

石斛多糖对小鼠体内血糖、血脂浓度、免疫功能及抗疲劳能力的影响

邓捷¹,付香玉¹,赵德强²,陈晓玲²,陈跃文¹,付晶晶^{1*}

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院,浙江杭州 310018;2. 浙江丰之源生物科技有限公司,浙江温州 325000)

摘要:为探究石斛多糖(*Dendrobium polysaccharides*, DP)对II型糖尿病小鼠降低血糖和血脂浓度、免疫低下小鼠免疫调节及正常小鼠抗疲劳能力的影响,将小鼠平均且随机分成6组,分别命名为空白组、模型组、阳性组、石斛多糖高剂量组(DP-H组,450 mg/kg)、石斛多糖中剂量组(DP-M组,300 mg/kg)、石斛多糖低剂量组(DP-L组,150 mg/kg)。II型糖尿病小鼠模型的构建采用腹腔注射四氧嘧啶(alloxan monohydrate, ALX, 100 mg/kg)的方法,阳性组使用盐酸二甲双胍(metformin hydrochloride, MET, 200 mg/kg),各组灌胃3周后,测定小鼠空腹血糖浓度、血清中总胆固醇(total cholesterol, TC)、甘油三酯(triglyceride, TG)、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)含量;免疫低下小鼠模型的构建采用腹腔注射环磷酰胺(cyclophosphamide, CTX, 80 mg/kg)的方法,分组同上,阳性组使用左旋咪唑(40 mg/kg),各组灌胃3周后,测定小鼠免疫器官指数及细胞免疫因子含量;正常小鼠分组同上,阳性组使用牛磺酸(200 mg/kg),各组灌胃4周后,记录小鼠负重游泳时间,测定尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)、乳酸(lactic acid, LD)含量及肌酸激酶(creatine kinase, CK)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)活性。结果表明,相比于模型组,经DP灌胃后,小鼠空腹血糖浓度、TC含量、TG含量、LDL-C含量均有不同程度的降低,而HDL-C含量升高;免疫调节实验中,DP组胸腺及脾脏指数、细胞免疫因子含量均呈现升高的趋势,且呈现剂量依赖性;DP-H组负重游泳时间、GSH-Px活性、SOD活性显著提高($P<0.05$),CK活性、BUN含量、LD含量降低。综上所述,石斛多糖可平衡血糖浓度,促进血脂代谢,增强免疫功能,并具有提高抗疲劳能力的作用。

关键词: 石斛多糖; II型糖尿病; 抗疲劳; 降糖降脂; 免疫功能

Effects of *Dendrobium Polysaccharides* on Blood Glucose and Blood Lipid Concentration, Immune Function, and Anti-Fatigue Ability in Mice

DENG Jie¹, FU Xiangyu¹, ZHAO Deqiang², CHEN Xiaoling², CHEN Yuewen¹, FU Jingjing^{1*}

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Fengzhiyuan Biotechnology Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to explore the effects of *Dendrobium polysaccharides* (DP) on the reduction of blood glucose and blood lipid concentration in mice with type II diabetes mellitus, immunoregulation in immunocompromised mice, and anti-fatigue ability of normal mice, the mice were randomly divided into six groups, which were blank group, model group, positive group, high-dose DP group (DP-H, 450 mg/kg), medium-dose DP group (DP-M, 300 mg/kg), and low-dose DP group (DP-L, 150 mg/kg). Intraperitoneal injection of alloxan monohydrate (ALX, 100 mg/kg) was used to construct a mouse model of type II diabetes mellitus, and metformin hydrochloride (MET, 200 mg/kg) was used in the positive group. The fasting blood glucose concentration, total cholesterol (TC), triglyceride (TG), low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C), and high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C) content in the serum were measured after gavage for three weeks in each group. The immunocompromised mouse model was constructed by intraperitoneal injection of cyclophosphamide (CTX, 80 mg/kg) and divided into six groups the same as above, and the positive group was treated with levamisole (40 mg/kg). The immune organ index and cytokine content of the mice were measured after three

作者简介:邓捷(2001—),男(汉),硕士,研究方向:现代食品制造技术。

*通信作者:付晶晶(1994—),女(汉),讲师,博士,研究方向:生物活性物质及营养递送。

weeks of gavage. The normal mice were grouped as above, and the positive group was treated with taurine (200 mg/kg). After four weeks of gavage, the weight-bearing swimming time of the mice was recorded, and blood urea nitrogen (BUN), lactic acid (LD) content, as well as activities of creatine kinase (CK), superoxide dismutase (SOD), and glutathione peroxidase (GSH-Px) were measured. The results showed that compared with the model group, the fasting blood glucose concentration, TC content, TG content, and LDL-C content of mice decreased to varying degrees after DP gavage, while the HDL-C content increased. In the immunomodulation experiment, the thymus and spleen index and cytokine content in the DP group showed a trend of increasing and were dose-dependent. The weight-bearing swimming time, GSH-Px activity, and SOD activity were significantly increased in the DP-H group ($P < 0.05$), while the CK activity and BUN and LD contents were decreased. In summary, DPs can balance blood glucose concentration, promote blood lipid metabolism, enhance immune function, and improve anti-fatigue ability.

Key words: *Dendrobium* polysaccharide; type II diabetes mellitus; anti-fatigue; reduction of blood glucose and blood lipid; immune function

引文格式:

邓捷,付香玉,赵德强,等. 石斛多糖对小鼠体内血糖、血脂浓度、免疫功能及抗疲劳能力的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 88-95.

DENG Jie, FU Xiangyu, ZHAO Deqiang, et al. Effects of *Dendrobium* Polysaccharides on Blood Glucose and Blood Lipid Concentration, Immune Function, and Anti-Fatigue Ability in Mice[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 88-95.

