

## 炒莱菔子中萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐在肠道菌群体外代谢的研究

高磊<sup>1</sup>, 张茜<sup>1,2</sup>, 盛华刚<sup>1</sup>, 于绍华<sup>1</sup>, 周洪雷<sup>1</sup>, 朱立俏<sup>1\*</sup>

(1. 山东中医药大学, 山东 济南 250355; 2. 临沂高新技术产业开发区管理委员会, 山东 临沂 276000)

**摘要:** **目的** 研究炒莱菔子中萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐的肠道菌群体外代谢。**方法** 采集健康SD大鼠新鲜粪便, 制备肠菌培养液, 与炒莱菔子提取液在厌氧环境下共孵育。HPLC法测定萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐含量, 分析采用InertSuatrain AQ-C<sub>18</sub>色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相乙腈-0.1%磷酸, 梯度洗脱; 体积流量1 mL/min; 柱温27 ℃; 检测波长225、326 nm。对2种成分的质量浓度与降解时间进行动力学方程拟合。**结果** 萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐在大鼠肠道菌群中均被代谢, 12 h时两者降解率分别为80.35%、96.31%, 并且其代谢转化均符合非线性动力学。**结论** 萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐在大鼠肠道菌群作用下可发生转化, 以后者转化速率更快, 推测其肠道菌群代谢产物可能为芥子酸。

**关键词:** 炒莱菔子; 萝卜苷; 芥子碱硫氰酸盐; 肠道菌群; 体外代谢; HPLC

**中图分类号:** R969.1

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1001-1528(2022)07-2396-05

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1528.2022.07.060

莱菔子为十字花科植物萝卜 *Raphanus sativus* L. 的干燥成熟种子, 其味辛、甘, 性平, 归脾、胃、肺经, 临床大多以炒制品入药, 具有消食除胀、降气化痰的作用, 可用于治疗饮食停滞、脘腹胀痛、大便秘结<sup>[1]</sup>, 有着降血压<sup>[2-3]</sup>、降血脂<sup>[4-5]</sup>、祛痰镇咳<sup>[6]</sup>、抗炎<sup>[7-8]</sup>、防癌<sup>[9]</sup>、消食<sup>[10]</sup>等活性, 主要含硫苷<sup>[11-12]</sup>、生物碱<sup>[13]</sup>、脂肪酸<sup>[14]</sup>、黄酮<sup>[15-16]</sup>、多糖、蛋白质<sup>[17-18]</sup>等成分, 以硫苷类成分萝卜苷和生物碱类成分芥子碱为代表。

中药大多以口服形式进入人体, 首先会在消化道内进行生物转化, 肠道菌群代谢是消化道内生物转化最重要的环节<sup>[19]</sup>。萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐均为离子型化合物, 属于强极性, 故在肠道中较难吸收, 生物利用度低, 而肠道菌群会使两者发生代谢, 生成疏水性更强的代谢产物, 从而被机体吸收进入血液。目前, 给予化学成分对肠道菌群的调节作用, 以及肠道菌群代谢产物鉴定的研究较多<sup>[20-21]</sup>, 但鲜有涉及它们在肠道菌群作用下的规律。因此, 本实验考察炒莱菔子中萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐在大鼠肠道菌群作用下的体外代谢, 以期为该药材开发提供依据。

### 1 材料

**1.1 试剂与药物** 炒莱菔子购于山东百味堂中药饮片有限公司(批号160101), 经山东中医药大学药学院张芳教授鉴定为十字花科植物萝卜 *Raphanus sativus* L. 的干燥成熟种子。芥子碱硫氰酸盐对照品(成都德斯特生物技术有限公司, 批号DST160910-21); 萝卜苷对照品(美国Cayman公

司, 批号0453522-24, 纯度≥98%)。营养琼脂(批号20170838)、牛肉膏(批号20170502)购自北京奥博星生物技术有限责任公司; L-半胱氨酸(批号313E026)、胰蛋白胨(批号1939536)购自北京索莱宝生物科技有限公司; L-抗坏血酸(批号20150831)购自国药集团化学试剂有限公司; 乙腈、甲醇为色谱纯(美国Fisher公司); 其他试剂均为分析纯; 水为娃哈哈纯净水。

