曲线查得氮的质量浓度 $\rho(\mu\text{g}/\text{mL})$,通过式(4)计算。

$$\text{氮含量}/(\mu\text{g}/\text{g湿质量}) = \frac{\rho \times V}{m} \quad (4)$$

1.3.4.7 血脂的测定

血脂检测指标主要有:血清总胆固醇(TC)、血清甘油三酯(TG)、血清高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、血清低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)4项。将血清样品在冰上自然解冻后,立即加入相应的测定试剂盒,按照测定试剂盒的使用说明书用全自动生化分析仪进行检测。动脉硬化指数按式(5)计算。

$$\text{动脉硬化指数(AI)} = \frac{\text{TC含量} - \text{HDL-C含量}}{\text{HDL-C含量}} \quad (5)$$

1.3.5 统计分析

采用SPSS Statistics(版本17.0)软件对结果进行统计分析,实验数据以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示;采用ANOVA分析数据间显著性, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 抗性淀粉种类对大鼠体质量增加量、饲料采食量和饲料效率的影响

表2 抗性淀粉种类对大鼠体质量增加量、饲料采食量和饲料效率的影响 $(\bar{x} \pm s, n=8)$

Table 2 Effect of resistant starch type on body weight gain, total feed intake and feed efficiency of rats $(\bar{x} \pm s, n=8)$

组别	体质量增加量/ (g/4周)	饲料采食量/ (g/4周)	饲料效率/ (g/100g)
对照组	130.99±3.19 ^A	576.86±17.96 ^A	23±0.75 ^a
雄鼠	RS2	98.04±10.17 ^B	20±1.49 ^b
	RS3	94.19±6.09 ^B	20±2.15 ^b
	RS4	90.28±9.83 ^B	19±1.22 ^b
对照组	126.72±6.62 ^a	553.67±19.56 ^A	23±0.75 ^a
雌鼠	RS2	110.49±8.28 ^{ab}	20±1.49 ^a
	RS3	101.37±12.27 ^b	21±2.66 ^a
	RS4	91.70±9.74 ^b	22±1.09 ^a

注:同列不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$);同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

从表2可以看出,体质量增加量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著低于对照组($P < 0.01$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组,且RS3、RS4组达到显著水平($P < 0.05$)。RS本身几乎不含热量,因此可以起到控制体质量的作用^[15],本研究中RS2、RS3、RS4组均小于对照组的体质量增加量,其中RS4组的体质量增加量最小。饲料采食量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著低于对照组($P < 0.01$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组也均极显著低于对照组($P < 0.01$),且RS3和RS4组进餐量极显著低于RS2组($P < 0.01$)。采食量与饱腹感相关,饱腹感与膳食成分及在胃肠道中的状态有关,低消化性和在胃排空时间长的膳食有助于提高饱腹感,抑制采食量。de Roos等^[16]研究发现长时间摄入RS比摄入葡萄糖更有饱腹感,本研究中RS2、RS3、RS4组的饲料采食量均小于对照组,其中RS4组的采食量最小,推测RS4饱腹感最强。饲料效率:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均显著低于对照组($P < 0.05$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组与对照组相比无显著差异。饲料效率反映饲料在胃肠道内消化吸收的利用情况。本研究中雄鼠的RS2、RS3、RS4组的饲料效率均显著低于对照组,与RS不能被直接消化吸收有关。

2.2 抗性淀粉种类对大鼠盲肠总质量、盲肠壁质量和表面积以及盲肠内容物湿质量的影响

从表3可以看出,盲肠总质量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组,且RS2和RS4组达到极显著水平($P < 0.01$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著高于对照组($P < 0.01$)。在盲肠壁质量方面:雄鼠中RS2、

RS3、RS4组均高于对照组；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均显著高于对照组($P<0.05$)。盲肠壁表面积：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS4组达到显著水平($P<0.05$)。Henningsson等^[17]研究发现在大鼠体内，RS几乎全部在结肠内发酵，产生的SCFA可以影响结肠上皮细胞的运转，促进结肠细胞和小肠细胞的代谢、生长和分化，为肠黏膜上皮细胞及肌肉等提供能量，对肠道上皮有营养作用，因此相比饲喂易消化淀粉来说，饲喂RS的大鼠盲肠组织质量更大。本研究中RS2、RS3、RS4组的盲肠壁质量和表面积均高于对照组。盲肠内容物湿质量：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS2和RS4组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著高于对照组($P<0.01$)。

表3 抗性淀粉种类对大鼠盲肠总质量、盲肠壁质量和表面积、盲肠内容物湿质量的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)

