

doi: 10.3969/j. issn. 2095 - 0780. 2013. 04. 010

## 龙须菜中硫琼脂的体外抗氧化评价及降血糖、降血脂活性的动物试验

刘秋凤<sup>1,2</sup>, 吴成业<sup>2</sup>, 苏永昌<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省水产研究所, 福建 厦门 361013)

**摘要:** 为探讨硫琼脂降血糖、降血脂活性及其体外抗氧化作用, 文章通过对超氧阴离子( $\cdot\text{O}^{2-}$ )、羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )及1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)清除效果的研究评价了硫琼脂的体外抗氧化活性; 建立四氯嘧啶高血糖小鼠模型和高脂饲料高血脂大鼠模型, 给予不同剂量的硫琼脂设计动物试验, 以测定的小鼠空腹血糖值、大鼠血脂水平[ 胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C) ]以及血清、肝脏的生化指标值研究硫琼脂的降血糖、降血脂活性。结果表明, 硫琼脂具有良好的抗氧化作用, 尤其对 $\cdot\text{OH}$ 的清除效果最好; 能显著降低高血糖小鼠的空腹血糖值及高血脂大鼠的TC、TG、LDL-C浓度, 提高HDL-C浓度, 具有降血糖、降血脂活性。

**关键词:** 硫琼脂; 抗氧化活性; 高血糖症; 高血脂症

中图分类号: R 285.5

文献标志码: A

文章编号: 2095 - 0780 - (2013)03 - 0057 - 10

## Study on antioxidation, animal experiments of hyperglycemia and hyperlipemia of agarpectin from *Gracilaria lemaneiformis*

LIU Qiufeng<sup>1,2</sup>, WU Chengye<sup>2</sup>, SU Yongchang<sup>2</sup>

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. Fisheries Research Institute of Fujian, Xiamen 361013, China)

**Abstract:** This paper aims at investigating the role agarpectin plays in hyperglycemia, hyperlipemia and antioxidation. We studied the cleaning effect of  $\cdot\text{O}^{2-}$ ,  $\cdot\text{OH}$  and DPPH, based on which vitro antioxidation was assessed. We also researched hyperglycemia and hyperlipidemia by making use of alloxan to build diabetic model, and hyperlipidemia fodder to build hyperlipidemia model, and conducted animal experiments with different doses of agarpectin so as to assay fasting blood glucose, rat's blood fats (TC, TG, HDL-C and LDL-C), as well as biochemical indexes of serums and livers. The study of vitro antioxidation reveals that agarpectin has antioxidant effect, functioning especially well on scavenging  $\cdot\text{OH}$ . Animal experiments show that agarpectin can significantly reduce fasting plasma glucose value in hyperglycemia mice, and decrease the content of TC, TG and LDL-C contained in hyperlipidemia rats, which indicates that agarpectin really has an effect on hyperglycemia and hyperlipemia.

**Key words:** agarpectin; antioxidant ability; hyperglycemia; hyperlipemia

硫琼脂是琼脂的组成成分之一, 是一种硫酸根和酸性多糖含量较高的硫酸酯多糖。由于多糖硫酸酯的生物活性与硫酸根的含量密切相关<sup>[1]</sup>, 这使得硫琼脂有降血糖、降血脂、抗氧化等多种生物活

性。近年来, 学术界对海藻多糖的研究日趋活跃, 研制出各种天然海藻多糖功能食品和生物药源, 并在临幊上获得广泛应用, 促使多糖生物资源的开发利用成为生物化学、生命科学、天然药物的研究热

收稿日期: 2012-12-13; 修回日期: 2013-01-22

资助项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201205022-4)

作者简介: 刘秋凤(1987-), 女, 硕士研究生, 从事水产资源综合利用研究。E-mail: qfeng.liu@163.com

通信作者: 吴成业(1953-), 男, 研究员, 从事水产品保鲜、加工、综合利用及食品安全研究。E-mail: wcy@fjscs.ac.cn

点<sup>[2]</sup>。刘力<sup>[3]</sup>研究了石花菜(*Gelidium amansii*)硫琼脂的体内外抗凝血活性,发现硫琼脂在体内和体外都具有抗凝血活性,而且剂量与抗凝血时间呈正相关;赵永强<sup>[4]</sup>对龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)硫琼脂寡糖的体外抗氧化进行了评价,发现硫琼脂寡糖具有抗氧化活性,而且活力高于琼脂寡糖;KIHO等<sup>[5]</sup>、谌素华等<sup>[6]</sup>、王兵等<sup>[7]</sup>研究发现硫酸酯多糖具有降血脂、降血糖等作用,能加速肝脏的代谢,明显降低四氧嘧啶糖尿病大鼠血液及肝组织中过高的丙二醛(MDA)。

目前,国内对龙须菜中硫琼脂的研究并不多,特别是在提取琼脂糖后的副产物中,虽含有大量的硫琼脂,但常被当作废弃物丢弃,不仅造成资源浪费,还污染了环境。为进一步探讨龙须菜中的硫琼脂的生理活性,文章对硫琼脂的降血糖、降血脂活性进行了研究,并对其体外抗氧化作用做了验证,以为龙须菜提取琼脂糖后的副产物的综合开发利用提供试验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料、试剂及仪器

龙须菜购于福建省连江海域,硫琼脂由笔者实验室制备;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)和四氧嘧啶(Sigma公司出品);瑞易宁格列吡嗪控释片(Pfizer Pharmaceuticals LLC公司出品);舒降之辛伐他汀(杭州默沙东制药有限公司出品);葡萄糖(桂林智强食品开发有限公司出品)。血清胰岛素试剂盒、胆固醇(TC)试剂盒、甘油三酯(TG)试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)试剂盒、超氧化物歧化酶(T-SOD)试剂盒、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)试剂盒等试剂盒(南京建成生物工程研究所出品)。

SPS级昆明(KM)小鼠(雄性,20~25 g)、Wistar大鼠(雄性,150~200 g)由厦门大学动物实验中心提供;高脂饲料(10%猪油、10%蛋黄粉、1%胆固醇、0.3%胆盐、78.7%基础饲料)(苏州双狮实验动物饲料科技有限公司出品)。

BS124S型分析天平[赛多利斯科学仪器(北京)有限公司出品];752PC紫外可见光分光光度计(上海光谱仪器有限公司出品);SSW-600-2S型电热恒温水槽(上海博远实业有限公司医疗设备厂出品);XW-80A旋涡混合器(上海康华生化仪器制造有限公

司出品);稳豪型One Touch Ultra血糖仪、血糖试纸[强生(上海)医疗器材有限公司出品]。

### 1.2 硫琼脂的制备

硫琼脂的制备参照刘秋凤等<sup>[8]</sup>的方法,其制备的工艺条件为w(龙须菜琼脂):w(水)=1:20、EDTA-Na<sub>2</sub>加入量为5.90 g·L<sup>-1</sup>、洗脱时间2.2 h、洗脱温度为53℃。

