

抗性淀粉结肠内酵解对大鼠肠道健康的影响

杨月欣, 王竹, 洪洁, 王国栋, 何梅, 沈湘

杨月欣, 王竹, 洪洁, 王国栋, 何梅, 沈湘, 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所食物营养评价室 北京市 100050
杨月欣, 女, 1955-10-22 生, 河北省衡水市人, 汉族, 食物营养评价室主任, 研究员, 博士生导师。
国家自然科学基金资助项目, No. 30070657
项目负责人: 杨月欣, 100050, 北京市南纬路 29 号, 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所食物营养评价室。yxyang@public3.bta.net.cn
电话: 010-83132912
收稿日期: 2004-08-16 接受日期: 2004-09-19

Effects of resistant starch fermentation on physiological changes of colon in rats

Yue-Xin Yang, Zhu Wang, Jie Hong, Guo-Dong Wang, Mei He, Xiang Shen

Yue-Xin Yang, Zhu Wang, Jie Hong, Guo-Dong Wang, Mei He, Xiang Shen, Department of Food Nutrition Assessment, National Institute for Nutrition and Food Safety, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China
Supported by National Natural Science Foundation of China, No. 30070657
Correspondence to: Yue-Xin Yang, Department of Food Nutrition Assessment, National Institute for Nutrition and Food Safety, Chinese Center for Disease Control and Prevention, 29 Nanwei Road, Beijing 100050, China. yxyang@public3.bta.net.cn
Received: 2004-08-16 Accepted: 2004-09-19

Abstract

AIM: To evaluate the effects of resistant starch (RS) fermentation on colon health-related indexes, including bowel functions, luminal short-chain fatty acid production and toxic compounds excretion.

METHODS: Fifty-seven healthy male SD rats were randomly divided into 5 groups based on body weight, and given basal diets with 0%, 6% and 12% RS, or high-protein diets (36% casein, HP) with 6% or 12% RS, respectively. After fed for 3 wk, gut transit time (GTT) for rats in each group was examined; at 5 wk three day feces samples were collected and their contents were assessed; at 7 wk all rats were killed. The morphological and histological characteristics of caecum were observed and the caecal function was evaluated by determination of the weight of caecal wall and caecal digesta, detection of caecal short chain fatty acid (SCFA), ammonia, phenol concentration and pH value.

RESULTS: In comparison with those in rats fed with 0% RS diet, shortened GTT was significantly shortened (601 ± 49 min vs 700 ± 58 min, $P < 0.001$), stool bulk was increased with more moisture (1.04 ± 0.22 g vs 0.37 ± 0.12 g, $P < 0.001$), and weight of caecal wall and caecal digesta was also increased (1.12 ± 0.14 g vs 0.73 ± 0.13 g, $P < 0.001$; 4.78 ± 1.44 g vs 3.00 ± 1.12 g, $P = 0.004 < 0.01$) in rats fed

with 12% RS diet; the concentration of SCFA in caecum was two- to three-fold enhanced by 12% RS (35.5 ± 11.4 $\mu\text{mol/g}$ vs 13.9 ± 6.7 $\mu\text{mol/g}$, $P = 0.003 < 0.01$), while the concentration of ammonia in both feces and caecum and phenol in caecum decreased (0.26 ± 0.13 mg/g vs 0.59 ± 0.15 mg/g, 0.35 ± 0.13 mg/g vs 0.63 ± 0.13 mg/g, 2.03 ± 0.42 mg/g vs 3.15 ± 0.55 mg/g, $P < 0.001$, respectively); caecal and fecal pH value dropped significantly (6.26 ± 0.36 vs 7.46 ± 0.28 ; 5.67 ± 0.31 vs 7.24 ± 0.31 , $P < 0.001$), and the variation of pH in feces was greater than that in caecum ($P < 0.001$), suggesting extended fermentation in distal colon. Rats in 6% RS group had similar but intermediate variances in fecal ammonia, caecal phenol and intestinal pH value ($P < 0.05$). All indexes mentioned above were dose-dependent ($P < 0.01$). For rats fed with HP, GTT was prolonged. Fecal bulk and caecal SCFA level dropped in HP+12% RS group (659 ± 47 min, $P = 0.009 < 0.01$; 0.80 ± 0.29 g, $P = 0.005 < 0.01$, 24.6 ± 13.6 $\mu\text{mol/g}$, $P = 0.043 < 0.05$), compared with 12% RS group. The concentrations of caecal phenol in HP+6% RS and HP+12% RS group were 3.20 ± 0.49 mg/g and 2.71 ± 0.55 mg/g respectively, significantly higher than that in 6% and 12% RS groups ($P < 0.001$); fecal and caecal pH value elevated as well. However, as RS intake increased (12%), these negative changes above were attenuated ($P < 0.05$). There was a significant interaction between RS and casein on fecal dry matter and caecal pH value ($P < 0.01$). Histological observation showed no abnormal changes in caecum tissues of rats fed with RS.

