

# 不同运动模式对青少年糖耐量和胰岛素敏感性的影响

龚风华<sup>1</sup>, 邓玉强<sup>1,2</sup>

1.南通大学体育科学学院,江苏 226019;2.南通大学儿童青少年运动与健康促进研究中心

**【摘要】 目的** 比较相等能量消耗的高强度间歇性运动和中等强度持续性运动对健康青少年糖耐量和胰岛素敏感性的影响。为制定维持与增进青少年健康水平的合理运动干预方案提供参考。**方法** 通过现场宣讲的方式在南通市某中学纳入 13 名被试,分为安静对照组(C)、中等强度持续性运动组(MICE)和高强度间歇性运动组(HIIE)后进行口服葡萄糖耐量试验,并计算胰岛素敏感指数、葡萄糖和胰岛素的总曲线下面积(*tAUC*)、曲线下面积增量(*iAUC*)。**结果** 与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组葡萄糖 *tAUC* 值分别下降了 5.99% ( $ES=-0.75$ ) 和 9.32% ( $ES=-0.86$ ) ( $P<0.05$ );与 MICE 组相比,HIIE 组葡萄糖 *tAUC* 值下降了 3.54% ( $ES=-0.30$ ,  $P<0.01$ )。与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组胰岛素 *tAUC* 分别下降了 4.49% ( $ES=-0.64$ ,  $P<0.01$ ) 和 6.79% ( $ES=-0.80$ ,  $P<0.01$ );与 MICE 组相比,HIIE 组胰岛素 *tAUC* 下降了 2.42% ( $ES=-0.30$ ,  $P<0.01$ )。与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组血糖 *iAUC* 值分别下降了 25.52% ( $ES=-0.57$ ,  $P<0.01$ ) 和 35.82% ( $ES=-0.73$ ,  $P<0.01$ );与 MICE 组相比,HIIE 组血糖 *iAUC* 值下降了 13.83% ( $ES=-0.16$ ,  $P<0.05$ )。与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组胰岛素 *iAUC* 值分别下降了 7.14% ( $ES=-0.67$ ,  $P<0.01$ ) 和 10.18% ( $ES=-0.75$ ,  $P<0.01$ );与 MICE 组相比,HIIE 组血浆胰岛素 *iAUC* 值下降了 3.27% ( $ES=0.21$ ,  $P<0.05$ )。与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组的 ISI 水平分别上升了 1.65% ( $ES=0.15$ ,  $P>0.05$ ) 和 4.72% ( $ES=0.25$ ,  $P<0.01$ ),MICE 组和 HIIE 组间差异无统计学意义 ( $ES=0.04$ ,  $P<0.05$ )。**结论** 高强度间歇性运动对健康青少年血糖、胰岛素和胰岛素敏感性的干预效应优于中等强度持续性运动。

**【关键词】** 运动活动;糖耐量;胰岛素;青少年;干预性研究

**【中图分类号】** G 804.49 R 446 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-9817(2020)03-0401-04

**Effects of different modes exercises on glucose tolerance and insulin sensitivities in adolescents/GONG Fenghua, DENG Yuqiang. School of Exercise Science Nantong University, Nantong (226019), Jiangsu Province, China**