### 1.3 硫琼脂体外抗氧化活性研究的方法

1.3.1 硫琼脂体外清除超氧阴离子( $\cdot\text{O}_2^-$ )能力的试验方法 硫琼脂体外清除 $\cdot\text{O}_2^-$ 能力的测定参照曾小玲<sup>[9]</sup>的方法。吸取浓度为0.1 mol·L<sup>-1</sup>的磷酸盐缓冲液(pH为8.04)3.5 mL于15 mL试管中,加入蒸馏水1 mL,10 mmol·L<sup>-1</sup>邻苯三酚溶液0.5 mL,立即计时并迅速混匀,以10 mmol·L<sup>-1</sup>盐酸代替邻苯三酚作为空白对照,在波长325 nm处测定吸光值(OD),30 s后开始记录数据(A<sub>1</sub>),每隔30 s记录一次直至3.5 min(A<sub>2</sub>),计算邻苯三酚自氧化速率。吸取不同质量浓度(2 mg·mL<sup>-1</sup>、4 mg·mL<sup>-1</sup>、6 mg·mL<sup>-1</sup>、8 mg·mL<sup>-1</sup>、10 mg·mL<sup>-1</sup>、12 mg·mL<sup>-1</sup>、14 mg·mL<sup>-1</sup>、16 mg·mL<sup>-1</sup>、18 mg·mL<sup>-1</sup>和20 mg·mL<sup>-1</sup>)硫琼脂溶液1 mL,按照上述方法测定加样后溶液的OD,并计算加样后邻苯三酚自氧化速率。

$$SO_0 = \frac{A_2 - A_1}{3}; C_1 = \frac{SO_0 - SO_1}{SO_0} \times 100\%$$

式中C<sub>1</sub>为硫琼脂对 $\cdot\text{O}_2^-$ 的清除率(%);A<sub>2</sub>为第3.5分钟的OD;A<sub>1</sub>为第0.5分钟的OD;SO<sub>0</sub>为邻苯三酚自氧化速率;SO<sub>1</sub>为加入硫琼脂后邻苯三酚自氧化速率。

1.3.2 硫琼脂体外清除羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )能力的试验方法 硫琼脂体外清除 $\cdot\text{OH}$ 能力的测定参照贾彦明和闫伟红<sup>[10]</sup>的方法。分别取9 mmol·L<sup>-1</sup>硫酸亚铁(FeSO<sub>4</sub>)、8.8 mmol·L<sup>-1</sup>过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)、9 mmol·L<sup>-1</sup>水杨酸-无水乙醇各0.5 mL于15 mL试管中,加入不同质量浓度(0.2 mg·mL<sup>-1</sup>、0.4 mg·mL<sup>-1</sup>、0.6 mg·mL<sup>-1</sup>、0.8 mg·mL<sup>-1</sup>、1.0 mg·mL<sup>-1</sup>、1.2 mg·mL<sup>-1</sup>、1.4 mg·mL<sup>-1</sup>、1.6 mg·mL<sup>-1</sup>、1.8 mg·mL<sup>-1</sup>和2.0 mg·mL<sup>-1</sup>)硫琼脂溶液1 mL,混匀,在37℃恒温水浴0.5 h,在波长510 nm处测定OD,记为A。以蒸馏水代替H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,测OD记为A<sub>0</sub>;以蒸馏水代替硫琼脂溶液,测OD记为A<sub>空</sub>。

$$C_2 = \frac{A_{\text{空}} - (A - A_0)}{A_{\text{空}}} \times 100\%$$

式中  $C_2$  为硫琼脂对·OH 的清除率(%)； $A$  为加入硫琼脂溶液后的 OD； $A_{\text{空}}$  为空白管的 OD； $A_0$  为未加  $\text{H}_2\text{O}_2$  硫琼脂溶液本底的 OD；

### 1.3.3 硫琼脂体外清除 DPPH 能力的试验方法

硫琼脂体外清除 DPPH 能力的测定参照 SHAMA 和 BHAT<sup>[11]</sup>的方法。分别吸取不同质量浓度( $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $4 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $6 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $8 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $12 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $14 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $16 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $18 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ )硫琼脂溶液 $1 \text{ mL}$ 于 $15 \text{ mL}$ 试管中，加入以无水乙醇配制的 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  DPPH $4 \text{ mL}$ ，混匀，室温下静置 $30 \text{ min}$ ，在波长 $517 \text{ nm}$ 测定 OD，记为 $A$ 。以无水乙醇代替 DPPH，测 OD 记为 $A_0$ ；以蒸馏水代替硫琼脂溶液，测 OD 记为 $A_{\text{空}}$ 。

$$C_3 = \frac{A_{\text{空}} - (A - A_0)}{A_{\text{空}}} \times 100\%$$

式中  $C_3$  为硫琼脂对 DPPH 的清除率(%)； $A$  为加入硫琼脂溶液后的 OD； $A_{\text{空}}$  为空白管的 OD； $A_0$  为未加 DPPH 硫琼脂溶液本底的 OD。

## 1.4 硫琼脂降血糖活性的试验方法

1.4.1 高血糖模型的建立<sup>[12-13]</sup> 小鼠饲喂普通饲料，适应 $3 \text{ d}$ 后禁食不禁水 $12 \text{ h}$ 。随机分组，其中一组为正常组(注射生理盐水 $\cdot \text{kg}^{-1}$ 体质量)，其余称量后腹腔注射 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (体质量)四氧嘧啶(四氧嘧啶使用前用生理盐水新鲜配制成 $2\%$ 的溶液，存放于棕色瓶中，不超过 $2 \text{ h}$ )。 $3 \text{ d}$ 后尾尖采血(禁食 $5 \text{ h}$ 后)，用血糖仪测空腹血糖值，血糖值大于 $11.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的视为造模成功。

1.4.2 试验分组 将造模成功的小鼠按照空腹血糖值进行分组(表 1)，组间的血糖值之差不超过

$1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，体质量无显著性差异。每组 $10$ 只小鼠。试验周期为 $28 \text{ d}$ ，试验期间自由摄食和饮水。每周称量 $1$ 次体质量，并记录数据。

1.4.3 空腹血糖值测定<sup>[14]</sup> 小鼠禁食 $5 \text{ h}$ 后尾尖采血，用血糖仪测空腹血糖值。每周测量 $1$ 次空腹血糖值。

1.4.4 负荷糖耐量测定<sup>[14]</sup> 试验时小鼠先禁食 $5 \text{ h}$ ，灌胃相应剂量的药剂， $20 \text{ min}$ 后灌胃 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (体质量)葡萄糖，然后分别在第 $0$ 、第 $0.5$ 、第 $2$ 小时尾部采血，测定血糖值。

1.4.5 脏器指数测定 试验结束后小鼠称质量，取血后开腹取肝脏、脾脏和胸腺，用电子天平称质量，计算肝脏指数、脾脏指数和胸腺指数。

1.4.6 生化指标测定 眼球取血，检测糖化血清蛋白(GSP)、血清胰岛素、肝糖原。生化指标均由试剂盒检测。

## 1.5 硫琼脂降血脂活性的试验方法

1.5.1 高血脂模型的建立<sup>[15-16]</sup> 大鼠以普通饲料适应性喂养 $5 \text{ d}$ 后称体质量并根据体质量进行随机分组，包括高脂模型大鼠 $5$ 组和正常对照组 $2$ 组。将 $5$ 组高脂模型大鼠连续饲喂高脂饲料 $2$ 周进行高脂模型造模试验， $2$ 周后尾部取血，检测血清 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 等 $4$ 项指标，以 $c(\text{TC}) > 1.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $c(\text{TG}) > 1.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为造模成功的标志。正常对照组饲喂正常饲料 $2$ 周，随机选取 $6$ 只正常对照大鼠，尾部取血，检测血清 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 等 $4$ 项指标。

1.5.2 试验动物分组 将造模成功的大鼠按照 TC 值进行分组(表 2)，每组 $10$ 只大鼠，组间的 $c(\text{TC})$ 之差不超过 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，体质量无显著性差异。连续给药 $4$ 周，给药期间大鼠自由饮水和摄食。每周称量 $1$ 次体质量，并记录数据。