CONCLUSION: RS is beneficial to sustain intestinal health-related indexes and has potential protective effects on bowel functions. Adequate RS intake could attenuate the negative effects of high casein on colon by improving bowel habit, acidifying intestinal tract, promoting SCFA production and decreasing intestinal inner noxious phenol.

Yang YX, Wang Z, Hong J, Wang GD, He M, Shen X. Effects of resistant starch fermentation on physiological changes of colon in rats. *Shijie Huaren Xiaohua Zazhi* 2004;12(11):2618-2622

摘要

目的: 探讨不同浓度抗性淀粉(RS), 特别在高蛋白饲养模式下, 对实验大鼠肠道功能、肠内短链脂肪酸和有害及酵解产物等健康指标的影响。

方法: 57 只健康♂ SD 大鼠根据体重随机分成 5 组, 分别给予含有 0%, 6% 和 12% RS 的基础饲料, 或含有 6% 和 12% RS 的高蛋白饲料(36% 酪蛋白, HP)喂养。实验 3 wk 进行肠道转运时间(GTT)的观察实验; 5 wk 连续收集 3 d 粪便; 7 wk 处死大鼠, 取盲肠进行形态学和组织学观察, 并对盲肠内容物中的短链脂肪酸(SCFA)、氨、酚含量以及肠道 pH 进行测定。

结果:和0% RS组大鼠相比, 12% RS组大鼠 GTT 明显缩短(601 ± 49 min vs 700 ± 58 min, $P < 0.001$), 粪便量、盲肠壁及盲肠内容物质量显著增加(分别为 1.04 ± 0.22 g vs 0.37 ± 0.12 g, 1.12 ± 0.14 g vs 0.73 ± 0.13 g, $P < 0.001$; 4.78 ± 1.44 g vs 3.00 ± 1.12 g, $P = 0.004 < 0.01$); 盲肠内 SCFA 增加 2–3 倍(35.5 ± 11.4 μ mol/g vs 13.9 ± 6.7 μ mol/g, $P = 0.003 < 0.01$); 粪氨、盲肠内氨及酚浓度下降(0.26 ± 0.13 mg/g vs 0.59 ± 0.15 mg/g, 0.35 ± 0.13 mg/g vs 0.63 ± 0.13 mg/g, 2.03 ± 0.42 mg/g vs 3.15 ± 0.55 mg/g, $P < 0.001$); 盲肠和粪便 pH 值减低(6.26 ± 0.36 vs 7.46 ± 0.28 , 5.67 ± 0.31 vs 7.24 ± 0.31 , $P < 0.001$), 且粪便 pH 值显著低于盲肠 pH 值($P < 0.001$), 提示 RS 使远端结肠发酵增加。6% RS 组粪氨、盲肠酚及肠道 pH 值亦有中度下降($P < 0.05$)。以上各指标与 RS 摄入量存在明显的剂量反应关系($P < 0.01$)。和相应等剂量 RS 组相比, HP+12%RS 组大鼠 GTT 延长(659 ± 47 min, $P = 0.009 < 0.01$), 粪便量减少(0.80 ± 0.29 g, $P = 0.005 < 0.01$), 盲肠内容物 SCFA 降低(24.6 ± 13.6 μ mol/g, $P = 0.043 < 0.05$); HP+6RS%组和 HP+12RS%组盲肠内酚浓度增加(分别为 3.20 ± 0.49 mg/g, 2.71 ± 0.55 mg/g, $P < 0.001$), 且肠道 pH 升高。但随着 RS 摄入的增加, 这一现象有所缓解, HP+12%RS 组粪便水分, 盲肠 SCFA、氨、酚浓度及 pH 值均与 HP+6%组有显著差异($P < 0.05$)。RS 和酪蛋白对粪便干质量和盲肠 pH 值有显著交互作用($P < 0.01$)。组织病理切片未显示实验期间 RS 喂养大鼠盲肠壁细胞出现异常变化。

结论:RS 有助于维持肠道健康相关指标, 适量摄取可改善高酪蛋白饮食引起的肠道功能改变, 起到酸化肠道, 促进肠内有益产物 SCFA 生成, 降低有毒代谢产物酚的作用。

