

彭丽娜, 宁尚斌, 王光光, 等. 玛咖结合运动疗法对糖尿病大鼠肾线粒体呼吸链酶活性及肾功能的影响 [J]. 中国比较医学杂志, 2019, 29(1): 64-68.

Peng LN, Ning SB, Wang GG, et al. Effects of Maca combined exercise on activity of renal mitochondrial respiratory chain enzymes and renal function in diabetic rats [J]. Chin J Comp Med, 2019, 29(1): 64-68.

doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2019.01.011

玛咖结合运动疗法对糖尿病大鼠肾线粒体呼吸链酶活性及肾功能的影响

彭丽娜, 宁尚斌, 王光光, 常世民, 张玉峰, 李艳霞

(廊坊师范学院运动人体科学教研室, 河北 廊坊 065000)

【摘要】 目的 观察玛咖结合运动疗法对糖尿病大鼠肾线粒体呼吸酶活性及肾功能的影响。方法 将40只糖尿病模型大鼠随机分为模型对照组、玛咖组、运动组和玛咖+运动组。玛咖组和玛咖+运动组每日灌胃玛咖粉剂(5 g/kg), 运动组和玛咖+运动组进行跑台训练。6周后各组大鼠进行力竭运动(35 m/min), 随后即刻麻醉提取肾线粒体, 测定线粒体呼吸链酶RCCI、RCCII、RCCIII、RCCIV活性及血尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)、血清肌酐(serum creatinine, SCr)、血糖(blood glucose)含量。结果 与对照组比较, 玛咖组大鼠肾线粒体呼吸酶RCCII, 运动组RCCI、RCCII, 玛咖+运动组RCCI、RCCII、RCCIV活性显著升高; 与玛咖组比较, 玛咖+运动组RCCI、RCCII活性显著升高; 与运动组比较, 玛咖+运动组RCCII活性显著升高。与对照组比较, 玛咖组、玛咖+运动组大鼠血尿素氮含量, 运动组、玛咖+运动组血清肌酐、血糖水平降低, 差异有显著性($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 与玛咖组比较, 玛咖+运动组血清肌酐、血糖水平降低, 差异有显著性($P < 0.05$); 与运动组比较, 玛咖+运动组血尿素氮、血糖水平降低, 差异有显著性($P < 0.05$)。结论 玛咖结合运动疗法可以提高老龄糖尿病大鼠肾线粒呼吸功能, 提高机体氧化磷酸化水平, 改善肾机能。

【关键词】 玛咖; 运动; 糖尿病大鼠; 肾线粒体; 呼吸酶; 肾功能

【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856(2019) 01-0064-05

Effects of Maca combined exercise on activity of renal mitochondrial respiratory chain enzymes and renal function in diabetic rats

PENG Lina, NING Shangbin, WANG Guangguang, CHANG Shimin, ZHANG Yufeng, LI Yanxia
(Department of Human Movement Science, Langfang Normal University, Langfang 065000, China)

【Abstract】 Objective To observe the effect of Maca combined exercise therapy on mitochondrial respiratory enzyme activity and renal function in diabetic rats. **Methods** Forty diabetic rats were randomly divided into model control group, Maca group, training group and Maca + training group. The training and Maca + training groups underwent treadmill exercise training every day (5 g/kg). After 6 weeks, rats in each group were subjected to exhaustive exercise (35 m/min) followed by immediate extraction of renal mitochondria under anesthesia. Activity of the mitochondrial respiratory chain enzymes RCCI, RCCII, RCCIII and RCCIV, blood urea nitrogen (BUN), serum creatinine (SCr), and blood glucose contents were measured. **Results** Compared with the control group, the Maca group RCCII, training group RCCI and

RCCII, and Maca + training group RCCI, RCCII and RCCIV activities were significantly increased. Compared with the Maca group, RCCI and RCCII activities in the Maca + training group were significantly increased. Compared with the training group, the RCCII activity in the Maca + training group was significantly increased. Compared with the control group, the content of blood urea nitrogen in the Maca and Maca + training groups, and the levels of serum creatinine and blood glucose in the training group and Maca + training group were significantly decreased ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Compared with the Maca group, the levels of serum creatinine and blood glucose were significantly decreased in the Maca + training group ($P < 0.05$). Compared with the training group, the levels of blood urea nitrogen and blood glucose in the Maca + training group were significantly decreased ($P < 0.05$). **Conclusions** Maca combined with exercise therapy improved the respiratory function, increased the level of oxidative phosphorylation, and improved kidney function in aged diabetic rats.