**【Abstract】 Objective** To compare the effects on glucose tolerance and insulin sensitivity between equal isocaloric consumption moderate intensity continuous exercise and high-intensity intermittent exercise in healthy male adolescents, and to provide a reference for a reasonable exercise intervention program to maintain and improve the health level of adolescents. **Methods** The 13 subjects from middle schools in Nantong were divided into control group, moderate intensity continuous exercise group (MICE) and high-intensity intermittent exercise group HIIE. The oral glucose tolerance tests were carried out on 13 healthy subjects in all conditions. Meanwhile, the insulin sensitivity index (ISI), total area under the curve (*tAUC*) and incremental area under the curve (*iAUC*) of glucose as well as insulin were calculated. **Results** The *tAUC* of plasma glucose of MICE and HIIE group decreased by 5.99% ( $ES=-0.75$ ) and 9.32% ( $ES=-0.86$ ) ( $P<0.05$ ) compared to C group, respectively. The *tAUC* of plasma glucose in HIIE group decreased by 3.54% ( $ES=-0.30$ ,  $P<0.01$ ) compared to MICE group. The *tAUC* of plasma insulin in MICE and HIIE group was attenuated 4.49% ( $ES=-0.64$ ,  $P<0.01$ ) and 6.79% ( $ES=-0.80$ ,  $P<0.01$ ) compared to C group, respectively. The *tAUC* of plasma glucose in HIIE group decreased by 2.42% ( $ES=-0.30$ ,  $P<0.01$ ) compared to MICE group. The *iAUC* of plasma glucose in MICE and HIIE group decreased by 25.52% ( $ES=-0.57$ ,  $P<0.01$ ) and 35.82% ( $ES=-0.73$ ,  $P<0.01$ ) compared to C group, respectively. The *iAUC* of plasma glucose in HIIE group decreased by 13.83% ( $ES=-0.16$ ,  $P<0.05$ ) compared to MICE group. The *iAUC* of plasma insulin in MICE and HIIE group descended by 7.14% ( $ES=-0.67$ ,  $P<0.01$ ) and 10.18% ( $ES=-0.75$ ,  $P<0.01$ ) compared to C group, respectively. The *iAUC* of plasma insulin in HIIE group decreased by 3.27% ( $ES=0.21$ ,  $P<0.05$ ) compared to MICE group. The ISI of MICE and HIIE group increased by 1.65% ( $ES=0.15$ ,  $P>0.05$ ) and 4.72% ( $ES=0.25$ ,  $P<0.01$ ) compared to C group, respectively. There was no significantly difference in ISI between MICE and HIIE group. **Conclusion** The intervention effects on the level of glucose, insulin and insulin sensitivity of high intensity intermittent exercise is better than moderate intensity continuous exercise among adolescents.

**【Key words】** Motor activity; Sugar endurance; Insulin; Adolescent; Intervention studies

**【基金项目】** 江苏省高校哲学社会科学项目(2015SJB635);江苏省社会科学基金项目(17TYD004)。

**【作者简介】** 龚风华(1979-),男,江苏启东人,讲师,硕士,主要研究方向为学生体质健康测量与评价。

**【通讯作者】** 邓玉强,E-mail:dengyuqiang@ntu.edu.cn。

DOI: 10.16835/j.cnki.1000-9817.2020.03.022

肥胖、2 型糖尿病和脂肪肝等代谢相关疾病呈现出低龄化倾向<sup>[1]</sup>。国家体育总局公布的《2014 年国民体质监测公报》显示,中国儿童青少年的体质健康水平止住了过去 20 多年的持续下滑态势,呈现出稳中向好的趋势,但各年龄阶段学生的肥胖检出率持续上升<sup>[2]</sup>。

胰岛素抵抗和葡萄糖耐量受损是代谢疾病发生发展的中心环节<sup>[3]</sup>。流行病学调查研究和运动干预研究的结果均认为,高水平身体活动和规律的运动锻炼可显著改善空腹血糖水平和胰岛素抵抗程度<sup>[4-5]</sup>。另外,Meta 分析结果也提示,运动锻炼改善空腹胰岛素水平和胰岛素抵抗程度的效果为小到中等<sup>[6]</sup>。但以往的运动干预研究多以肥胖/超重青少年人群为干预对象,鲜有研究关注运动干预对可能存在代谢异常潜在风险的健康青少年人群的影响。Short 等<sup>[7]</sup>发现,急性有氧运动可以改善身体活动水平、有氧适能水平低下青少年餐后胰岛素敏感性。急性高强度间歇运动对糖尿病前期成年人的葡萄糖耐量和胰岛素敏感性的干预效果要好于中等强度有氧运动<sup>[8]</sup>。提示运动干预的效果可能与运动模式有关<sup>[9]</sup>。为此,本研究比较了高强度间歇运动和持续性有氧运动对健康青少年葡萄糖耐量和胰岛素敏感性的影响,以期能为制定维持与增进青少年健康水平的合理运动干预方案提供参考。

