



抗阻运动对 2 型糖尿病的作用及机制研究进展

王 静,刘 欣,王晶晶

摘 要:近年来,糖尿病发病率在全球迅速增加,已经成为严重的公共卫生问题之一。运动疗法是糖尿病防治的重要方法之一,有氧运动在糖尿病防治中的作用已得到认可并推广,但抗阻运动的作用却未得到重视。本文分析了抗阻运动对 2 型糖尿病患者的血糖控制、胰岛素抵抗、肌糖原合成、线粒体功能、脂质积聚、心理健康等几方面的作用及相关机制,为建立 2 型糖尿病科学、全面的运动治疗方案提供依据。

关键词: 抗阻运动;2 型糖尿病;血糖控制;骨骼肌;心理健康

中图分类号: G804.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-1207(2015)04-0070-05

Effect of Resistance Training on Type 2 Diabetes Mellitus and Related Mechanism

WANG Jing, LIU Xin, WANG Jingjing

(Shanghai Research Institute of Sports Science, 200030, China)

Abstract: Diabetes mellitus has been increasing rapidly all around the world in recent years. It has become one of the serious public health problems. Exercise therapy is one of the important methods of preventing and controlling diabetes. Although aerobic exercise is widely accepted, the potential of resistance exercise has not been recognized. The purpose of this paper is to provide a scientific and comprehensive exercise treatment option for treating T2DM by examining the role of resistance exercise in blood sugar control, insulin resistance, muscle glycogen synthesis, mitochondrial function, lipid accumulation, psychology and the related mechanism.

Key Words: resistance exercise; type 2 diabetes mellitus; glycemic control; skeletal muscle; psychological health

近年来,糖尿病发病率迅速增加,2014 年全球糖尿病人口已经达到 3.87 亿,用于糖尿病的医疗开支达到 6 120 亿美元^[1],糖尿病带来的医疗负担相当惊人。我国的情况也不容乐观,2007-2008 年进行的糖尿病调查发现,总的糖尿病发病率已达 9.7%,糖尿病前期比率为 15.5%,据此推算,我国糖尿病患病人数已达 9 240 万,糖尿病前期人口达 1.48 亿,糖尿病已经成为严重危害国民健康和生活质量的公共卫生问题^[2]。

在成年人的糖尿病中,2 型糖尿病 (Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM) 占到 90%~95%。运动对 T2DM 的防治具有重要作用。已有研究证明,运动能够增加肥胖和胰岛素抵抗个体肌肉中胰岛素的活性,使其发展为 T2DM 的风险延后 5 年以上^[3-5];长期的运动对 T2DM 患者血糖控制水平的改善也能达到与长期的药物或胰岛素治疗相似的效果^[6];运动能同时降低其他慢性疾病的发病风险^[7],这些都促使运动成为 T2DM 防治体系中的重要组成部分^[8]。

过去,有关 T2DM 运动疗法的研究都集中在有氧运动方面。近年来,随着对抗阻运动(也称“抗阻训练”、“力量训练”)研究的深入,发现抗阻运动对代谢综合征、糖尿病、心血管疾病、肌肉衰减症(Sarcopenia)、关节炎等多种慢性疾病都有一定的防治作用。本文分析了抗阻运动对

T2DM 患者的血糖控制、胰岛素抵抗、肌糖原合成、线粒体功能、脂质积聚和心理健康等几方面的作用及相关机制,为建立 T2DM 的科学、全面的运动治疗方案提供依据。

1 抗阻运动与血糖控制

糖化血红蛋白(HbA1c)水平是评价长期血糖控制的金指标,也是指导临床调整治疗方案的重要依据,其水平在糖尿病患者中会有所增加。HbA1c 水平越接近正常值(4%~6%),糖尿病并发症发生率的降低就越明显。我国的糖尿病防治指南指出,一般情况下,HbA1c 的控制目标应小于 7%,HbA1c \geq 7%是 T2DM 患者启动临床治疗或需要调整治疗方案的重要判断标准。英国的系列前瞻性糖尿病研究(UKPDS)证实,HbA1c 每下降 1%,糖尿病相关的死亡率降低 21%,心肌梗死发生率下降 14%,脑卒中发生率下降 12%,微血管病变发生率下降 37%,白内障摘除术减少 19%,周围血管疾病导致的截肢或死亡率下降 43%,心力衰竭发生率下降 16%。因此,HbA1c 对糖尿病患者来说是一项非常重要的监测指标,它的高低直接决定将来各种严重影响糖尿病患者生活质量的慢性并发症的发生和发展。

个别研究^[9]认为,只有有氧运动才能降低 T2DM 患者

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 上海市科学技术委员会研发平台专项课题(12DZ2294400)。