近年来,社会经济的迅速发展导致了人们生活方式及饮食习惯的改变。生活节奏的加快不可避免地造成了人们身体素质的变化,如血糖和血脂不稳定、免疫力低下、易产生疲劳现象等问题,成为危害人类健康的“杀手”。而随着人们生活水平的提升以及对健康养生生活方式的关注,降低血糖和血脂浓度、提高免疫力、缓解疲劳等成为广大人群的迫切需求。因此,寻找一种安全、高效、健康的药食同源物质,具有较高的研究和应用价值。

石斛是兰科石斛属植物,我国安徽、浙江、福建等地是其主要的生长分布区域,主要的人药部位是石斛茎和叶^[1]。石斛中主要的生物活性物质是石斛多糖(*Dendrobium* polysaccharides, DP),同时还含有一定的石斛生物碱、黄酮类化合物及一些微量元素^[2],被誉为“人间仙草”。石斛具有滋阴清热、益胃生津的功效,作为药食同源类,其具有极高的食用和药用价值,能有效地预防一些疾病的发生。目前,石斛主要以鲜制品及铁皮枫斗形式销售,加工利用水平相对较低。现如今,为提高石斛的经济附加值,研究者对石斛产品进行创新性开发,如开发石斛原浆饮品,在保留石斛原有营养风味的同时,提高了市场对石斛相关产品的接受度和认可度。以石斛多糖为主要成分的石斛,具有抗炎、抗氧化、抗疲劳、免疫调节、降低血糖和血脂浓度等生理活性功能^[3-4],从而赋予了石斛原浆饮品独特的营养价值。董晴等^[5]通过超声波协同酶解法工艺优化提取铁皮石斛多糖并发现石斛多糖具有良好的 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由

基和 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基清除能力。张寅等^[6]制备了膨化石斛提取物并发现石斛多糖提取物经膨化作用可有效提高其抗氧化能力,缓解小鼠疲劳。黄梓^[7]研究铁皮石斛多糖对 II 型糖尿病小鼠降糖降脂作用,发现铁皮石斛多糖具有降低血糖浓度及平衡糖尿病小鼠血脂水平的作用。Shan 等^[8]研究发现铁皮石斛多糖在经超声及脱乙酰化处理后,具有对免疫低下小鼠良好的免疫调节作用及促进细胞免疫因子的释放。Xu 等^[9]研究发现铁皮石斛多糖可以显著增强超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GSH-Px)等抗氧化酶活性,提高小鼠体内抗氧化能力。而石斛多糖对 II 型糖尿病小鼠降低血糖和血脂浓度、免疫调节和缓解疲劳功效的系统化研究较少。

因此,本文以石斛多糖为研究对象,通过构建 II 型糖尿病小鼠模型,研究石斛多糖对降低 II 型糖尿病小鼠血糖和血脂浓度的影响;构建免疫力低下小鼠模型,研究石斛多糖对免疫力低下小鼠免疫调节作用,以及石斛多糖对正常小鼠抗疲劳能力的影响,以期为提高石斛附加值,同时为进一步开发石斛创新产品提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料、实验动物与试剂

1.1.1 材料与试剂

石斛多糖(生物试剂,60%):上海源叶生物科技有限公司;盐酸左旋咪唑(生物试剂,99%)、环磷酰胺(生

物试剂,98%)、四氧嘧啶(分析纯,98%)、盐酸二甲双胍(分析纯,97%):上海麦克林生化科技有限公司;尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)测定试剂盒、乳酸(lactic acid, LD)测定试剂盒、肌酸激酶(creatine kinase, CK)测定试剂盒、SOD测定试剂盒、GSH-Px测定试剂盒、酶联免疫分析(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒:上海酶联生物科技有限公司;总胆固醇(total cholesterol, TC)测定试剂盒、甘油三酯(triglyceride, TG)测定试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇(low-density lipoprotein cholesterol, LDL-C)测定试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇(high-density lipoprotein cholesterol, HDL-C)测定试剂盒:南京建成生物工程研究所;小鼠饲料垫料:中科生命科技有限公司。

1.1.2 实验动物

无特定病原体(specific pathogen free, SPF)级雄性6周龄 Balb/c 小鼠 60 只、雄性6周龄 ICR 小鼠 120 只:江苏集萃药康生物科技股份有限公司,生产许可证号 SCXK(苏)2023-0009,体质量为 20 g 左右,实验经浙江工商大学实验动物伦理委员会批准[许可证号:SYXK(浙)2020-0027]。

1.2 仪器与设备

血糖测定仪(GA-3):三诺生物传感股份有限公司;高速离心机(Neofuge23R):上海湘仪离心机有限公司;全自动酶标仪(AMR-100):苏州阿尔法生物实验器材有限公司。

1.3 石斛多糖溶液的制备

将 15、30、45 mg 石斛多糖分别溶于 1 mL 蒸馏水中制备成低剂量样品溶液、中剂量样品溶液、高剂量样品溶液。

1.4 石斛多糖降低小鼠血糖和血脂浓度实验

1.4.1 小鼠分组及处理

小鼠的分组及建模方法参考樊溢^[10]的方法并稍作修改。将 60 只健康且体质量为 20 g 左右的 ICR 小鼠随机分为 6 组,每组 10 只,恒温(25±2)℃、恒湿 40% 且昼夜交替 12 h 环境下适应性培养 7 d。在禁食不禁水 24 h 后,空白组小鼠腹腔注射生理盐水,其余 5 组腹腔注射 100 mg/kg 体质量(body weight, bw)的四氧嘧啶(alloxan monohydrate, ALX),每隔 1 d 注射 1 次,共 3 次。给药剂量和 II 型糖尿病模型构建成功标准参照王云威等^[11]的方法,以空腹血糖浓度高于 11.1 mmol/L 视为 II 型糖尿病模型构建成功,建模成功后分组及灌胃给药情况:石斛多糖高剂量给药组(记为 DP-H 组,450 mg/kg bw)、石斛多糖中剂量给药组(记为 DP-M 组,300 mg/kg bw)、石斛多糖低剂量给药组(记为 DP-L 组,150 mg/kg bw)、模型组(记为 M 组,等量生理盐水)、阳性组(记为 PC 组,200 mg/kg bw 盐酸二甲双胍溶液)、空白组(记为 C 组,等量生理盐水)。以 0.1 mL/10 g 小

