

# 中学生不同肥胖判定指标与骨代谢标志物的关系

杨清梅, 马萍, 刘秀英, 董洋洋, 蔡蓉蓉, 丁文清

宁夏医科大学公共卫生与管理学院, 银川 750004

**【摘要】** 目的 分析银川市中学生体质量指数(BMI)、腰围(WC)和腰围身高比(WHtR)与骨代谢标志物的关系,为评价青少年骨代谢状况提供依据。**方法** 采用现况研究,以方便整群抽样的方法于2018年9—12月共抽取银川市某中学12~18岁青少年1 084名,进行问卷调查、体格检查及实验室检测。**结果** BMI、WC、WHtR与Ca均呈负相关( $r$ 值分别为-0.10, -0.15, -0.15), WC与I型胶原交联C末端肽( $\beta$ -CTX)呈负相关( $r=-0.06$ ) ( $P$ 值均 $<0.05$ );调整年龄、性别、维生素D补充情况等因素后, WC对Ca、 $\beta$ -CTX的影响结果均有统计学意义( $\beta$ 值分别为-0.33, -0.22,  $P$ 值均 $<0.05$ )。Logistic回归分析结果显示,不同肥胖类型与骨钙素(OC)水平无显著关系( $P$ 值均 $>0.05$ ),血清 $\beta$ -CTX水平肥胖者增加是正常学生的1.93倍,血清Ca水平肥胖者与腹型肥胖者(以WC定义)增加分别是正常学生的0.31和0.54倍。**结论** 银川市青少年体内BMI、WC和WHtR与OC、 $\beta$ -CTX、Ca存在关联,且WC与Ca、 $\beta$ -CTX的关系更为密切,提示肥胖对骨吸收有负面影响。

**【关键词】** 人体质量指数;身高;代谢;生物学标记;学生

**【中图分类号】** R 179 G 804.49 R 446 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1000-9817(2020)08-1224-04

**Relationship between body mass index, waist circumference and waist circumference height ratio and bone metabolism markers in Yinchuan middle school students/YANG Qingmei, MA Ping, LIU Xiuying, DONG Yangyang, CAI Rongrong, DING Wenqing. School of Public Health and Management, Ningxia Medical University, Yinchuan(750004), China**

**【Abstract】 Objective** To analyze the relationship between body mass index (BMI), waist circumference (WC), waist to height ratio (WHtR) and bone metabolism markers. **Methods** By using the method of cluster sampling, a total of 1 084 adolescents aged 12 to 18 from one middle school in Yinchuan were investigated by questionnaire, physical examination and laboratory examination during sept. to Dec., 2018. **Results** BMI, WC and WHtR were significantly negatively correlated with Ca ( $r=-0.10$ ,  $-0.15$ ,  $-0.15$ ,  $P<0.05$ ), and WC was negatively correlated with  $\beta$ -CTX ( $r=-0.06$   $P<0.05$ ). After adjusting for age, sex and vitamin D supplementation, WC had significant effects on Ca and  $\beta$ -CTX ( $\beta=-0.33$ ,  $-0.22$ ,  $P<0.05$ ). Logistic regression analysis showed that there was no significant relationship between different types of obesity and the level of OC ( $P>0.05$ ). The level of serum  $\beta$ -CTX in obese students was 1.93 times higher than that in normal students, Ca serum levels of obese students was 0.31 times higher than that in normal students that in abdominal obese students (defined as WC) was 0.54 times higher than that in normal students. **Conclusion** BMI, WC and WHtR were correlated with OC,  $\beta$ -CTX and Ca in adolescents in Yinchuan city, and WC was more closely related to Ca and  $\beta$ -CTX, suggesting that obesity has a negative effect on bone absorption.

**【Key words】** Body mass index; Body height; Metabolism; Biological markers; Students

近30年来,全球儿童超重和肥胖的患病率从1990年的4.2%上升到2010年的6.7%,预计到2020年,将达到9.1%<sup>[1]</sup>。随着我国社会经济的快速发展和居民生活方式的转变,儿童超重肥胖率呈快速上升趋势,2014年全国学生体质调研结果显示,与30年前相比,我国7岁以上学龄儿童超重率也由2.1%增至12.2%,肥胖率由0.5%增至7.3%,到2030年预计超重

