

美味牛肝菌多糖 对 2 型糖尿病大鼠肝损伤的改善作用

肖艳红¹, 徐倩¹, 周晓慧¹, 刘楠², 苟子薇¹, 李素婷^{1,*}

(1.承德医学院生物化学教研室, 河北承德 067000;

2.承德市中心医院, 河北承德 067000)

摘要:目的:研究美味牛肝菌多糖对 2 型糖尿病(T2DM)大鼠肝损伤的改善作用。方法:采用高脂高糖饲料喂养联合链脲佐菌素(STZ)腹腔注射法构建 T2DM 大鼠模型。将 T2DM 大鼠随机分成模型组、牛肝菌多糖低、高剂量组(200, 400 mg/kg·bw)、二甲双胍组(200 mg/kg·bw),以正常组作对照,正常组与模型组给予生理盐水。各组灌胃给药 1 次/d, 4 周后,测定各组大鼠空腹血糖(GLU)值并计算肝脏指数;测定血清中甘油三酯(TG)含量,谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)的活力;检测肝脏中过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活力,还原型谷胱甘肽(GSH)和丙二醛(MDA)含量。结果:与模型组相比,三组药物组大鼠的 GLU 水平显著降低($p < 0.05$)。TG 和 MDA 含量减少,肝脏指数下降,ALT、AST 的活力显著降低($p < 0.01$);CAT、SOD、GSH-Px 活力和 GSH 的含量极显著升高($p < 0.01$)。结论:美味牛肝菌多糖对减轻 T2DM 大鼠的肝损伤有显著的疗效。

关键词:美味牛肝菌多糖, 2 型糖尿病, 肝损伤, 抗氧化

The improvement effect of *Boletus edulis* polysaccharides on the liver injury in type 2 diabetic rats

XIAO Yan-hong¹, XU Qian¹, ZHOU Xiao-hui¹, LIU Nan², GOU Zi-wei¹, LI Su-ting^{1,*}

(1.Department of Biochemistry, Chengde Medical College, Chengde 067000, China;

2.Chengde Center Hospital, Chengde 067000, China)

Abstract: Objective: The objective of this work was to investigate the effect of *Boletus edulis* polysaccharide on the liver injury in type 2 diabetes mellitus (T2DM) rats. Methods: The rats were fed with high-fat high-sugar fodder and then injected with streptozocin (STZ) to induce T2DM rat model. Then the T2DM rats were divided randomly into model group, Bolete polysaccharide dose groups (200, 400 mg/kg·bw) and metformin group (200 mg/kg·bw), the normal rats were used as blank control, the normal and model group rats were fed with normal saline. The drugs were infused to stomach of every group of rats and once a day for 4 weeks. Then the levels of blood glucose (GLU) were detected, the liver indexes were calculated; the contents of triglyceride (TG), the activities of Glutamic-pyruvic Transaminase (ALT) and Glutamic oxalacetic Transaminase (AST) in serum were measured; the activities of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), glutathion peroxidase (GSH-Px) and the contents of glutathione (GSH), malonaldehyde (MDA) in the liver were detected. Results: Compared with the model group, three drug groups showed obviously lower contents of GLU, TG and MDA, liver index, activities of ALT and AST; and higher activities of CAT, SOD and GSH-Px, contents of GSH, the difference was significant. Conclusion: *Boletus edulis* polysaccharide can observably relieve the liver injury in T2DM rats.

Key words: *Boletus edulis* polysaccharides; type 2 diabetes mellitus; liver injury; antioxidation

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2018)11-0297-05

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2018.11.051

引文格式: 肖艳红, 徐倩, 周晓慧, 等. 美味牛肝菌多糖对 2 型糖尿病大鼠肝损伤的改善作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 297-300, 313.