鼠体质量的剂量于每天定时给药,连续 3 周。

1.4.2 血糖浓度测定

连续给药后的第 7、14、21 天,取小鼠尾部血,使用血糖测定仪测定小鼠空腹血糖浓度。

1.4.3 小鼠血脂指标检测

实验结束后取小鼠眼眶血,3 000 r/min 离心 10 min 后取血清,使用 TC、TG、LDL-C、HDL-C 测定试剂盒测定相应血脂指标。

1.5 石斛多糖调节小鼠免疫功能实验

1.5.1 小鼠分组及处理

小鼠的分组及处理参考周美等^[12]的方法并作适当修改,60 只雄性 SPF 级 Balb/c 小鼠随机分为 6 组,每组 10 只。各实验组小鼠连续 5 d 腹腔注射环磷酰胺(80 mg/kg),构建免疫缺陷小鼠模型,空白组小鼠注射等量生理盐水。小鼠出现毛发稀疏、体质量无明显增长、精神萎靡等症状判断为造模成功。造模后灌胃给药时间、剂量及分组同 1.4.1,其中阳性组给药为 50 mg/kg 左旋咪唑,其余不变。

1.5.2 小鼠免疫器官指数的测定

免疫器官指数的测定参照李慧琳等^[13]的方法并稍作修改。实验结束后将小鼠处死并称重,取完整胸腺和脾脏,生理盐水洗净擦干后称重,按下式计算免疫器官指数($I, %$)。

$$I = M_1/M_2 \times 100$$

式中: M_1 为器官质量(胸腺、脾脏),g; M_2 为小鼠体质量,g。

1.5.3 细胞免疫因子含量的测定

细胞免疫因子含量的测定参照单政欣^[14]的方法,小鼠眼眶取全血,于离心管中 4℃、3 000 r/min 离心 10 min,取上清液,使用 ELISA 试剂盒测定白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-10(interleukin-10, IL-10)、肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor, TNF- α)、干扰素- γ (interferon- γ , IFN- γ)含量。

1.6 石斛多糖抗疲劳能力小鼠实验

1.6.1 小鼠分组及处理

小鼠的分组及处理参考夏云建等^[15]的方法并适当修改,60 只雄性 ICR 小鼠随机分为 5 组,每组 12 只。分组及灌胃给药情况:石斛多糖高剂量给药组(记为 DP-H 组,450 mg/kg bw)、石斛多糖中剂量给药组(记为 DP-M 组,300 mg/kg bw)、石斛多糖低剂量给药组(记为 DP-L 组,150 mg/kg bw)、阳性组(记为 PC 组,200 mg/kg 牛磺酸)、空白组(记为 C 组,等量生理盐水)。以 0.1 mL/10 g bw 的剂量于每天定时给药,连续 3 周。

1.6.2 小鼠负重游泳时间测定

参照徐海军等^[16]的方法并稍作修改,泳池采用直径 40 cm、深度 30 cm 的塑料桶,水温控制在 25℃左右,在小鼠尾部绑上 15% 体质量的重物,记录其在水

面至沉入水底的时间为负重游泳时间。

1.6.3 生化指标测定

生化指标测定参照白海军^[17]的方法并稍作修改。末次给药 30 min 后,将小鼠放入 30 cm 水深、25 °C 水中游泳 15 min 后采集眼眶血,4 °C、3 000 r/min 离心 10 min 后取上清液。使用相应试剂盒检测 BUN、LD 含量及 CK、SOD、GSH-Px 活性。

1.7 数据处理

采用 SPSS 和 Origin 对数据统计分析。数据采用

单因素方差分析, $P < 0.05$ 时认为差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 石斛多糖对小鼠血糖、血脂浓度的影响

2.1.1 小鼠血糖浓度变化

II 型糖尿病通常以空腹血糖浓度作为诊断标准。在初始、建模 1 周、给药 1、2、3 周后测定小鼠的空腹血糖浓度,DP 对其影响的结果如表 1 所示。

由表 1 可知,建模 1 周后,除空白组外,其余 5 组

表 1 石斛多糖对小鼠血糖浓度的影响

Table 1 Effect of DPs on blood glucose concentration in mice

组别	血糖浓度/(mmol/L)				
	初始	建模 1 周	给药 1 周	给药 2 周	给药 3 周
C 组	5.20±0.20 ^{Aa}	5.53±0.65 ^{Ba}	4.97±0.47 ^{Ca}	5.17±0.21 ^{Da}	5.30±0.46 ^{Da}
M 组	5.10±0.26 ^{Ab}	23.70±3.40 ^{Aa}	24.10±4.95 ^{Aa}	24.53±3.16 ^{Aa}	24.37±2.08 ^{Aa}
PC 组	4.80±0.30 ^{Ac}	23.30±0.10 ^{Aa}	19.63±1.46 ^{Bb}	16.73±0.93 ^{Cc}	14.37±0.42 ^{Cd}
DP-L 组	4.63±0.68 ^{Ac}	23.83±3.33 ^{Aa}	22.23±2.59 ^{Bc}	20.80±1.35 ^{Bb}	19.93±0.38 ^{Bb}
DP-M 组	4.47±0.06 ^{Ac}	23.67±1.78 ^{Aa}	21.87±1.68 ^{Bcab}	19.37±1.26 ^{Bab}	17.67±1.19 ^{Bb}
DP-H 组	5.03±0.32 ^{Ac}	23.63±0.74 ^{Aa}	20.70±0.40 ^{Bb}	17.60±0.26 ^{Cc}	15.13±0.35 ^{Cd}