肥胖率将达到28.0%<sup>[2-3]</sup>。儿童青少年肥胖不仅是2型糖尿病、血脂异常、心血管疾病的主要危险因素,还与某些类型的癌症、精神健康、骨关节炎疾病密切相关<sup>[4]</sup>。相关研究表明,随着体质量指数(body mass index, BMI)升高,骨矿物质含量和骨密度也会升高,从而降低骨质疏松的风险<sup>[5]</sup>。但最近有研究发现,肥胖可能会降低骨密度并且是骨折的危险因素<sup>[6-7]</sup>。血清骨代谢标志物是评价骨代谢状况的指标,具有灵敏度高、易操作、省时经济等优点,目前被临床广泛使用。本研究分析BMI、腰围(waist circumference, WC)、腰围身高比(waist-height ratio, WHtR)与骨代谢标志物间的关系,为评价青少年骨代谢状况提供依据。

**【基金项目】** 宁夏自然科学基金项目(2019AAC03083)。

**【作者简介】** 杨清梅(1994-),女,宁夏人,在读硕士,主要研究方向为儿童青少年慢性病流行病学。

**【通讯作者】** 丁文清, E-mail: dwqdz@163.com。

DOI: 10.16835/j.cnki.1000-9817.2020.08.027

## 1 对象与方法

**1.1 对象** 采用方便整群抽样方法,于 2018 年 9—12 月随机抽取银川市某中学 1 084 名 12~18 岁中学生为研究对象。纳入标准:从事各项体育锻炼活动,身体发育健全。排除标准:(1)患有甲状腺功能亢进症、糖尿病、血液系统疾病、恶性肿瘤骨转移等;(2)患严重心脏、肝脏、肾脏、肺部、骨关节疾病;(3)长期服用糖皮质激素、抗癫痫药物、甲状腺激素等影响骨代谢的药物史者。其中男生 553 名,女生 531 名;平均年龄为(13.9±1.2)岁。男生 WC、BMI 高于女生,差异均有统计学意义( $t$  值分别为 5.79, 2.75,  $P$  值均 $<0.01$ ),骨钙素(OC)、钙(Ca)、I 型胶原交联 C 末端肽( $\beta$ -CTX)男、女生间差异无统计学意义( $Z$  值分别为 -0.18, -0.84, -1.21,  $P$  值均 $>0.05$ )。所有调查对象在父母协助下均签署了知情同意书,此研究得到了宁夏医科大学伦理审查委员会的批准(批准号:2020-520)。

### 1.2 方法

**1.2.1 问卷调查** 包括研究对象基本情况、饮食及体力活动状况、疾病史及家族史等。

**1.2.2 体格测量** 身高、体重、腰围依据“2014 年全国学生体质与健康调研手册”<sup>[8]</sup>进行测量,身高、腰围连续测量 2 次,精确到 0.1 cm,且 2 次测量误差不得超过 0.5 cm,取平均值;体重连续测量 2 次,精确到 0.1 kg,2 次测量误差不得超过 0.5 kg,取平均值,并计算 BMI=体重(kg)/身高<sup>2</sup>(m<sup>2</sup>),WHtR=腰围(cm)/身高(cm)。

**1.2.3 实验室检测** 采集空腹 12 h 静脉血,经离心后留取血清,放置于 -80 °C 冰箱备用。使用 AU480 型全自动生化分析仪检测钙(Ca)水平(四川迈克生物科技股份有限公司);采用 Multiskan GO 型全波长多功能酶标仪检测血清骨钙素(osteocalcin, OC)、I 型胶原交联 C 末端肽( $\beta$ -Cterminal telopeptide of type 1 collagen, CTX)水平等(武汉伊莱瑞特生物科技股份有限公司),板内、板间变异系数均 $<10\%$ 。

**1.2.4 诊断标准** BMI 定义的肥胖采用李辉等<sup>[9]</sup>2010 年提出的中国儿童青少年超重和肥胖筛查 BMI

界值点值的研究;WC 定义的腹型肥胖采用马冠生等<sup>[10]</sup>提出的中国 7~18 岁学龄儿童青少年腰围界限值研究的参照标准;WHtR 定义的腹型肥胖采用中华医学会儿分会推荐的标准<sup>[11]</sup>,即男生 WHtR $\geq 0.48$ ,女生 WHtR $\geq 0.46$ 。