2 型糖尿病(T2DM)是由于胰岛素抵抗导致胰岛素信号传导通路受阻所引起的^[1]。肝脏是人体代

收稿日期: 2017-12-12

作者简介: 肖艳红(1984-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 中药新药研究与开发, E-mail: 250624104@qq.com。

* 通讯作者: 李素婷(1963-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 中药新药研究, E-mail: xiaoyanhong1990@163.com。

基金项目: 河北省教育厅青年基金项目(QN2017008); 河北省中医药管理局科研项目(2017080); 河北省卫生计生委重点课题项目(20170876); 承德市科技计划项目(201601A023); 承德医学院青年基金项目(201722); 承德医学院博士基金项目(201203)。

谢的中枢,长期的高血糖会造成肝脏氧化应激系统异常^[2-4],出现肝损伤^[5-7]。真菌多糖具有多种生理活性,如抗肿瘤、降血脂血糖、提高免疫力、抗氧化延缓衰老、抗菌、抗辐射等^[8-11],从真菌中寻找和提取有活性的多糖一直是国内外食品与保健领域研究和开发的热点。

美味牛肝菌(*Boletus edulis*),归于牛肝菌属、美味牛肝菌种,又称大脚菇,是久负盛名的优质野生食用真菌,不但美味可口,营养丰富,还可药用,深受人们的青睐^[12-13]。牛肝菌可分为美味牛肝菌、黑牛肝菌、褐环粘盖牛肝菌等^[14],近来已有学者研究了几种牛肝菌提取成分的功效,郭永月^[15]与王建明^[16]分别研究了黑牛肝菌多糖与褐环粘盖牛肝菌的乙醇提取物对小鼠酒精性肝损伤及糖尿病有一定的改善,但未见美味牛肝菌多糖对 T2DM 大鼠肝损伤的保护作用的相关报道。

本研究采用高脂高糖饲料喂养联合 STZ 腹腔注射法构建 T2DM 大鼠模型^[17],研究美味牛肝菌多糖的降糖、降脂以及糖尿病性肝损伤的保护作用,以期美味牛肝菌多糖相关保健食品的开发提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

健康清洁级 Wistar 大鼠 40 只,雄性,体重 180~200 g,12 周龄,由北京华阜康科技股份有限公司提供,动物合格证号为 SCXK(京)2009-0008,饲养于承德医学院实验动物中心,自由摄食水,室温 20~22℃,自然采光,通风良好;大鼠标准饲料及高脂高糖饲料

北京科澳协力饲料有限公司,其中高脂高糖饲料的配方为:猪油 10%、蛋黄粉 8%、胆固醇 1.5%、蔗糖 20%、胆酸钠 0.1%、标准饲料 60.4%;牛肝菌 承德润隆食品有限公司,批号 20120906003,牛肝菌于恒温箱 50℃烘干至恒重,并用植物粉碎机粉碎过 80 目筛制成粉末备用;牛肝菌多糖 由承德医学院生物化学教研室制备;链脲佐菌素(STZ) 美国 Sigma 公司,用时溶解于 0.1 mol/L(pH=4.3)柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液中,现用现配;盐酸二甲双胍 中美上海施贵宝制药有限公司,0.5 g/片,批号 1311123;血糖仪及配套试纸 三诺生物传感股份有限公司,批号 1312085;甘油三酯(TG)、谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)、还原型谷胱甘肽(GSH)和丙二醛(MDA)检测试剂盒 南京建成生物工程公司,批号 1708027;BCA 蛋白浓度测定试剂盒 北京索莱宝科技有限公司,批号 1705009;其他所用试剂 均为分析纯。

WSZ-133-65 型电热恒温水浴锅 上海东星建材实验设备有限公司;旋转蒸发器 RE-52AA,上海亚荣生化仪器厂;SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵 石家庄阳星仪器贸易有限公司;LGJ-22D 型冷冻干燥机 北京四环科学仪器厂有限公司;722 可见分光光度计 上海精密科学仪器有限公司;BFM-6A 型植物粉碎机 济南倍力粉技术工程有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 牛肝菌多糖的提取 参照文献[18-20],准确称量牛肝菌粉末 15.0 g,加 300 mL 石油醚于 70℃水浴锅中脱脂 1.5 h 后抽滤。脱脂后的牛肝菌加水 300 mL 于 100℃水浴锅中加热 1.5 h,4000 r/min 离心 10 min。沉淀再次加水加热后 4000 r/min 离心 10 min,两次上清液置于旋转蒸发仪进行浓缩,浓缩比为 5:1,向浓缩液中加入无水乙醇至醇浓度为 80%。低温静置过夜后 4000 r/min 离心 10 min,将上层酒精萃取液再次用旋转蒸发仪进行浓缩、80%醇沉、4000 r/min 离心 10 min,共重复三次。收集沉淀,即得牛肝菌多糖。-40℃低温冷冻 48 h 干燥,称量冻干膏,并计算多糖含量。采用苯酚-硫酸法^[21]测定牛肝菌多糖提取物中多糖含量,以葡萄糖作标准曲线。回归方程为 $Y = 11.732X$, $R^2 = 0.996$,说明线性关系良好。冻干膏中多糖含量(%) = 多糖质量/冻干膏质量 × 100,经测定多糖含量为 53.83%。