杨月欣, 王竹, 洪洁, 王国栋, 何梅, 沈湘. 抗性淀粉结肠内酵解对大鼠肠道健康的影响. 世界华人消化杂志 2004;12(11):2618–2622
<http://www.wjgnet.com/1009-3079/12/2618.asp>

0 引言

胃肠动力紊乱、肠道菌群失调、肠内毒素滞留、肠内环境改变常可诱发肠道癌症的发生。食物的精细化生产, 高热量、高脂、高蛋白食物的过多摄入, 不良的饮食习惯, 又是引起这些病症的重要原因。碳水化合物是人类膳食中最主要的成分, 和传统认识上的淀粉可完全被机体利用的观点不同, 人们在研究中逐渐发现部分淀粉因结构、来源不同而不能被小肠内的淀粉酶所消化^[1], 欧洲抗性淀粉研究工作组(EURESTA)和 FAO 将“健康人小肠内不消化的淀粉及其降解产物”定义为抗性淀粉(resistant starch, RS)^[2]。由于 RS 可以“逃逸”小肠消化而到结肠内代谢, 因此淀粉对肠道的健康意义, 特别是在当今高脂、高蛋白的饮食模式下, 淀粉类型与肠道健康的关系需要重新评估。我们从结肠内酵解入手, 探讨了 RS 对实验动物肠道动力学、排便习惯、肠内环境的影响, 特别是在高蛋白饮食饲养模式下对

肠道有益酵解产物和肠道毒素生成的影响, 为证明 RS 的肠道健康作用补充依据。

1 材料和方法

1.1 材料 普通淀粉由北京市场购得普通玉米源食用淀粉, 按 Champ^[3]方法测定 RS 含量为 0%; Hylon VII 由美国国民淀粉公司提供, 为玉米源工业加工淀粉, 经测定 RS 含量为 50%。57 只健康成年 δ SD 大鼠, 二级, 体质量 140–180 g, 购自中国医学科学院动物繁育中心。进入二级动物房并适应环境 3 d。根据体质量随机将大鼠分为 5 组, 其中 3 组分别给予 RS 含量为 0%、6% 和 12% 的基础饲料, 另外 2 组大鼠给予含 6% RS 和 12% RS 的高蛋白饲料(HP+6%RS, HP+12%RS)。饲料配方根据 AIN⁷⁶略作调整。基础饲料中各组分含量分别为(g/kg): 酪蛋白 180, 淀粉 594.5, 植物油 50, DL-蛋氨酸 3, 纤维素 20, 混合维生素 10, 混合矿物质 40。其中 0%RS 组饲料中的淀粉全部采用普通淀粉; 6%RS2 和 12%RS2 组饲料中分别含有 12% 和 24% 的 Hylon VII, 其余用普通淀粉配齐。高蛋白饲料中酪蛋白含量为 360 g/kg, 淀粉为 414.5 g/kg, 其余成分同基础饲料。

1.2 方法 将实验动物于二级动物房内分笼饲养, 室温维持在(24 ± 2 °C), 相对湿度控制在(50 ± 10 %), 照明时间为昼夜 12:12。实验期间动物自由进食及饮水, 每天记录进食量, 每 3 d 测体质量 1 次。实验 3 wk 进行肠道转运时间(GTT)观察实验, 各组大鼠禁食过夜, 于次日清晨空腹条件下灌予 2 mL 用碳末标记的饲料混悬液(200 g/L), 记录灌胃时间并恢复正常饮食, 观察大鼠从灌胃开始至排出首粒黑便的时间。实验 5 wk 进行排便实验, 连续 3 d 收集大鼠新鲜粪便, 测定粪便质量、水分、pH 值、氨含量。实验 7 wk, 空腹过夜条件下处死大鼠, 分离盲肠, 测定盲肠质量、容量; 取盲肠壁进行组织切片检查; 取盲肠内容物测定 pH、酵解产物短链脂肪酸(SCFA)及氨和酚的含量。粪便、盲肠、盲肠壁及内容物质量采用称质量法; pH 值采用电位法(pH 计); 氨测定采用改良的 Helen McCullough 方法, 即取样品匀浆液去蛋白后, 取上清液, 先后与含有苯酚、硝普钠的显色剂 1 和含有 Na_2HPO_4 , NaOH 和 HClO_3 的显色剂 2 反应, 比色测定; SCFA 采用 GC 法^[4]; 酚(对甲酚和苯酚)含量测定采用 HPLC 法^[5]。