**1.3 统计学分析** 采用 EpiData 3.1 软件录入数据,运用 SPSS 21.0 软件进行统计学分析,服从正态分布的定量资料采用( $\bar{x}\pm s$ )描述,非正态分布资料采用  $M(P_{25}\sim P_{75})$ 描述,经变量转换后均采用单因素方差分析或非参数检验比较不同组间各指标的差异,采用 Spearman 相关和多元线性回归评价 BMI、WC 和 WHtR 与骨代谢指标之间的关系,Logistic 回归分析骨代谢指标与肥胖的关联,检验水准  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果

**2.1 BMI、WC、WHtR 与骨代谢标志物的相关分析** Spearman 相关分析显示,BMI、WC、WHtR 与 Ca 均呈负相关( $r$  值分别为 -0.10, -0.15, -0.15,  $P$  值均 $<0.05$ ),与 OC 无明显关系( $P>0.05$ ),WC 与  $\beta$ -CTX 呈负相关( $r=-0.06, P<0.05$ )。

**2.2 BMI、WC、WHtR 与骨代谢标志物的多重线性回归分析** 采用多元线性回归分析,分别以 3 种骨代谢标志物为因变量,以 WC、BMI、WHtR 为自变量,调整年龄、性别、维生素 D 补充情况等混杂因素,剔除共线性变量 WHtR,结果发现,纳入模型的变量中仅 WC 对 Ca、 $\beta$ -CTX 的影响有统计学意义( $\beta$  值分别为 -0.33, -0.22,  $P$  值均 $<0.05$ ),且 WC 对骨代谢标志物的影响最大。

**2.3 不同肥胖程度和不同肥胖类型间骨代谢标志物的比较** 以 BMI 定义的肥胖组 Ca 低于正常组和超重组, $\beta$ -CTX 水平低于正常组,差异有统计学意义( $P$  值均 $<0.01$ )。以 WC 定义的腹型肥胖与正常组比较,Ca 低于正常组( $P<0.05$ );以 WHtR 诊断的腹型肥胖与正常组比较,Ca 水平低于正常组,差异有统计学意义( $P<0.01$ )。见表 1。

表 1 不同诊断标准各肥胖类型中学生骨代谢标志物水平比较 [ $M(P_{25}\sim P_{75})$ ]

诊断标准	分组	人数	统计值	OC/(ng·mL <sup>-1</sup> )	Ca/(ng·mL <sup>-1</sup> )	$\beta$ -CTX/(pg·mL <sup>-1</sup> )
BMI	正常	779		8.25(4.91~13.73)	2.35(2.20~2.56)	4.25(2.47~6.27)
	超重	189		8.25(5.00~13.33)	2.38(2.18~2.60)	3.77(2.25~6.18)
	肥胖	116		5.97(3.82~17.64)	2.18(2.06~2.38)*&	4.15(3.81~7.40)*&
			Z 值	0.03	54.31	18.24
		P 值	0.99	<0.01	<0.01	
WC	正常	800		8.31(4.87~13.66)	2.36(2.21~2.57)	4.30(2.56~6.38)
	腹型肥胖	284		7.10(4.50~14.31)	2.25(2.12~2.49)	4.17(2.41~6.18)
			Z 值	-5.59	-1.35	
			P 值	1.00	<0.01	0.18
WHtR	正常	837		8.31(4.83~13.68)	2.36(2.20~2.57)	4.26(2.55~6.35)
	腹型肥胖	247		7.23(4.57~14.10)	2.25(2.12~2.49)	4.21(2.44~6.34)
			Z 值	-0.35	-5.74	-0.36
			P 值	0.73	<0.01	0.72

注:\*肥胖组与正常组相比,&肥胖组与超重组相比, $P<0.05$ 。

2.4 肥胖与骨代谢标志物的 Logistic 回归分析 根据中位数  $P_{50}$  将 OC、 $\beta$ -CTX、Ca 水平分为低水平组(赋值为 0)和高水平组(赋值为 1)作为因变量,不同肥胖程度及不同肥胖类型作为自变量(BMI:正常=0,超重=1,肥胖=2;WC:正常=0,腹型肥胖=1;WHtR:正常=

0,腹型肥胖=1),以体重正常为参照进行 Logistic 回归分析,结果显示,不同肥胖类型与 OC 水平无显著关系( $P$  值均 $>0.05$ );肥胖者血清  $\beta$ -CTX 水平,血清 Ca 水平,腹型肥胖者(以 WC 定义)增加分别是正常学生的 1.93,0.31,0.54 倍。见表 2。

表 2 中学生肥胖与骨代谢标志物的 Logistic 回归分析( $n=1\ 084$ )