第一作者简介: 王静,女,助理研究员,博士。主要研究方向:国民体质健康。

作者单位: 上海体育科学研究所,上海 200030



HbA1c水平,但大多数研究发现抗阻运动能够改善T2DM患者的HbA1c水平。Baldi等^[10]发现10周中等强度的抗阻运动能够有效地改善肥胖T2DM患者的血糖控制,并降低其空腹胰岛素水平。针对60~80岁间的老年T2DM患者^[11]和中年亚裔T2DM患者^[12]的研究也发现,渐进抗阻运动后血糖控制得到明显改善。有学者经过元分析^[13]后发现,抗阻运动能使T2DM患者的HbA1c降低0.6%。

有很多学者比较了有氧运动、抗阻运动对T2DM患者血糖控制水平的影响。有研究^[14]认为,有氧运动和抗阻运动都能够明显改善T2DM患者的血糖控制,且两种运动的效果是相似的。Bweir^[15]和Cauza^[16]均认为抗阻运动在改善T2DM患者血糖控制方面的作用要优于有氧运动。Zanuso^[17]在对T2DM的运动疗法进行综述后指出,抗阻运动在T2DM患者血糖控制方面的作用与有氧运动是可以相提并论的。

虽然关于抗阻运动、有氧运动对T2DM患者HbA1c水平影响的程度存在不同的研究结果,但是,可以肯定的是抗阻运动对T2DM患者的血糖控制确实具有良好的作用。

2 抗阻运动与骨骼肌

健康人体内有一个严密的调节系统帮助人体将血糖始终控制在4~5 mmol/L左右,这种血糖的内稳态取决于血糖来源和消除的平衡,血糖的来源主要是食物的消化和肝脏的释放,消除主要依靠胰岛素依赖性组织——骨骼肌和脂肪组织,及胰岛素非依赖性组织——脑和内脏器官。在胰岛素敏感型的葡萄糖摄取和氧化组织中,骨骼肌摄取量可以高达80%^[18],这让骨骼肌成为葡萄糖内稳态调控中的重要组织。

T2DM发生后,患者体内骨骼肌的适应和改变主要以胰岛素抵抗、糖原合成受损、线粒体损伤和脂质积聚为特征^[19]。

2.1 抗阻运动改善胰岛素抵抗

T2DM是一种渐进性的代谢紊乱,前期表现为胰岛素抵抗,即主要组织(如肌肉、脂肪)对胰岛素敏感性的下降。在胰岛素抵抗的初级阶段进行干预对T2DM及其并发症的预防具有重要作用。

Dunstan等^[20]将T2DM病人随机分为抗阻运动组和对照组,运动组进行每周3次的抗阻运动,运动前和运动8周后,分别进行口服葡萄糖耐量测试。结果显示,运动组的葡萄糖和胰岛素的曲线下面积均明显减少,将胰岛素的曲线下面积进行体重校正后仍然发现有显著性改变。Brooks等^[21]对老年T2DM患者进行16周(3次/周)的全身性抗阻运动干预后发现,约25%改善了胰岛素抵抗。但该研究中采用了稳态模式评估法进行胰岛素抵抗(homeostasis model assessment, HOMA-IR)测试,主要反映的是肝脏的胰岛素敏感性^[22]。正常血糖胰岛素钳制术(euglycemic insulin clamp technique, EICT)是活体胰岛素活性测量的金标准^[23]。该技术所测定的主要是骨骼肌的胰岛素敏感性^[24]。Ishii等^[25]将T2DM患者分为抗阻运动组(5次/周,2组/次,9重复/组)和对照组进行4~6周实验,采用EICT测定后发现运动组葡萄糖清除率提高了48%,这表明骨骼肌的胰岛素敏感性有所提高。Holten等^[26]也采用EICT技术进行研究,发现6周(3次/周)的单腿抗阻运动也能增加骨骼

肌的胰岛素敏感性。

有研究^[17,27]比较了抗阻运动与有氧运动对胰岛素敏感性的作用后发现,两者对胰岛素敏感性的改善作用基本相似。

2.2 抗阻运动与肌糖原合成

糖摄入后,血糖升高,刺激胰岛素分泌,胰岛素刺激肝脏和骨骼肌对葡萄糖的摄取。其中,80%的葡萄糖的摄取发生在骨骼肌,这些葡萄糖或者被氧化成二氧化碳和水,或者形成肌糖原。糖原合成受到糖原合成酶的调节。Shulman等^[28]发现,与正常人相比,T2DM患者的糖原合成功率要低约57%。糖原合成酶活性下降是T2DM患者骨骼肌中最早出现的症状之一^[29]。骨骼肌中胰岛素介导的葡萄糖摄取减少几乎全部是由糖原合成酶活性下降导致的^[30]。