## 1 对象与方法

**1.1 对象** 通过现场宣讲的方式在南通市某初级中学招募被试,并参照季成叶等<sup>[10-11]</sup>的方法筛选被试,经家长和学生知情同意,最终 13 名被试纳入研究。平均年龄(13.3±0.8)岁,平均体重(54.9±5.3)kg,平均身高(167.5±2.5)cm,平均体质指数(BMI)(19.5±1.6)kg/m<sup>2</sup>。本研究通过南通大学伦理委员会的审查。

### 1.2 方法

**1.2.1 研究程序** 2016 年 3—6 月,本研究共进行 4 次实验室测量,每次测量的间隔时间为 1 周。第 1 次测量包括采集一般人口统计学参数(身高、体重等)和安静状态下的口服葡萄糖耐量试验(oral glucose tolerance test, OGTT)数据(C 组);第 2 次测量包括最大摄氧量(volume of maximal oxygen uptake, VO<sub>2max</sub>)和基础代谢率(resting metabolic rate, RMR)测试,测量前被试先熟悉实验测试环境、测量仪器和测量程序等;第 3 次测量为被试进行高强度间歇运动(HIIE 组);第 4 次时被试进行与高强度间歇运动能量消耗相当的连续性运动(MICE 组)。另外,在每次不同模式的运动后均对所有被试行 OGTT。

**1.2.2 身高、体重测量** 用 SGTZ-1 型人体身高体重测量仪测量被试的身高和体重。BMI=体重(kg)/[身高<sup>2</sup>(m)<sup>2</sup>]。测量时,要求被试仅穿着内衣,测量结果分别精确到 0.1 cm 和 0.1 kg。

**1.2.3 口服葡萄糖耐量、血浆血糖和胰岛素水平测试** 被试到达实验室静坐 10~20 min 后,口服 300 mL 质量浓度为 0.25 g/mL 的葡萄糖溶液,在摄入葡萄糖后的 0, 10, 20, 30, 60, 90 和 120 min 时取末梢血用罗氏血糖仪测量血糖水平,同时获得相同时间节点的静脉血,离心后用 ELISA 法测量血清胰岛素水平,测量

仪器为 ELX 800 型酶标仪。胰岛素敏感指数(insulin sensitive index, ISI)用下列公式计算:

$$ISI = 10\,000 \sqrt{(I_0 \times G_0) \times (I \times G)}$$

其中  $G_0$ 、 $I_0$  分别为空腹血糖(BG)和空腹胰岛素水平(Ins),  $G$ 、 $I$  分别为 OGTT 中各个时间点血浆葡萄糖和胰岛素水平的均值<sup>[12]</sup>。在第 3 次和第 4 次运动后 10 min 时也进行同样的 OGTT。同时计算 BG 和 Ins 的曲线下面积(*tAUC*)和曲线下面积增量(*iAUC*)

**1.2.4 VO<sub>2max</sub> 测试** VO<sub>2max</sub> 测试在南通大学体育科学学院实验与测试中心进行,测量运动为 Bruce 功率自行车方案。测试时强调的注意事项,严格按照 VO<sub>2max</sub> 实验终止的判别标准终止测试。所用仪器为 META-LYZER 3B 型 Cortex 气体成分分析仪和 839E 型 MONARK 有氧功率自行车。

**1.2.5 HIIE 和 MICE 方案** 被试均需进行 HIIE 和中等强度连续性运动。高强度间歇性运动方案:准备活动后,被试立即进行 4 min 运动强度为 90% VO<sub>2max</sub> 的功率自行车运动,然后进行 3 min 运动强度为 60% VO<sub>2max</sub> 的功率自行车运动,循环 4 次。HIIE 的实际总运动时间为 28 min(准备活动时间除外)。根据被试的基础代谢率和在 HIIE 中的耗氧量、呼吸交换率及非蛋白氧热价计算每个被试在 HIIE 中的能量消耗(均值~403 kcal),并以此作为计算被试进行能量消耗相等、运动强度为 60% VO<sub>2max</sub> 的连续性运动应持续时间的依据。MICE 方案:被试进行运动强度为 60% VO<sub>2max</sub> 的功率自行车运动,持续时间约为 60 min(依 HIIE 过程中所消耗的能量计算而得)。在执行不同运动方案的过程中均要求被试将蹬踏节奏尽量维持在 60 r/min 左右,同时要求被试报告自感用力度。另外,每种运动方案前均嵌入了 1 个持续时间为 3 min、负荷量为 50 W 的准备活动。