统计学处理 各检测指标均以 mean \pm SD 表示。组间差异的检验首先进行方差齐性检验, 如方差齐性, 继续采用 one way ANOVA 进行分析, 如方差不齐转换数据后再进行分析; 影响因素分析采用多因素方差分析, 相关分析采用 Pearson 法, 检验水准 α 为 0.05。所有统计学分析采用 SPSS 软件包。

2 结果

实验期间各组大鼠饮食活动正常, 12%RS 组进食量和体质量增长略有升高趋势, 但与其他各组没有显著

性差异(表1)。

2.1 RS对实验大鼠排便习惯的影响 RS能加快食物在肠道内的转运速度;促进粪便排出,增加粪便量;使粪便水分含量增加,起到软化粪便的作用。其中12%RS组GTT,粪便干质量和水分含量均和0%RS组有显著性差异($P<0.001$),6%RS组变化趋势一致,RS对各指标的影响存在着显著的剂量反应关系($P<0.001$)。和相应等剂量RS组相比,高蛋白饲养大鼠GTT延长($P=0.009<0.01$),粪便干质量降低($P=0.005<0.01$),水分含量减少($P=0.011<0.05$),HP+12%RS组与12%RS组相比有较显著的差异,说明高蛋白饮食可影响大鼠正常排便习惯。但随着RS摄入增加,这一现象有所缓解(表1)。

2.2 RS酵解对盲肠壁的影响 和0%RS组相比,给予RS的大鼠盲肠体积增大,无论6%RS组还是12%RS组盲肠总质量、盲肠壁质量、盲肠壁质量/体质量比以及盲肠内容物质量均呈增加趋势,其中6%RS组盲肠内容物质量和12%RS组各指标与0%RS组有显著性差异(表2)。病理组织切片检查未见给予RS的大鼠发生异常的组织变化。与相应等剂量RS组相比,高蛋白组大

鼠上述指标没有显著差异,提示高蛋白饮食对盲肠容积没有显著影响。

2.3 RS对酵解产物生成的影响 12%RS组大鼠盲肠内乙酸、丙酸、丁酸及总SCFA浓度明显高于0%RS组和6%RS组($P=0.003<0.01$),约是0%RS组的2-3倍,各个SCFA浓度与RS摄入之间存在显著的剂量反应关系($P<0.001$),乙酸:丙酸:丁酸摩尔比为36:39:25(0%RS组为29:51:20)(表3)。和SCFA相反,6%RS组和12%RS组大鼠粪氨、盲肠内容物中氨和酚的浓度均比0%RS组显著降低($P<0.001$),氨、酚水平与RS摄入呈显著负相关;综合考虑各组大鼠粪便排出总量和盲肠内容物总质量,可见6%RS组和12%RS组大鼠有毒代谢产物的排出总量与0%RS组一致,提示RS对肠道内有毒代谢产物起到了稀释作用。和相应等剂量的RS组相比,高蛋白组大鼠盲肠内SCFA水平有所降低,酚水平(包括苯酚和对甲酚)升高。采用多因素方差分析,证明高蛋白摄入是引起肠内酚含量增高的重要因素($F=32.28, P<0.001$)。但随着RS摄入的增加,SCFA水平亦呈上升趋势,HP+12%RS组乙酸和丁酸浓度明

表1 抗性淀粉对大鼠饮食、体质量增长和排便习惯的影响(mean±SD, g)

分组	n	末期	初始	体质量增长	进食量/d	GTT(min)	粪便干质量/d	粪便水分(%)
0%RS	11	335 ± 35	169 ± 14	167 ± 33	15.0 ± 2.5	700 ± 58	0.37 ± 0.12	30.5 ± 7.3
6%RS	12	324 ± 23	168 ± 15	156 ± 28	14.6 ± 2.3	662 ± 53	0.45 ± 0.16	35.6 ± 8.0
12%RS	12	360 ± 46	168 ± 13	188 ± 47	17.5 ± 3.3	601 ± 49 ^{bc}	1.04 ± 0.22 ^{bd}	44.8 ± 8.8 ^{bd}
HP+6%RS	11	331 ± 31	167 ± 16	164 ± 38	15.8 ± 1.9	673 ± 55	0.71 ± 0.19 ^d	29.8 ± 5.4
HP+12%RS	12	355 ± 29	168 ± 13	187 ± 25	16.8 ± 1.1	659 ± 47 ^d	0.80 ± 0.29 ^d	36.4 ± 8.2 ^{de}