[Keywords] Maca; motion; diabetic rats; kidney mitochondria; respiratory enzymes; renal function

线粒体呼吸链(respiratory chain)的作用是线粒体的最基本功能。线粒体呼吸链又称电子传递链,由线粒体内膜上的电子载体复合物 I、II、III、IV 即呼吸链酶 RCCI ~ RCCIV 构成,主要接受代谢物 NADH 和 FADH₂ 脱下的氢或电子,经过复合物 I ~ IV 中 NAD⁺、NADP⁺ 和 FAD 载体传递给氧生成水并释放 ATP 的过程。线粒体呼吸链酶缺陷是造成很多疾病的源泉^[1]。肾主骨生髓,乃先天之本,生命之根,君主之官。肾功能健全是保证机体机能正常运转的根本^[1]。肾线粒体呼吸链酶的活性直接影响能量输出 ATP 时传递氢离子或是电子的速率,影响肾功能^[2]。实验证明,玛咖能显著降低线粒体丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平,提高老龄小鼠心、肝组织血尿素氮(blood urea nitrogen, BUN)水平和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,具有缓解体力疲劳的功能^[3-4]。课题组前期实验证明,玛咖可以提高老龄大鼠肾、脑组织线粒体呼吸链酶活性和提高抗衰老能力;也可以改善阿霉素诱导的心肌组织 ATP 的消耗,缓解心肌损伤的发生^[5-7]。在前期研究成果的基础上,本文探讨补充玛咖结合运动疗法对老龄糖尿病大鼠肾线粒体呼吸链酶活性及肾功能的影响,为机体能量代谢性疾病及预防、康复手段提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验动物

SPF 级 Wistar 雄性大鼠 60 只,体重(450 ± 20)g,12 月龄。购于北京维通利华[SCXK(京)2016-0001]。大鼠饲养于本单位动物房[SYXK(冀)2016-0011],分笼饲养,每笼 5 只,温度 25℃ 左右,每周进行一次紫外灯消毒。在实验过程中严格遵循实验动物福利伦理相关规定和要求,并按实验动

物使用的 3R 原则给予人道的关怀。

1.2 主要试剂与仪器

链脲佐菌素、NADH、鱼藤酮、细胞色素 C、抗霉素、阿霉素等为 Sigma 公司产品;硫脲、硼酸、邻甲苯胺、冰醋酸、柠檬酸、柠檬酸钠、葡萄糖、蔗糖等药品为国产;血尿素氮(BUN)、血清肌酐(SCr)、血糖试剂盒由南京建成生物工程研究所提供。北京信康亿达 YDX-3 液氮罐、YQ-3 型电动匀浆机;低温高速离心机(德国 Hettich 320/320R);紫外可见分光光度计(日本岛津 UVmini-124);大鼠跑台(杭州)。

1.3 实验方法

1.3.1 实验动物造模

高糖高脂饲料喂养一个月后腹腔注射链脲佐菌素(40 mg/kg,用 0.1 mmol/L 柠檬酸缓冲液溶解,pH=4.0),每天一次,连续 4 d。两天后再按照 100 mg/kg 剂量腹腔注射四氧嘧啶水溶液^[8-9]。造模成功后,保留 40 只模型大鼠。

1.3.2 实验动物分组与玛咖干预

一个月后淘汰模型失败及死亡大鼠,最终保留 40 只大鼠参与模型实验。随机分成 4 组,每组 10 只,分为模型对照组、玛咖组、运动组和玛咖+运动组。根据国内大鼠运动模型^[10],运动和玛咖+运动两组动物进行跑台训练(每周 5 d,每天一次),速度从 12 m/min 递增到 27 m/min,每周递增 3 m/min;时间从 20 min 递增到 45 min,每周递增 5 min。玛咖组和玛咖+运动组大鼠每次运动后以 5 g/kg 玛咖粉^[11]给予大鼠灌胃。一个半月训练结束后所有动物(除模型对照组)以运动速度 35 m/min^[10]运动至力竭。

1.3.3 肾标本制备及线粒体的提取

力竭后即刻麻醉取血并解剖取出双肾,冰浴中除去结缔组织并剪成碎块制成匀浆液(1:5加入缓

冲液)。匀浆液两次离心(600 r/min, 15 min), 弃沉淀, 取上清; 悬浮后再离心(12 000 r/min, 15 min), 弃上清, 留固体沉淀, 再次与 250 mmol/L 蔗糖等悬浮液混合后再离心(12 000 r/min, 15 min), 沉淀物即为肾线粒体^[12]。