Table 3 Effect of resistant starch type on caecal weight, the weight and area of the caecal wall, and the wet weight of the caecal contents in rats ($\bar{x} \pm s, n=8$)

组别	盲肠总质量/g	盲肠壁质量/g	盲肠壁表面积/cm ²	盲肠内容物湿质量/g
雄鼠				
对照组	6.84±0.45 ^B	1.29±0.09 ^a	29.48±3.94 ^a	5.55±0.49 ^B
RS2	9.35±0.50 ^A	1.52±0.09 ^a	36.54±4.42 ^a	7.83±0.42 ^A
RS3	8.14±0.59 ^{AB}	1.37±0.02 ^a	33.70±1.82 ^a	6.77±0.61 ^{AB}
RS4	8.58±0.33 ^A	1.33±0.26 ^a	36.89±6.20 ^a	7.25±0.57 ^A
雌鼠				
对照组	6.31±0.33 ^B	1.12±0.09 ^b	17.05±5.10 ^b	5.20±0.37 ^B
RS2	9.41±0.23 ^A	1.40±0.08 ^a	22.82±2.34 ^{ab}	8.01±0.18 ^A
RS3	8.90±0.50 ^A	1.38±0.04 ^a	23.12±2.03 ^{ab}	7.51±0.48 ^A
RS4	8.95±0.34 ^A	1.38±0.02 ^a	26.40±3.72 ^a	7.57±0.34 ^A

2.3 抗性淀粉种类对大鼠盲肠内容物pH值、水分含量和氨含量的影响

表4 抗性淀粉种类对大鼠盲肠内容物pH值、水分含量和氨含量的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)

Table 4 Effect of resistant starch type on pH, moisture and ammonia levels of the caecal contents in rats ($\bar{x} \pm s, n=8$)

组别	pH	水分含量	氨含量/(μg/g)
雄鼠			
对照组	6.24±0.17 ^A	0.75±0.03 ^B	620.30±46.67 ^A
RS2	5.48±0.38 ^{AB}	0.84±0.02 ^A	532.25±30.15 ^A
RS3	5.10±0.27 ^B	0.81±0.03 ^{AB}	420.42±36.02 ^B
RS4	5.22±0.32 ^B	0.82±0.01 ^A	522.46±41.24 ^{AB}
雌鼠			
对照组	6.31±0.30 ^A	0.76±0.04 ^B	636.38±33.58 ^A
RS2	5.56±0.18 ^B	0.85±0.01 ^A	546.00±39.12 ^{AB}
RS3	4.88±0.19 ^C	0.82±0.01 ^A	454.42±55.08 ^B
RS4v	5.00±0.15 ^{BC}	0.81±0.01 ^{AB}	563.27±21.10 ^{AB}

从表4可以看出，盲肠内容物pH值：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组，其中RS3、RS4达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著低于对照组($P<0.01$)。SCFA的产生能降低肠道pH值，结肠中一些腐生菌在较高的pH值环境下活跃，易产生致癌物

质，肠道pH值的降低有利于抑制腐生菌的生长，对于预防和治疗肠道疾病具有重要的意义^[18]。本研究中RS2、RS3、RS4组的盲肠内容物pH均低于对照组，其中RS3组pH最低。在盲肠内容物水分含量方面：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS2和RS4组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS2和RS3组达到极显著水平($P<0.01$)。粪便含水量增加有利于代谢产物及有毒物质的及时排出，减少粪便在肠道中的停滞时间及粪便中有害物质与肠道上皮的接触时间，对于保持肠道清洁、维持肠道健康有着重要的作用。本研究中RS2、RS3、RS4组的盲肠内容物含水量均高于对照组，其中RS2组最高，比对照组提高了12%。盲肠内容物氨含量：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组，其中RS3组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠与雄鼠情况相同。氨是不消化蛋白质在结肠内腐败的主要产物，它能改变结肠表皮细胞的形态和代谢，被认为是结肠内潜在的肿瘤促进因子。RS为结肠内的细菌提供了合适的底物和丰富的能量来源，促使细菌迅速增生，将氨氮用于菌体蛋白质合成，同时肠道内SCFA和酸性环境也直接影响氨的吸收。杨月欣等^[19]研究发现6% RS2组和12% RS2组大鼠粪氨、盲肠内容物中氨浓度均比0% RS组显著降低($P<0.01$)，且氨与RS的摄入量呈显著负相关。本研究中RS2、RS3、RS4组的氨含量均低于对照组，其中RS3组氨含量最低。