表 1 降血糖动物试验设计

Tab. 1 Design of hypoglycemic animal experiment

组别 group	药品 pharmaceutical	剂量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ dose
高血糖模型组 diabetic model (DM)	蒸馏水	-
药物对照组 drug control (DC)	格列吡嗪	5
正常对照组 normal control (NC)	蒸馏水	-
硫琼脂低剂量组 agaropectin low-dose (SPS-L)	硫琼脂	200
硫琼脂中剂量组 agaropectin mediou-dose (SPS-M)	硫琼脂	500
硫琼脂高剂量组 agaropectin high-dose (SPS-H)	硫琼脂	800

表2 降血脂动物试验设计

Tab. 2 Design of hypolipidemic animal experiment

组别 group	喂养饲料 feed	灌胃药物 pharmaceutical	剂量/g·kg <sup>-1</sup> dose
正常对照组 normal control (NC)	普通饲料	蒸馏水	-
正常硫琼脂组 normal control-agarpectin (NC-S)	普通饲料	硫琼脂	0.80
高脂模型对照组 hyperlipidemia model (HL)	高脂饲料	蒸馏水	-
药物对照组 drug control (DC)	高脂饲料	辛伐他汀	0.01
硫琼脂低剂量组 agarpectin low-dose (SPS-L)	高脂饲料	硫琼脂	0.20
硫琼脂中剂量组 agarpectin mediudose (SPS-M)	高脂饲料	硫琼脂	0.50
硫琼脂高剂量组 agarpectin high-dose (SPS-H)	高脂饲料	硫琼脂	0.80

1.5.3 血清指标测量<sup>[14]</sup> 末次给药后禁食16 h, 摘眼球取血, 血样室温静置待分层后取血清, 采用试剂盒测定血清中TC、TG、HDL-C、LDL-C、T-SOD、GSH-Px、丙二醛(MDA)和一氧化氮(NO)等8项指标。

1.5.4 肝脏指标测量 试验结束后脊椎脱臼处死动物, 解剖取肝脏组织, 用生理盐水洗涤残存的血迹, 4℃冰浴中充分研磨, 肝脏组织于8 000 r·min<sup>-1</sup>、4℃离心10 min, 用试剂盒测定肝脏组织中HDL-C、LDL-C、T-SOD、GSH-PX、MDA和NO等6项指标。

## 1.6 统计方法

采用SPSS 17.0数据分析软件进行分析, 数据均以均数±标准偏差( $\bar{X} \pm SD$ )表示, 组内、组间(0 d与28 d)比较均采用方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫琼脂体外抗氧化研究

2.1.1 硫琼脂对·O<sup>2-</sup>的清除率 2~20 mg·mL<sup>-1</sup>范围内随着硫琼脂质量浓度的增加, 硫琼脂对·O<sup>2-</sup>清除率呈上升趋势(图1), 且不同质量浓度硫琼脂对·O<sup>2-</sup>的清除率有极显著差异( $P < 0.01$ )。硫琼脂质量浓度为19 mg·mL<sup>-1</sup>时其对·O<sup>2-</sup>的清除率约为50%, 即硫琼脂清除·O<sup>2-</sup>的半抑制质量浓度( $IC_{50}$ )为19 mg·mL<sup>-1</sup>。赵永强<sup>[4]</sup>以维生素C(V<sub>c</sub>)作为阳性对照, V<sub>c</sub>清除·O<sup>2-</sup>的 $IC_{50}$ 约为0.25 mg·mL<sup>-1</sup>, 与之比较, 硫琼脂对·O<sup>2-</sup>的清除能力较弱。

2.1.2 硫琼脂对·OH的清除率 0.6~6.0 mg·mL<sup>-1</sup>范围内硫琼脂对·OH的清除率随着硫琼脂质量浓度的增加而增大(图2), 质量浓度为3.6 mg·mL<sup>-1</sup>时硫琼脂对·OH的清除率已接近100%, 随着

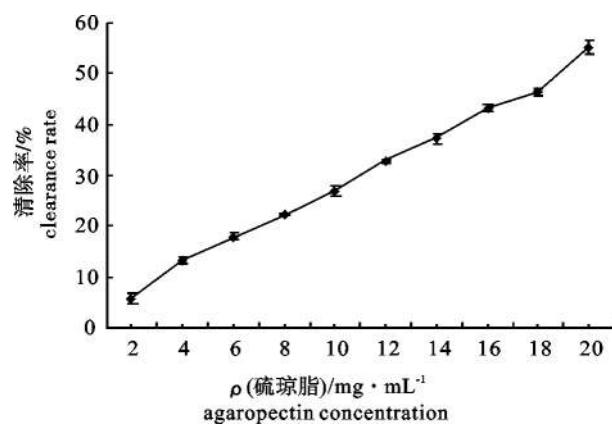


图1 硫琼脂对超氧阳离子的清除作用  
Fig. 1 Effect of agarpectin on scavenging superoxide anion radicals

浓度继续增加, 清除率不再升高, 硫琼脂清除·OH的 $IC_{50}$ 约为1.0 mg·mL<sup>-1</sup>。0.6~3.0 mg·mL<sup>-1</sup>范围内硫琼脂清除·OH的能力差异极显著( $P < 0.01$ ), 而3.0 mg·mL<sup>-1</sup>的硫琼脂与3.6 mg·mL<sup>-1</sup>的比较, 清除率无显著性差异( $P > 0.05$ )。与V<sub>c</sub>清除·OH能力比较, V<sub>c</sub>清除·OH的 $IC_{50}$ 约为1.3 mg·mL<sup>-1</sup><sup>[5,17]</sup>, 而硫琼脂对·OH清除率达到50%的质量浓度低于V<sub>c</sub>的质量浓度, 这说明硫琼脂对·OH清除能力极强。

2.1.3 硫琼脂对DPPH的清除率 2~20 mg·mL<sup>-1</sup>范围内随着硫琼脂质量浓度的增加, 硫琼脂对DPPH的清除率也随之升高(图3), 且各浓度间的硫琼脂清除DPPH的能力具有极显著差异( $P < 0.01$ )。质量浓度为17 mg·mL<sup>-1</sup>时硫琼脂对DPPH的清除率为50%, 即硫琼脂清除DPPH的 $IC_{50}$ 为17 mg·mL<sup>-1</sup>。与V<sub>c</sub>对DPPH清除率达到50%的质量浓度5.0 mg·mL<sup>-1</sup><sup>[4,18]</sup>比较, 硫琼脂对DPPH的

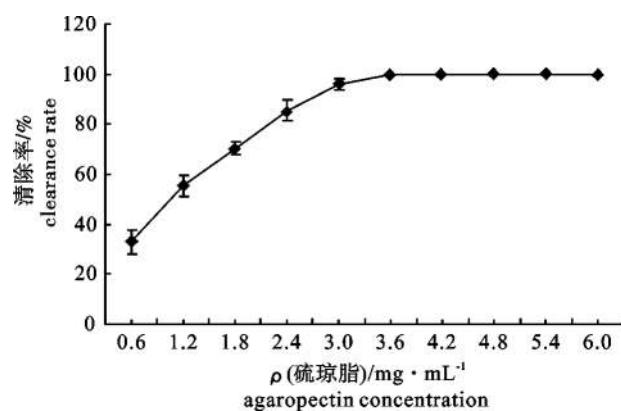


图2 硫琼脂对羟基自由基的清除作用

Fig. 2 Effect of agaropectin on scavenging hydroxyl free radicals

清除能力较弱。

## 2.2 硫琼脂降血糖活性的研究

2.2.1 硫琼脂对高血糖小鼠体质量的影响 造模后(0 d)各组小鼠的体质量较正常对照组均减少, 具有极显著性( $P < 0.05$ ), 符合糖尿病体质量减少的特征; 除正常对照组外, 造模分组后各组间小鼠的体质量与高血糖模型组比较无显著性差异( $P > 0.05$ )(表3)。从造模分组(0 d)到第28天, 试验各组小鼠的体质量都有所增加( $P < 0.01$ ), 其中DM组增重了23.2%, DC、SPS-L、SPS-M和SPS-H组较DM组分别增重了9.5%、6.7%、9.2%和10.3%, SPS-H组与DM组的体质量具有显著性差异( $P < 0.05$ )。由此说明硫琼脂对糖尿病小鼠体质量减少具有一定缓解的作用, 而且随着剂量的增加, 效果越明显。