^b $P<0.01$ vs 0% RS; ^c $P<0.05$, ^d $P<0.01$ vs 6%RS; ^e $P<0.05$, ^f $P<0.01$ vs 12% RS; ^g $P<0.05$ vs HP+6% RS。

表2 抗性淀粉对大鼠盲肠质量的影响(mean±SD, g)

分组	n	盲肠总质量	盲肠壁质量	盲肠壁/体质量比(%)	内容物质量
0%RS	11	3.73 ± 1.14	0.73 ± 0.13	0.22 ± 0.07	3.00 ± 1.12
6%RS	12	4.96 ± 1.62 ^a	0.82 ± 0.26	0.25 ± 0.08	4.14 ± 1.78 ^a
12%RS	12	5.90 ± 1.49 ^b	1.12 ± 0.14 ^{bd}	0.33 ± 0.06 ^{bc}	4.78 ± 1.44 ^b
HP+6%RS	11	4.14 ± 1.05	0.86 ± 0.15	0.27 ± 0.05	3.28 ± 0.98
HP+12%RS	12	6.45 ± 1.25 ^f	1.13 ± 0.16 ^f	0.33 ± 0.05 ^f	5.32 ± 1.23 ^f

^a $P<0.05$, ^b $P<0.01$ vs 0%RS; ^c $P<0.05$, ^d $P<0.01$ 6%RS; ^e $P<0.01$ vs HP+6%RS。

表3 抗性淀粉对盲肠内有益酵解产物生成的影响(mean±SD, μmol/g)

分组	n	乙酸	丙酸	丁酸	总SCFA
0%RS	11	4.6 ± 3.2	6.1 ± 2.5	3.2 ± 2.2	13.9 ± 6.7
6%RS	12	6.8 ± 5.0	7.1 ± 5.2	4.6 ± 3.4	18.5 ± 13.0
12%RS	12	12.4 ± 4.6 ^b	13.9 ± 6.3 ^b	8.5 ± 3.1 ^b	35.5 ± 11.4 ^b
HP+6%RS	11	5.4 ± 3.4	5.9 ± 2.5	3.7 ± 2.3	15.0 ± 7.7
HP+12%RS	12	9.3 ± 6.0 ^e	8.9 ± 4.3	6.4 ± 4.1 ^e	24.6 ± 13.6 ^{de}

^b $P<0.01$ vs 0% 和 6% RS; ^c $P<0.05$ vs 12%RS; ^d $P<0.05$ vs HP+6%RS。

表4 抗性淀粉对有毒代谢物生成的影响(mean±SD, mg/g)

分组	n	氨		酚		
		盲肠内容物	粪便	苯酚	对甲酚	总酚
0%RS	11	0.63 ± 0.13	0.59 ± 0.15	1.05 ± 0.15	2.10 ± 0.43	3.15 ± 0.55
6%RS	12	0.51 ± 0.22	0.42 ± 0.17 ^a	0.78 ± 0.11 ^b	1.67 ± 0.29 ^b	2.46 ± 0.36 ^b
12%RS	12	0.35 ± 0.13 ^{bd}	0.26 ± 0.13 ^{bc}	0.59 ± 0.16 ^{bd}	1.43 ± 0.30 ^b	2.03 ± 0.42 ^{bd}
HP+6%RS	11	0.52 ± 0.13	0.44 ± 0.17	1.05 ± 0.19 ^d	2.15 ± 0.39 ^d	3.20 ± 0.49 ^d
HP+12%RS	12	0.35 ± 0.07 ^b	0.29 ± 0.11 ^c	0.86 ± 0.15 ^{dh}	1.85 ± 0.42 ^d	2.71 ± 0.55 ^{dx}

^a*P*<0.05, ^b*P*<0.01 vs 0%RS; ^c*P*<0.05, ^d*P*<0.01 vs 6%RS; ^e*P*<0.01 vs 12%RS; ^f*P*<0.05, ^g*P*<0.01 vs HP+6%RS.

显高于 HP+6%RS 组(*P* = 0.018<0.05), 且酚浓度显著下降(*P* = 0.001<0.01), 说明增加 RS 的摄入(12%)可以降低高蛋白引起的结肠内有毒产物的过高分泌(表 4).

2.4 RS 对维持肠道酸性环境的影响 实验后期随着 RS 摄入的增加, 盲肠内容物和粪便 pH 显著下降; 和相应等剂量 RS 组相比, 食用高蛋白饲料的大鼠肠道 pH 较高, 但增加 RS 摄入可以有效地缓解这一变化, 有助于维持肠道酸性环境. 和盲肠内容物 pH 相比, 给予 RS 的各实验组大鼠粪便 pH 值下降得更多(*P*<0.01), 提示末端结肠酵解程度可能更高, 受食物影响也更大(表 5).