自变量	OC					$\beta$ -CTX					Ca					
	$\beta$ 值	标准误	Wald $\chi^2$ 值	$P$ 值	OR 值(OR 值 95%CI)	$\beta$ 值	标准误	Wald $\chi^2$ 值	$P$ 值	OR 值(OR 值 95%CI)	$\beta$ 值	标准误	Wald $\chi^2$ 值	$P$ 值	OR 值(OR 值 95%CI)	
BMI	超重	0.05	0.17	0.10	0.76	1.06(0.75~1.48)	-0.28	0.17	2.76	0.10	0.75(0.54~1.05)	0.02	0.17	0.01	0.91	1.02(0.73~1.43)
	肥胖	-0.26	0.21	1.53	0.22	0.77(0.51~1.17)	0.66	0.22	9.32	0.00	1.93(1.27~2.94)	-1.16	0.23	25.60	<0.01	0.31(0.20~0.49)
WC	腹型肥胖	-0.13	0.15	0.73	0.39	0.88(0.66~1.18)	-0.16	0.14	1.28	0.26	0.85(0.64~1.13)	-0.62	0.15	17.54	<0.01	0.54(0.40~0.72)
WHtR	腹型肥胖	-0.17	0.15	1.24	0.27	0.84(0.63~1.14)	0.05	0.15	0.12	0.73	0.95(0.71~1.28)	-0.48	0.25	3.64	0.06	0.62(0.38~1.01)

注:以正常体重作为参照;调整年龄、性别、维生素 D 补充情况。

### 3 讨论

儿童青少年肥胖问题是目前面临的一项重大公共卫生问题<sup>[12]</sup>。考虑到全球肥胖流行的程度、对个人健康的影响以及医疗系统和全球经济的成本,识别儿童肥胖相关共病对早期识别和治疗有重要意义<sup>[13]</sup>。骨代谢生化指标在人体骨的新陈代谢过程中发挥着重要调节作用,骨形成标志物与骨吸收标志物合称为骨转换标志物<sup>[14]</sup>。

骨钙素作为骨转换标志物是参与骨矿化过程的重要非胶原蛋白之一,相关研究表明,儿童青少年骨钙素水平较高,提示骨形成增加,但年龄和青春期发育激素水平变化等均可影响人体血清 OC 水平<sup>[15]</sup>。本研究表明,BMI、WC、WHtR 与 OC 无明显关系,可能与样本量大小有关。国外关于血清骨代谢生化指标与 BMI 和身体代谢的关系的研究显示,中老年 OC 浓度与 BMI、WC 等呈负相关,且 BMI 和骨钙素水平之间存在负相关关系<sup>[16]</sup>。有研究认为,骨组织释放的 OC 正在成为一种介质刺激胰腺  $\beta$  细胞的增殖和胰岛素的分泌;另一方面增加了外周组织的胰岛素敏感性,作为肥胖指标的增加与骨转换标志物的减少有关<sup>[17]</sup>。大量研究发现,骨钙素在血糖控制中也发挥重要作用,可以直接作用于朗格汉斯的胰岛细胞,增加胰岛素的产生和分泌,也可以通过脂联素作用于外周组织胰岛素敏感细胞<sup>[16]</sup>。

骨吸收标志物  $\beta$ -CTX 是反映破骨细胞的骨吸收活性的特异和敏感指标。本研究发现,WC 与  $\beta$ -CTX 负相关。Magalh 等<sup>[18]</sup> 研究发现,血清 BMI、WC 与  $\beta$ -CTX 之间有显著关系。Kord-Varkaneh 等<sup>[19]</sup> 研究结果表明 BMI 和  $\beta$ -CTX 之间有相关性,但在校正协变量后,相关性并不显著。另外还有一些研究表明,体重减轻可以降低  $\beta$ -CTX 的水平<sup>[20-21]</sup>。国内一项研究比较青年不同肥胖表型间骨代谢指标变化情况,结果发现, $\beta$ -CTX 水平随着 BMI 的增加而上升<sup>[22]</sup>。不同的

研究由于年龄、性别、国家、研究人群类型的差异以及已知或未知的潜在混杂因素的存在,结果存在许多差异。本研究发现,总体肥胖参数中仅 WC 与骨转换标志物、骨吸收标志物均有关联,提示腹型肥胖与骨代谢标志物的关系更为密切,与 Tan 等<sup>[23]</sup> 研究结果一致。本研究结果显示,肥胖组 Ca 的水平低于正常青少年,提示肥胖者体内骨丢失较体重正常者严重,因此肥胖青少年更应该注意钙剂补充,相关研究表明,钙剂补充可以增强肥胖中年女性的减肥效果<sup>[24]</sup>,更能说明正常学生体内钙水平高于肥胖者。