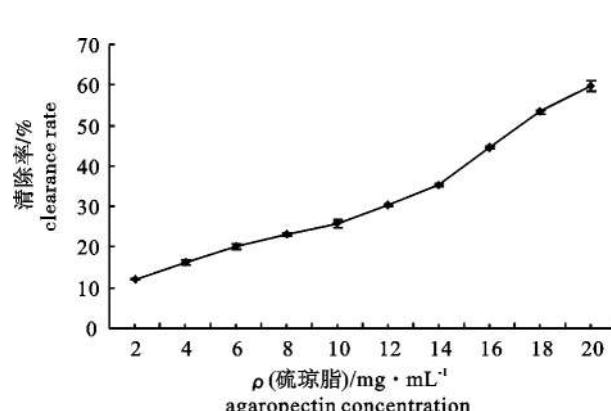


图3 硫琼脂对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼的清除作用

Fig. 3 Effect of agaropectin on scavenging DPPH

### 2.2.2 硫琼脂对高血糖小鼠空腹血糖值的影响

数据表明, 造模后各组小鼠的空腹血糖值与正常对照组相比, 具有极显著的升高( $P < 0.01$ ), 说明造模成功。将造模成功的小鼠进行分组, 分组后各组的空腹血糖值无显著性差异( $P > 0.05$ ) (表4)。经28 d给药后DC、SPS-L、SPS-M和SPS-H组血糖值均有所下降, 但仍未恢复到正常水平, 而DM组持续升高, 差异显著( $P < 0.05$ ); DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H组较DM组具有极显著差异( $P < 0.01$ ), 与NC组比较差异极显著( $P < 0.01$ ); 各组内, DC组和SPS-H组给药前后对比具有显著差异( $P < 0.01$ ), SPS-M组具有极显著差异( $P < 0.05$ )。可见硫琼脂对糖尿病小鼠降血糖具有一定的作用, 而且随着剂量的增加, 效果越明显。

表3 硫琼脂对小鼠体质量的影响( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 3 Effect of agaropectin on weight in mice

组别 group	体质量/g body weight					增加量/g weight growth	增重率/% rate of weight growth
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
高血糖模型组(DM)	24.6 ± 2.0 **	28.3 ± 2.9 **	29.6 ± 3.5 **	31.1 ± 3.5 **	30.3 ± 3.7 **	5.7 <sup>ab</sup>	23.2
药物对照组(DC)	25.1 ± 1.8 **	29.1 ± 2.4 **	31.6 ± 2.9 **	32.8 ± 3.7 **	33.3 ± 4.0 **	8.2 <sup>ab</sup>	32.7
正常对照组(NC)	36.9 ± 1.9 ##	40.9 ± 2.9 ##	43.7 ± 3.1 ##	45.6 ± 3.1 ##	46.2 ± 3.0 ##	9.3 <sup>ab</sup>	25.2
低剂量组(SPS-L)	25.4 ± 1.9 **	28.9 ± 2.9 **	31.3 ± 3.7 **	31.8 ± 3.8 **	33.0 ± 4.2 **	7.6 <sup>ab</sup>	29.9
中剂量组(SPS-M)	25.1 ± 2.2 **	29.0 ± 3.2 **	30.7 ± 3.9 **	32.7 ± 4.7 **	33.2 ± 5.2 **	8.1 <sup>ab</sup>	32.3
高剂量组(SPS-H)	26.0 ± 2.7 **	29.1 ± 3.1 **	32.5 ± 4.1 **	33.7 ± 5.2 **	34.7 ± 5.8 ** #	8.7 <sup>ab</sup>	33.5

注: 与NC组比较, \* . 差异显著( $P < 0.05$ ), \*\* . 差异极显著( $P < 0.01$ ); 与DM组比较, # . 差异显著( $P < 0.05$ ), ## . 差异极显著( $P < 0.01$ ); 各组内比较, aa. 差异显著( $P < 0.05$ ), ab. 差异极显著( $P < 0.01$ ); 后表同此。

Note: Compared with NC group, \* . significant difference ( $P < 0.05$ ), \*\* . very significant difference ( $P < 0.01$ ); Compared with DM group, # . significant difference ( $P < 0.05$ ), ## . very significant difference ( $P < 0.01$ ); Compare between all groups, aa. significant difference ( $P < 0.05$ ), ab. very significant difference ( $P < 0.01$ ); the same case in the following tables.

表4 硫琼脂对小鼠降血糖效果的影响( $\bar{X} \pm SD$ )  
Tab. 4 Effect of agarpectin on lowering blood-glucose in mice mmol·L<sup>-1</sup>

组别 group	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d	变化值 difference value
高血糖模型组(DM)	20.3 ± 5.2 **	22.2 ± 4.3 **	23.5 ± 5.1 **	25.6 ± 2.2 **	26.5 ± 4.0 **	6.2 <sup>ab</sup>
药物对照组(DC)	20.2 ± 4.6 **	17.3 ± 3.6 ** #	15.8 ± 4.5 ** ##	13.5 ± 3.1 ** ##	11.7 ± 5.3 ** ##	8.5 <sup>aa</sup>
正常对照组(NC)	6.7 ± 1.2 ##	8.0 ± 1.3 ##	7.3 ± 1.1 ##	8.0 ± 1.5 ##	7.0 ± 1.4 ##	0.3
低剂量组(SPS-L)	20.3 ± 3.9 **	19.1 ± 2.7 **	18.4 ± 4.3 ** #	17.5 ± 3.7 ** ##	16.1 ± 4.5 ** ##	4.2
中剂量组(SPS-M)	20.5 ± 4.1 **	18.9 ± 3.2 **	17.5 ± 3.6 ** #	16.1 ± 2.8 ** ##	14.3 ± 3.5 ** ##	6.2 <sup>ab</sup>
高剂量组(SPS-H)	20.6 ± 4.8 **	18.2 ± 3.5 **	16.5 ± 3.2 ** ##	14.8 ± 4.9 ** ##	13.2 ± 2.3 ** ##	7.4 <sup>aa</sup>

表5 硫琼脂对小鼠负荷糖耐量的影响( $\bar{X} \pm SD$ )  
Tab. 5 Effect of agarpectin on load glucose tolerance in mice mmol·L<sup>-1</sup>

组别 group	0 h	0.5 h	2 h
高血糖模型组(DM)	30.3 ± 3.3 *	33.3 ± 3.7	33.1 ± 2.8 * <sup>aa</sup>
药物对照组(DC)	22.1 ± 4.7 ##	32.4 ± 4.2	24.7 ± 2.6 #
正常对照组(NC)	8.4 ± 1.6 ** ##	12.5 ± 1.8 ** ##	6.2 ± 1.7 ** ##
低剂量组(SPS-L)	24.1 ± 3.8 #	30.8 ± 2.6	26.1 ± 3.0
中剂量组(SPS-M)	22.6 ± 4.3 #	33.3 ± 3.3	24.6 ± 2.6 #
高剂量组(SPS-H)	20.6 ± 3.5 ##	31.9 ± 2.7	23.1 ± 3.2 ##

注: 与 DC 组比较

Note: Compared with DC group.