**1.2 仪器** Agilent Technologies 1260 Infinity 高效液相色谱仪(配置DAD检测器, 美国Agilent Technologies公司); THZ-82A 气浴恒温振荡器(江苏省金坛市医疗仪器厂); HFszfe-1200TE 生物安全柜(上海力申科学仪器有限公司); LDZX-50FBS 立式压力蒸汽灭菌器; 厌氧产气袋(AnaeroPack-Anaero)、厌氧培养盒(Pack-Rectangular Jars)(日本三菱瓦斯化学株式会社); 3K15 离心机(北京索莱宝科技有限公司); SZ-1 快速混匀器(江苏金坛市金城国胜仪器厂); SCIENTZ-48 高通量组织研磨器(宁波新芝生物科技股份有限公司); FA2004 电子分析天平(上海精密科学仪器有限公司)。

**1.3 动物** 雄性健康SD大鼠, 体质量200~220 g, 购于济南朋悦实验动物繁育有限公司, 动物生产合格证号SCXK(鲁)20140007。

### 2 方法

**2.1 提取液制备** 称取饮片约100 g, 粉碎, 加入12倍量水煎煮30 min, 滤过, 药渣再加10倍量水煎煮30 min, 合并提取液, 浓缩至每1 mL药液相当于0.4 g药材。量取适

收稿日期: 2021-10-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(81503252); 山东省自然科学基金项目(ZR2020MH373); 山东中医药大学青年创新团队项目(2020)

作者简介: 高磊(1995—), 女, 硕士生, 从事中药化学成分、作用机制及药材质量控制研究。Tel: 17854111566, E-mail: gaolei11252021@163.com

\*通信作者: 朱立俏(1981—), 女, 副教授, 从事中药药效物质基础及体内过程研究。E-mail: zliqiao@163.com

量, 蒸馏水稀释至质量浓度为 0.04 g/mL, 过 0.22 μm 无菌微孔滤膜, 即得。

## 2.2 肠道菌群代谢转化

2.2.1 厌氧培养液制备 参考文献 [22] 报道。A 液为 0.78% K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 37.5 mL, B 液为 0.47% KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、1.18% NaCl、1.2% (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、0.12% CaCl<sub>2</sub>、0.25% MgSO<sub>4</sub> · H<sub>2</sub>O 37.5 mL, C 液为 8% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 50 mL, 将三者与 0.5 g L-半胱氨酸、2 mL 25% L-抗坏血酸溶液、1 g 牛肉膏、1 g 蛋白胨、1 g 营养琼脂混匀, 加蒸馏水至 1 L, 盐酸调 pH 至 7.5~8.0, 即得。

2.2.2 大鼠肠道菌液制备 取大鼠 2 只, 禁食不禁水 12 h, 取新鲜粪便 0.4 g, 加入 4 倍量生理盐水, 组织匀浆机中充分混匀后 5 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 即得, 置于 4 °C 冰箱中保存。

2.2.3 肠菌培养液制备 参考文献 [23] 报道。取大鼠肠道菌液 2 mL, 置于无菌培养皿中, 加入厌氧培养液 18 mL, 混合均匀, 置于厌氧培养盒中, 加入厌氧产气袋后迅速盖上盒盖以保证厌氧环境, 置于 37 °C 气浴恒温振荡箱中培养 24 h, 即得。

2.2.4 实验操作 将肠菌培养液平均分为 2 份, 每份 10 mL, 一份 (有肠菌) 中加入“2.1”项下提取液 5 mL, 作为给药组, 而另一份 (有肠菌) 作为空白组; 另取“2.1”项下提取液 5 mL, 加到 10 mL 厌氧培养液 (无肠菌) 中, 作为对照组, 将上述样品置于厌氧培养盒中, 加入厌氧产气袋后迅速盖上盒盖以保证厌氧环境, 置于 37 °C 气浴恒温振荡箱中培养, 于 0、0.25、0.5、1、2、3、4、6、8、10、12、24 h 时取出, 加入 10 mL 甲醇涡混振荡 3 min 终止反应, 8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 微孔滤膜, 作为供试品溶液。