1.2.2 T2DM 大鼠模型的建立及分组 取 40 只大鼠,随机分为正常组(A)、模型组(B)、牛肝菌多糖低剂量组(C)、牛肝菌多糖高剂量组(D)和二甲双胍阳性药物对照组(E),每组 8 只。标准饲料正常饲养 1 w 后,B、C、D、E 组给予高脂高糖饲料进行造模,为期 28 d,第 29 d 禁食 12 h,一次性腹腔注射 35 mg/kg·bw STZ;A 组继续给予标准饲料后注射同等剂量的柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液。72 h 后经内眦眼眶后静脉丛采血,测空腹血糖 ≥ 16.7 mmol/L 为造模成功。各组分笼饲养,A、B 组给予生理盐水灌胃,C、D 组给予牛肝菌多糖(200、400 mg/kg·bw),E 组给予二甲双胍(200 mg/kg·bw),1 次/d,连续给药 4 w。

1.2.3 指标的测定 给药前、末次给药后两次各组大鼠内眦眼眶后静脉丛采血,使用血糖仪配备试纸测定各组大鼠空腹血糖(GLU);给药结束后麻醉大鼠,腹主动脉取血,血样 4℃静置 2 h,3000 r/min 离心 10 min 后取上清,根据试剂盒说明书测定各组大鼠血清中 TG、ALT 与 AST;处死大鼠后称量体重及肝脏湿重,参照文献^[22],计算各组大鼠肝脏指数,肝脏指数 = (肝脏重量/体重) × 1000;取肝脏,利用生理盐水制备 10% 肝匀浆,3000 r/min 离心 10 min 后取上清,测定 CAT、SOD、GSH-Px、GSH、MDA,具体操作步骤参照各种试剂盒说明书进行。

1.3 数据处理

结果采用 SPSS 19.0 统计软件进行分析,多组间比较采用单因素方差分析,两组间比较采用 q 检验。以 $p < 0.05$ 表示差异具有统计学意义, $p < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 美味牛肝菌多糖对 2 型糖尿病大鼠血糖含量的影响

由表 1 可知,给药前 4 个造模组大鼠血糖含量均高于 16.7 mmol/L,并显著高于正常组($p < 0.01$),说明造模成功。与给药前比较,给药 4 w 后,牛肝菌多糖低、高剂量组大鼠与二甲双胍组大鼠血糖含量均显著降低($p < 0.01$),并均显著低于模型组($p <$

0.05),且牛肝菌多糖高剂量组与阳性药物二甲双胍组大鼠血糖含量无显著性差异($p > 0.05$)。以上结果表明,美味牛肝菌多糖能够降低 T2DM 大鼠血糖含量,高剂量组降糖效果与二甲双胍相近。

表1 美味牛肝菌多糖对大鼠血糖含量的影响($\bar{x} \pm s$, mmol/L)
Table 1 Effects of *Boletus edulis* polysaccharides on blood glucose contents of rats($\bar{x} \pm s$, mmol/L)

组别	n	给药前	给药 4 w
正常组	8	4.41 ± 1.13	3.85 ± 0.45
模型组	8	19.44 ± 5.99 ^a	17.75 ± 3.31 ^a
低剂量组	8	21.99 ± 4.86 ^a	7.98 ± 6.44 ^{bc}
高剂量组	8	22.52 ± 6.24 ^a	5.98 ± 1.84 ^{bcd}
二甲双胍组	8	18.90 ± 6.37 ^a	4.84 ± 4.35 ^{bc}

注:a:与正常组比较 $p < 0.01$; b:与给药前比较 $p < 0.01$; c:与模型组比较 $p < 0.05$; d:与二甲双胍组比较 $p > 0.05$ 。

2.2 美味牛肝菌多糖对2型糖尿病大鼠体重与肝脏指数的影响

如表2所示,与正常组比较,模型组大鼠的体重显著减轻($p < 0.01$),并显著低于3组药物组($p < 0.01$);肝脏指数显著升高($p < 0.01$),并显著高于3组药物组($p < 0.01$),且牛肝菌多糖高剂量组与二甲双胍组大鼠的体重与肝脏指数均无显著性差异($p > 0.05$)。以上结果表明,美味牛肝菌多糖能改善糖尿病“三多一少”中体重减轻的症状,并有效降低肝脏指数,减轻脂肪在肝脏的堆积。高剂量组与二甲双胍组作用效果相当。