**1.3 统计分析** 采用 GraphPad Prism 5.0 统计学软件计算 *tAUC* 和 *iAUC*,并绘制图形,采用 SPSS 16.0 统计学软件对数据进行分析,结果用( $\bar{x} \pm s$ )表示,检验方法为 *t* 检验,检验水准  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果

**2.1 各组被试空腹血糖、胰岛素水平的比较** OGTT 前,对照组、MICE 组和 HIIE 组的血浆中空腹血糖分别为(5.18±0.22)(5.21±0.21)和(5.24±0.21)mmol/L,差异无统计学意义( $F = 0.00, P > 0.05$ );OGTT 前,对照组、MICE 组和 HIIE 组的血浆胰岛素水平分别为(18.30±1.07)(18.64±1.30)和(18.98±1.46)μIU/mL,差异无统计学意义( $F = 0.00, P > 0.05$ )。

**2.2 各组被试 OGTT 的 *tAUC*、*iAUC* 值和 ISI 变化** 与 C 组相比,MICE 组和 HIIE 组葡萄糖 *tAUC* 值分别下降了 5.99% ( $ES = -0.75$ ) 和 9.32% ( $ES = -0.86$ ) ( $P < 0.05$ );与 MICE 组相比,HIIE 组葡萄糖 *tAUC* 值下降了 3.54% ( $ES = -0.30, P < 0.01$ )。与 C 组相比,MICE

组和 HIIIE 组胰岛素 *tAUC* 分别下降了 4.49% 和 6.79% (*ES* 值分别为 -0.64, -0.80, *P* < 0.05); 与 MICE 组相比, HIIIE 组胰岛素 *tAUC* 下降了 2.42% (*ES* = -0.30) (*P* 值均 < 0.01)。与 C 组相比, MICE 组和 HIIIE 组血糖 *iAUC* 值分别下降了 25.52% 和 35.82.% (*ES* 值分别为 -0.57, -0.73, *P* < 0.05); 与 MICE 相比, HIIIE 组血糖 *iAUC* 值下降了 13.83% (*ES* = -0.16, *P* 值均 < 0.05)。与 C 组相比, MICE 组和 HIIIE 组胰岛素 *iAUC* 值分别

下降了 7.14% (*ES* = -0.67) 和 10.18% (*ES* = -0.75); 与 MICE 组相比; HIIIE 组胰岛素 *iAUC* 值下降了 3.27% (*ES* = 0.21) (*P* 值均 < 0.05)。与 C 组相比, MICE 组的 ISI 水平上升了 1.65% (*ES* = 0.15, *P* > 0.05); HIIIE 组的 ISI 上升了 4.72% (*ES* = 0.25, *P* < 0.01); MICE 组和 HIIIE 组间差异无统计学意义 (*ES* = 0.04, *P* > 0.05)。见图 1~2, 表 1。

表 1 不同组别被试 OGTT 的 *tAUC*、*iAUC* 值和 ISI 比较

| 组别         | <i>tAUC</i>                           |                                       | <i>iAUC</i>                           |                                       | ISI         |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------|
|            | BG/[mmol · (mL · min) <sup>-1</sup> ] | Ins/[μIU · (mL · min) <sup>-1</sup> ] | BG/[mmol · (mL · min) <sup>-1</sup> ] | Ins/[μIU · (mL · min) <sup>-1</sup> ] |             |
| C 组        | 898.81±18.31                          | 6 398.46±106.18                       | 290.50±30.79                          | 4 127.69±105.81                       | 55.31±2.21  |
| MICE 组     | 844.96±13.68★                         | 6 111.15±119.19★                      | 216.35±36.66★                         | 3 833.00±107.33★                      | 56.97±1.98  |
| HIIIE 组    | 815.04±16.39★▲                        | 5 963.85±116.70★▲                     | 186.42±35.10★▲                        | 3 707.85±143.08★▲                     | 57.92±2.55★ |
| <i>F</i> 值 | 88.84                                 | 48.74                                 | 31.78                                 | 41.96                                 | 4.46        |
| <i>P</i> 值 | 0.00                                  | 0.00                                  | 0.00                                  | 0.00                                  | 0.02        |