2.2.3 硫琼脂对高血糖小鼠负荷糖耐量的影响  
对小鼠以葡萄糖灌胃后(0 h)与 DM 组比较, DC、NC、SPS-H 组具有极显著差异( $P < 0.01$ ), SPS-L、SPS-M 具有显著差异( $P < 0.05$ ); 与 DC 组比较, DM 具有显著差异( $P < 0.05$ ), NC 组具有极显著差异( $P < 0.01$ ) (表 5)。葡萄糖灌胃 2 h 后 DC、NC、SPS-L、SPS-M 和 SPS-H 组的血糖值和 0 h 时的无显著性差异( $P > 0.05$ ), 而 DM 组具有显著性差异( $P < 0.05$ )。说明硫琼脂对四氧嘧啶小鼠受损的胰岛  $\beta$  细胞具有一定的修复作用。

2.2.4 硫琼脂对高血糖小鼠脏器指数的影响  
DC、NC、SPS-H 组与 DM 组的肝脏指数比较具有显著性差异( $P < 0.05$ ), 除 DM 组外试验各组与 NC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ ), 说明糖尿病会使小鼠出现肝肿大现象, 而硫琼脂具有抑制肝肿大的作用; DC、NC、SPS-H 组的脾脏指数与 DM 组比较具有极显著性差异( $P < 0.01$ ), SPS-L、SPS-M 组与 DM 组比较具有显著性差异( $P < 0.05$ ), 而 DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组与 NC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ ), 说明硫琼脂具有脾脏保护的作用, 而且随着剂量的增加, 效果越明显; DC、NC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组的胸腺指数与 NC 组的无显著性差异, DM 组与 NC 组差异

显著, 这说明糖尿病会导致小鼠出现胸腺萎缩, 而硫琼脂对胸腺具有一定的保护作用(表 6)。

2.2.5 硫琼脂对高血糖小鼠血清中 GSP、肝糖原及血清胰岛素的影响  
DC、SPS-H 组的 GSP 水平、肝糖原含量与 DM 组比较差异极显著, NC 组与 DM 组差异显著( $P < 0.05$ ); 与 DM 组的血清胰岛素水比较, DC、NC、SPS-M、SPS-H 组具有极显著性差异( $P < 0.01$ ), SPS-L 组具有显著性差异( $P < 0.05$ ) (表 7)。与 NC 组的 GSP 水平、肝糖原含量、血清胰岛素水平比较, DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组均无显著性差异( $P > 0.5$ )。结果表明, 硫琼脂能促进糖尿病小鼠的肝糖原正常代谢, 对近期血糖值具有一定调节作用。

## 2.3 硫琼脂降血脂活性的研究

2.3.1 硫琼脂对高血脂大鼠血脂水平的影响  
造模后 TC、TG 浓度均极显著增加( $P < 0.01$ ) (表 8), HDL-C 浓度极显著降低( $P < 0.01$ ), LDL-C 浓度极显著升高( $P < 0.01$ ) (表 9), 说明高脂模型造模成功。造模分组(0 d)后 DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组与 NC 组差异显著( $P < 0.05$ ), 与 HL 组无显著性差异( $P > 0.05$ ), 表明分组结果具有统计学意义。经过 28 d 的给药, DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 的 TC、TG 浓度都有所下降, 而 HL 组升高,

表6 硫琼脂对小鼠脏器指数的影响( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 6 Effect of agaropectin on index of spleen, thymus and liver of diabetic mice

g

组别 group	肝脏指数 liver index	脾脏指数 spleen index	胸腺指数 thymus index
高血糖模型组(DM)	0.052 8 ± 0.003 0*	0.002 3 ± 0.000 3**	0.001 2 ± 0.000 3*
药物对照组(DC)	0.044 6 ± 0.002 5#	0.003 9 ± 0.000 3##	0.001 8 ± 0.000 2
正常对照组(NC)	0.043 3 ± 0.002 3#	0.004 2 ± 0.000 4##	0.002 1 ± 0.000 2#
低剂量组(SPS-L)	0.050 6 ± 0.004 9	0.003 6 ± 0.001 1#	0.001 5 ± 0.000 2
中剂量组(SPS-M)	0.048 7 ± 0.004 2	0.003 7 ± 0.000 5#	0.001 7 ± 0.000 2
高剂量组(SPS-H)	0.044 2 ± 0.003 9#	0.003 9 ± 0.000 7##	0.001 8 ± 0.000 3

表7 血清各项指标测定结果( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 7 Measurements of GSP, liver glycogen and insulin in serum

组别 group	c(糖化血清蛋白)/mmol·L <sup>-1</sup> glutathion peroxidase (GSP)	w(肝糖原)/mg·g <sup>-1</sup> hepatic glycogen	血清胰岛素/mIU·L <sup>-1</sup> serum insulin
高血糖模型组(DM)	5.88 ± 0.60*	0.81 ± 0.56*	5.89 ± 1.17**
药物对照组(DC)	4.50 ± 0.37##	1.76 ± 0.68##	4.68 ± 0.62##
正常对照组(NC)	4.85 ± 0.34#	2.26 ± 0.14#	4.41 ± 0.93##
低剂量组(SPS-L)	5.20 ± 1.81	0.85 ± 0.16	4.89 ± 0.88#
中剂量组(SPS-M)	5.04 ± 1.24	1.36 ± 0.17	4.78 ± 1.62##
高剂量组(SPS-H)	4.82 ± 0.64##	2.04 ± 0.45##	4.69 ± 0.98##

其中 DC、SPS-L、SPS-M 的 TC 浓度与 NC 组无显著性差异( $P > 0.05$ )，SPS-H 组的 TC 浓度低至 1.8 mmol·L<sup>-1</sup> ( $P < 0.01$ )，SPS-L、SPS-M、SPS-H 的 TG 浓度与 NC 组无显著差异( $P > 0.05$ )，DC 组降至 1.07 mmol·L<sup>-1</sup> ( $P < 0.05$ )，而各组的 TC、TG 浓度与 HL 组差异极显著( $P < 0.01$ )；各组内，DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组较 0 d 时的 TC、TG 浓度极显著地降低了( $P < 0.01$ )，HL 组的 TC 浓度显著升高了( $P < 0.05$ )而 TG 浓度稍有升高( $P > 0.05$ )，说明硫琼脂能够调节 TC、TG 水平；DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组较 0 d 时的 HDL-C 浓度极显著地升高( $P < 0.01$ )，LDL-C 浓度极显著降低( $P < 0.01$ )而 HL 组的 HDL-C 浓度降低不显著( $P > 0.05$ )，LDL-C 浓度升高极显著( $P < 0.01$ )，表明硫琼脂对高血脂大鼠的 HDL-C、LDL-C 具有调节作用。对表 8、表 9 的分析结果说明，硫琼脂能够降低血清中 TC、TG 浓度，升高血液中 HDL-C 浓度，降低 LDL-C 浓度，具有降血脂功效。

2.3.2 硫琼脂对高血脂大鼠体质量的影响 造模分组后(0 d) NC、HL、DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组之间的体质量均无显著性差异( $P > 0.05$ ) (表 10)。经过 28 d 的给药，试验各组老鼠的体质量都有明显增加( $P < 0.01$ )，NC、NC-S、HL、

DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组分别增重 116.2 g、112.1 g、121.8 g、98.4 g、102.1 g、97.5 g、98.7 g，HL 组较其他各组分别增重 4.0%、6.8%、12.3%、7.6%、11.0%、9.5%。SPS-L、SPS-M、SPS-H 组分别与 NC、HL 组的体质量比较均具有显著性差异( $P < 0.05$ )，NC-S 组与 NC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ )。结果表明，硫琼脂能明显减缓高血脂症大鼠体质量增长的速度，达到一定剂量时还具有降低体质量的效果，但不会影响正常大鼠的自然生长。

2.3.3 硫琼脂对高血脂大鼠肝脏指数及肝脏抗氧化能力的影响 NC-S、DC、SPS-M、SPS-H 组与 NC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ )，SPS-L 组与 NC 组比较差异显著( $P < 0.05$ )，各组与 HL 组比较具有极显著差异( $P < 0.01$ )，由此可知高血脂症大鼠存在肝肿大现象，而硫琼脂能够减小肝脏指数，起到护肝作用(表 11)。DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 的 GSH-Px 酶活性、T-SOD 酶活性、*b*(NO)与 NC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ )，与 HL 组差异显著( $P < 0.05$ )，而 DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 的 *b*(MDA)与 NC 组具有极显著差异( $P < 0.01$ )，除 SPS-L 组外各组与 HL 组差异极显著( $P < 0.01$ )，

表 8 硫琼脂对大鼠胆固醇、甘油三酯的影响( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 8 Effect of agarpectin on TC and TG in rats

mmol·L<sup>-1</sup>

组别 group	胆固醇 total cholesterol (TC)		甘油三酯 triglyceride (TG)	
	0 d	28 d	0 d	28 d
正常对照组 (NC)	2.65 ± 0.10 <sup>#</sup>	2.20 ± 0.32 <sup>##aa</sup>	1.14 ± 0.10 <sup>##</sup>	1.31 ± 0.29 <sup>##</sup>
正常硫琼脂组 (NC-S)	2.30 ± 0.22 <sup>##</sup>	2.28 ± 0.24 <sup>##</sup>	1.18 ± 0.41 <sup>##</sup>	1.34 ± 0.55 <sup>##</sup>
高血脂模型组 (HL)	3.35 ± 0.36 <sup>*</sup>	3.85 ± 0.21 <sup>** aa</sup>	2.60 ± 0.41 <sup>**</sup>	2.81 ± 0.33 <sup>**</sup>
药物对照组 (DC)	3.55 ± 0.42 <sup>**</sup>	2.06 ± 0.17 <sup>##ab</sup>	2.31 ± 0.53 <sup>**</sup>	1.07 ± 0.25 <sup>* ##ab</sup>
低剂量组 (SPS-L)	3.36 ± 0.34 <sup>*</sup>	2.12 ± 0.10 <sup>##ab</sup>	2.4 ± 0.67 <sup>**</sup>	1.13 ± 0.24 <sup>##ab</sup>
中剂量组 (SPS-M)	3.41 ± 0.45 <sup>**</sup>	1.99 ± 0.23 <sup>##ab</sup>	2.51 ± 0.49 <sup>**</sup>	1.23 ± 0.21 <sup>##ab</sup>
高剂量组 (SPS-H)	3.58 ± 0.50 <sup>**</sup>	1.82 ± 0.20 <sup>##ab</sup>	2.64 ± 0.82 <sup>**</sup>	1.24 ± 0.11 <sup>##ab</sup>

注: 与 HL 组比较

Note: Compared with HL group.

表 9 硫琼脂对大鼠高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇的影响( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 9 Effect of agarpectin on HDL-C and LDL-C in rats

mmol·L<sup>-1</sup>

组别 group	高密度脂蛋白胆固醇 high-density lipoprotein (HDL-C)		低密度脂蛋白胆固醇 low density lipoprotein (LDL-C)	
	0 d	28 d	0 d	28 d
正常对照组 (NC)	2.45 ± 0.39 <sup>##</sup>	2.54 ± 0.29 <sup>##</sup>	1.07 ± 0.19 <sup>##</sup>	1.15 ± 0.37 <sup>##</sup>
正常硫琼脂组 (NC-S)	2.52 ± 0.07 <sup>##</sup>	2.36 ± 0.23 <sup>##</sup>	1.16 ± 0.15	1.32 ± 0.19 <sup>##</sup>
高血脂模型组 (HL)	1.37 ± 0.70 <sup>**</sup>	0.95 ± 0.16 <sup>**</sup>	1.79 ± 0.65 <sup>**</sup>	2.38 ± 0.35 <sup>** ab</sup>
药物对照组 (DC)	1.55 ± 0.45 <sup>**</sup>	2.16 ± 0.18 <sup>* ##ab</sup>	1.95 ± 0.70 <sup>**</sup>	1.13 ± 0.20 <sup>* ##ab</sup>
低剂量组 (SPS-L)	1.58 ± 0.31 <sup>**</sup>	2.05 ± 0.19 <sup>##ab</sup>	1.84 ± 0.56 <sup>**</sup>	1.24 ± 0.13 <sup>##ab</sup>
中剂量组 (SPS-M)	1.37 ± 0.45 <sup>**</sup>	2.11 ± 0.16 <sup>* ##ab</sup>	1.95 ± 0.71 <sup>**</sup>	1.19 ± 0.18 <sup>##ab</sup>
高剂量组 (SPS-H)	1.26 ± 0.19 <sup>**</sup>	2.19 ± 0.23 <sup>* ##ab</sup>	1.96 ± 0.45 <sup>**</sup>	1.15 ± 0.16 <sup>##ab</sup>

表 10 硫琼脂对大鼠体质量的影响( $\bar{X} \pm SD$ )

Tab. 10 Effect of agarpectin on weight in rats

组别 group	体质量/g body weight					增加量/g weight growth	增重率/% rate of weight growth
	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d		
正常对照组 (NC)	198.9 ± 14.2	252.5 ± 15.6	282.4 ± 19.1	302.6 ± 25.4	315.1 ± 34.2	116.2 <sup>ab</sup>	58.4
正常硫琼脂组 (NC-S)	201.6 ± 14.8 <sup>*</sup>	240.4 ± 15.9	275.4 ± 16.1	294.5 ± 16.2	313.7 ± 16.3	112.1 <sup>ab</sup>	55.6
高血脂模型组 (HL)	195.1 ± 13.8	249.0 ± 17.6	275.4 ± 19.1	294.9 ± 27.6	316.9 ± 31.6	121.8 <sup>ab</sup>	62.4
药物对照组 (DC)	196.5 ± 11.4	242.3 ± 17.7	263.1 ± 19.6	281.2 ± 21.8	294.9 ± 18.9	98.4 <sup>ab</sup>	50.1
低剂量组 (SPS-L)	186.3 ± 12.6	231.7 ± 15.5	249.0 ± 22.0 <sup>* #</sup>	271.7 ± 22.1 <sup>* #</sup>	288.4 ± 26.7 <sup>* #</sup>	102.1 <sup>ab</sup>	54.8
中剂量组 (SPS-M)	189.8 ± 10.8	239.6 ± 12.8	258.0 ± 21.7	273.5 ± 28.6 <sup>* #</sup>	287.3 ± 35.4 <sup>* #</sup>	97.5 <sup>ab</sup>	51.4
高剂量组 (SPS-H)	186.6 ± 20.2	233.8 ± 22.0	252.6 ± 23.1 <sup>*</sup>	266.6 ± 24.3 <sup>* #</sup>	285.3 ± 24.6 <sup>* #</sup>	98.7 <sup>ab</sup>	52.9