2.3 美味牛肝菌多糖对2型糖尿病大鼠血清TG含量与ALT、AST活力的影响

由表3可知,与正常组比较,模型组大鼠血清中TG含量与ALT、AST的活力均显著升高($p < 0.01$),并显著高于3组药物组($p < 0.01$),且牛肝菌多糖高剂量组与二甲双胍组大鼠的各项结果均无显著差异($p > 0.05$)。以上结果表明,美味牛肝菌多糖能减少

表2 美味牛肝菌多糖对大鼠体重及肝脏指数的影响($\bar{x} \pm s$)
Table 2 Effects of *Boletus edulis* polysaccharides on body weight and liver index of rats($\bar{x} \pm s$)

组别	n	体重(g)	肝脏指数
正常组	8	298.7 ± 4.5	3.1 ± 0.1
模型组	8	188.7 ± 5.8 ^a	5.9 ± 0.2 ^a
低剂量组	8	293.1 ± 6.2 ^c	4.2 ± 0.1 ^c
高剂量组	8	298.5 ± 5.8 ^{cd}	3.9 ± 0.1 ^{cd}
二甲双胍组	8	298.6 ± 7.7 ^c	4.0 ± 0.2 ^c

注:a:与正常组比较 $p < 0.01$; c:与模型组比较 $p < 0.01$; d:与二甲双胍组比较 $p > 0.05$ 。

T2DM 大鼠血脂含量,减轻肝脏细胞损伤,降低血清中肝内酶的活力,高剂量组与二甲双胍组功效相近。

2.4 美味牛肝菌多糖对2型糖尿病大鼠肝脏CAT、SOD与GSH-Px活力的影响

由表4可知,与正常组比较,模型组大鼠肝脏中CAT、SOD和GSH-Px活力均显著降低($p < 0.01$);与模型组相比,3组药物组大鼠肝脏中CAT、SOD和GSH-Px活力均显著升高($p < 0.01$)。其中,牛肝菌多糖高剂量组大鼠肝脏中CAT、SOD和GSH-Px活力显著高于二甲双胍处理组大鼠($p < 0.01$)。以上结果表明3组药物能够改善T2DM大鼠肝脏组织中CAT、SOD等抗氧化酶活力。

2.5 美味牛肝菌多糖对2型糖尿病大鼠肝脏GSH与MDA含量的影响

如表5所示,与正常组比较,模型组大鼠肝脏组织中GSH含量明显降低,但MDA的含量显著升高($p < 0.01$);与模型组相比,3组药物组大鼠肝脏组织中GSH含量显著升高,而MDA含量显著降低($p < 0.01$)。其中,牛肝菌多糖高剂量组大鼠肝脏组织中GSH含量显著高于二甲双胍组大鼠,MDA的含量显著低于二甲双胍组大鼠($p < 0.01$)。以上结果表明,3组药物能够提高T2DM大鼠肝脏中抗氧化物质GSH

表3 美味牛肝菌多糖对大鼠血清TG含量与ALT、AST活力的影响($\bar{x} \pm s$)
Table 3 Effects of *Boletus edulis* polysaccharides on TG contents and activities of ALT and AST in serum of rats($\bar{x} \pm s$)

组别	n	TG (mmol/L)	ALT (U/L)	AST (U/L)
正常组	8	0.45 ± 0.03	48.6 ± 0.4	108.6 ± 3.3
模型组	8	1.50 ± 0.34 ^a	97.5 ± 1.2 ^a	159.8 ± 5.1 ^a
低剂量组	8	0.32 ± 0.02 ^c	77.4 ± 0.9 ^c	142.5 ± 5.0 ^c
高剂量组	8	0.31 ± 0.06 ^{cd}	48.5 ± 0.6 ^{cd}	100.4 ± 3.8 ^{cd}
二甲双胍组	8	0.36 ± 0.01 ^c	51.6 ± 1.0 ^c	104.7 ± 3.3 ^c