抗阻运动能增加T2DM患者骨骼肌中的糖原合成。6周的抗阻运动后,骨骼肌中的糖原含量、糖原合成蛋白含量和糖原合成酶活性都会明显增加^[26]。Castaneda等^[31]在其研究中也发现,16周的抗阻运动(3次/周)能够使肌糖原含量增加约32%,而同时对照组的肌糖原含量却有显著的下降。

但关于该问题的研究结果并不一致。Praet等^[32]发现,10周(3次/周)的抗阻运动后,T2DM病人的骨骼肌糖原含量并没有显著变化,但是患者的空腹葡萄糖水平和对外源性胰岛素的需要量减少了。

2.3 抗阻运动改善线粒体功能

线粒体功能损伤与胰岛素抵抗一样都发生在T2DM的早期。Morino等^[33]发现,T2DM患者的后代中那些患有胰岛素抵抗的人,其肌肉中线粒体密度与健康人相比低38%。Kelley等^[34]不仅发现T2DM患者线粒体的超微结构与健康人不同,而且骨骼肌线粒体的电子传递也明显减少。所以,T2DM患者骨骼肌的氧化能力会有所降低。

关于老年人的研究表明,抗阻运动能够改善其线粒体的功能^[35]。Sparks等^[36]比较了9个月的有氧运动、抗阻运动及以上两种运动结合对骨骼肌代谢功能的影响,通过肌肉活检进行线粒体含量和功能的检测后发现,两种运动结合对2型糖尿病患者肌肉功能的改善最为显著。

2.4 抗阻运动与脂质积聚

T2DM患者肌肉内甘油三酯含量会有所增加,胰岛素抵抗与肌肉内的脂质积聚相关^[37],这种积聚可能与线粒体功能受损和餐后骨骼肌对脂质摄取增加有关。Kelley^[38]发现,T2DM患者不仅餐后对脂肪酸的摄取要高于对照组,其脂肪氧化能力也有所降低。

脂质可能积聚在骨骼肌细胞内或者细胞间,而肌细胞内脂质的增加是T2DM患者的前期症状之一,所以,这种积聚可能是胰岛素抵抗的早期症状^[39]。采用组织化学技术可以明显地观察到T2DM患者骨骼肌中脂质的增加,在正常人中,肌细胞内大约有1.5%的面积被脂滴占据,而T2DM患者中有3%~4%的面积被占据^[37]。而且,正常人和T2DM患者肌细胞中脂滴的位置也是不同的,T2DM患者的脂滴更倾向于分布在细胞的中心^[40]。这些都会导致肌



细胞代谢的损伤。

关于抗阻运动对 T2DM 患者肌肉中脂质含量影响的研究并不多。Ku 等^[41]对比了 12 周的抗阻运动和有氧运动对 T2DM 女性患者肌肉中脂质的影响,但结果发现,两种运动后肌肉中脂质含量都没有发生明显的变化。Praet 等^[32]在其研究中也未发现 10 周的抗阻运动能够改变肌细胞中的脂质含量。

抗阻运动对其他人群肌肉中脂质的研究也不多见, Mueller 等^[42]在对老年人的研究中发现,12 周(2 次/周)的离心抗阻运动后其肌细胞内的脂质含量有所降低,但常规的抗阻运动后并没有显著变化。这提示我们,抗阻运动对 T2DM 患者肌细胞脂质的影响可能也存在着运动类型之间的差异,今后的研究可能应该着重于不同类型的抗阻运动对肌细胞脂质的影响。

3 抗阻运动改善 T2DM 患者的心理健康

糖尿病及其并发症使患者的生活质量受到很大影响,也严重影响了患者的心理健康,抑郁症在糖尿病患者中就较为高发。研究显示,抗阻运动能够改善 T2DM 高危个人或患者的抑郁症状,促进其心理健康,提高其生活质量。

Cindy^[43]等对比了 8 周的渐进抗阻运动和有氧运动对 T2DM 中年患者的影响,发现,两种运动后一般的健康和活力指标都有明显改善,同时,渐进抗阻运动还能够改善 T2DM 患者的身体功能和心理健康状态,而有氧运动却不能。12 周渐进抗阻运动^[44]和 16 周大强度渐进性抗阻运动^[45]分别能减轻 T2DM 患者的知觉压力、抑郁或者改善 T2DM 老年人的心理健康状态。Reid 等^[46]让 T2DM 患者进行 22 周的有氧运动或抗阻运动或联合运动后,完成关于健康状况的两份问卷调查,自行报告健康改善状况,结果发现,抗阻运动或者两者结合的运动在改善心理健康方面的效果要优于有氧运动。针对代谢综合征和 T2DM 的高危及低危人群的研究也发现,10 周低-中等强度或者中-大强度的抗阻运动后,该人群的抑郁情绪得到明显改善^[47]。