2.3 色谱条件 InertSuatrain AQ-C<sub>18</sub> 色谱柱 (4.6 mm × 250 mm, 5 μm); 流动相乙腈 (A) -0.1% 磷酸 (B), 梯度洗脱 (0~5 min, 2% A; 5~8 min, 2%~5% A; 8~10 min, 5%~12.5% A; 10~12 min, 12.5%~14% A; 12~25 min, 14%~25% A; 25~40 min, 25%~50% A; 40~50 min, 50%~70% A; 50~60 min, 70%~100% A); 体积流量 1 mL/min; 柱温 27 °C; 检测波长 225、326 nm; 进样量 20 μL。

2.4 对照品溶液制备 精密称取萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐对照品适量, 少量纯净水溶解后加预先灭菌的肠菌培养液, 制成两者质量浓度分别为 76、13.4 μg/mL 的溶液, 即得。

## 2.5 方法学考察

2.5.1 线性关系考察, 吸取对照品溶液适量, 8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 过 0.45 μm 微孔滤膜, 分别取 1、5、10、20、40、60 μL, 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 以峰面积为纵坐标 (Y), 进样量为横坐标 (X) 进行回归, 得萝卜苷方程为  $Y=1\ 186.6X-154.8$  ( $R^2=0.999\ 4$ ), 线性范围 0.076~7.6 μg; 芥子碱硫氰酸盐方程为  $Y=1\ 320.6X+$

20.612 ( $R^2=0.999\ 3$ ), 线性范围 0.013 4~1.34 μg。

2.5.2 稳定性试验 取供试品溶液适量, 于 0、4、8、12、16、20、24 h 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 测得萝卜苷、萝卜苷代谢产物、芥子碱硫氰酸盐、芥子碱硫氰酸盐代谢产物峰面积 RSD 分别为 2.40%、2.39%、4.41%、4.65%, 表明溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.5.3 精密度试验 取供试品溶液适量, 在“2.3”项色谱条件下进样测定 6 次, 测得萝卜苷、萝卜苷代谢产物、芥子碱硫氰酸盐、芥子碱硫氰酸盐代谢产物峰面积 RSD 分别为 1.99%、1.15%、3.76%、0.47%, 表明仪器精密度良好。

2.5.4 重复性试验 按“2.2.4”项下方法平行制备供试品溶液 6 份, 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 测得萝卜苷、萝卜苷代谢产物、芥子碱硫氰酸盐、芥子碱硫氰酸盐代谢产物峰面积 RSD 分别为 2.10%、4.67%、4.79%、3.59%, 表明该方法重复性良好。

2.5.5 专属性试验 取“2.2”项下各培养液, 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 结果见图 1。由此可知, 萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐保留时间分别为 4.57、21.34 min, 而两者代谢产物分别为 16.33、28.77 min, 并且大鼠肠菌液和厌氧培养液不干扰测定, 表明该方法专属性良好。