1.3.4 肾线粒体呼吸链酶活性及血尿素氮、血清肌酐、血糖水平的测定

考马斯亮蓝 G250 测定蛋白含量。形态学指标采用甲醛固定, HE 染色, 光镜下观察结构变化。在 25℃ 室温下, 测定肾线粒体呼吸链酶活性。将 10 μL 线粒体蛋白加入到酶 RCCI~RCCIV 反应缓冲液 2 mL 中, 连续测定 3 min 内 NADH、FADH₂、细胞色素 C 还原酶与细胞色素 C 氧化酶 340、600、550、550 nm 处吸光值的变化表示肾线粒体呼吸链酶 RCCI~RCCIV 的活性^[13]。血尿素氮(BUN)、血清肌酐(SCr)、血糖的测定严格按照试剂盒的操作程序进行。

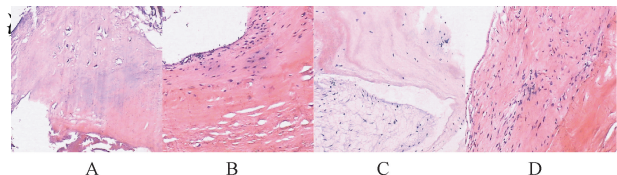
1.4 统计学方法

所有数据均用 SPSS 21.0 统计学软件分析, 以平均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。组间各指标采用 *t* 检验, 以 $P < 0.05$ 为差异有显著性。

2 结果

2.1 各组大鼠肾线粒体形态结构的变化

光镜下放大 1500 倍观察线粒体结构显示, 糖尿病大鼠肾线粒体形态结构不一。对照组肾线粒体呈现坏死、肿胀、断裂、紊乱、异常、界限间隙增加; 玛咖组线粒体排列较对照组线粒体肿胀、损伤、断裂、变性情况有所减轻, 界限稍明显; 运动组和玛咖组类似, 线粒体排列界限模糊、紊乱, 肿胀、损伤、断裂、变性程度仍很大, 但相对于对照组有所改善; 玛咖+运动组肾线粒体病理有明显改善, 结构排列比前三组紧密、纹理稍清晰、整齐, 坏死、肿胀、断裂情



注: A: 对照组; B: 玛咖组; C: 运动组; D: 玛咖+运动组。

图 1 各组大鼠肾线粒体形态结构的变化(×1500)

Note. A: Control group; B: Maca group; C: Training group; D: Maca + training group.

Figure 1 Morphological and structural changes of mitochondria in rat kidneys of each group

2.2 各组大鼠肾线粒体呼吸链酶活性的变化

与对照组比较, 玛咖组大鼠肾线粒体呼吸链 RCCI、RCCIII、RCCIV 活性分别提高 14.14%、11.92% 和 18.42% ($P > 0.05$), RCCII 活性提高 32.86% ($P < 0.01$); 与对照组比较, 运动组 RCCI、RCCII 活性分别提高 36.81% 和 26.12% ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$), RCCIII、RCCIV 活性分别提高 8.73% 和 12.51% ($P > 0.05$); 与对照组比较, 玛咖+运动组 RCCI、RCCII、RCCIV 活性分别提高 48.21%、38.89% 和 25.10% ($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$), RCCIII 活性提高 14.89% ($P > 0.05$)。与玛咖组比较, 玛咖+运动组 RCCI、RCCII 活性分别提高 39.68% 和 31.18% ($P < 0.01$), RCCIII、RCCIV 活性分别提高 3.37% 和 8.18% ($P > 0.05$)。与运动组比较, 玛咖+运动组 RCCI、RCCIII、RCCIV 活性分别提高 18.05%、6.74% 和 14.39% ($P > 0.05$), RCCII 活性提高 37.46% ($P < 0.01$)。见表 1。

2.3 各组大鼠肾功能的变化

与对照组比较, 玛咖组、玛咖+运动组大鼠血尿素氮含量分别降低 25.37% 和 35.47% ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 运动组降低 17.65% ($P > 0.05$); 与对照组比较, 玛咖组血清肌酐降低 18.86% ($P > 0.05$), 运动组、玛咖+运动组分别降低 25.20% 和 38.66% ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 与对照组比较, 玛咖组血糖水平降低 18.15% ($P > 0.05$), 运动组、玛咖+运动组分别降低 28.13% 和 45.28% ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。与玛咖组比较, 玛咖+运动组血尿素氮含量降低 13.54% ($P > 0.05$), 血清肌酐、血糖水平分别降低 24.39%、33.14% ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。与运动组相比, 玛咖+运动组血尿素氮、血糖水平分别降低 21.65%、23.86% ($P < 0.05$), 血清肌酐含量降低 17.99% ($P > 0.05$)。见表 2。