注:a:与正常组比较 $p < 0.01$; c:与模型组比较 $p < 0.01$; d:与二甲双胍组比较 $p > 0.05$ 。

表4 美味牛肝菌多糖对大鼠肝脏CAT、SOD与GSH-Px活力的影响($\bar{x} \pm s$, U/mg protein)
Table 4 Effects of *Boletus edulis* polysaccharides on activities of CAT, SOD and GSH-Px in liver of rats($\bar{x} \pm s$, U/mg protein)

组别	n	CAT	SOD	GSH-Px
正常组	8	292.3 ± 3.5	236.1 ± 5.4	98.6 ± 0.8
模型组	8	170.0 ± 2.0 ^a	132.3 ± 0.5 ^a	46.2 ± 6.6 ^a
低剂量组	8	232.5 ± 4.0 ^c	177.5 ± 1.1 ^c	66.1 ± 6.4 ^c
高剂量组	8	290.6 ± 5.3 ^{cd}	230.5 ± 7.2 ^{cd}	95.0 ± 5.9 ^{cd}
二甲双胍组	8	281.0 ± 2.7 ^c	216.0 ± 9.7 ^c	81.6 ± 5.9 ^c

注:a:与正常组比较 $p < 0.01$; c:与模型组比较 $p < 0.01$; d:与二甲双胍组比较 $p < 0.01$ 。

的水平,降低过氧化产物 MDA 的含量,美味牛肝菌多糖高剂量组的效果优于二甲双胍。

表5 美味牛肝菌多糖对大鼠肝脏

GSH 与 MDA 含量的影响($\bar{x} \pm s$)

Table 5 Effects of *Boletus edulis* polysaccharides on GSH and MDA contents in liver of rats($\bar{x} \pm s$)

组别	n	GSH ($\mu\text{mol}/\text{mg protein}$)	MDA ($\text{nmol}/\text{mg protein}$)
正常组	8	893.8 $\pm$ 7.3	3.1 $\pm$ 0.4
模型组	8	670.0 $\pm$ 2.0 ^a	5.4 $\pm$ 0.4 ^a
低剂量组	8	840.0 $\pm$ 17.5 ^c	4.2 $\pm$ 0.5 ^c
高剂量组	8	894.4 $\pm$ 14.3 ^{cd}	3.0 $\pm$ 0.3 ^{cd}
二甲双胍组	8	869.7 $\pm$ 18.2 ^c	3.7 $\pm$ 0.3 ^c

注:a:与正常组比较 $p < 0.01$;c:与模型组比较 $p < 0.01$;d:与二甲双胍组比较 $p < 0.01$ 。

3 讨论

本研究通过建立 T2DM 大鼠模型,探讨美味牛肝菌多糖对 T2DM 大鼠肝脏的保护作用。结果表明,与模型组相比,美味牛肝菌多糖处理组大鼠的 GLU($p < 0.05$)和 TG($p < 0.01$)含量均显著降低,表明美味牛肝菌多糖具有较好的降血糖降血脂作用^[23];肝脏指数明显降低,表明美味牛肝菌多糖能够促进糖脂代谢^[24],减少脂肪在肝脏的堆积^[25-26];肝脏抗氧化酶系 CAT、SOD、GSH-Px 的活力和非酶抗氧化物质 GSH 的含量显著升高($p < 0.01$),且脂质过氧化产物 MDA 的含量显著降低($p < 0.01$),进一步表明美味牛肝菌多糖可以通过恢复肝脏氧化应激系统功能^[27-28],提高肝脏抗氧化能力,抵御过氧化物的攻击,清除各种自由基,减轻肝脏细胞膜脂质过氧化的程度^[29];ALT、AST 是存在于肝细胞内的代谢酶类,血清中 ALT、AST 的活力可直接作为肝功能检测的指标^[30],美味牛肝菌多糖组大鼠血清 ALT、AST 的活力显著降低充分说明美味牛肝菌多糖可以保护肝脏组织,减轻肝细胞炎症、坏死等损伤,维持肝细胞膜结构的完整性^[31]。美味牛肝菌多糖高剂量组大鼠肝脏组织中 CAT、SOD、GSH-Px 的活力与 GSH 的含量均显著高于阳性药物二甲双胍组大鼠,且 MDA 的含量显著低于二甲双胍组大鼠,说明美味牛肝菌多糖对减轻 T2DM 大鼠的肝损伤有显著的功效,且有一定的剂量依赖性。以往研究大多为关于美味牛肝菌多糖提取方法的优化,体外检测抗氧化能力等,未见有关美味牛肝菌多糖对大鼠糖尿病性肝损伤影响的报道。本研究表明,美味牛肝菌多糖能够改善 T2DM 大鼠的肝损伤,可为将美味牛肝菌多糖开发为预防治疗 T2DM 的保健品提供新的思路。但究竟美味牛肝菌多糖中何种组分实现其降糖功能,以及影响糖代谢途径中哪些基因的表达等问题,有待深入的探讨。