抗阻运动除了上述对 T2DM 患者的作用外,还能够通过降低静息血压、降低低密度脂蛋白胆固醇和甘油三酯、增加高密度脂蛋白胆固醇来提高心血管健康;还能够促进骨骼健康,使骨密度增加 1%~3%;减轻腰背痛,减轻关节炎和纤维肌痛引起的不适;延缓骨骼肌的衰减(sarcopenia)。抗阻运动在改善身体成分、肥胖防治、保持运动能力、提高生活质量等方面都有显著作用^[48]。所以,鉴于抗阻运动对 T2DM 及身体其他系统的多种积极作用,应该将其纳入 T2DM 患者的运动治疗体系中。

4 抗阻运动特征研究

虽然抗阻运动已经被很多组织纳入对 T2DM 患者的运动指南中,但抗阻运动的不同频率、强度、方式等对 T2DM 患者影响差异方面的研究并不多。

健康成人抗阻运动的频率一般为每周 2~3 次,且两次运动间隔 1~2 d,在针对 T2DM 患者的研究中,也大都采用这样的频率^[15,49,50]。

有研究发现^[51],抗阻运动对胰岛素敏感性和血糖的改善效果与抗阻运动的量和强度之间存在量效关系,大强度(85% 1RM)多重复组的抗阻运动比中等强度(65% 1RM)运动的作用效果要好。但 Moreira 等^[52]在其研究中也指出,急性低强度(23% 1RM)和中等强度(43% 1RM)抗阻运动在降低 T2DM 患者的血糖方面均有效果,但低强度抗阻运动的心血管-代谢和自我感觉压力都较小,更容易坚持和实现。

Hansen 等^[49]比较了最大抗阻运动(3 次/周,5 组/次,3~4 重复/组,60%~85% 1RM)和耐力抗阻运动(3 次/周,3 组/次,12~15 重复/组,45%~65% 1RM)对有 T2DM 风险的超重个体的胰岛素水平和葡萄糖耐受的影响,结果发现,两种运动都可以减轻其胰岛素抵抗,最大抗阻运动在增加葡萄糖摄取能力(肌肉)方面更有效,耐力抗阻运动在改善胰岛素敏感性方面效果更好,两种抗阻运动都可以作为 T2DM 风险病人的干预措施。Egger 等^[50]在比较不同类型抗阻运动效果的研究中也得出了类似的结果。

所以,抗阻运动的频率、强度、方式的差异可能会导致对 T2DM 患者健康状况改善效果上的差异,这也应该是我们今后的研究方向之一。

5 联合运动(有氧运动加抗阻运动)与 T2DM

抗阻运动、有氧运动对 T2DM 的防治均有作用,但两者联合是否会起到叠加的效果呢?

Sigal^[53]在对 2151 名 39~70 岁的 T2DM 患者进行了 22 周(3 次/周)不同形式的运动干预后发现,单独的有氧运动和抗阻运动都能改善 T2DM 患者的 HbA1c,但效果都比两者联合的运动要差。Behrens^[54]的研究也得出了同样的结果。Yavari 等^[55]在其研究中对比了有氧运动、抗阻运动、两者联合对 T2DM 患者血糖控制、心血管危险因素和身体成分的影响发现,联合运动的效果优于单种运动模式。

在众多研究中,Umpierre 等^[56]在 1980 年 1 月到 2011 年 2 月间,通过有关不同运动形式,对 T2DM 患者 HbA1c 影响的研究进行了较为全面的元分析,该分析共纳入 47 个随机对照研究,涉及受试者 8 538 人。分析后发现,总体来讲,运动训练可以导致 HbA1c 水平降低 0.67%(95% CI, -0.84%~-0.49%),单纯的抗阻运动可以使 HbA1c 水平降低 0.57%(95% CI, -1.14%~-0.01%),虽然高于有氧和抗阻运动两者联合的降低 HbA1c 的效果(0.51%;95% CI, -0.79%~-0.23%),却低于有氧运动对 HbA1c 的降低效果(0.73%;95% CI, -1.06%~-0.40%)。但新近发表的一篇研究对 2011 年到 2014 年 5 月间的相关研究进行元分析后发现,有氧和抗阻联合的运动对 HbA1c 的降低效果优于单种运动形式^[57]。

综上所述,只有将有氧和抗阻运动相结合的长期训练才能够对 T2DM 患者的心血管疾病危险因素、发病率、死亡率等产生积极影响^[58],才能明显改善 T2DM 患者的 HbA1c 水平^[59]。