3 讨论

3.1 各组大鼠肾线粒体呼吸链酶活性的变化

研究表明, 有氧运动可以改善胰岛素抵抗、提高血管内皮功能、提高线粒体呼吸链酶活性及抗氧化酶活性, 降低血糖水平及炎症的发生^[14-16]。也有研究表明, 玛咖结合运动训练可以提高老年大鼠肾线粒体呼吸链酶活性, 降低大鼠线粒体 MDA 含量, 防治线粒体功能的退行性变化, 延缓机体衰老^[5]。本实验结果显示, 一个半月有氧运动训练、玛咖干预、玛咖+运动干预均可改善糖尿病大鼠肾线粒体

表 1 各组大鼠肾线粒体呼吸链酶活性的变化($\bar{x} \pm s, n=10, \mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{mg prot})$)**Table 1** Changes in mitochondria respiratory chain enzyme activities in rat kidneys of each group

分组 Groups	NADH 还原酶 NADH reductase (RCCI)	FADH ₂ 还原酶 FADH ₂ reductase (RCCII)	细胞色素 C 还原酶 Cytochrome C reductase (RCCIII)	细胞色素 C 氧化酶 Cytochrome C oxidase (RCCIV)
对照组 Control group	18.634 ± 3.496	13.269 ± 3.992	34.349 ± 5.332	27.706 ± 6.509
玛咖组 Maca group	21.703 ± 4.524	19.762 ± 5.270**	38.997 ± 7.667	33.962 ± 8.146
运动组 Training group	29.487 ± 4.836**	17.959 ± 3.264*	37.635 ± 6.279	31.667 ± 6.237
玛咖+运动组 Maca + training group	35.981 ± 6.662***#	28.715 ± 5.192***#	40.356 ± 8.923	36.989 ± 9.064

注:与对照组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$;与玛咖组比较,## $P < 0.01$ 。

Note. Compared with the control group,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$. Compared with the Maca group,## $P < 0.01$.

表 2 各组大鼠肾功能的变化($\bar{x} \pm s, n=10$)**Table 2** Changes in renal function of rats in each group

分组 Groups	血尿素氮 (mmol/L) Blood urea nitrogen (BUN)	血清肌酐 ($\mu\text{mol}/\text{L}$) Serum creatinine (SCr)	血糖 (mmol/L) Blood glucose
对照组 Control group	16.423 ± 1.858	109.04 ± 15.332	18.95 ± 3.332
玛咖组 Maca group	12.257 ± 1.456*	88.47 ± 13.167	15.51 ± 2.776
运动组 Training group	13.525 ± 1.843	81.56 ± 13.029*	13.62 ± 1.954*
玛咖+运动组 Maca + training group	10.597 ± 2.532**	66.89 ± 11.923***#	10.37 ± 1.247***#

注:与对照组比较,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$;与玛咖组比较,## $P < 0.05$ 。

Note. Compared with the control group,* $P < 0.05$,** $P < 0.01$. Compared with the Maca group,## $P < 0.05$.

呼吸链酶活性,提高机体能量代谢速率,且玛咖+运动组效果更加显著。本实验还发现,对于玛咖结合运动疗法在改善糖尿病大鼠线粒体呼吸链酶活性中,长期运动对呼吸链的起始酶——FADH₂ 还原酶(RCCII)最为敏感,而补充玛咖主要影响 NADH 还原酶(RCCI)。分析其机制可能是糖尿病大鼠本身的肾组织处于高代谢状态,肾小球内压及滤过率加大,肾小球的硬化速度加快及部分出现增值肥大^[17-18],电解质、体液失衡,细胞外基质增加,甘油三酯脂酶、NADH 还原酶等活性下降,造成机体免疫力下降^[19];而有氧运动可以提高脂蛋白脂酶的活性,增加 β -细胞胰岛素分泌,降低由于脂糖超载而造成的血管压力,减轻由于机体代谢紊乱而造成的机体损害^[20],减轻肾小管上皮细胞间质纤维化,降低肾小球内压及滤过率,FADH₂ 还原酶作为呼吸链的启动酶系传递电子或 H⁺ 功能加强,提高肾线粒体产生良性适应,氧化磷酸化功能倍增^[21];另外,玛咖中含有丰富的玛咖烯、玛咖酰胺、芥子油苷、生物碱等调节肾上腺、胰腺等功能,平衡荷尔蒙分泌,加强肾活力^[22];玛咖中还含有亚油酸、亚麻酸、牛黄酸、赖氨酸、谷氨酸、铁、锌等营养成分,能加固免疫系统,清除过量的自由基,调节肾线粒体内膜 NADPH 氧化酶活性^[23],防止胰岛素抵抗,减轻受损肾细胞修复,降低肾耗氧量,提高肾产能速率,延缓机体疲劳及衰老速度、激活肾功能来提高线粒体能量代谢^[24]。总之,补充玛咖结合运动疗法可提高糖尿病