2.4 抗性淀粉种类对大鼠盲肠内容物中短链脂肪酸含量的影响

从表5可以看出，乙酸：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，其中RS2组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠与雄鼠情况相同。丙酸：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS3达到显著水平($P<0.05$)。丁酸：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，其中RS3组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，其中RS3、RS4组达到极显著水平($P<0.01$)。异丁酸：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组，且RS3组达到极显著水平($P<0.01$)；雌鼠中RS2、RS3、RS4组均高于对照组。总SCFA：雄鼠中RS2、RS3、RS4组均极显著高于对照组($P<0.01$)，雌鼠与雄鼠情况相同。SCFA对人体大肠的代谢和功能起着重要的作用，其中丁酸的作用近年来受到很大的关注，它对结肠黏膜具有营养保护作用，是结肠上皮细胞的重要能量来源，能诱导各种结肠癌细胞的生长抑制和最终分化^[20]。人体肠道细菌发酵产生SCFA的能力是受细菌数量、pH值及底物不同的影响，不同淀粉的结构和组成会影响SCFA的产生部位、数量和种类。Cumming等^[21]发现RS2在增加粪便中乙酸含量方面作用更显著而RS3更多的是增加丙酸的含量。本研究中RS2、

表5 抗性淀粉种类对大鼠盲肠内容物中短链脂肪酸含量的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)
Table 5 Effect of resistant starch type on SCFA in the caecal contents of rats ($\bar{x} \pm s, n=8$)

	组别	乙酸含量/($\mu\text{mol/g}$)	丙酸含量/($\mu\text{mol/g}$)	丁酸含量/($\mu\text{mol/g}$)	异丁酸含量/($\mu\text{mol/g}$)	总SCFA含量/($\mu\text{mol/g}$)
雄鼠	对照组	90.03 $\pm$ 8.62 ^B	38.32 $\pm$ 2.88 ^a	16.98 $\pm$ 3.72 ^B	6.28 $\pm$ 0.81 ^B	151.61 $\pm$ 13.39 ^B
	RS2	133.37 $\pm$ 8.83 ^A	40.89 $\pm$ 2.40 ^a	25.60 $\pm$ 5.19 ^{AB}	7.48 $\pm$ 0.72 ^{AB}	207.33 $\pm$ 8.73 ^A
	RS3	117.41 $\pm$ 12.53 ^{AB}	40.41 $\pm$ 2.50 ^a	27.05 $\pm$ 1.70 ^A	8.34 $\pm$ 0.52 ^A	193.20 $\pm$ 11.20 ^A
	RS4	112.69 $\pm$ 11.40 ^{AB}	40.34 $\pm$ 1.28 ^a	24.73 $\pm$ 1.77 ^{AB}	6.99 $\pm$ 0.19 ^{AB}	184.74 $\pm$ 12.17 ^A
雌鼠	对照组	83.49 $\pm$ 4.59 ^B	34.20 $\pm$ 3.14 ^b	16.55 $\pm$ 0.69 ^C	6.91 $\pm$ 0.31 ^a	141.15 $\pm$ 12.48 ^B
	RS2	109.68 $\pm$ 6.36 ^A	40.29 $\pm$ 3.56 ^{ab}	20.74 $\pm$ 1.99 ^{BC}	7.44 $\pm$ 0.54 ^a	178.15 $\pm$ 9.48 ^A
	RS3	95.28 $\pm$ 3.10 ^B	44.81 $\pm$ 7.73 ^a	29.83 $\pm$ 2.06 ^A	7.10 $\pm$ 0.75 ^a	177.02 $\pm$ 11.63 ^A
	RS4	95.79 $\pm$ 4.58 ^B	43.74 $\pm$ 3.06 ^{ab}	23.89 $\pm$ 0.79 ^B	7.13 $\pm$ 0.65 ^a	170.54 $\pm$ 13.82 ^A

表6 抗性淀粉种类对大鼠血脂的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)
Table 6 Effect of resistant starch type on serum lipid parameters in rats ($\bar{x} \pm s, n=8$)