SPS-L 组与 HL 组差异显著 ( $P < 0.05$ )，这说明高血脂不仅会破坏 GSH-Px 酶、T-SOD 酶活性，增加 b(NO)，还会导致大鼠体内 b(MDA) 剧增，而硫琼脂能够提高 GSH-Px 酶和 T-SOD 酶活性，减少 b(NO)，对 MDA 具有一定清除作用，具有抗氧化能力。

2.3.4 硫琼脂对高血脂大鼠血清抗氧化能力的影响 GSH-Px 酶活性比较，NC、NC-S 组与 DC 组

差异极显著 ( $P < 0.01$ )，HL 组与 DC 组差异显著 ( $P < 0.05$ )，SPS-L、SPS-M、SPS-H 组与 DC 组无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，NC、NC-S、SPS-H 组与 HL 组差异极显著 ( $P < 0.01$ )，DC、SPS-M 组与 HL 组比较差异显著 ( $P < 0.05$ )，SPS-L 组与 HL 组无显著性差异 ( $P > 0.05$ )，说明高血脂对血清中 GSH-Px 酶活性破坏力很强，而硫琼脂能够提高其活性，但不能恢复到正常水平；T-SOD 酶活性比

较, NC、NC-S、DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组与 HL 组比较具有极显著差异( $P < 0.01$ ), 除 HL 组外各组与 DC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ ), HL 组与 DC 组差异极显著( $P < 0.01$ ), 表明硫琼脂能够保护 T-SOD 酶并且能够提高酶活性;  $b(\text{NO})$  比较, 除 HL 组外其余各组与 DC 组比较无显著性差异( $P > 0.05$ ), HL 组与 DC 组有显著性差异( $P < 0.05$ ), NC、NC-S、SPS-L 组与 HL 组差异显著( $P < 0.05$ ), SPS-M、SPS-H 组与 HL 组比较差异极显著( $P < 0.01$ ), 由此可见, 高血脂能够提高  $b$

(NO), 而硫琼脂具减少  $b(\text{NO})$  作用;  $b(\text{MDA})$  比较, 除 HL、SPS-L 组外各组与 DC 组无显著性差异( $P > 0.05$ ), HL 组与 DC 组具有极显著性差异( $P < 0.01$ ), SPS-L 组与 DC 组差异显著( $P < 0.05$ ), NC、NC-S、DC、SPS-L、SPS-M、SPS-H 组与 HL 组比较具有极显著差异( $P < 0.01$ ), 这说明硫琼脂能够清除血清中 MDA(表 12)。从上述分析结果说明硫琼脂能够显著降低血清中  $b(\text{MDA})$  和  $b(\text{NO})$ , 提高 GSH-Px 酶和 T-SOD 酶活性, 具有一定的抗氧化能力。

表 11 肝脏抗氧化指标及肝脏指数测定结果( $\bar{X} \pm \text{SD}$ )

Tab. 11 Measurements of agaropectin on index of GSH-Px, T-SOD, NO and MDA in liver

组别 group	肝脏指数/g liver index	谷胱甘肽过氧化物 酶/活力单位 GSH-Px	超氧化物歧化酶 /U·mg <sup>-1</sup> prot T-SOD	$b(\text{一氧化氮})$ / $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ NO	$b(\text{丙二醛})$ /nmol·mg <sup>-1</sup> MDA
正常对照组(NC)	$0.0278 \pm 0.0018^{\# \#}$	$258.21 \pm 20.92^{\# \#}$	$60.96 \pm 13.00^{\# \#}$	$1.59 \pm 0.80^{\# \#}$	$5.83 \pm 2.15^{\# \#}$
正常硫琼脂组(NC-S)	$0.0269 \pm 0.0015^{\# \#}$	$313.88 \pm 17.64^{* \# \#}$	$72.07 \pm 5.26^{* \# \#}$	$1.32 \pm 0.60^{\# \#}$	$4.29 \pm 1.39^{\# \#}$
高血脂模型组(HL)	$0.0357 \pm 0.0016^{**}$	$150.57 \pm 41.82^{**}$	$41.69 \pm 4.61^{**}$	$4.54 \pm 1.95^{**}$	$14.81 \pm 1.41^{**}$
药物对照组(DC)	$0.0286 \pm 0.0019^{\# \#}$	$245.99 \pm 41.42^{\# \#}$	$56.98 \pm 3.70^{\# \#}$	$2.02 \pm 1.69^{\# \#}$	$10.05 \pm 1.73^{** \# \#}$
低剂量组(SPS-L)	$0.0311 \pm 0.0014^{* \# \#}$	$239.84 \pm 42.47^{\# \#}$	$54.48 \pm 6.57^{\#}$	$3.08 \pm 1.91^{** \# \#}$	$12.96 \pm 1.42^{** \#}$
中剂量组(SPS-M)	$0.0302 \pm 0.0026^{\# \#}$	$258.32 \pm 27.74^{\# \#}$	$55.81 \pm 12.51^{\#}$	$2.53 \pm 1.90^{\# \#}$	$11.87 \pm 1.35^{** \# \#}$
高剂量组(SPS-H)	$0.0289 \pm 0.0019^{\# \#}$	$271.08 \pm 25.07^{\# \#}$	$56.81 \pm 7.35^{\# \#}$	$1.65 \pm 0.51^{\# \#}$	$10.91 \pm 0.89^{** \# \#}$

表 12 硫琼脂对高血脂大鼠血清抗氧化能力的影响( $\bar{X} \pm \text{SD}$ )

Tab. 12 Measurements of agaropectin on index of GSH-Px, T-SOD, NO and MDA in serum

组别 group	谷胱甘肽过氧化物 酶/活力单位 GSH-Px	超氧化物歧化酶 /U·mg <sup>-1</sup> prot T-SOD	$b(\text{一氧化氮})$ / $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ NO	$b(\text{丙二醛})$ /nmol·mg <sup>-1</sup> MDA
正常对照组(NC)	$1935.2 \pm 90.7^{** \# \#}$	$711.6 \pm 67.7^{\# \#}$	$15.54 \pm 2.76^{\#}$	$8.40 \pm 2.61^{\# \#}$
正常硫琼脂组(NC-S)	$2024.8 \pm 120.4^{** \# \#}$	$729.4 \pm 107.8^{\# \#}$	$15.87 \pm 2.60^{\#}$	$8.09 \pm 1.45^{\# \#}$
高血脂模型组(HL)	$958.4 \pm 169.0^{*}$	$563.4 \pm 33.3^{**}$	$25.96 \pm 2.27^{*}$	$11.47 \pm 2.10^{**}$
药物对照组(DC)	$1170.4 \pm 289.2^{\#}$	$780.4 \pm 64.2^{\# \#}$	$16.03 \pm 1.69^{\#}$	$8.52 \pm 1.01^{\# \#}$
低剂量组(SPS-L)	$997.6 \pm 129.7$	$764.6 \pm 51.0^{\# \#}$	$19.07 \pm 1.91$	$9.84 \pm 0.82^{** \# \#}$
中剂量组(SPS-M)	$1182.4 \pm 105.6^{\#}$	$793.0 \pm 83.8^{\# \#}$	$18.27 \pm 1.90^{\# \#}$	$9.02 \pm 1.39^{\# \#}$
高剂量组(SPS-H)	$1303.2 \pm 225.7^{\# \#}$	$798.8 \pm 61.1^{\# \#}$	$16.67 \pm 2.51^{\# \#}$	$8.10 \pm 0.99^{\# \#}$

注: 与 DC 组比较

Note: Compared with DC group.