注: 与 C 组相比, ★*P* < 0.01; 与 MICE 相比, ▲*P* < 0.05, ▲▲*P* < 0.01。

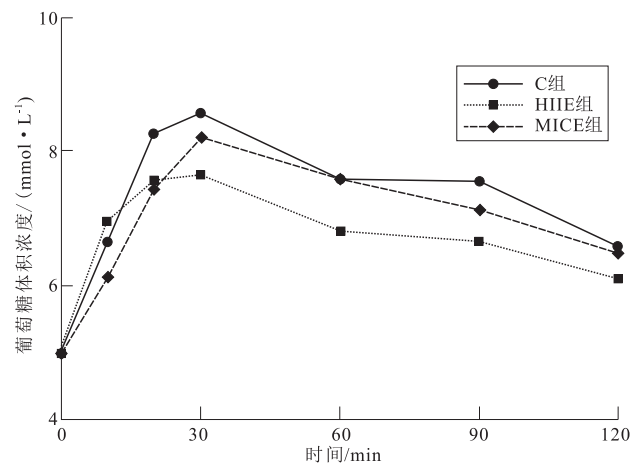


图 1 OGTT 后血浆葡萄糖体积浓度时间变化曲线

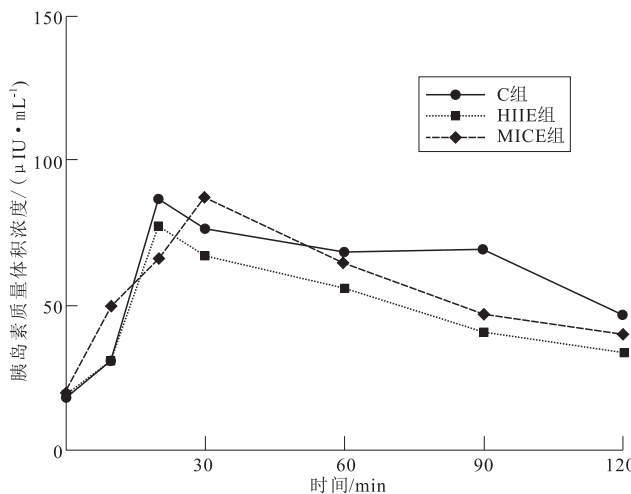


图 2 OGTT 后血浆胰岛素质量体积浓度时间变化曲线

3 讨论

众多研究证实, 儿童青少年肥胖、糖尿病和脂肪肝等心血管代谢疾病的发生呈现低龄化趋势<sup>[1]</sup>。社

会生态学模型指出, 身体活动或锻炼不足是全球性公共健康问题的重要影响因素<sup>[13]</sup>。本研究比较了等能量消耗的不同方式运动对健康青少年糖代谢的影响, 结果发现, 持续性有氧运动能够有效阻遏健康男性青少年餐后 (OGTT) 血糖浓度和胰岛素上升, 并对胰岛素敏感性有显著的改善效应, 与 Short 等<sup>[9]</sup> 研究结果相似。然而, Zakrzewski 等<sup>[14]</sup> 研究发现, 在高糖饮食前 16 h 进行能量消耗为 500 kcal 的有氧运动可降低正常体重女性的餐后胰岛素水平, 但血糖没有变化。因此, 持续性有氧运动对健康青少年糖代谢指标的干预效果可能存在性别差异, 未来应用同一运动方案对不同性别健康青少年进行干预以验证这一推测。