大鼠肾线粒体呼吸功能,提高机体能量输出速率。

3.2 各组大鼠肾功能的变化

血尿素氮(BUN)、血清肌酐(SCr)、血糖是检查肾功能的常用指标,但易受各种因素的影响,如摄入高脂、高糖、高蛋白食物,饮酒、情绪波动等均可使血尿素氮、血清肌酐、血糖水平升高^[17-18]。研究显示,有氧运动能有效降低糖尿病大鼠血尿素氮水平和血糖含量,改善大鼠糖、脂代谢和胰岛素抵抗,提高肾线粒体结构,减轻肾功能损伤^[25]。另一研究表明,玛咖干预可提高机体抗疲劳能力^[3]。本实验数据显示,运动疗法、玛咖干预、运动+玛咖干预均可降低糖尿病大鼠血尿素氮、血清肌酐、血糖水平,且运动疗法结合玛咖干预组效果大于另外两组;本实验还显示,补充玛咖主要影响血尿素氮含量,而在改善血清肌酐和血糖水平方面效果并不显著,6周递增负荷运动可以明显降低血清肌酐、血糖水平,但在改善血尿素氮方面并不十分理想。

分析其机制可能是肾病理刺激加上大强度运动的双重刺激,使得肾线粒体MDA、ROS、H₂O₂等产物增加^[17],导致线粒体呼吸链酶活性及糖酵解酶活性下降,线粒体DNA缺失加大,引起线粒体功能障碍,ATP合成能力受阻所致^[26];而长期科学的有氧运动训练可以增加胰岛素敏感性,增强与受体的亲和力,降低低密度脂蛋白胆固醇,提高机体免疫力^[27];同时,线粒体功能损害在糖尿病中起着重要的作用,血尿素氮、血清肌酐、血糖紊乱可以引起线

粒体结构和功能上的改变,适当的运动结合玛咖本身具有的抗氧化活性的双重效应可以调节血管通透性,维持肾小球及线粒体膜结构功能完整性,清除自由基,减少肾小管的重吸收及清除率^[28],降低血糖及 VEGF-A 和 VEGFR2 蛋白水平,提高长链脂酰辅酶 A 活性,减少血脂,减轻大鼠肾损伤,提高机体免疫力及改善糖尿病大鼠肾功能^[29]。

总之,糖尿病的发病机制很多,应该根据肾病理结合血液、尿液、遗传病史以及临床症状等多方面因素加以考虑,对症下药。本实验方案依据运动结合营养补剂从能量代谢性疾病方面来改善糖尿病大鼠肾功能,为预防疾病和临床康复提供参考。但糖尿病患者要注意运动强度、时间、膳食以及心情,制定适合自己的运动方案,达到运动降糖、降压、减脂、提高心肺及肾功能,减少药物摄入,改善糖尿病患者症状的目的。

参考文献:

[1] 林文毅,徐国琴,翁锡全. 不同强度有氧运动对糖尿病大鼠血糖及内质网应激蛋白的影响 [J]. 首都体育学院学报, 2014, 26(2): 180-184.

[2] 黄敏,赵玲玲. 呼吸链酶复合体 I 研究进展 [J]. 广东医学, 2014, 32(5): 662-664.

[3] 楚璐雅. 玛咖对人体抗氧化能力、免疫功能及血脂代谢的影响 [D]. 北京体育大学, 2016: 8-30.

[4] 柳琴,程贝. 西藏玛咖对小鼠抗疲劳作用的初步研究 [J]. 中国药师, 2015, 18(3): 511-513.

[5] 彭丽娜,贾鹏. 玛咖对力竭运动后老年大鼠肾脏线粒体呼吸功能及抗衰老能力的影响 [J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(18): 2711-2716.