国内外的多家糖尿病防治机构或组织均已把抗阻运动纳入其运动防治体系中。ACSM(American College of Sports Medicine,美国运动医学学会)和 ADA(American Diabetes Association,美国糖尿病协会)在其联合发布的指



南中^[60]指出,除了进行有氧运动外,每周应至少进行 2~3 天中等强度至大强度的抗阻运动。《中国 2 型糖尿病防治指南(2010 年版)》中提出,除有氧运动外,每周最好进行 2 次阻力性肌肉运动,训练时阻力为轻或中度,联合进行抗阻运动和有氧运动可获得更大程度的代谢改善^[61]。澳大利亚的运动和体育科学学会(Exercise and Sport Science Australia, ESSA)推荐 T2DM 患者或糖尿病前期患者每周至少进行 210 min 的中等强度运动或 125 min 大强度运动,其中就包括 2 次或者 2 次以上的抗阻运动(2~4 组,8~10 次/组)^[62]。澳大利亚还有一个针对 T2DM 患者的“Lift for life”项目,专门推广以社区为主的抗阻运动,对该项目的研究发现,社区为主的抗阻运动对 T2DM 成年人或有 T2DM 风险成年人有良好的影响,可以降低腰围、减轻中心性肥胖、改善身体功能^[63]。

6 结论及展望

抗阻运动对 T2DM 的预防和治疗有非常重要的作用。最理想的防治 T2DM 和获得多种运动益处的方式是将抗阻运动与有氧运动相结合。但对于抗阻运动的运动方式、强度、频率,以及如何与有氧运动有效结合等具体细节还需要更深入的研究和探索。

参考文献:

- [1] International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas Update 2014[EB/OL]. <http://www.idf.org/diabetesatlas/5e/Update2014>.
- [2] Yang S H, Dou K F, Song W J. (2010). Prevalence of diabetes among men and women in China[J]. *N Engl J Med*. 362(25): 2425-2426.
- [3] Hawley J A. (2004). Exercise as a therapeutic intervention for the prevention and treatment of insulin resistance[J]. *Diabetes/ Metabolism Research and Reviews*. 20:383 - 393.
- [4] Hawley J A, Gibala M J. (2012). What's new since Hippocrates? Preventing type 2 diabetes by physical exercise and diet [J]. *Diabetologia*. 55:535 - 539.
- [5] Hawley J A, Lessard S J. (2008). Exercise training-induced improvements in insulin action[J]. *Acta Physiologica*. 192:127-135.
- [6] Snowling N J, Hopkins W G. (2006). Effects of different modes of exercise training on glucose control and risk factors for complications in type 2 diabetic patients: a meta-analysis[J]. *Diabetes Care*. 29:2518 - 2527.
- [7] Booth F W, Gordon S E, Carlson C J, et al. (2000). Waging war on modern chronic diseases: primary prevention through exercise biology[J]. *Journal of Applied Physiology*. 88:774-787.
- [8] Thent Z C, Das S, Henry L J. (2013). Role of Exercise in the Management of Diabetes Mellitus: the Global Scenario[J]. *Plos One*. 8(11).pp.e80436
- [9] Kwon H R, Min K W, Ahn H J, et al. (2011). Effects of Aerobic Exercise vs. Resistance Training on Endothelial Function in Women with Type 2 Diabetes Mellitus[J]. *Diabetes & Metabolism Journal*. 35(4): 364-373.
- [10] Baldi J C, Snowling N. (2003). Resistance training improves glycaemic control in obese type 2 diabetic men[J]. *International Journal of Sports Medicine*. 24(6): 419-423.
- [11] Dunstan D W, Daly R M, Owen N, et al. (2002). High-intensity resistance training improves glycaemic control in older patients with type 2 diabetes[J]. *Diabetes Care*. 25(10): 1729-1736.
- [12] Hameed U A, Manzar D, Raza S, et al. (2012). Resistance Training Leads to Clinically Meaningful Improvements in Control of Glycemia and Muscular Strength in Untrained Middle-aged Patients with type 2 Diabetes Mellitus[J]. *North American Journal of Medical Sciences*. 4(8): 336-343.
- [13] Koenig D, Deibert P, Dickhuth H, et al. (2011). Resistance Exercise and Type 2 Diabetes Mellitus[J]. *Deutsche Zeitschrift Fur Sportmedizin*. 62(1): 5-9.
- [14] Moe B, Augestad L B, Asvold B O, et al. (2011). Effects of aerobic versus resistance training on glycaemic control in men with type 2 diabetes[J]. *European Journal of Sport Science*. 11(5): 365-374.
- [15] Bweir S, Al-Jarrah M, Almalty A, et al. (2009). Resistance exercise training lowers HbA1c more than aerobic training in adults with type 2 diabetes[J]. *Diabetology & Metabolic Syndrome*. 1:27.
- [16] Cauza E, Hanusch-Enserer U, Strasser B, et al. (2005). The relative benefits of endurance and strength training on the metabolic factors and muscle function of people with type 2 diabetes mellitus[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 86(8): 1527-1533.
- [17] Zanuso S, Jimenez A, Pugliese G, et al. (2010). Exercise for the management of type 2 diabetes: a review of the evidence [J]. *Acta Diabetologica*. 47(1): 15-22.
- [18] DeFronzo R A, Gunnarsson R, Björkman O, et al. (1985). Effects of insulin on peripheral and splanchnic glucose metabolism in noninsulin-dependent (type II) diabetes mellitus[J]. *Journal of Clinical Investigation*. 76:149-155.
- [19] Wood R J, O'Neill E C. (2012). Resistance Training in Type II Diabetes Mellitus: Impact on Areas of Metabolic Dysfunction in Skeletal Muscle and Potential Impact on Bone[J]. *Journal of Nutrition and Metabolism*. 1-13.
- [20] Dunstan D W, Puddey I B, Beilin L J, et al. (1998). Effects of a short-term circuit weight training program on glycaemic control in NIDDM [J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*. 40(1):53 - 61.
- [21] Brooks N, Layne J E, Gordon P. L, et al. (2007). Strength training improves muscle quality and insulin sensitivity in Hispanic older adults with type 2 diabetes[J]. *International Journal of Medical Sciences*. 4(1): 19-27.
- [22] DeFronzo R A, Tripathy D. (2009). Skeletal muscle insulin resistance is the primary defect in type 2 diabetes[J]. *Diabetes Care*. 32:157 - 163.
- [23] DeFronzo R A, Tobin J D, Andres R. (1979). Glucose clamp technique: a method for quantifying insulin secretion and resistance [J]. *American Journal of Physiology Endocrinology Metabolism and Gastrointestinal Physiology*. 6(3): 214 - 223.
- [24] Ferrannini E, Simonson D. C, Katz L D, et al. (1988). The disposal of an oral glucose load in patients with non-insulin-



