

# 儿童青少年外周动脉顺应性、血管内皮功能的年龄变化规律及与心血管疾病危险因素的关系

穆锴 张羿 牛大彦 叶莹 严卫丽

201102 上海, 复旦大学附属儿科医院临床流行病学研究室

通信作者: 严卫丽, Email: yanwl@fudan.edu.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2016.06.013

**【摘要】** 目的 探讨儿童青少年外周动脉顺应性和内皮功能的年龄变化规律及其与肥胖相关测量指标和心血管疾病危险因素的关系。方法 在上海市闵行区儿童青少年血压流行病学调查人群中选取7~17岁体重正常和超重/肥胖者, 分别采用动脉硬化检测仪、Endopat2000无创内皮功能检测仪测定动脉顺应性、血管内皮功能, 测量肱踝脉搏波速度(baPWV)、充血反应指数(RHI)及体格、血压和空腹生化指标。分析baPWV、RHI随年龄的变化规律。对相关测量指标进行年龄标准化以及偏态分布的指标正态化转换后, 使用简单线性相关分析观察baPWV、RHI与肥胖相关测量指标、心血管疾病危险因素的关系。结果 452名体重正常和94名超重/肥胖者完成动脉顺应性和血管内皮功能检测, 其中299名(54.76%)为男性。简单线性相关分析显示, 正常体重者中baPWV、RHI与年龄呈弱正相关关系( $r=0.33, P<0.01$ ;  $r=0.36, P<0.01$ )。baPWV与标准化( $z$ )BMI( $r=0.13, P=0.002$ )、SBP( $r=0.20, P<0.01$ )、DBP( $r=0.27, P<0.01$ )、TG( $r=0.11, P=0.010$ )、胰岛素( $r=0.21, P=0.004$ )、胰岛素抵抗指数( $r=0.21, P=0.005$ )呈正相关关系, 与HDL-C呈负相关关系( $r=-0.09, P=0.039$ )。RHI与 $z$  BMI呈正相关关系( $r=0.10, P=0.018$ ), 与DBP呈弱的负相关关系( $r=-0.10, P=0.016$ ), 与其他测量指标无显著性相关。baPWV在男性略高于女性, 而RHI无性别差异。结论 baPWV、RHI测量值在7~17岁间随年龄增长整体呈上升趋势, 提示动脉顺应性和血管内皮功能在此期间处在不断发育的过程。动脉顺应性的变化与心血管疾病危险相关测量指标的变化具有相关性, 而血管内皮功能则仅在超重/肥胖儿童中表现出提前发育的现象, 与血压、胰岛素抵抗等心血管疾病的危险因素未表现出相关性。对儿童青少年人群心血管疾病危险的早期评估, 测量动脉顺应性可能比血管内皮功能指标更敏感。

**【关键词】** 肥胖; 心血管疾病危险因素; 动脉顺应性; 血管内皮功能; 儿童青少年

基金项目: 上海市新百人计划(XBR2013101); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAI03B03)

**Distribution of peripheral arterial stiffness and endothelial function as well as their correlations with cardiovascular risk factors in children and adolescents** Mu Kai, Zhang Yi, Niu Dayan, Ye Ying, Yan Weili

Department of Clinical Epidemiology, Children's Hospital of Fudan University, Shanghai 201102, China

Corresponding author: Yan Weili, Email: yanwl@fudan.edu.cn

**【Abstract】 Objective** To investigate the distribution of peripheral arterial stiffness, endothelial function and their correlations with cardiovascular risk factors in the 7-17 year-olds. **Methods** Normal weight and obese subjects aged 7-17 years with completed data on questionnaires, anthropometric and blood biochemical tests, were recruited from a cross-sectional population-based study on childhood hypertension in Minhang district of Shanghai. Automatic waveform analyzer (BP-203RPE-I) and Endopat 2000 were used to measure the arterial stiffness. Endothelial function with brachial-ankle pulse wave velocity (baPWV) and reactive hyperemia index (RHI) were recorded. BaPWV and RHI were standardized by age. Skewed biochemical variables were log transformed. Linear correlation analysis was performed to observe association between baPWV, RHI and other measured variables. **Results** A total of 452 normal-weight and 94 obese subjects were recruited, including 299 males. Data showed that baPWV and RHI increased with age in normal weight subjects