表5 抗性淀粉对肠道 pH 值的影响(mean±SD)

组别	n	盲肠内容物	粪便	
			实验前	实验后
0%RS	11	7.46 ± 0.28	7.24 ± 0.20	7.24 ± 0.31
6%RS	12	7.18 ± 0.31 ^a	7.23 ± 0.22	6.12 ± 0.20 ^{bi}
12%RS	12	6.26 ± 0.36 ^{bd}	7.20 ± 0.14	5.67 ± 0.31 ^{bd}
HP+6%RS	11	7.48 ± 0.29 ^c	7.20 ± 0.25	6.52 ± 0.24 ^{di}
HP+12%RS	12	7.14 ± 0.32 ^h	7.22 ± 0.15	5.93 ± 0.34 ^{dh}

^a*P*<0.05, ^b*P*<0.01 vs 0%RS; ^c*P*<0.05, ^d*P*<0.01 vs 6%RS; ^e*P*<0.05, ^f*P*<0.01 vs 12%RS; ^g*P*<0.01 vs HP+6%RS; ^h*P*<0.01 vs 本组盲肠内容物.

2.5 RS 摄入量与各指标的相关性及析因分析 采用 Pearson 相关分析证明, 在本剂量范围内, RS 摄入量与胃肠道转运时间显著负相关(*P*<0.01), 与结肠质量和有益酵解产物的生成呈显著正相关(*P*<0.01), 与肠道 pH 值和有害酵解产物负相关(*P*<0.01). 多因素方差分析结果表明, 蛋白质能显著影响 GTT, 减少肠道内丙酸生成(*P*<0.05), 降低粪便水分含量, 增加盲肠内酚含量及升高肠道 pH 值(*P*<0.01). RS 和蛋白质对粪便干质量、盲肠 pH 值有显著交互作用(*P*<0.01).

3 讨论

在肠道癌症发生中, 膳食因素和肠道菌群是引起肠道微环境变化的关键, 流行病学研究表明, 膳食能量、宏亮营养素的高摄入与肠道癌症发生密切相关^[6]; 而在我国上海人群的调查实验中, 红肉、鱼、鸡蛋等食

物摄入的增加是加大结肠癌发生危险性的相关因素^[7], 糖、淀粉等生糖碳水化合物(glycemic carbohydrate)又可能与其有着交互影响^[8].

碳水化合物的生糖特性与其在小肠内消化的速度密切相关, 不消化碳水化合物(indigestible carbohydrate, IDC)可逃逸小肠消化, 进入结肠酵解. 酵解是不消化物一种有效的代谢吸收方式, 非淀粉多糖、RS、低聚糖等, 或消化道分泌的消化液、脱落的黏膜细胞, 可作为底物为肠道菌群所利用, 以挽回部分能量. SCFA 是 IDC 酵解的主要终产物, 可再为肠上皮细胞吸收, 被肝脏和肌肉代谢. 作为结肠内主要的阴离子, SCFA 最重要的特性是对肠道上皮的营养作用; 并可降低肠道 pH, 维护肠黏膜的防御屏障; 促进和改善结肠微循环, 与结肠癌发生负相关. 其中丁酸是最为有效的肠道细胞营养物质, 不仅提供能量, 且对调节细胞的生长和分化^[9], 维持细胞形态, 促进瘤细胞向非瘤细胞转化有重要意义. 由于 SCFA 可以促进肠道电解质和水的吸收, 目前已有一些研究将 SCFA(如丁酸钠)作为临床药物用于治疗肠道炎症、腹泻^[10], 改善肠道手术或肠道管饲引起的排便功能下降^[11-12]. 但限于用量和长期疗效的不确定, 所以探讨利用食物成分刺激肠内有益菌繁殖和内源性 SCFA 生成显得十分重要. 受 GTT、酸性条件、药物、其他膳食等因素的影响, 不同碳水化合物对肠内 SCFA 产生部位、数量、种类的影响有所不同^[13-14], 如果胶类食物酵解后乙酸百分比相对较高(80%). 和其他类型 IDC 相比, RS 在结构上属于淀粉, 外观、口感、性状和可接受性更符合人体需要, 且在肠道内的酵解是相当完全的, 代谢率达 94% 以上^[15-16], 是刺激 SCFA 生成的最好底物, 增加乙酸和丁酸的摩尔比^[17-18](这一结果在我们的研究中得到证实), 对结肠生理功能的影响可能也更大^[19]. 另一方面, 和淀粉相比, RS 可以延缓餐后葡萄糖的吸收, 降低血糖, 对预防葡萄糖耐量低减、高胰岛素血症有利^[20]. 而胰岛素抵抗又可增加结肠癌症发生的危险性^[21].