4 结论

美味牛肝菌多糖通过降糖、降脂,提高 T2DM 大鼠肝脏 CAT、SOD、GSH-Px 活力和 GSH 的含量,抵抗自由基及各种过氧化物的攻击,降低了血清 ALT、AST 活力与肝脏 MDA 的含量,对 T2DM 大鼠的肝损

伤有极大的保护作用,但其具体机制还需进一步研究。

参考文献

- [1] White MF. Insulin signaling in health and disease [J]. Science, 2003, 302(5651): 1710-1711.
- [2] Bonapace S, Perseghin G, Molon G, et al. Nonalcoholic fatty liver disease is associated with left ventricular diastolic dysfunction in patients with type 2 diabetes [J]. Diabetes Care, 2012, 35(2): 389-395.
- [3] Baig NA, Herrine SK, Rubin R. Liver disease and diabetes mellitus [J]. Clinics in laboratory medicine, 2001, 21(1): 193-207.
- [4] Herzig S. Liver: a target of late diabetic complications [J]. Exp Clin Endocrinol Diabetes, 2012, 120(4): 202-204.
- [5] Evans JL, Maddux BA, Goldfine ID. The molecular basis for oxidative stress-induced insulin resistances [J]. Antioxid Redox Signal, 2005, 7(7): 1040-1052.
- [6] Asnat BD, Nava B. Proposed mechanisms for the induction of insulin resistance by oxidative stress [J]. Antioxid Redox Signal, 2005, 7(11): 1553-1567.
- [7] Brownlee M. Biochemistry and molecular cell biology of diabetic complications [J]. Nature, 2001, 414(6865): 813-820.
- [8] 盛伟, 方晓阳, 吴萍. 白灵菇、鲍侧菇、阿魏菇多糖体外抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2008, 29(5): 103-106.
- [9] Jia J, Zhang X, Hu YS, et al. Evaluation of *in vivo* antioxidant activities of Ganoderma lucidum polysaccharides in STZ-diabetic rats [J]. Food Chemistry, 2009, 115(1): 32-36.
- [10] Meng FY, Liu XN, Jia L. Optimization for the production of exopolysaccharides from Morchella esculenta SO-02 in submerged culture and its antioxidant activities *in vitro* [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(3): 700-704.
- [11] 孙娟, 郑朝辉, 刘磊, 等. 4 种珍稀食用菌粗多糖的抗氧化活性研究 [J]. 安徽农业大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 404-409.
- [12] 周玲仙, 殷建忠. 云南野生食用牛肝菌营养成分分析及评价 [J]. 食用菌学报, 2008, 4(1): 61-62.
- [13] 崔福顺, 张华, 李官浩, 等. 美味牛肝菌黄酮类提取物体内抗氧化作用研究 [J]. 食品科技, 2014, 39(8): 201-205.
- [14] 戴玉成, 周丽伟, 杨祝良, 等. 菌物学报 [J]. 中国食用菌名录, 2010, 29(1): 1-21.
- [15] 郭永月, 徐杰, 邢佳, 等. 黑牛肝菌多糖对小鼠酒精性肝损伤的改善作用 [J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 325-328.
- [16] 王建国, 赵晓静, 燕瑾, 等. 褐环粘盖牛肝菌乙醇提取物抗糖尿病研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2016, 28(12): 271-276.
- [17] 肖艳红, 谷佳琦, 杨晔娟, 等. 高脂高糖饲料联合 STZ 诱导 2 型糖尿病大鼠模型 STZ 最佳剂量探讨 [J]. 承德医学院学报, 2015, 32(5): 376-378.
- [18] 田光辉. 香菇多糖提取工艺的优化 [J]. 延安大学学报: 自然科学版, 2002, 21(2): 46-47.
- [19] 田光辉, 刘春芳, 辜天琪, 等. 野生藎香中多糖的提取与

(下转第 313 页)

glycoproteins with activity based on the molecularly imprinted spatial structure of the target and boronate affinity[J].Angewandte Chemie International Edition, 2014(46):12697-12701.