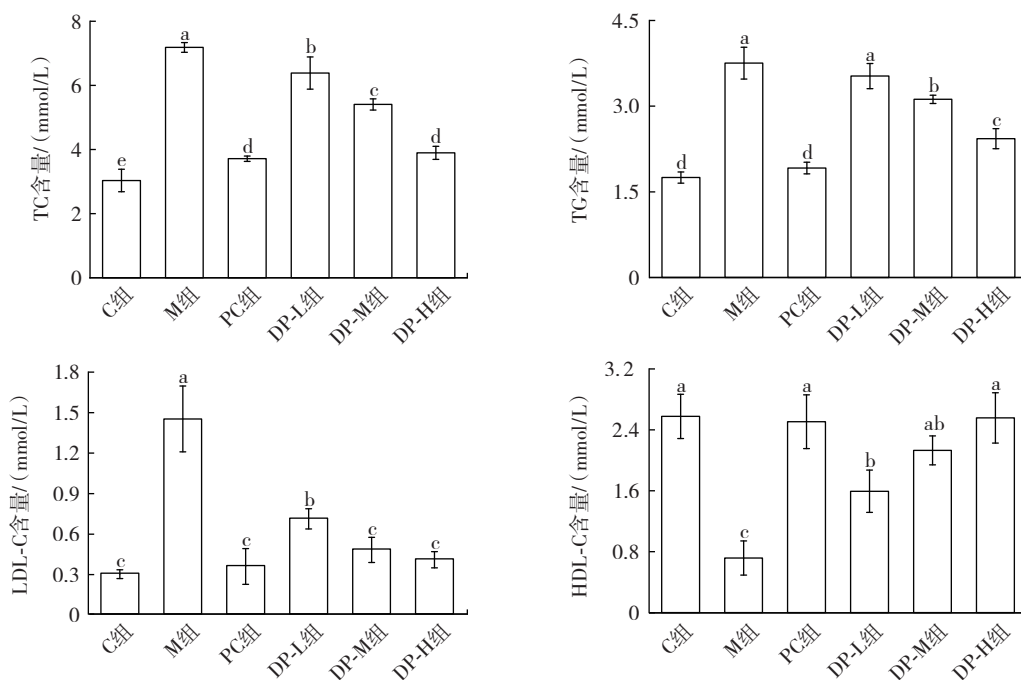
注:同列不同大写字母表示同一时间不同组别之间差异显著, $P < 0.05$;同行不同小写字母表示同一组别不同时间之间差异显著, $P < 0.05$ 。

小鼠的空腹血糖浓度均显著高于 11.1 mmol/L($P < 0.05$),表明糖尿病模型小鼠建模成功。模型组小鼠灌胃 1~3 周生理盐水,其血糖浓度维持在一个稳定的范围,并未发生显著性变化。而相较于模型组,经 DP 灌胃给药 1 周后,小鼠血糖浓度下降显著,且呈现剂量依赖性,即 DP 浓度越高,对血糖浓度升高抑制效果越好,且 DP-H 组的效果接近 PC 组,表明 DP 可以平衡血糖

浓度,提高小鼠糖耐量,从而抑制血糖浓度的升高。这也与 Li 等^[18]的研究结果相一致。

2.1.2 小鼠血脂浓度变化

血脂检测的主要指标有总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)含量。石斛多糖对小鼠血脂指标的影响见图 1。



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P < 0.05$ 。

图 1 石斛多糖对小鼠血脂的影响

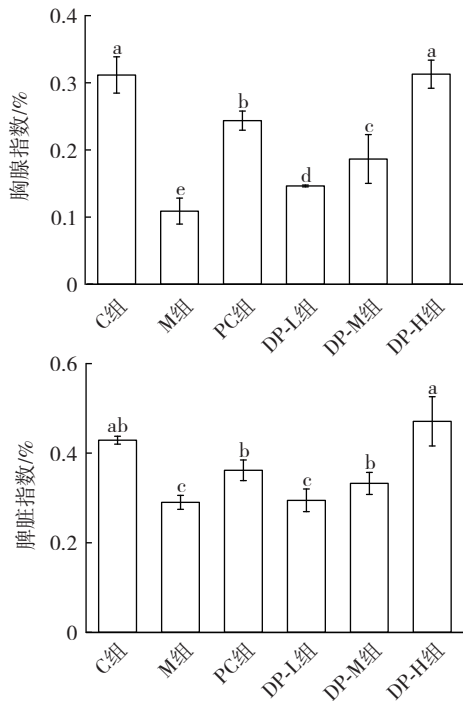
Fig.1 Effect of DPs on blood lipids in mice