	组别	TG含量/(mmol/L)	TC含量/(mmol/L)	HDL-C含量/(mmol/L)	LDL-C含量/(mmol/L)	动脉硬化指数AI
雄鼠	对照组	1.54 $\pm$ 0.19 ^a	3.10 $\pm$ 0.27 ^a	0.80 $\pm$ 0.11 ^a	0.46 $\pm$ 0.08 ^a	2.89 $\pm$ 0.37 ^a
	RS2	1.36 $\pm$ 0.08 ^{ab}	2.83 $\pm$ 0.16 ^a	0.90 $\pm$ 0.07 ^a	0.42 $\pm$ 0.12 ^a	2.17 $\pm$ 0.36 ^b
	RS3	1.06 $\pm$ 0.15 ^b	2.65 $\pm$ 0.27 ^a	0.77 $\pm$ 0.04 ^a	0.43 $\pm$ 0.06 ^a	2.44 $\pm$ 0.28 ^{ab}
	RS4	1.13 $\pm$ 0.24 ^b	2.51 $\pm$ 0.46 ^a	0.79 $\pm$ 0.12 ^a	0.38 $\pm$ 0.07 ^a	2.16 $\pm$ 0.11 ^b
雌鼠	对照组	1.26 $\pm$ 0.32 ^a	2.53 $\pm$ 0.20 ^a	0.72 $\pm$ 0.08 ^a	0.27 $\pm$ 0.06 ^a	2.55 $\pm$ 0.64 ^a
	RS2	1.15 $\pm$ 0.07 ^a	2.21 $\pm$ 0.29 ^{ab}	0.75 $\pm$ 0.09 ^a	0.21 $\pm$ 0.04 ^a	2.03 $\pm$ 0.03 ^a
	RS3	30.92 $\pm$ 0.19 ^a	2.19 $\pm$ 0.26 ^{ab}	0.70 $\pm$ 0.04 ^a	0.22 $\pm$ 0.01 ^a	2.13 $\pm$ 0.23 ^a
	RS4	1.20 $\pm$ 0.33 ^a	1.93 $\pm$ 0.20 ^b	0.65 $\pm$ 0.06 ^a	0.22 $\pm$ 0.04 ^a	1.97 $\pm$ 0.07 ^a

RS3、RS4组与对照组相比都不同程度地增加了盲肠内容物中乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸和总SCFA的含量,且RS2在增加乙酸含量上作用更显著,RS3在增加丙酸、丁酸、异丁酸含量上更有优势。

2.5 抗性淀粉种类对大鼠血脂的影响

从表6可以看出,TG含量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组,且RS3和RS4组均达到显著水平($P<0.05$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组。de Deckere等^[22]发现RS可以降低餐后血糖和胰岛素水平,导致在肝脏和脂肪组织中脂肪酸和TG的合成减少。本研究中RS2、RS3、RS4组相比对照组都能降低血清TG含量,其中RS3组效果最显著,平均降低水平可达30%左右。TC含量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组;雌鼠相同,且RS4组达到显著水平($P<0.05$)。RS主要是通过增加粪中胆汁酸排泄量来降低血清TC含量,除此之外,进食量、胰岛素水平、SCFA也可以影响血清TC含量^[23]。本研究中RS2、RS3、RS4组相比对照组都能降低血清TC含量,其中RS4组效果最显著。HDL-C含量:雄鼠中RS2组高于对照组,RS3和RS4均低于对照组;雌鼠的与雄鼠情况相同。LDL-C含量:雄鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组;雌鼠的与雄鼠情况相同。AI:雄

鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组,其中RS2和RS4组达到显著水平($P<0.05$);雌鼠中RS2、RS3、RS4组均低于对照组。高、低密度脂蛋白被认为是动脉粥样硬化重要的影响因子,其中高密度脂蛋白是将肝脏外组织的胆固醇逆向转运回肝脏的主要形式,而低密度脂蛋白是将肝脏合成的胆固醇转运到全身组织的主要形式,前者能有效防御动脉粥样硬化的形成,后者则会导致其形成。AI值是反映动脉粥样硬化和冠心病危险性的重要指标,AI值升高,意味着患动脉硬化的危险增加。RS能有效降低低密度脂蛋白,升高高低密度脂蛋白,对降低动脉粥样硬化起到积极的作用^[24]。本研究中RS2、RS3、RS4组相比对照组都能降低AI值,其中RS4组最显著。

3 结 论

RS2、RS3和RS4对大鼠体质量、肠道和血脂方面的作用各不相同。在控制体质量方面,RS4体质量增加量最小;在调节大鼠肠道代谢产物方面,RS3效果最优;在调节血脂方面,RS3对血清甘油三酯的降低效果最显著,而RS4对血清胆固醇的调节效果最优。

参考文献:

- [1] FAO. Carbohydrates in human nutrition[C]. FAO Food and Nutrition, 1998, 6: 66.
- [2] 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.
- [3] MACFARLANE G T, ENGLYST H N. Starch utilization by the human large intestinal microflora[J]. Journal of Applied Microbiology, 1986, 60(3): 195-201.
- [4] BAGHURST P A, BAGHURST K I, RECORD S J. Dietary fiber, non-starch polysaccharides and resistant starch: a review[J]. Food Australia, 1996, 48(3): 1-35.
- [5] PHILLIPS J, MUIR J, BIRKETT A, et al. Effect of resistant starch on fecal bulk and fermentation-dependent events in humans[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1995, 62(1): 121-130.
- [6] ANDRIEUX C, PACHECO E D, BOUCHET B, et al. Contribution of the digestive tract microflora to amyloamylase starch degradation in the rat[J]. British Journal of Nutrition, 1992, 67(3): 489-499.
- [7] BIRKETT A, MUIR J, PHILLIPS J, et al. Resistant starch lowers fecal concentrations of ammonia and phenols in humans[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1996, 63(5): 766-772.
- [8] PHILIP G, REEVES, FORREST H, et al. AIN-93 purified diets for laboratory rodents: final report of the American Institute of Nutrition ad hoc writing committee on the reformulation of the AIN-76A rodent diet[J]. The Journal of Nutrition, 1993, 123(11): 1939-1951.
- [9] 林杨, 赵新淮. 高直链玉米淀粉制备抗性淀粉的技术改进及成品分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 284-286.
- [10] 刘雄, 张焕容, 杨发龙, 等. 高直链玉米淀粉对大鼠肠道发酵影响的研究[J]. 营养学报, 2007, 29(4): 372-373.
- [11] LE LEU R K, BROWN I L, HU Ying, et al. Effect of dietary resistant starch and protein on colonic fermentation and intestinal tumorigenesis in rats[J]. Carcinogenesis, 2007, 28(2): 240-245.
- [12] CHANG M J, BANG M H, PARK J H Y, et al. Interactions of high amylose starch and deoxycholic acid on gut functions in rats[J]. Nutrition, 2006, 22(2): 152-159.
- [13] SCHEPPACH W M, FABIAN C E, KASPER H W. Fecal short-chain fatty acid(SCFA)analysis by capillary gas-liquid chromatography[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 46(4): 641-646.
- [14] LIN H C, VISEK W J. Large intestinal pH and ammonia in rats: dietary fat and protein interactions[J]. The Journal of Nutrition, 1991, 121(6): 832-843.
- [15] TAPSELL L C. Diet and metabolic syndrome: where does resistant starch fit in?[J]. Journal of the Association of Analytical Chemists International, 2004, 87(3): 756-760.
- [16] de ROOS N, HEIJNEN M L, de GRAFF C, et al. Resistant starch has little effect on appetite, food intake and insulin secretion of healthy young men[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1995, 49(7): 532-541.
- [17] HENNINGSSON A M, BJORCK I M, NYMAN E M. Combinations of indigestible carbohydrates affect short-chain fatty acid formation in the hind gut of rats[J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(10): 3098-3104.
- [18] MALHOTRA S L. Faecal urobilinogen levels and pH of stools in population groups with different incidence of cancer of the colon, and their possible role in its aetiology[J]. Journal of the Royal Society of Medicine, 1982, 75(9): 709-714.
- [19] 杨月欣, 王竹, 洪洁, 等. 抗性淀粉结肠内酵解对大鼠肠道健康的影响[J]. 世界华人消化杂志, 2004, 12(11): 2618-2622.
- [20] MORITA T, KASAOKA S, HASE K, et al. Psyllium shifts the fermentation site of high-amylose cornstarch toward the distal colon and increases fecal butyrate concentration in rats[J]. The Journal of Nutrition, 1999, 129(11): 2081-2087.
- [21] CUMMINGS J H, BEATTY E R, KINGMAN S M, et al. Digestion and physiological properties of resistant starch in the human large bowel[J]. The British Journal Nutrition, 1996, 75(5): 733-747.
- [22] de DECKERE E A, KLOOTS W J, van AMELSVOORT J M. Resistant starch decreases serum total cholesterol and triacylglycerol concentrations in rats[J]. The Journal of Nutrition, 1993, 123(12): 2142-2151.
- [23] SUZUKI M, KAJI T. Suppression of hepatic lipogenesis by pectin and galacturonic acid orally-fed at the separate timing from digestion-absorption of nutrients in rat[J]. The Journal of Nutrition, 1983, 29(5): 553-562.
- [24] 常银子, 仲山民, 等. 百合膳食纤维对大鼠调节血脂和减肥功能的影响[J]. 食品科技, 2005, 21(5): 140-141.