- dependent diabetes [J]. *Metabolism*. 37(1): 79 - 85.
- [25] Ishii T, Yamakita T, Sato T, et al. (1998). Resistance training improves insulin sensitivity in NIDDM subjects without altering maximal oxygen uptake[J]. *Diabetes Care*. 21(8): 1353-1355.
- [26] Holten M K, Zacho M, Gaster M, et al. (2004). Strength training increases insulin-mediated glucose uptake, GLUT4 content, and insulin signaling in skeletal muscle in patients with type 2 diabetes[J]. *Diabetes*. 53(2): 294 - 305.
- [27] Boul'e N G, Haddad E, Kenny G P, et al. (2001). Effects of exercise on glycemic control and body mass in type 2 diabetes mellitus: a meta-analysis of controlled clinical trials[J]. *JAMA*. 286(10): 1218 - 1227.
- [28] Shulman G I, Rothman D L, Jue T, et al. (1990). Quantitation of muscle glycogen synthesis in normal subjects and subjects with noninsulin-dependent diabetes by ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. *The New England Journal of Medicine*. 322(4):223 - 228.
- [29] DeFronzo R. A. (2004). Pathogenesis of type 2 diabetes mellitus[J]. *Medical Clinics of North America*. 88(4): 787 - 835.
- [30] Perseghin G, Ghosh S, Gerow K, et al. (1997). Metabolic defects in lean non-diabetic offspring of NIDDM parents: a cross-sectional study[J]. *Diabetes*. 46(6):1001 - 1009.
- [31] Castaneda C, Layne J E, Munoz-Orians L, et al. (2002). A randomized controlled trial of resistance exercise training to improve glycemic control in older adults with type 2 diabetes [J]. *Diabetes Care*. 25, (12):2335 - 2341.
- [32] Praet S F E, Jonkers R A M, Schep G, et al. (2008). Long-standing, insulin-treated type 2 diabetes patients with complications respond well to short-term resistance and interval exercise training[J]. *European Journal of Endocrinology*. 158(2): 163-172.
- [33] Morino K, Petersen K F, Dufour S, et al. (2005). Reduced mitochondrial density and increased IRS-1 serine phosphorylation in muscle of insulin-resistant offspring of type 2 diabetic parents[J]. *The Journal of Clinical Investigation*. 115(12):3587 -3593.
- [34] Kelley D E, He J, Menshikova E V, et al. (2002). Dysfunction of mitochondria in human skeletal muscle in type 2 diabetes [J]. *Diabetes*. 51(10):2944-2950.
- [35] Tarnopolsky M A. (2009). Mitochondrial DNA shifting in older adults following resistance exercise training[J]. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. 34(3):348-354.
- [36] Sparks L M, Johannsen N M, Church T S, et al. (2013). Nine Months of Combined Training Improves Ex Vivo Skeletal Muscle Metabolism in Individuals With Type 2 Diabetes[J]. *Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. 98(4): 1694-1702.
- [37] Goodpaster B H, Thaete F L, Kelley D E. (2000). Thigh adipos tissue distribution is associated with insulin resistance in obesity and in type 2 diabetes mellitus[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*. 71(4): 885 - 892.
- [38] Kelley D E, Simoneau J A. (1994). Impaired free fatty acid utilization by skeletal muscle in non-insulin- dependent diabetes mellitus[J]. *The Journal of Clinical Investigation*. 94(6):2349 -2356.
- [39] Perseghin G, Scifo P, De Cobelli F, et al. (1999). Intramyocellular triglyceride content is a determinant of in vivo insulin resistance in humans: a ¹H-¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy assessment in offspring of type 2 diabetic parents [J]. *Diabetes*. 48(8): 1600-1606.
- [40] Malenfant P,Joanisse D. R, Th?eriault R, et al. (2001). Fat content in individual muscle fibers of lean and obese subjects [J]. *International Journal of Obesity*. 25(9):1316-1321.
- [41] Ku Y H, Han K A, Ahn H, et al. (2010). Resistance exercise did not alter intramuscular adipose tissue but reduced retinol binding protein-4 concentration in individuals with type 2 diabetes mellitus[J]. *Journal of International Medical Research*. 38(3):782 - 791.
- [42] Mueller M, Breil F A , Lurman G, et al. (2011). Different Molecular and Structural Adaptations with Eccentric and Conventional Strength Training in Elderly Men and Women[J]. *Gerontology*. 57(6):528-538.
- [43] Cindy L W N, Tai E S, Goh S,et al. (2011). Health status of older adults with Type 2 diabetes mellitus after aerobic or resistance training: A randomised trial[J]. *Health and Quality of Life Outcomes*. 9(59).
- [44] Putiri A L, Lovejoy J C, Gillham S, et al. (2012). Psychological effects of Yi Ren Medical Qigong and progressive resistance training in adults with type 2 diabetes mellitus: a randomized controlled pilot study.[J]. *Alternative Therapies in Health and Medicine*. 18(1): 30-34.
- [45] Lincoln A K, Shepherd A, Johnson P L, et al. (2011). The Impact of Resistance Exercise Training on the Mental Health of Older Puerto Rican Adults With Type 2 Diabetes[J]. *Journals of Gerontology Series B-Psychological Sciences and Social Sciences*. 66(5): 567-570.
- [46] Reid R D, Tulloch H E, Sigal R J, et al. (2010). Effects of aerobic exercise, resistance exercise or both, on patient-reported health status and well-being in type 2 diabetes mellitus: a randomised trial[J]. *Diabetologia*. 53(4): 632-640.
- [47] Levinger I, Selig S, Goodman C, et al. (2011). Resistance Training Improves Depressive Symptoms in Individuals at High Risk for Type 2 Diabetes[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 25(8): 2328-2333.
- [48] Winett R A, Carpinelli R N. (2001). Potential health-related benefits of resistance training[J]. *Preventive Medicine*. 33(5): 503-513.
- [49] Hansen E, Landstad B J, Gundersen K T, et al. (2012). Insulin Sensitivity After Maximal And Endurance Resistance Training [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 26(2):327 -334.
- [50] Egger A, Niederseer D,Diem G, et al. (2013). Different Types of Resistance Training in Type 2 Diabetes Mellitus: Effects On Glycaemic Control, Muscle Mass and Strength[J]. *European Journal of Preventive Cardiology*, 20(6): 1051-1060.
- [51] Black L E, Swan P D, Alvar B A. (2010). Effects of Intensity and Volume on Insulin Sensitivity During Acute Bouts of Resistance Training[J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 24(4): 1109-1116. (下转第 79 页)