[6] 彭丽娜,张冰. 玛咖对老年大鼠脑组织线粒体呼吸链酶活性及抗衰老能力的影响 [J]. 中国老年学杂志, 2018, 38(1): 50-52.

[7] 彭丽娜,彭丽妍. 玛咖结合运动对阿霉素诱导心肌炎大鼠心肌线粒体呼吸链酶活性及抗氧化损伤能力的影响 [J]. 临床心血管病杂志, 2016, 32(8): 853-856.

[8] 邵俊伟,蔡逊. 高脂饮食联合链脲佐菌素建立 2 型糖尿病大鼠模型的研究进展 [J]. 中国实验动物学报, 2014, 22(4): 90-93.

[9] 朱超,朱莹莹. II 型糖尿病动物模型的构建 [J]. 中国实验动物学报, 2013, 21(2): 84-87.

[10] 田野,高铁群. 大鼠运动性疲劳模型的建立 [J]. 北京体育大学学报, 1995, 18(4): 49-53.

[11] 高玉秋,李彬,王彦武,等. 玛咖片缓解体力疲劳功能的实

验研究 [J]. 中国食物与营养, 2014, 20(8): 76-77.

[12] Zwicker K, Dikalov S, Matuschka S, et al. Oxygen radical generation and enzymatic properties of mitochondria in hypoxia/reoxygenation [J]. *Arzneimittel-Forschung*, 1998, 48(6): 629-636.

[13] Vyatkina G, Bhatia V, Gerstner A, et al. Impaired mitochondrial respiratory chain and bioenergetics during chagasic cardiomyopathy development [J]. *Biochim Biophys Acta*, 2004, 1689(2): 162-173.

[14] 习雪峰. 运动和 EGCG 对 II 型糖尿病大鼠海马线粒体功能的改善作用及机制研究 [D]. 苏州大学, 2014: 20-80.

[15] 陈德明,牛衍龙. 糖尿病运动治疗方案中运动项目选择的研究 [J]. 哈尔滨体育学院学报, 2014, 32(2): 87-96.

[16] 刘银根. 有氧运动对老龄大鼠心肌线粒体能量代谢及自由基代谢的影响 [D]. 西北师范大学, 2014: 21-26.

[17] 朱洪竹,肖国强,朱梅菊,等. 有氧运动对 2 型糖尿病大鼠肾脏 VEGF-A 及 VEGFR2 蛋白表达的影响 [J]. 上海体育学院学报, 2015, 39(6): 61-67, 83.

[18] 林子桐,张超,沈雪梅. 糖尿病肾病发病机制研究进展 [J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2014, 28(5): 765-771.

[19] 刘芳,杨华,周文江,等. 诱发性 2 型糖尿病小鼠模型与自发性 db/db 小鼠特性的比较 [J]. 中国实验动物学报, 2014, 22(6): 54-59.

[20] 陈木,唐超平. 短期有氧运动对糖尿病大鼠肾功能的影响 [J]. 上饶师范学院学报, 2014, 34(6): 111-115.

[21] 李一梅,刘宽芝. 氧化应激、线粒体功能障碍与 2 型糖尿病 [J]. 临床荟萃, 2014, 29(2): 213-215.

[22] 汤春雪. 天然玛咖制剂对运动员身体机能状态影响的功效研究 [D]. 北京体育大学, 2016: 20-30.

[23] 许敏,徐丽,宋辉,等. 玛咖的研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2775-2781.

[24] 何黛,侯改霞. 有氧运动对糖尿病肾病大鼠肾功能影响研究 [J]. 北京体育大学学报, 2009, 32(12): 66-68.

[25] 姜勤佳,陈雅,袁春华. 不同强度有氧运动对糖尿病肾病大鼠肾功能影响研究 [J]. 山西体育科技, 2012, 32(3): 15-18.

[26] 朱竞赫,赵金明,秦文艳,等. 高脂血症实验动物模型研究概述 [J]. 实验动物科学, 2012, 29(2): 48-52.

[27] 谈文博. 适度运动对增龄大鼠骨骼肌线粒体能量代谢及自由基代谢的影响 [D]. 西北师范大学, 2014: 15-20.

[28] 查圣华. 玛咖活性成分及抗疲劳功能研究 [D]. 中国科学院大学, 2016: 15-36.

[29] 罗曦娟,王正珍,朱玲,等. 有氧和抗阻运动对糖尿病前期人群血糖干预效果的比较研究 [J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(9): 831-837.

[收稿日期] 2017-07-05