### 3 讨论

通过对 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$  及 DPPH 清除效果的研究评价了硫琼脂的体外抗氧化活性。结果表明, 在试验的质量浓度范围内, 硫琼脂对 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $\cdot\text{OH}$  及 DPPH 的清除率均随着其质量浓度的增加而增大, 其中硫琼脂清除 $\cdot\text{O}_2^-$  的  $IC_{50}$  为  $19 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 清除 $\cdot\text{OH}$  的  $IC_{50}$  约为  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 清除 DPPH 的  $IC_{50}$  为  $17 \text{ mg}$

$\cdot\text{mL}^{-1}$ 。单从体外抗氧化研究结果并不能完全评价硫琼脂的抗氧化活性, 因此有必要进行体内抗氧化活性试验如动物试验。从降血糖、降血脂活性的研究结果可知硫琼脂具有体内抗氧化作用, 而在动物体内主要通过酶促和非酶促系统清除自由基<sup>[19]</sup>, 硫琼脂是通过提高各种抗氧化酶活性还是直接作为抗氧化剂而清除自由基的, 这还有待进一步研究。

四氢嘧啶是自由基激活剂, 易被胰岛  $\beta$  细胞

吸收，其所产生的超氧阴离子等自由基可直接破坏胰岛 $\beta$ 细胞的膜结构，损伤 $\beta$ 细胞的DNA，当大量的细胞损伤与坏死后引起胰岛素原合成障碍，进而产生糖尿病<sup>[20]</sup>。高血糖模型试验结果表明，采用四氧嘧啶造模效果显著，为进一步试验奠定了基础。经过28 d的给药，结果表明，硫琼脂能够缓解糖尿病体质量减少的体征，保护肝脏、脾脏和胸腺使得糖尿病小鼠具有一定的免疫能力，同时能促进糖尿病小鼠的肝糖原正常代谢，对近期血糖值具有一定调节作用，能够控制糖尿病产生并发症，具有降血糖作用，并且降血糖效果随着剂量的增加而增强。降血糖作用可能是通过改善微循环、增加胰岛素受体或提高其亲和力、防止脂质过氧化等<sup>[21]</sup>，而硫琼脂具有抗氧化作用，这可能是硫琼脂能够降血糖的原因之一；目前较好的降血糖药物都是进口药，种类少、价格昂贵，有些西药长期使用效果不佳或有较严重的副作用<sup>[22]</sup>，因此硫琼脂如果能进一步开发为降血糖药的替代物，将具有重要意义，但其具体的降血糖机制还有待进一步研究。

硫琼脂降血脂活性试验结果表明，硫琼脂能明显减缓高血脂症大鼠体质量增长的速度，达到一定剂量时还具有降低体质量的效果；降低了血清中TC、TG浓度，升高血液中HDL-C浓度，降低LDL-C浓度，具有降血脂功效。这可能因为硫琼脂作为一种可溶性膳食纤维，具有很高的吸水性，可在胃内膨胀，增加饱腹感，延缓胃排空，减少食物的摄入，从而达到减肥的目的，同时能够阻碍机体对脂肪的吸收，吸附胆汁酸并降低TC和TG<sup>[23]</sup>。硫琼脂还能通过提高血清、肝脏中GSH-Px、T-SOD等抗氧化酶活性，降低NO质量摩尔浓度，抑制大鼠体内脂质过氧化的酶促翻译，降低体内自由基水平，从而降低体内MDA质量摩尔浓度，达到改善高脂大鼠体内氧化-抗氧化失衡的状态，减少过量自由基对机体的损伤，也因此保护了大鼠肝脏。因此以硫琼脂为减肥新药、高脂血症患者的功能性食疗保健品具有良好的开发前景。

## 参考文献：

- [1] 刘秋凤, 吴成业. 硫琼脂多糖的生物活性及其提取方法[J]. 福建水产, 2012, 34(3): 240–244.
- [2] 张彦民, 李宝才, 朱利平, 等. 多糖化学及其生物活性研究进展[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2003, 28(3): 140–145.
- [3] 刘力. 琼脂分级产物的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001.
- [4] 赵永强. 龙须菜琼胶糖的制备及其副产物的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2010.
- [5] KIHO T, MORIMOTO H, KOBAYASHI T, et al. Effect of a polysaccharide (TAP) from the fruiting bodies of *Tremella aurantia* on glucose metabolism in mouse liver [J]. Biomchnol Biochem, 2000, 64(2): 417.
- [6] 谌素华, 王维民, 刘辉, 等. 马尾藻岩藻聚糖硫酸酯纯化及降血脂功能研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(5): 28–31.
- [7] 王兵, 李靖, 马舒冰, 等. 羊栖菜多糖降血糖作用的实验研究[J]. 中国海洋药物, 2000, 19(3): 33.
- [8] 刘秋凤, 苏永昌, 吴成业. 硫琼脂提取工艺的响应面法优化[J]. 福建农业学报, 2012, 27(9): 1004–1010.
- [9] 曾小玲. 七种菊科植物抗活性氧作用的研究对超氧阴离子的自由基清除作用[J]. 中国现代医学杂志, 1999(2): 51–52.
- [10] 贾彦明, 闵伟红. 海带多糖的分离纯化及体外抗氧化作用的研究[J]. 农产品加工学刊, 2010(8): 26–35.
- [11] SHAMA O P, BHAT T K. DPPH antioxidant assay revisited[J]. Food Chem, 2009, 113(4): 1202–1205.
- [12] 范玉生. 马齿苋多糖降血糖作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [13] SEZIK E, ASLAN M, YESILADA E, et al. Hypoglycaemic activity of *Gentiana olivieri* and isolation of the active constituent through bioassay-directed fractionation techniques[J]. Life Sci, 2005, 76(11): 1223–1238.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 卫法监发[2003]42号 保健食品检验与评价技术规范(2003版)[Z]. 2003: 35–42.
- [15] 于竹芹, 刘宗宝, 龚少兰, 等. 海带对实验性高脂血症大鼠降血脂作用及其机制[J]. 青岛大学医学院学报, 2010, 46(5): 419–424.
- [16] SHARMA S B, NASIR A, PRABHU K M, et al. Hypoglycaemic and hypolipidemic effect of ethanolic extract of seeds of *Eugenia jambolana* in alloxan-induced diabetic rabbits[J]. J Ethnopharmacol, 2003, 85(2/3): 201–206.
- [17] 贾之慎, 部建敏, 唐孟成. 比色法测定Fenton反应产生的羟自由基[J]. 生物化学与生物物理进展, 1996, 23(2): 184–186.
- [18] JEON SM, BOK S H, JANGM K, et al. Antioxidative activity of maringenin and lovastain in high cholesterol-fed rabbits[J]. Life Sci, 2001, 69(24): 2855.
- [19] MARITIM A C, SANDERS R A, WATKINS J B. Diabetes, oxidative stress and antioxidants: a review[J]. J Biochem Mol Toxicol, 2003, 17(1): 24–38.
- [20] 林龙, 常建波, 孙煜煊. 孔石莼多糖降血糖作用研究[J]. 食品科技, 2012, 37(6): 224–227.
- [21] 任初杰. 不同溶剂提取花生粕多糖工艺结构及抗氧化活性的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [22] 刘铜华, 吕仁和. 中医药防治糖尿病及其并发症的作用途径[J]. 北京中医药大学学报, 2000, 23(3): 69–71.
- [23] 张君萍. 沙葱籽油和多糖的提取及其降血脂作用[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.