- (2004). High-arched runners exhibit increased leg stiffness compared to low-arched runners[J]. *Gait & Posture*. 19(3):263-269.
- [9] 钱竞光, 宋雅伟, 叶强, 等. 步行动作的生物力学原理及其步态分析[J]. 南京体育学院学报(自然科学版). 2006(04):1-7+39.
- [10] 李世昌. 运动解剖学[M].北京: 高等教育出版社; 2006.
- [11] Molgaard C, Lundbye-Christensen S, Simonsen O. (2012). High prevalence of foot problems in the Danish population: a survey of causes and associations[J]. *Foot*. 20(1):7-11.
- [12] Twomey DM, McIntosh AS(2012). The effects of low arched feet on lower limb gait kinematics in children[J]. *Foot*. 22(2): 60-65.
- [13] 陆爱云. 运动生物力学[M].北京: 人民体育出版社; 2010.
- [14] 伍颢, 陆爱云, 庞军. 健康老年人常速行走的步态分析[J]. 上海体育学院学报. 2000,24(2):52-55.
- [15] Carson DW, Myer GD, Hewett TE, et al. (2012). Increased plantar force and impulse in American football players with high arch compared to normal arch[J]. *Foot*. 22(4):310-314.
- [16] Plank M. (1995). The pattern of forefoot pressure distribution in hallux valgus[J]. *The foot*. 5(1):8-14.
- [17] Zifchock RA, Davis I, Hillstrom H, et al. (2006). The effect of gender, age, and lateral dominance on arch height and arch stiffness[J]. *Foot & ankle international*. 27(5):367-372.
- [18] McPoil TG, Cornwall MW, Vicenzino B, et al. (2008). Effect of using truncated versus total foot length to calculate the arch height ratio[J]. *Foot*. 18(4):220-227.
- [19] Powell D W, Williams D S B, Windsor B, et al. (2014). Ankle work and dynamic joint stiffness in high-compared to low-arched athletes during a barefoot running task[J]. *Human movement science*, 34: 147-156.