总之,本研究表明,BMI、WC、WHtR 与 Ca、 $\beta$ -CTX 水平呈负相关,且 WC 与骨代谢标志物关系密切;Ca、 $\beta$ -CTX 水平是肥胖的保护因素,表明肥胖对骨吸收有负面影响,所以肥胖对骨代谢的保护作用有待进一步验证。

### 4 参考文献

- [1] MERCEDES D O, MONIKA B S, ELAINE B. Global prevalence and trends of overweight and obesity among preschool children[J]. Am J Clin Nutr, 2010, 92(5): 1257.
- [2] 张娜, 马冠生.《中国儿童肥胖报告》解读[J]. 营养学报, 2017, 39(6): 530-534.
- [3] NG M, FLEMING T, ROBINSON M, et al. Global, regional and national prevalence of overweight and obesity in children and adults 1980-2013: a systematic analysis[J]. Lancet, 2014, 384(9945): 766-781.
- [4] SIMMONDS M, BURCH J, LLEWELLYN A, et al. The use of measures of obesity in childhood for predicting obesity and the development of obesity-related diseases in adulthood: a systematic review and meta-analysis[J]. Health Technol Assess, 2015, 19(43): 1-336.
- [5] GOULDING A, JONES I E, TAYLOR R W, et al. Bone mineral density and body composition in boys with distal forearm fractures: a dual-energy x-ray absorptiometry study[J]. J Pediatr, 2001, 139(4): 509-515.
- [6] COMPSTON J E, FLAHEVE J, HOSMER D W, et al. Relationship of weight, height, and body mass index with fracture risk at different sites in postmenopausal women: the Global Longitudinal study of Osteoporosis in Women(GLOW)[J]. J Bone Miner Res, 2014, 29(2): 487-