随着运动与健康领域内研究的深入, 人们开始关注不同模式运动的健康促进效应。以往的研究关注了高强度间歇运动对罹患代谢性疾病个体健康结局的影响, 但未见高强度间歇运动对健康青少年糖代谢标志物影响的报道。本研究发现, 高强度间歇运动可有效削弱健康男性青少年餐后葡萄糖和胰岛素水平上升, 对胰岛素敏感性也有明显的改善效应, 且高强度间歇运动对葡萄糖、胰岛素水平和胰岛素敏感性的干预效应明显优于中等强度的连续性运动。进一步分析认为, 其机制一方面可能是高强度间歇运动比持续性有氧运动诱导了更多的 GLUT4 向肌细胞膜易位, 进而增加了骨骼肌对葡萄糖的摄取量<sup>[15]</sup>; 另一方面, 高强度间歇运动过程中募集的高阶肌纤维快速消耗了肌糖原, 而在运动后, GLUT4 摄取葡萄糖并将其迅速转化成肌糖原<sup>[16]</sup>; 此外, 高强度间歇运动诱发的循环中儿茶酚胺水平的升高也是增加葡萄糖利用的重要原因<sup>[17]</sup>。本研究结果提示, 对于健康青少年而言, 运动强度可能是影响葡萄糖耐量和胰岛素敏感性的一个重要因素, 为以运动强度为中心的运动干预方案的设计与组织提供了实证依据。

美国运动医学会推荐<sup>[18]</sup> 健康保持的每周能耗为

1 200 kcal,运动频率为每周 3 次,因此一次运动的能量消耗应在 400 kcal 左右,本研究的间歇运动的能量消耗约为 403 kcal,运动持续时间为 28 min。本研究基于每日等能量消耗进行研究设计,考察了等能量消耗的高强度间歇运动和持续性运动的时间消耗。结果发现,持续性运动的平均耗时约为 60 min,因此,高强度间歇性运动体现了明显的运动持续时间节省化。本研究还观察了实验过程中被试的行为,发现 60%  $VO_{2max}$  的持续性运动不利于运动耐受不良和体质较差的青少年的运动坚持性。虽然有关部门出台的文件给予了青少年学生运动时间的政策保障,但初中阶段青少年正面临着升学的压力,一些学校仍会挤占学生的课余锻炼时间。因此,就有限的时间而言,持续性运动这一运动模式可能不适合广大儿童青少年的健康促进,因为在这一运动模式下,学生每消耗 400 kcal 的能量约花费 60 min。相反,高强度间歇运动呈现明显的时间节省化,提示这一模式可在体育课堂教学、大课间活动等多种情境中施行,广大体育教师可围绕教学目标设计以运动强度为中心的体育课程教学,从而切实提高青少年健康水平。

值得注意的是,本研究发现持续性运动和高强度间歇性运动分别使 ISI 改善了 8.4% 和 11.2%, 而以往的研究发现胰岛素敏感性的变化范围为 45% ~ 78%<sup>[14]</sup>。可能与以往研究招募被试的身体活动水平和有氧适能  $VO_{2max}$  约为 30 mL/(min · kg) 较低有关<sup>[14]</sup>,而本研究招募被试的  $VO_{2max}$  值[37 mL/(min · kg)]则显著高于该值。由于低有氧适能是青少年心血管疾病的独立预测因子<sup>[19]</sup>,但研究业已证实规律的有氧运动锻炼可以提高个体有氧适能,推测以往研究中被试的  $VO_{2max}$  具有较高的提升空间,也具备较好的胰岛素敏感性改善潜能。此外,两项研究结果的差异还可能与运动后 OGTT 数据采集的时间节点有关,Guillaume 等<sup>[9]</sup>的研究中 OGTT 数据采集的时间节点为运动后 10 min 和 40 min,而本研究中 OGTT 数据的采集时间节点为 0,10,20,30,60,90 和 120 min,而时间是反调节激素水平存在差异的一个重要因素<sup>[20]</sup>。

本研究先设计了一种高强度间歇运动方案,并计算了健康的男性青少年执行该运动方案时的能量消耗,再以此能量消耗为基准考察被试以 60%  $VO_{2max}$  的运动强度进行持续性运动需要花费的时间。结果发现,与持续性运动相比,高强度间歇运动的运动耗时呈节省化效应,对葡萄糖耐量和胰岛素敏感性的干预效应也优于持续性运动。