[63] Wang J, Li J, Wang Y, et al. Development of versatile metal-organic framework functionalized magnetic graphene core-shell biocomposite for highly specific recognition of glycopeptides[J]. ACS Applied Materials and Interfaces, 2016(41):27482-27489.

[64] Wan W, Liang Q, Zhang X, et al. Magnetic metal-organic frameworks for selective enrichment and exclusion of proteins for MALDI-TOF MS analysis[J]. Analyst, 2016(15):4568-4572.

[65] Yang Q, Zhu Y, Luo B, et al. pH-responsive magnetic metal-organic framework nanocomposites for selective capture and release of glycoproteins[J]. Nanoscale, 2017(2):527-532.

[66] Sun X, Zhu B, Ji D K, et al. Selective fluorescence detection of monosaccharides using a material composite formed between graphene oxide and boronate-based receptors[J]. ACS Applied

Materials and Interfaces, 2014(13):10078-10082.

[67] Shen P, Xia Y. Synthesis-modification integration: one-step fabrication of boronic acid functionalized carbon dots for fluorescent blood sugar sensing[J]. Analytical Chemistry, 2014(11):5323-5329.

[68] Ye J, Chen Y, Liu Z. A boronate affinity sandwich assay: an appealing alternative to immunoassays for the determination of glycoproteins[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2014(39):10386-10389.

[69] Zhang W, Liu W, Li P, et al. A fluorescence nanosensor for glycoproteins with activity based on the molecularly imprinted spatial structure of the target and boronate affinity[J]. Angewandte Chemie, 2014(46):12697-12701.

[70] Anzai J. Recent progress in electrochemical biosensors based on phenylboronic acid and derivatives[J]. Materials Science and Engineering: C, 2016(67):737-746.

(上接第300页)

测定及抗氧化活性研究[J].食品工业科技, 2010, 31(2):249-251.

[20] 杜敏华, 张英君, 刘明星, 等. 野生牛肝菌多糖提取工艺的优化及其对自由基的清除作用[J].食品工业科技, 2012, 33(22):292-295.

[21] 涂宗财, 李敏, 刘光宪, 等. 苯酚-硫酸法测定油菜花粉多糖含量的研究[J].食品工业科技, 2007, 28(4):219-221.

[22] 王昱, 王胜青, 叶文斌, 等. 橄榄苦苷对糖尿病大鼠肾组织的保护作用及其机制[J].食品工业科技, 2015, 36(21):353-358.

[23] Weickert MO, Pfeiffer AF. Signalling mechanisms linking hepatic glucose and lipid metabolism[J]. Diabetologia, 2006, 49(8):1732-1741.

[24] Yamashita H, Takenoshita M, Sakurai M, et al. A glucose-responsive transcription factor that regulates carbohydrate metabolism in the liver[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98(16):9116-9121.

[25] Smith BW, Adams LA. Nonalcoholic fatty liver disease and diabetes mellitus: pathogenesis and treatment[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2011, 7(8):456-465.

[26] Verderese JP, Younossi Z. Interaction of Type 2 diabetes and nonalcoholic fatty liver disease[J]. Expert Review of Gastroenterology and Hepatology, 2013, 7(5):405-407.

[27] Lucchesi AN, Freitas NT, Cassettari LL, et al. Diabetes mellitus triggers oxidative stress in the liver of alloxan-treated rats: a mechanism for diabetic chronic liver disease[J]. Acta Cirurgica Brasileira, 2013, 28(7):502-508.

[28] Kaneto H, Nakatani Y, Kawamori D, et al. Role of oxidative stress, endoplasmic reticulum stress, and c-Jun N-terminal kinase in pancreatic β -cell dysfunction and insulin resistance[J]. International Journal of Biochemistry and Cell Biology, 2006, 38(5-6):782-793.

[29] 谭林, 刘冬恋, 杨春梅, 等. 桑叶总黄酮对2型糖尿病模型大鼠肝脏的保护作用[J].食品工业科技, 2016, 37(8):340-343.

[30] 缪云萍, 陈爱瑛, 夏志国, 等. 角鲨烯对小鼠急性酒精性肝损伤的保护作用[J].食品工业科技, 2015, 36(16):364-377.

[31] Ahmadi H, Azar ST. Liver disease and diabetes: association, pathophysiology, and management[J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2014, 104(1):53-62.

权威·核心·领先·实用·全面