尽管 RS 的肠道健康作用得到越来越多的证实, 但是其对降低损害肠道黏膜的有害物质 - 包括氨、酚、N-亚硝基等的能力, 预防和治疗结肠疾病的作用尚需要进一步的评估^[22]. 氨、胺、酚、吲哚等是不消化蛋

白质在结肠内腐败的主要产物。氨(NH₃)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,可促进肠道内的肿瘤转化。酚和吲哚本身虽不是致癌物,但却可辅助致癌。我们利用酪蛋白设计了两个蛋白质摄入水平,以探讨RS对肠道内氨、酚分泌的影响。结果表明,在蛋白质摄入相同的情况下,高RS可使肠道氨、酚浓度下降,这可能是由于RS为肠内细菌提供了合适的底物和丰富的能量来源,促使了细菌迅速增生,并将氮氮用于菌体蛋白质合成,使结肠内以碳水化合物为底物的细菌增生增多,抑制了蛋白质腐败菌的增生,减少了腐败物的产生以及肠道对氨的吸收,同时肠道内SCFA和酸性环境也直接影响氨的吸收,使氮表观吸收率降低^[6]。在高酪蛋白饲养模式下,大鼠肠道内SCFA显著下降,酚浓度上升,氨却没有显著变化,12%RS能有效缓解这些变化。一些证据表明,尽管蛋白质的过高摄入与结肠癌发生有关,但蛋白质来源的影响也不容忽视。体外实验研究表明,酪蛋白可以促进SCFA的产生,说明酪蛋白可以为细菌提供丰富的氮源,从而促进发酵^[23]。但在一些化学制剂诱导的肠道肿瘤动物模型中,喂养酪蛋白及其降解肽的动物比食用等量的乳清蛋白、大豆蛋白的动物更易发生结肠癌^[24-26]。而且我们研究证据表明蛋白质虽未能影响盲肠容积,但对盲肠pH却与RS有交互影响,提示二者可能通过不同的途径影响肠道发酵,使发酵产物配比改变。高酪蛋白影响结肠癌症发生的机制是否与酚而非氨的高分泌有关需要进一步研究。

除此之外,适量给予RS可以较好地改善肠道动力,增加肠道容积,促进肠道有益菌的定植^[27],维持肠道内酸性环境。研究表明流行病学资料显示肠道pH下降0.5,可降低结肠癌的危险。RS不仅可以降低肠道pH,且对末端pH影响更大,提示除了盲肠内可能有由小肠进入的碱性消化液外,末端结肠的酵解程度更高,受食物影响也更大。由于结肠疾病尤其是结肠癌更多见于末端结肠,因此RS对末端结肠pH的影响显得更具有重要意义。关于RS预防和治疗肠道疾患、维持肠道健康作用的机制,以及RS与蛋白质、脂肪和其他碳水化合物之间的交互作用尚需进一步研究。

4 参考文献

- Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur J Clin Nutr* 1992;46(Suppl 2):S33-50
- FAO. Carbohydrates in Human Nutrition. FAO Food and Nutrition Paper 66, Rome: FAO 1998:1-5
- Champ M. Determination of resistant starch in foods and food products: interlaboratory study. *Eur J Clin Nutr* 1992;46(Suppl 2):S51-62
- Topping DL, Illman RJ, Clarke JM, Trimble RP, Jackson KA, Marsono Y. Dietary fat and fiber alter large bowel and portal venous volatile fatty acids and plasma cholesterol but not biliary steroids in pigs. *J Nutr* 1993;123:133-143
- Birkett AM, Jones GP, Muir JG. Simple high-performance liquid chromatographic analysis of phenol and p-cresol in urine and feces. *J Chromatogr B Biomed Appl* 1995;674:187-191