糖尿病的产生通常伴随血脂代谢紊乱,造成 TC、TG、LDL-C 含量的升高和 HDL-C 含量的降低^[19]。由图 1 可知,模型组的 TC、TG、LDL-C 含量都显著高于空白组,而 HDL-C 含量显著低于空白组($P<0.05$)。相比于模型组,经 DP 灌胃 3 周后,TC、TG、LDL-C 含量下降明显,且呈现剂量依赖性。研究发现,HDL-C 可将胆固醇从肝外组织转运到肝脏进行代谢,由胆汁排出体外,其含量的高低与患心血管病的风险呈负相关,含量越高则对人体越有益^[20]。DP 组中 HDL-C 含量显著高于模型组($P<0.05$)。综上,DP 可有效降低 TC、TG 含量,抑制 LDL-C 产生并促进 HDL-C 的合成,具有良好的降血脂功效。这与戴亚峰等^[20]的研究结果相一致。

2.2 石斛多糖对小鼠免疫调节的影响

2.2.1 小鼠免疫器官指数变化

动物体内主要的免疫器官为胸腺和脾脏。胸腺在细胞及体液免疫方面都表现出重要的作用,而脾脏与体内非特异性免疫相关^[21]。故可通过胸腺及脾脏指数反映 DP 对小鼠免疫调节的作用,石斛多糖对小鼠免疫器官指数的影响见图 2。



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P<0.05$ 。

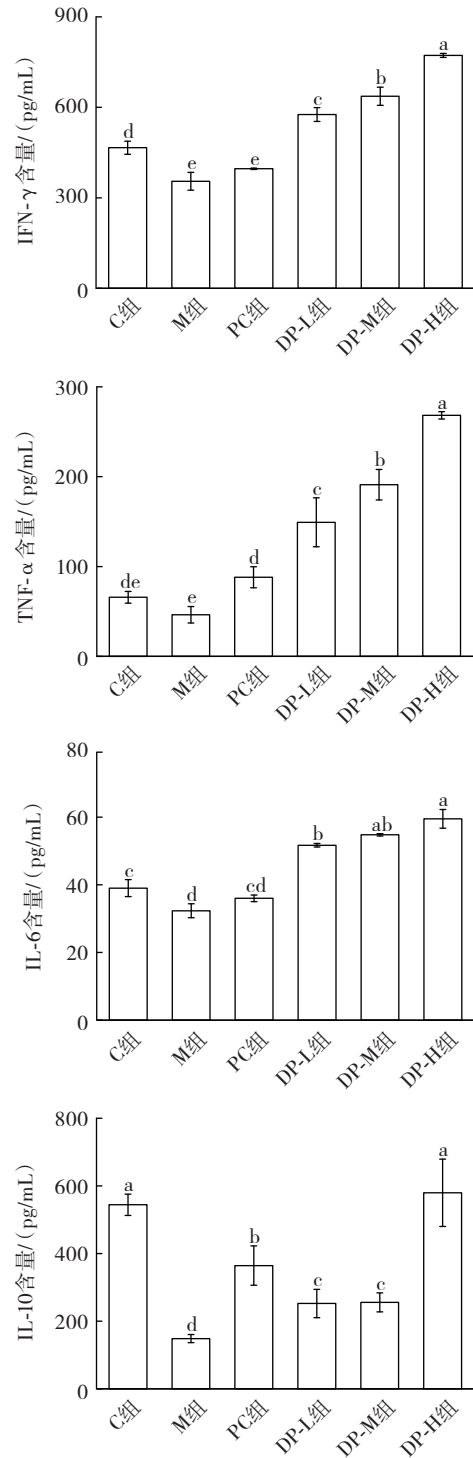
图 2 石斛多糖对小鼠免疫器官指数的影响

Fig.2 Effect of DPs on immune organ index in mice

由图 2 可知,与空白组相比,模型组的胸腺指数和脾脏指数均显著降低($P<0.05$),表明环磷酰胺抑制了小鼠的免疫功能,这也验证了免疫低下小鼠建模成功。而 DP-H 组在这两项指标方面均显著高于模型组和阳性组。结果表明,DP 可促进免疫器官的发育,从而增强免疫调节功效,且高浓度具有更好的效果。

2.2.2 小鼠细胞免疫因子变化

当有抗原入侵时,T 淋巴细胞开始增殖和分化。被激活的 T 细胞可分化成 Th1、Th2 细胞,从而通过分泌各类炎症因子进行免疫应答反应,其中 IFN- γ 和 TNF- α 由 Th1 细胞分泌,IL-6 和 IL-10 则是由 Th2 细胞分泌^[22]。石斛多糖对小鼠细胞免疫因子的影响见图 3。



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P<0.05$ 。

图 3 石斛多糖对小鼠细胞免疫因子的影响

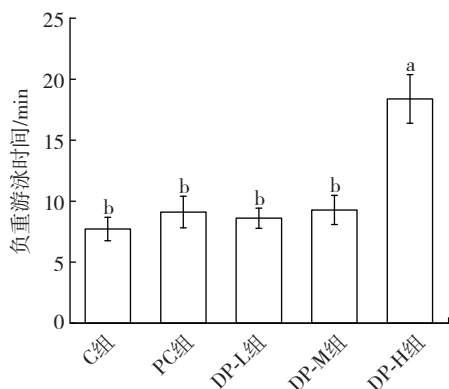
Fig.3 Effect of DPs on cytokines in mice

由图3可知,模型组各细胞免疫因子含量明显低于空白组,说明环磷酰胺抑制了细胞免疫因子的表达。在灌胃3周DP后,相较于模型组,小鼠血清中IFN- γ 、TNF- α 、IL-6、IL-10含量得到了显著提升($P<0.05$)。说明DP有助于恢复细胞免疫因子的表达从而增强免疫应答能力。这与Li等^[23]的研究结果相符。