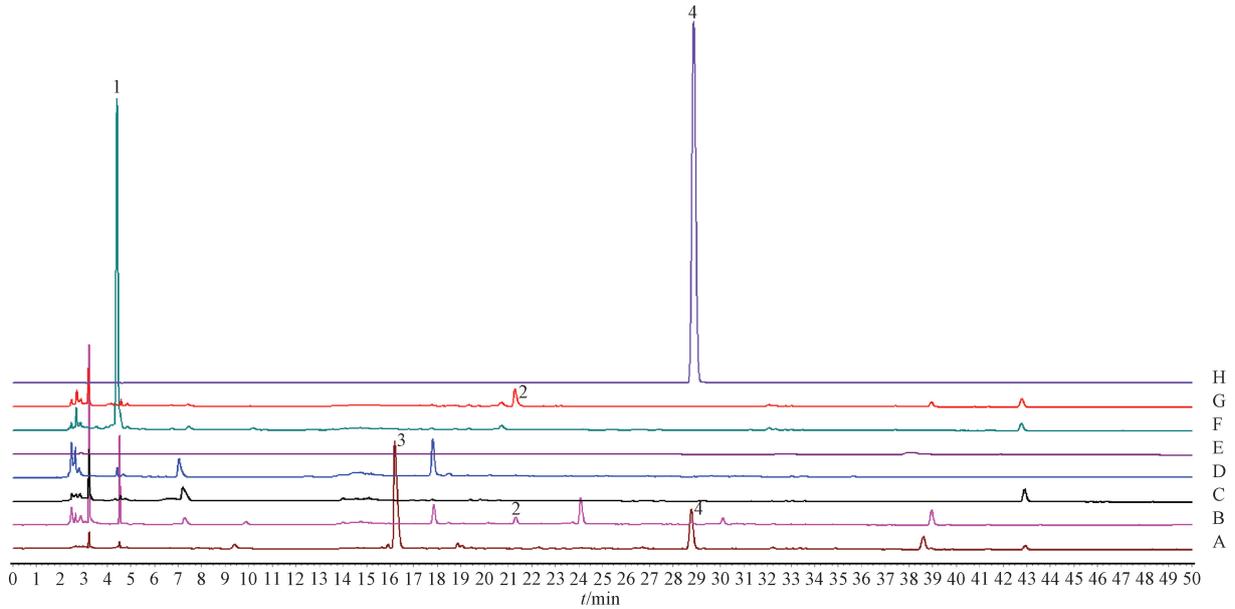
2.5.6 加样回收率试验 取孵育某一时间点、各成分含量已知的肠道菌群培养液 6 份, 精密加入适量对照品溶液, 按“2.2”项下方法制备供试品溶液, 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 计算回收率。结果, 萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐平均加样回收率分别为 92.35%、97.12%, RSD 分别为 6.26%、6.93%。

2.6 降解率、生成率测定 取“2.2”项下供试品溶液, 在“2.3”项色谱条件下进样测定, 标记在肠道菌群孵育过程中发生变化的特征峰, 记录峰面积, 分别按  $Q_1=(1-A_i/A_0) \times 100\%$ 、 $Q_d=(E_d/A_0) \times 100\%$  计算萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐、芥子酸苷降解率及其代谢物生成率, 并绘制转化曲线<sup>[24]</sup>。其中,  $Q_1$  为某一时间点的降解率,  $A_0$  为 0 h 时 1、2 号峰的峰面积之和或 4、5、7、9 号峰的峰面积之和,  $A_i$  为某一时间点 1、2 号峰的峰面积之和或 4、5、7、9 号峰的峰面积之和,  $Q_d$  为某一时间点代谢物的生成率,  $E_d$  为某一时间点代谢物的峰面积。

2.7 降解动力学参数测定 以萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐质量浓度为纵坐标, 时间为横坐标, 分别采用零级方程、一级方程、非线性动力学方程进行线性拟合, 通过相关系数 ( $R^2$ ) 来判断拟合程度。