(责任编辑:何聪)

(上接第74页)

- [52] Moreira S R, Simoes G C, Moraes J F V N, et al. (2012). Blood Glucose Control for Individuals With Type-2 Diabetes: Acute Effects of Resistance Exercise if Lower Cardiovascular-metabolic Stress [J]. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 26(10): 2806-2811.
- [53] Sigal R J, Kenny G P, Boule N G, et al. (2007). Effects of aerobic training, resistance training, or both on glycemic control in type 2 diabetes - A Randomized trial[J]. *Annals of Internal Medicine*. 147(6): 357-369.
- [54] Behrens M, Zimmer P, Klare W R, et al. (2012). Fitness Training for Diabetics - Theoretical and Practical Aspects[J]. *Diabetes Stoffwechsel Und Herz*. 21(1): 21-25.
- [55] Yavari A, Najafipour F, Aliasgarzadeh A, et al. (2012). Effect of Aerobic Exercise, Resistance Training or Combined Training on Glycaemic Control And Cardiovascular Risk Factors in Patients With Type 2 Diabetes [J]. *Biology of Sport*. 29(2): 135-143.
- [56] Umpierre D, Ribeiro P A B, Kramer C K, et al. (2011). Physical Activity Advice Only or Structured Exercise Training and Association With HbA(1c) Levels in Type 2 Diabetes A Systematic Review and Meta-analysis[J]. *Journal of the American Medical Association*. 305(17): 1790-1799.
- [57] Llopis P Q& Garcia-Galbis M R. (2015). Glycemic Control through Physical Exercise in Type 2 Diabetes Systematic Review[J]. *Nutricion Hospitalaria*. 31(4): 1465-1472.
- [58] Niederseer D, Niebauer J. (2012). Aerobic and strength training in patients with diabetes mellitus type 2 and heart failure [J]. *HERZ*. 37(5): 499-507.
- [59] Church T S. (2011). Effects of Aerobic and Resistance Training on Hemoglobin A(1c) Levels in Patients With Type 2 Diabetes: A Randomized Controlled Trial[J]. *Journal of The American Medical Association*. 305(9): 892.
- [60] Colberg S R, Albright A L, Blissmer B J, et al. (2010). Exercise and type 2 diabetes: American College of Sports Medicine and the American Diabetes Association: joint position statement. Exercise and type 2 diabetes[J]. *Med Sci Sports Exerc*. 42(12): 2282-2303.
- [61] 中华医学会糖尿病学分会. 中国2型糖尿病防治指南(2010年版)[J]. 中国糖尿病杂志. 2012(01): 81-117.
- [62] Hordern M D, Dunstan D W, Prins J B, et al. (2012). Exercise prescription for patients with type 2 diabetes and pre-diabetes: A position statement from Exercise and Sport Science Australia [J]. *Journal of Science And Medicine in Sport*. 15(1): 25-31.
- [63] Minges K E, Cormick G, Unglik E, et al. (2011). Evaluation of a resistance training program for adults with or at risk of developing diabetes: an effectiveness study in a community setting[J]. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 8:50.

(责任编辑:何聪)