2.3 石斛多糖对小鼠抗疲劳能力的影响

2.3.1 负重游泳时间

因有氧运动会使体内的糖原被快速利用分解,通过负重游泳时间可以判断不同处理条件下小鼠对疲劳的承受能力,石斛多糖对小鼠负重游泳时间的影响见图4。



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P<0.05$ 。

图4 石斛多糖对小鼠负重游泳时间的影响

Fig.4 Effect of DPs on weight-bearing swimming time in mice

由图4可知,相较于其他组别,DP-H组的负重游泳时间显著延长($P<0.05$),说明高剂量的DP可显著提升小鼠的运动能力,增强其抗疲劳的能力。这与何颖等^[24]的研究结果一致。

2.3.2 尿素氮含量

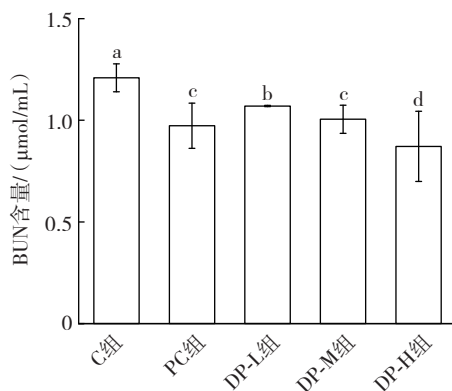
剧烈运动后大量能量的消耗会引起含氮物质,如氨基酸、蛋白质等的分解,从而产生尿素氮。但是尿素氮在体内的积累会引起机体的疲劳,这使得尿素氮含量变化可以作为评价疲劳程度的一个重要指标。石斛多糖对小鼠运动后尿素氮含量的影响见图5。

由图5可知,相较于空白组,运动后DP组和PC组小鼠BUN含量都显著降低($P<0.05$),表明DP可以显著降低运动后BUN的积累,从而达到较好的抗疲劳效果。这与Kim等^[25]的研究结果相一致。

2.3.3 乳酸含量

剧烈运动时肌肉组织产生大量乳酸会使机体产生疲劳现象,从而使乳酸含量成为评价疲劳程度的一个重要指标。石斛多糖对小鼠运动后乳酸含量的影响见图6。

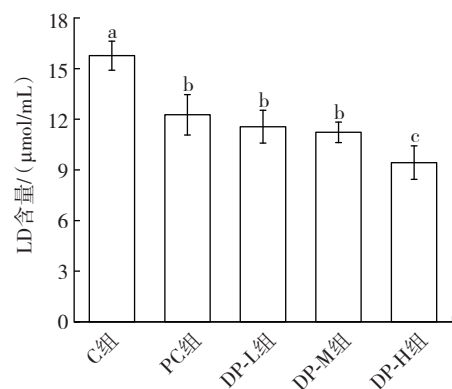
由图6可知,相较于空白组,运动后DP组和PC组小鼠LD含量都显著降低($P<0.05$),其中DP-H组小



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P<0.05$ 。

图5 石斛多糖对小鼠运动后尿素氮含量的影响

Fig.5 Effect of DPs on BUN content in mice after exercise



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P<0.05$ 。

图6 石斛多糖对小鼠运动后乳酸含量的影响

Fig.6 Effect of DPs on LD content in mice after exercise

鼠乳酸含量最低,这可能是因为高剂量的DP增强了小鼠有氧代谢能力,从而有效减少了乳酸的积累,使得该组小鼠体内乳酸含量最低^[26]。DP可有效降低小鼠运动后乳酸的积累,具有良好的抗疲劳能力。

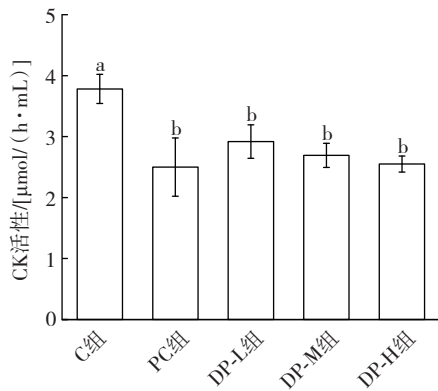
2.3.4 肌酸激酶活性

一般情况下,肌酸激酶存在于骨骼肌、心肌等肌肉组织中,负责肌酸的催化水解从而产生大量的乳酸。而剧烈运动后肌肉组织的损伤则会使肌酸激酶流失到血液中,使血液中肌酸激酶活性增大^[27]。石斛多糖对小鼠运动后肌酸激酶活性的影响见图7。

由图7可知,与空白组相比,DP低、中、高组肌酸激酶活性显著下降($P<0.05$),其效果与阳性组相当,表明DP可有效减轻肌肉组织的损伤,从而降低血液中肌酸激酶的活性,具有良好的肌肉抗疲劳功效。这也与吕圭源等^[28]研究发现石斛多糖具有良好的抗疲劳效果的结论相一致。

2.4 石斛多糖对小鼠体内抗氧化能力的影响

超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)是动物体内抗氧化系统内的酶,对保护机体免受氧化损伤具有十分重要的作用^[29],其活性越高代