## 3 结果

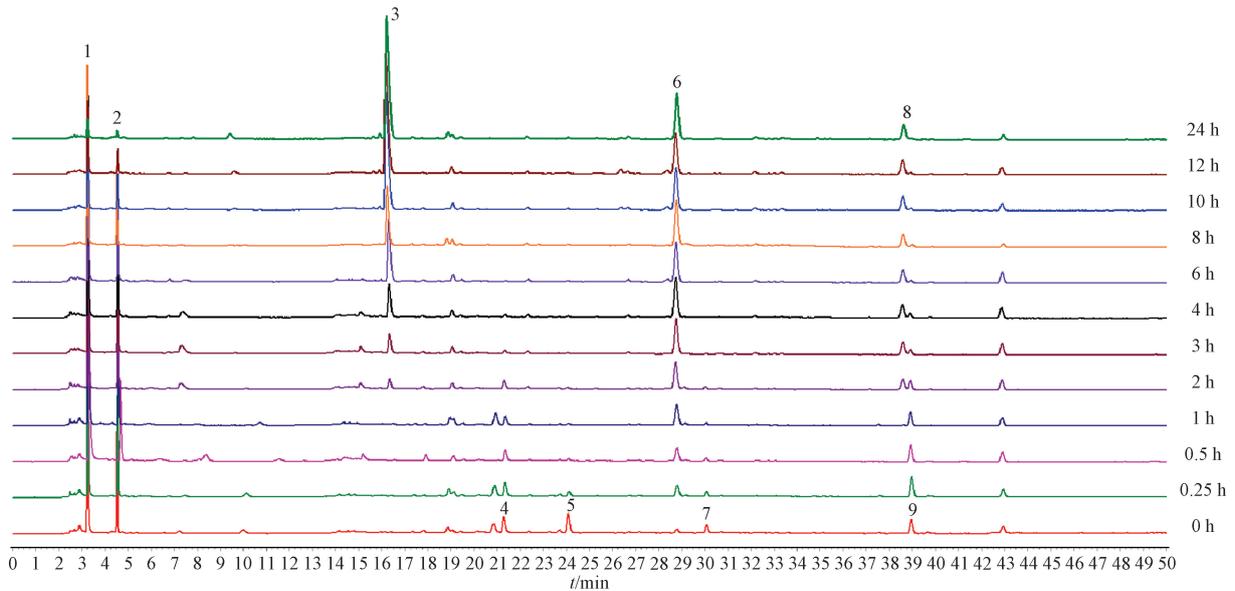
3.1 样品测定 将提取液不同肠道菌群孵育时间的 225 nm 波长处 HPLC 色谱图导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统 (2012 版)”软件, 得到 HPLC 叠加图, 标记 9 个孵育时间发生变化的特征峰, 见图 2。通过 Agilent 色谱工作站导出 1~3 号特征峰 (225 nm) 和 4~9 号特征峰 (326 nm) 在不同肠道菌群孵育时间的峰面积, 见表 1。



注：A 为给药 24 h 后样品，B 为对照组，C 为空白组，D 为厌氧培养液，E 为溶剂空白，F 为萝卜苷+灭活肠菌培养液，G 为芥子碱硫氰酸盐+灭活肠菌培养液，H 为芥子酸。

1. 萝卜苷 2. 芥子碱硫氰酸盐 3. 萝卜苷代谢产物 4. 芥子酸

图 1 各成分 HPLC 色谱图



2. 萝卜苷 3. 萝卜苷代谢产物 4. 芥子碱硫氰酸盐 6. 芥子酸

图 2 提取液不同孵育时间 HPLC 叠加图

表 1 不同肠道菌群孵育时间特征色谱峰的峰面积

编号	保留时间/min	0 h	0.25 h	0.5 h	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	8 h	10 h	12 h	24 h	变化趋势
1	3.24	4 219.90	4 141.55	3 991.95	3 988.95	3 996.30	3 964.15	3 815.15	3 433.00	2 931.75	1 893.45	1 145.35	459.45	下降
2	4.54	1 748.00	1 721.40	1 767.35	1 693.80	1 666.20	1 660.85	1 596.45	1 494.05	1 214.35	701.40	396.00	161.65	下降
3	16.34	0	35.65	68.95	69.20	293.90	494.35	1 263.35	2 234.35	2 913.95	6 218.00	6 628.95	7 165.55	升高
4	21.34	985.15	935.00	786.95	684.45	482.40	269.10	148.80	49.35	23.15	6.85	0	0	下降
5	24.13	505.10	178.75	123.55	85.35	55.20	59.05	37.70	33.60	36.95	35.25	31.20	0	下降
6	28.78	399.60	899.10	1 226.30	1 648.30	2 195.70	2 678.50	2 966.45	3 030.15	3 213.30	3 411.50	3 370.85	3 566.80	升高
7	30.09	430.05	312.80	243.85	187.60	122.75	69.35	19.00	7.70	31.90	22.80	6.75	0	下降
8	38.61	0	0	0	43.22	681.39	815.57	850.96	845.23	841.98	911.97	933.02	958.71	升高
9	38.96	1 472.55	1 468.75	1 191.20	1 014.30	641.80	474.55	351.45	230.25	166.10	113.65	88.90	0	下降