#### 4 参考文献

- [1] MUSAIGER A O. Overweight and obesity in eastern mediterranean region, can we control it? [J]. East Mediterr J, 2004, 10: 789-793.
- [2] 国家体育总局. 2014 年全国学生体质健康调研结果[J]. 中国学校卫生, 2015, 36(12): IV.
- [3] GERALD M R. Insulin resistance: the link between obesity and cardiovascular disease[J]. Med Clin Am, 2011, 95(5): 875-892.
- [4] OHNO Y, MIYAZAKI T, SATO M, et al. Lifestyle modifications supported by regional health nurses lowered insulin resistance, oxidative stress and central blood pressure in subjects with metabolic syndrome[J]. Obes Res Clin Prac, 2015, 9(6): 584-591.
- [5] SATOSHI K, ICHIRO I, TAKUJI K, et al. Improvement in endothelial function by lifestyle modification focused on exercise training is associated with insulin resistance in obese patients[J]. Obes Res Clin Prac, 2014, 8(1): e106-e114.
- [6] FEDEWA M V, GIST N H, EVANS E M, et al. Exercise and insulin resistance in youth: a meta-analysis[J]. Pediatrics, 2014, 133(1): e163-e174.
- [7] SHORT K R, PRATT L V, TEAGUE A M, et al. Postprandial improvement in insulin sensitivity after a single exercise session in adolescents with low aerobic fitness and physical activity[J]. Pediatr Diabetes, 2013, 14(2): 129-137.
- [8] DE FEO P. Is high-intensity exercise better than moderate-intensity exercise for weight loss? [J]. Nutr Metab Cardiovas, 2013, 23(11): 1037-1042.
- [9] GUILLAUME M G, DOUGLAS H, MARTIN J, et al. Intensive lifestyle intervention including high-intensity interval training program improves insulin resistance and fasting plasma glucose in obese patients[J]. Prev Med Repo, 2015, 2: 314-318.
- [10] 季成叶. 中国学生超重肥胖 BMI 筛查标准的应用[J]. 中国学校卫生, 2004, 25(1): 125-128.
- [11] 朱琳, 陈佩杰, 庄洁, 等. 12~14 岁正常和肥胖男性青少年运动能耗的比较研究[J]. 中国运动医学杂志, 2011, 30(2): 166-169.
- [12] 李华, 龚艳春, 贾伟平, 等. 三种简易胰岛素敏感性指数在糖耐量异常时的可靠性[J]. 高血压杂志, 2004, 12(3): 204-206.
- [13] BECK K, YAN A F, VOORHEES C, et al. A social ecological assessment of physical activity among urban adolescents [J]. Am J Health Behav, 2014, 38(3): 379-391.
- [14] ZAKRZEWSKI J K, TOLFREY K. Acute effect of fatmax exercise on the metabolism in overweight and nonoverweight girls[J]. Med Sci Sports Exerc, 2012, 44(9): 1698-1705.
- [15] KEIICHI K, EMI K, FUMI H, et al. Effect of acute high-intensity intermittent swimming on post-exercise insulin responsiveness in epitrochlearis muscle of fed rats[J]. Metabolism, 2009, 58(2): 246-253.
- [16] FARUP J, SØRENSEN H, KJØLHEDE T. Similar changes in muscle fiber phenotype with differentiated consequences for rate of force development: endurance versus resistance training[J]. Hum Movement Sci, 2014, 34: 109-119.
- [17] MICHAEL G C, GLEN S P, OWEN H F, et al. Co-ordinated regulation of muscle glycolysis and hepatic glucose output in exercise by catecholamines acting via  $\alpha$ -receptors[J]. FEBS Letters, 1983, 158(1): 1-6.
- [18] 王正珍. ACSM 运动测试与运动处方指南[M]. 1 版, 北京: 北京体育大学出版社, 2019.
- [19] REGINALDO G, LESZEK A S, VINCIUS O D, et al. Association of body mass index and aerobic physical fitness with cardiovascular risk factors in children[J]. Rev Paul De Ped, 2014, 32(3): 208-214.
- [20] RYNDERS C A, WELTMAN J Y, JIANG B, et al. Effects of exercise intensity on postprandial improvement in glucose disposal and insulin sensitivity in prediabetic adults[J]. J Clin Endocrinol Metab, 2013, 99(1): 220-228.

收稿日期: 2020-01-23; 修回日期: 2020-02-15