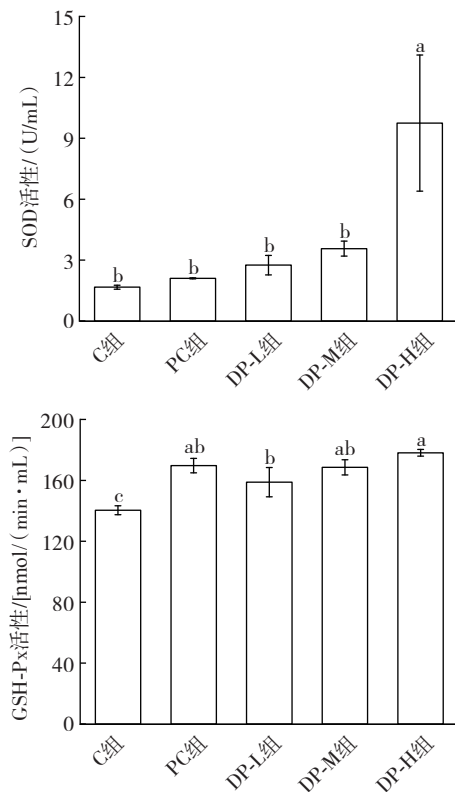


不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P < 0.05$ 。

图7 石斛多糖对小鼠运动后肌酸激酶活性的影响

Fig.7 Effect of DPs on CK activity in mice after exercise

表抗氧化能力越强。石斛多糖对 SOD 和 GSH-Px 活性的影响见图 8。



不同小写字母表示不同组别之间差异显著, $P < 0.05$ 。

图8 石斛多糖对小鼠体内 SOD 和 GSH-Px 活性的影响

Fig.8 Effect of DPs on SOD and GSH-Px activities in mice

由图 8 可知,与空白组相比,DP 组 SOD 和 GSH-Px 活性升高,且 DP-H 组与空白组差异显著($P < 0.05$)。这表明 DP 促进了小鼠血清中 SOD 和 GSH-Px 活性的提高,增强了体内抗氧化的能力。

3 结论

本研究从小鼠体内降低血糖和血脂浓度、增强免

疫和抗疲劳等方面探讨石斛多糖的营养功效,结果表明,石斛多糖可有效调节 II 型糖尿病小鼠血糖并降低 TC、TG、LDL-C 含量,提升 HDL-C 含量从而发挥血脂调节作用,通过对免疫因子及免疫器官发育的调控,促进机体免疫功能的恢复,从而发挥免疫调节作用;可延长小鼠力竭游泳时间,降低尿素氮含量、乳酸含量和肌酸激酶活性,提高体内抗氧化活性,从而有效提升正常小鼠的抗疲劳能力。本研究结果揭示了石斛多糖对动物体内血糖和血脂浓度、免疫功能及抗疲劳能力影响,为功能性食品功能因子的开发提供了新的方法与思路,同时为提高石斛附加值奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] YUAN Y D, LI C T, QIU S M, et al. Exploring the medicinal potential of *Dendrobium*: Uncovering the spatial distribution of flavonoids and alkaloids in 15 species of *Dendrobium* using MALDI-MSI [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 338: 113738.
- [2] LIU Y G, YANG L L, ZHANG Y, et al. *Dendrobium officinale* polysaccharide ameliorates diabetic hepatic glucose metabolism via glucagon-mediated signaling pathways and modifying liver-glycogen structure[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 248: 112308.
- [3] TANG H X, ZHAO T W, SHENG Y J, et al. *Dendrobium officinale* kimura et migo: A review on its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacology, and industrialization[J]. *Evidence - Based Complementary and Alternative Medicine*, 2017, 2017(1): 7436259.
- [4] YAN L, WANG X, LIU H, et al. The genome of *Dendrobium officinale* illuminates the biology of the important traditional Chinese orchid herb[J]. *Molecular Plant*, 2015, 8(6): 922-934.
- [5] 董晴, 宋继田, 史慧言, 等. 超声协同酶法提取铁皮石斛多糖工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(10): 119-124.
DONG Qing, SONG Jitian, SHI Huiyan, et al. Optimization of ultrasound enzyme synergistic extraction process of *Dendrobium officinale* polysaccharides and analysis of its antioxidant activity[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(10): 119-124.
- [6] 张寅, 赵小龙. 铁皮石斛膨化提取物的抗氧化和抗疲劳活性的评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(10): 3328-3334.
ZHANG Yin, ZHAO Xiaolong. Evaluation of antioxidant and anti-fatigue activity of puffed extracts from *Dendrobium officinale*[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(10): 3328-3334.
- [7] 黄梓. 铁皮石斛当归复方多糖胶囊制备工艺、质量标准、降糖降脂功效以及体内安全性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
HUANG Zi. Study on preparation technology, quality standard, hypoglycemic and lipid-lowering efficacy and in vivo safety of *Dendrobium candidum* and *Angelica sinensis* compound polysaccharide capsules[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [8] SHAN Z X, WANG Y, JIN Z Y, et al. Insight into the structural and immunomodulatory relationships of polysaccharides from *Dendrobium officinale* - an in vivo study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108560.
- [9] XU L, ZENG X X, LIU Y N, et al. Inhibitory effect of *Dendrobium officinale* polysaccharide on oxidative damage of glial cells in aging mice by regulating gut microbiota[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 247: 125787.
- [10] 樊溢. 铁皮石斛多糖体内内外降糖降脂功能初探[D]. 太原: 山西