1、2号峰(萝卜苷)在大鼠肠道菌群作用下随着共孵育时间延长,两者峰面积均减小,前8h程度缓慢,在8h时分别为0h的69.97%、68.47%,10h时分别为0h的32.39%、28.81%;随着1、2号峰峰面积的降低,3号峰峰面积逐渐升高,24h时达到最大值。由此推测,1、2号峰在大鼠肠道菌群作用下发生降解,代谢产物峰为3号峰。

在326nm波长处,芥子碱硫氰酸盐(4号峰)随着共孵育时间延长,其峰面积降低,在8h时仅为0h的3.14%;保留时间为28min的6号峰(芥子酸)峰面积逐渐升高。由此推测,芥子碱硫氰酸盐在大鼠肠道菌群作用下的代谢产物为6号峰,并通过对照品比对确定为芥子酸。

炒莱菔子中本身含有芥子酸,故在0h时就检测到6号峰;10h后4号峰(芥子碱硫氰酸盐)被代谢完全,峰面积为0,但6号峰峰面积仍在增加,提示除芥子碱硫氰酸盐外,还有其他成分在大鼠肠道菌群下也会被代谢为6号峰;随着孵育时间延长,5、7、9号峰峰面积也在逐渐减小。查阅文献[25]发现,炒莱菔子除了含芥子碱硫氰酸盐外,还含芥子酸葡萄糖苷、(Z)-β-D-(3-芥子酰基)呋喃果糖基-α-D-葡萄糖苷、(E)-β-D-(3-芥子酰基)呋喃果糖基-α-D-葡萄糖苷,它们会断裂其葡萄糖苷键得到芥子酸。

3.2 转化曲线 萝卜苷及其代谢产物的生成曲线见图3,芥子碱硫氰酸盐及芥子酸衍生物、芥子酸生成曲线见图4。

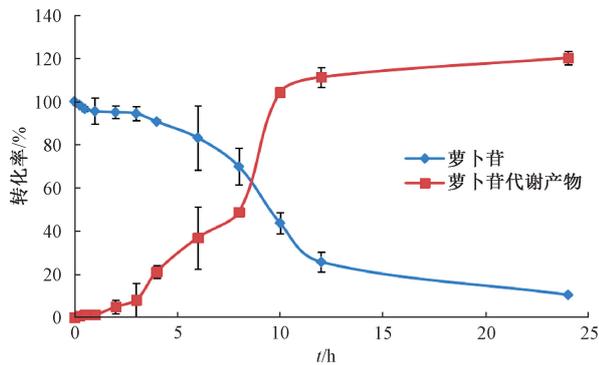


图3 萝卜苷降解及代谢物生成曲线

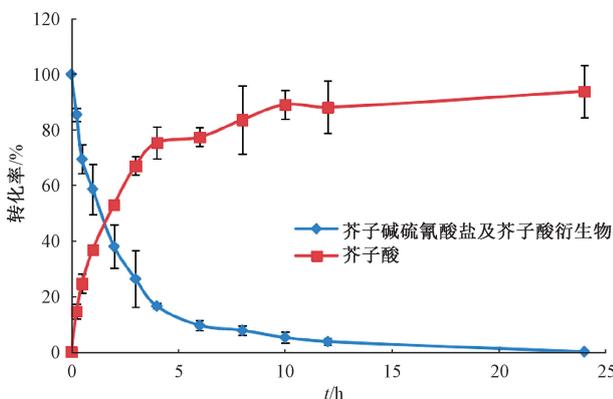


图4 芥子碱硫氰酸盐降解及代谢物生成曲线

在0、0.25、0.5、1、2h时,萝卜苷降解率分别为0、1.5%、2.5%、4.0%、4.5%,降解速率较慢;在3、4、6、8、10h时,其降解率分别为5.2%、8.1%、18.3%、