- Satia-Abouta J, Galanko JA, Potter JD, Ammerman A, Martin CF, Sandler RS. North carolina colon cancer study. Associations of total energy and macronutrients with colon cancer risk in African Americans and Whites: results from the North Carolina colon cancer study. *Am J Epidemiol* 2003;158:951-962
- Chiu BC, Ji BT, Dai Q, Gridley G, McLaughlin JK, Gao YT, Fraumeni JF Jr, Chow WH. Dietary factors and risk of colon cancer in Shanghai, China. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 2003;12:201-208
- Favero A, Parpinel M, Montella M. Energy sources and risk of cancer of the breast and colon-rectum in Italy. *Adv Exp Med Biol* 1999;472:51-55
- Cai J, Chen Y, Murphy TJ, Jones DP, Sartorelli AC. Role of caspase activation in butyrate-induced terminal differentiation of HT29 colon carcinoma cells. *Arch Biochem Biophys* 2004;424:119-127
- 李可洲, 李宁, 黎介寿, 鲍扬, 李幼生. 短链脂肪酸对大鼠移植小肠形态及功能的作用研究. *世界华人消化杂志* 2002;10:720-722
- Lewis SJ, Heaton KW. Increasing butyrate concentration in the distal colon by accelerating intestinal transit. *Gut* 1997;41:245-251
- Whelan K, Judd PA, Preedy VR, Taylor MA. Enteral feeding: the effect on faecal output, the faecal microflora and SCFA concentrations. *Proc Nutr Soc* 2004;63:105-113
- Govers MJ, Gannon NJ, Dunshea FR, Gibson PR, Muir JG. Wheat bran affects the site of fermentation of resistant starch and luminal indexes related to colon cancer risk: a study in pigs. *Gut* 1999;45:840-847
- Oufir LE, Barry JL, Flourie B, Cherbut C, Cloarec D, Bornet F, Galmiche JP. Relationships between transit time in man and in vitro fermentation of dietary fiber by fecal bacteria. *Eur J Clin Nutr* 2000;54:603-609
- 王竹, 杨月欣, 周瑞华, Vonk RJ, 江骥. 抗性淀粉的代谢及对血糖的调节作用. *营养学报* 2003;25:190-195
- 王竹, 王国栋, 何梅, 杨月欣. 体内外实验测定淀粉的消化吸收特性. *卫生研究* 2004;33:470-472
- Bird AR, Hayakawa T, Marsono Y, Gooden JM, Record IR, Correll RL, Topping DL. Coarse brown rice increases fecal and large bowel short-chain fatty acids and starch but lowers calcium in the large bowel of pigs. *J Nutr* 2000;130:1780-1787
- Moreau NM, Martin LJ, Toquet CS, Laboisie CL, Nguyen PG, Siliart BS, Dumon HJ, Champ MM. Restoration of the integrity of rat caeco-colonic mucosa by resistant starch, but not by fructo-oligosaccharides, in dextran sulfate sodium-induced experimental colitis. *Br J Nutr* 2003;90:75-85
- Topping DL, Clifton PM. Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides. *Physiol Rev* 2001;81:1031-1064
- 王竹, 杨月欣, 韩军花, 门建华, 洪洁. 抗性淀粉对饮食诱发葡萄糖耐量异常的预防. *营养学报* 2002;24:48-52
- Komninou D, Ayonote A, Richie JP Jr, Rigas B. Insulin resistance and its contribution to colon carcinogenesis. *Exp Biol Med (Maywood)* 2003;228:396-405
- Kendall CW, Emam A, Augustin LS, Jenkins DJ. Resistant starches and health. *J AOAC Int* 2004;87:769-774
- 孙晓红, Heiner AM, Elzinga H, Vonk RJ. 影响肠道细菌发酵因素的体外研究. *营养学报* 2003;25:312-315
- Hakkak R, Korourian S, Ronis MJ, Johnston JM, Badger TM. Dietary whey protein protects against azoxymethane-induced colon tumors in male rats. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 2001;10:555-558
- Hakkak R, Korourian S, Ronis MJ, Johnston JM, Badger TM. Soy protein isolate consumption protects against azoxymethane-induced colon tumors in male rats. *Cancer Lett* 2001;166:27-32
- Oliveira MJ, Van Damme J, Lauwaet T, De Corte V, De Bruyne G, Verschraegen G, Vaneechoutte M, Goethals M, Ahmadian MR, Muller O, Vandekerckhove J, Mareel M, Leroy A. Beta-casein-derived peptides, produced by bacteria, stimulate cancer cell invasion and motility. *EMBO J* 2003;22:6161-6173
- Le Blay GM, Michel CD, Blottiere HM, Cherbut CJ. Raw potato starch and short-chain fructo-oligosaccharides affect the composition and metabolic activity of rat intestinal microbiota differently depending on the caecocolonic segment involved. *J Appl Microbiol* 2003;94:312-320