- 大学, 2018.
- FAN Yi. Preliminary study on hypoglycemic and lipid-lowering functions of *Dendrobium candidum* polysaccharide *in vitro* and *in vivo*[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.
- [11] 王云威, 王景雪. 铁皮石斛多糖对2型糖尿病小鼠降糖降脂的作用[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 127-132.
- WANG Yunwei, WANG Jingxue. Hypoglycemic and lipid-lowering effects of polysaccharides from *Dendrobium officinale* stems in type 2 diabetic mice[J]. Food Science, 2020, 41(21): 127-132.
- [12] 周美, 姜阳明, 国光梅, 等. 铁皮石斛多糖制备及免疫活性[J/OL]. 现代食品科技, 2024: 1-12. (2024-04-15). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GZSP20240411001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- ZHOU Mei, JIANG Yangming, GUO Guangmei, et al. Preparation and immune activity of selenium polysaccharide from *Dendrobium candidum*[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-12. (2024-04-15). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GZSP20240411001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [13] 李惠琳, 李珏, 李宝通, 等. 杏鲍菇多糖对小鼠急性化学性肝损伤的抗炎及抗氧化作用[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(21): 68-74, 117.
- LI Huilin, LI Jue, LI Baotong, et al. Anti-inflammatory and antioxidant effects of *Pleurotus eryngii* polysaccharides on acute chemical liver injury in mice[J]. Food Research and Development, 2024, 45(21): 68-74, 117.
- [14] 单政欣. 铁皮石斛多糖基于小鼠免疫调节功能的构效机制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
- SHAN Zhengxin. Study on structure-activity mechanism of *Dendrobium officinale* polysaccharides based on immune regulation function in mice[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.
- [15] 夏云建, 余刚. 霍山石斛多糖干预对力竭运动小鼠 BUN、MDA、BLA、肝糖原影响的研究[J]. 湖北体育科技, 2012, 31(6): 650-653.
- XIA Yunjian, YU Gang. Effect of *Dendrobium huoshanensis* polysaccharide intervention on glycogen in BUN, MDA, BLA and liver glycogen in exhausted exercise mice[J]. Hubei Sports Science and Technology, 2012, 31(6): 650-653.
- [16] 徐海军, 陶文众, 彭欢欢, 等. 黄芪多糖和葡萄籽提取物对衰老模型小鼠负重游泳时间和血常规参数的影响[J]. 天然产物研究与开发, 2015, 27(1): 158-162.
- XU Haijun, TAO Wenzhong, PENG Huanhuan, et al. Effects of *Astragalus* polysaccharides and grape seed extract on loaded swimming time and blood parameters in aging mice model[J]. Natural Product Research and Development, 2015, 27(1): 158-162.
- [17] 白海军. 富硒大豆低聚肽的制备及其抗疲劳功能的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 46-50, 58.
- BAI Haijun. Preparation and anti-fatigue function of selenium-rich soybean oligopeptide[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 46-50, 58.
- [18] LI C, WANG Y W, HUANG Z J, et al. Hypoglycemic effect of polysaccharides of *Dendrobium officinale* compound on type 2 diabetic mice[J]. Journal of Functional Foods, 2023, 106: 105579.
- [19] DAI H Y, SHAN Z Y, SHI L, et al. Mulberry leaf polysaccharides ameliorate glucose and lipid metabolism disorders via the gut microbiota-bile acids metabolic pathway[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282(Pt 2): 136876.
- [20] 戴亚峰, 郑亭, 王诗文, 等. 霍山石斛提取物降血脂作用研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(28): 73-74.
- DAI Yafeng, ZHENG Ting, WANG Shiwen, et al. Hypolipidemic activity of the extracts of *Dendrobium huoshanense*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(28): 73-74.
- [21] 李佳, 郑紫莹, 杨晓丽, 等. 仿生石斛多糖对小鼠免疫器官的调节作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 79-86.
- LI Jia, ZHENG Ziyang, YANG Xiaoli, et al. Regulatory effect of biomimetic *Dendrobium* polysaccharides on immune organs in mice[J]. Food Research and Development, 2023, 44(3): 79-86.
- [22] 黄晓君. 基于肠道免疫的铁皮石斛多糖免疫调节机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- HUANG Xiaojun. Study on immune regulation mechanism of *Dendrobium candidum* polysaccharide based on intestinal immunity [D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [23] LI J R, TAO W Y, ZHOU W Y, et al. The comprehensive analysis of gut microbiome and spleen transcriptome revealed the immunomodulatory mechanism of *Dendrobium officinale* leaf polysaccharide on immunosuppressed mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134975.
- [24] 何颖, 沈先荣, 周浩泽, 等. 铁皮石斛多糖抗疲劳作用研究[C]//全国第二届海洋与陆地多糖多肽及天然创新药物研发学术会议论文集. 漠河, 2015: 145.
- HE Ying, SHEN Xianrong, ZHOU Haoze, et al. Study on the anti-fatigue effect of *Dendrobium officinale* polysaccharides[C]//Proceedings of the 2nd National Conference on the Development of Marine and Terrestrial Polysaccharide Polypeptides and Natural Innovative Drugs. Mohe, 2015: 145.
- [25] KIM S, JO K, BYUN B S, et al. Chemical and biological properties of puffed *Dendrobium officinale* extracts: Evaluation of antioxidant and anti-fatigue activities[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 73: 104144.
- [26] 封毅, 黄茂康, 叶建保, 等. 铁皮石斛提高小鼠运动能力、抗疲劳能力和免疫水平的量效关系分析[J]. 南方农业学报, 2014, 45(6): 1089-1093.
- FENG Yi, HUANG Maokang, YE Jianbao, et al. The lowest doses of *Dendrobium officinale* for improving sports ability, anti-fatigue and immune ability of mice[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(6): 1089-1093.
- [27] 赵文瑾. 芫根多糖提取、分离及抗疲劳机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- ZHAO Wenjin. Study on extraction, separation and anti-fatigue mechanism of polysaccharide from the root of *Daphne giraldii*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [28] 吕圭源, 颜美秋, 陈素红. 铁皮石斛功效相关药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(4): 489-49.
- LV Guiyuan, YAN Meiqiu, CHEN Suhong. Research progress on pharmacological effects related to the efficacy of *Dendrobium officinale*[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine, 2013, 38(4): 489-49.
- [29] 陈栋才. 铁皮石斛多糖的提取、分离纯化、结构及生物活性研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2015.
- CHEN Dongcai. Extraction, separation and purification, structure and biological activity of polysaccharides from *Dendrobium officinale* [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2015.

责任编辑:王艳

收稿日期:2024-12-13