30.0%、68.8%,即在肠菌作用下被大量降解,8~10h降解速率最快;在10h后,其降解曲线趋于平缓。

在0、0.25、0.5、1、2、3、4、6h时,萝卜苷代谢物生成率分别为0、0.90%、1.13%、1.23%、5.10%、8.79%、18.76%、26.49%,上升速率较慢;在8、10h时,其生成率分别为50.00%、111.50%,即大量产生;在10h后,其生成率趋于平缓。

在0、0.25、0.5、1、2、3、4、6h时,芥子碱硫氰酸盐及其他成分降解率分别为0、15.8%、32.5%、43.52%、62.87%、75.27%、84.31%、90.98%;在12h时,其降解率为96.31%,几乎被代谢完全。

在0、0.25、0.5、1、2、3、4h时,芥子酸生成率分别为0、14.12%、23.36%、35.28%、50.66%、67.34%、70.76%;在12h时,其生成率为86.21%;12h后,其生成率仍在升高,但程度缓慢。

3.3 肠道菌群转化动力学研究 萝卜苷零级方程、一级方程、非线性动力学方程分别为 $Y = -0.0112X + 0.258$  ( $R^2 = 0.8521$ )、 $\ln Y = -0.0967X - 1.2742$  ( $R^2 = 0.9677$ )、 $Y = 0.2436 + 0.0136X - 0.0040X^2 + 0.0001X^3$  ( $R^2 = 0.9860$ ),即其体外代谢过程更符合非线性动力学方程;芥子碱硫氰酸盐三者分别为 $Y = -0.0048X + 0.0308$  ( $R^2 = 0.8609$ )、 $\ln Y = -0.6430X - 3.0422$  ( $R^2 = 0.9796$ )、 $Y = 0.03672 - 0.01286X + 0.00147X^2 - 0.00005X^3$  ( $R^2 = 0.9970$ ),即其体外代谢过程也符合非线性动力学方程。

#### 4 讨论

本实验通过文献查阅及对照品比对,确定芥子碱硫氰酸盐的代谢产物为芥子酸,对萝卜苷的代谢产物没有进行定性鉴别及纯化制备。由表1可知,除峰3(16.34min)和峰6(28.78min)外,峰8(38.61min)峰面积在逐渐增加,紫外吸收在326nm波长处,推测为芥子碱硫氰酸盐除芥子酸外的其他转化。

萝卜苷在甲醇溶液中时,会发生转化,由原来的1个峰(4.54min)转化为2个峰,保留时间分别为3.24、4.54min,而在乙腈中并未有此转化发生。肉苁蓉中松果菊苷也有类似现象发生,松果菊苷在甲醇中的转化途径主要包括糖苷键水解、甲基化和顺式/反式异构化<sup>[26]</sup>。

今后,本实验将采用离体代谢方法证明炒莱菔子中的萝卜苷、芥子碱硫氰酸盐及其他葡萄糖苷类化合物会在肠菌作用下发生生物转化生成相应的代谢产物,并且分析其代谢转化规律。

#### 参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020年版一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 284.  
[2] Li Y L, Yang W Q, Zhu Q J, et al. Protective effects on vascular endothelial cell in N'-nitro-L-arginine (L-NNA)-induced hypertensive rats from the combination of effective components of *Uncaria rhynchophylla* and *Semen Raphani*[J]. *Bioscience Trends*, 2015, 9(4): 237-244.