- 493.
- [7] PALERMO A, TUCCINARDI D, DEFEUDIS G, et al. BMI and BMD: the potential interplay between obesity and bone fragility [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(6):544.
- [8] 全国学生体质与健康调研组. 2014 年全国学生体质与健康调研手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [9] 李辉, 宗心南, 季成叶, 等. 中国 2~18 岁儿童青少年超重和肥胖筛查体重指数界值点的研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2010, 31(6):616-620.
- [10] 马冠生, 季成叶, 马军, 等. 中国 7~18 岁学龄儿童青少年腰围界值点研究 [J]. *中华流行病学杂志*, 2010, 31(6):609-615.
- [11] 中华医学会儿科学分会内分泌遗传代谢学组, 中华医学会儿科学分会心血管学组, 中华医学会儿科学分会儿童保健学组, 等. 中国儿童青少年代谢综合征定义和防治建议 [J]. *中华儿科杂志*, 2012, 50(6):420-422.
- [12] 马军, 吴双胜. 中国学龄儿童青少年超重肥胖流行趋势分析 [J]. *中国学校卫生*, 2009, 30(3):195-197.
- [13] VISHAL S, SUSANNE C, JANE N, et al. A systematic review and meta-analysis estimating the population prevalence of comorbidities in children and adolescents aged 5 to 18 years [J]. *Obes Rev*, 2019, 20(10):1-9.
- [14] 张萌萌, 张秀珍, 邓伟民, 等. 骨代谢生化指标临床应用专家共识 (2019) [J]. *中国骨质疏松杂志*, 2019, 25(10):1357-1372.
- [15] MOTYL K J, MCCABE L R, SCHWARTZ A V. Bone and glucose metabolism: a two-way street [J]. *Arch Biochem Biophys*, 2019, 503(1):10.
- [16] NIKOLIC S, CURIC N, ILINCIC B, et al. Relation between osteocalcin and the energy metabolism in obesity [J]. *Vojnosanitetski Pregled*, 2019, 76(3):266-271.
- [17] UMER S, MOSLEY T H, KULLO I J. Serum osteocalcin is associated with measures of insulin resistance, adipokine levels, and the presence of metabolic syndrome [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2010, 30(7):1474-1478.
- [18] MAGALHÃES K B D S, MARCELO M M, ERIK T D, et al. Metabolic syndrome and central fat distribution are related to lower serum osteocalcin concentrations [J]. *Ann Nutr Metabol*, 2013, 62(3):181-186.
- [19] KORD-VARKANEH H, TANGESTANI H, MANSOURI S, et al. Association of body mass index and waist circumference with osteocalcin and C-terminal telopeptide in Iranian elderly: results from a cross-sectional study [J]. *J Bone Miner Metab*, 2019, 37(1):174-184.
- [20] WEILER H A, JULIE L, JOHN K, et al. Osteocalcin and vitamin D status are inversely associated with homeostatic model assessment of insulin resistance in Canadian aboriginal and white women: the First Nations Bone Health Study [J]. *J Nutr Biochem*, 2013, 24(2):412-418.
- [21] HOLECKI M, ZAHORSKA-MARKIEWICZ B, CHUDEK J, et al. Changes in bone mineral density and bone turnover markers in obese women after short-term weight loss therapy during a 5-year follow-up [J]. *Polsk Archiwum Medycyny Wewnętrznej-polish Arch Inter Med*, 2010, 120(7/8):248-254.
- [22] 张伟楠. 青年男性不同肥胖表型与骨代谢标志物水平研究 [D]. 承德: 承德医学院, 2018.
- [23] TAN A, GAO Y, YANG X, et al. Low serum osteocalcin level is a potential marker for metabolic syndrome: results from a Chinese male population survey [J]. *Metab Clin Exper*, 2011, 60(8):1186-1192.
- [24] S S H, ZAINAB Z, M O B, et al. A high weekly dose of cholecalciferol and calcium supplement enhances weight loss and improves health biomarkers in obese women [J]. *Nutr Res*, 2018, 59:53-64. DOI: 10.1016/j.nutres.2018.07.011.
- 收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-03-02
- 
- (上接第 1223 页)
- [30] KATSIKADELIS M, PILIANIDIS T, MANTZOURANIS N, et al. The influence of 10 weeks high-intensity interval Multiball training on aerobic fitness in adolescent table tennis players [J]. *J Biol Exerc*, 2017, 13(1):1-13.
- [31] GOJANOVIC B, SHULTZ R, FEIHL F, et al. Overspeed hiit in lower-body positive pressure treadmill improves running performance [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(12):2571-2578.
- [32] ROXBURGH B H, NOLAN P B, WEATHERWAX R M, et al. Is moderate intensity exercise training combined with high intensity interval training more effective at improving cardiorespiratory fitness than moderate intensity exercise training alone? [J]. *J Sports Sci Med*, 2014, 13(3):702-707.
- [33] MENZ V, SEMSCH M, MOSBACH F, et al. Cardiorespiratory effects of one-legged high-intensity interval training in normoxia and hypoxia: a pilot study [J]. *J Sports Sci Med*, 2016, 15(2):208-213.
- [34] LARSEN S, DANIELSEN J H, SØNDERGÅRD S D, et al. The effect of high-intensity training on mitochondrial fat oxidation in skeletal muscle and subcutaneous adipose tissue [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(1):59-69.
- [35] GUNNARSSON T P, BANGSBO J. The 10-20-30 training concept improves performance and health profile in moderately trained runners [J]. *J Appl Physiol*, 2012, 113(1):16-24.
- [36] DALLECK L, BUSHMAN T T, CRAIN R D, et al. Dose-response relationship between interval training frequency and magnitude of improvement in lactate threshold [J]. *Int J Sports Med*, 2010, 31(8):567-571.
- [37] HAFSTAD A D, BOARDMAN N T, LUND J, et al. High intensity interval training alters substrate utilization and reduces oxygen consumption in the heart. [J]. *J Appl Physiol*, 2011, 111(5):1235-1241.
- [38] THEVENET D, TARDIEUBERGER M, BERTHOIN S, et al. Influence of recovery mode (passive vs. active) on time spent at maximal oxygen uptake during an intermittent session in young and endurance-trained athletes [J]. *Eur J Appl Physiol*, 2007, 99(2):133-142.
- [39] TOUBEKIS A G, SMILIOS I, BOGDANIS G C, et al. Effect of different intensities of active recovery on sprint swimming performance [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2006, 31(6):709-716.
- [40] BURGOMASTER K A, HUGHES S C, HEIGENHAUSER G J, et al. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans [J]. *J Appl Physiol*, 2005, 98(6):1985-1990.
- 收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-05-06