- [ 3 ] 杨金果,李运伦,周洪雷. 钩藤和莱菔子生物碱抗高血压血管内皮细胞损伤效应[J]. 中成药, 2013, 35(5): 889-893.
- [ 4 ] 张国侠,盖国忠. 莱菔子总生物碱对 Apo E 基因敲除小鼠血脂的影响[J]. 中国老年学杂志, 2010, 30(6): 844-845.
- [ 5 ] Zhang H Q, Chen S Y, Wang A S, et al. Sulforaphane induces adipocyte browning and promotes glucose and lipid utilization [J]. *Mol Nutr Food Res*, 2016, 60(10): 2185-2197.
- [ 6 ] 谭 鹏,薛 玲,吕文海,等. 莱菔子不同炮制品对呼吸系统作用的实验研究[J]. 山东中医杂志, 2005, 24(5): 300-302.
- [ 7 ] Egner P A, Chen J G, Wang J B, et al. Bioavailability of sulforaphane from two broccoli sprout beverages: Results of a short term, cross-over clinical trial in Qidong, China[J]. *Cancer Prev Res (Phila)*, 2011, 4(3): 384-395.
- [ 8 ] Jeries J, Ahmad Y, Salwa R, et al. Identification of a new antibacterial sulfur compound from *Raphanus Sativus* seeds[J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2016, 2016(61): 9271285.
- [ 9 ] Royston K J, Tollefsbol T O. The epigenetic impact of cruciferous vegetables on cancer prevention[J]. *Curr Pharmacol Rep*, 2015, 1(1): 46-51.
- [ 10 ] 唐健元,张 磊,彭 成,等. 莱菔子行气消食的机制研究[J]. 中国中西医结合消化杂志, 2003, 11(5): 287-289.
- [ 11 ] 李 洁,谭正林,王清章,等. 正交旋转设计优化萝卜籽硫甙提取工艺[J]. 食品科学, 2008, 29(12): 264-269.
- [ 12 ] Zhang X, Liu H B, Jia J J, et al. Two novel sulfur compounds from the seeds of *Raphanus sativus* L[J]. *J Asian Nat Prod Res*, 2010, 12(2): 113-118.
- [ 13 ] 蒋海强,丁 臻,周洪雷. 高效液相色谱法测定莱菔子总碱中芥子碱硫氰酸盐含量[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(17): 78-80.
- [ 14 ] 张 杰,邓 旭,邵承斌,等. 响应面试验优化超临界 CO<sub>2</sub> 萃取胭脂萝卜籽油工艺及其脂肪酸组成分析[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 46-50.
- [ 15 ] 金洪光,李玉全,凌云,等. 莱菔子化学成分的分离与鉴定[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 200-206.
- [ 16 ] 朱海霞,张小芳,高 洋,等. 萝卜籽粕中黄酮的提取及纯化工艺研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 159-162.
- [ 17 ] 杨 萌. 莱菔子多糖的分离纯化、生化鉴定及功能性质的初步研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [ 18 ] 赵功玲,梁新红,郭延成,等. 萝卜籽粕蛋白质的组成及功能性质[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 117-122.
- [ 19 ] 向宇楠,王小艳,高 洁,等. 口服药物代谢与肠道菌群生态平衡的相互作用[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(1): 155-159.
- [ 20 ] 乔立君,郑 征,马文慧,等. 多不饱和脂肪酸对大鼠肠道菌群及脂肪代谢相关基因的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(17): 231-235.
- [ 21 ] 房 卉,李孟璇,李海波,等. 大鼠肠道菌群对短小蛇根草苷体外代谢转化研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(10): 1921-1925.
- [ 22 ] 覃小丽,孙慧园,杨 武,等. UPLC-ESI-Q-TOF-MS/MS 分析槲皮苷在大鼠肠道菌群中的代谢[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(2): 357-362.
- [ 23 ] 王鹏旭,赵丽珠,齐 文,等. 异去氢钩藤碱在人和大鼠肠道菌群中代谢产物的鉴定[J]. 沈阳药科大学学报, 2016, 33(5): 364-368; 373.
- [ 24 ] Chen Y, Li Q, Zhao T, et al. Biotransformation and metabolism of three mulberry anthocyanin monomers by rat gut microflora [J]. *Food Chem*, 2017, 237(19): 887-894.
- [ 25 ] Ferreres F, Fernandes F, Sousa C, et al. Metabolic and bioactivity insights into *Brassica oleracea* var. *acephala* [J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(19): 8884-8892.
- [ 26 ] 颜 昱,刘同祥,毕 丹,等. 肉苁蓉主要活性成分松果菊苷在甲醇中转化路径的阐明[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(11): 2321-2325.