( $r=0.33, P<0.01; r=0.36, P<0.01$ ). Results from Linear correlation analysis revealed that baPWV was positively correlated with BMI ( $r=0.13, P=0.002$ ), systolic blood pressure (SBP) ( $r=0.20, P<0.01$ ), diastolic blood pressure (DBP) ( $r=0.27, P<0.01$ ), triglycerides (TG) ( $r=0.11, P=0.010$ ), insulin ( $r=0.21, P=0.004$ ) and the HOMA insulin resistance index ( $r=0.21, P=0.005$ ), but negatively correlated with high-density lipoprotein cholesterol ( $r=-0.09, P=0.039$ ). RHI was positively correlated with BMI ( $r=0.10, P=0.018$ ) but negatively correlated with DBP ( $r=-0.10, P=0.016$ ). Males had higher baPWVs than females ( $P=0.04$ ). However, RHI did not differ between genders. **Conclusions** The fact that baPWV and RHI increased along with age, indicated that the arterial stiffness and endothelial function continued to develop in normal weight childhood and adolescence. Arterial stiffness was correlated with cardiovascular risk-related parameters whereas endothelial function was not. BaPWV might be more sensitive in evaluating the cardiovascular risk in children and adolescents than RHI did.

**【Key words】** Obesity; Cardiovascular risk factors; Arterial stiffness; Endothelial function; Children and adolescents

**Fund programs:** Shanghai new one-Hundred Talents Plan (XBR2013101); National Science and Technology Support Projects for the "Twelfth Five-Year" Plan of China (2012BAI03B03)

动脉顺应性和血管内皮功能是评估血管功能的重要指标<sup>[1]</sup>。成年人相关领域的研究提示了动脉顺应性与心血管疾病的发生、发展和结局密切相关<sup>[2]</sup>。由于高血压等心血管疾病发生发展的危险因素可追溯到儿童期<sup>[3]</sup>，而儿童青少年人群动脉顺应性的研究相对较少。血管内皮功能损伤是动脉粥样硬化的早期阶段<sup>[4-5]</sup>，也是心血管疾病的重要病理基础及心血管不良事件的独立预测因子<sup>[6]</sup>，但既往报道儿童青少年血管内皮功能与肥胖相关测量指标相关性的结果不一致<sup>[7-8]</sup>，且缺少儿童青少年动脉顺应性、血管内皮功能与肥胖相关测量指标及心血管疾病危险因素相关性的研究。为此本研究使用大样本数据，探讨 7~17 岁儿童青少年动脉顺应性和血管内皮功能随年龄的变化规律，及其与肥胖相关测量指标、心血管疾病危险因素的关系。

## 对象与方法

1. 研究对象：来自 2014 年 9 月至 2015 年 5 月上海市闵行区儿童青少年血压流行病学调查人群。纳入标准：① 7~17 岁正常体重儿童青少年，每一年龄段 40 人，男女各 20 人，同时也纳入了部分肥胖研究对象；② 调查问卷填写完整，体格指标、空腹血糖生化指标检测结果完整；③ 研究对象与家长均签署知情同意书。排除患有先天性心脏病、糖尿病和外周血管疾病者。本研究通过首都儿科研究所附属儿童医院伦理审查委员会批准(2012062)。

### 2. 研究方法：

(1) 问卷调查：低年级研究对象的调查问卷由家长(或监护人)填写，初、高中研究对象由其本人在家长指导下填写。问卷内容包括研究对象的人口学信息、疾病史、家族史等。

(2) 体格测量及实验室检测：按照教育部《2010 年

全国学生体质健康调研工作手册》要求的方法和标准测量体重、身高(ht)，并计算 BMI(kg/m<sup>2</sup>)<sup>[9]</sup>。采用欧姆龙电子血压计(型号：HEM-7012)测量 3 次、右臂坐位血压，每次间隔不少于 30 s，取 3 次血压读数平均值。使用欧姆龙动脉硬化检测仪 VP-1000 (BP-203RPE I 型)测量研究对象动脉顺应性，其测量结果为臂踝脉搏波速度(baPWV)<sup>[10]</sup>。使用 Endopat 2000(Itamar Medical Ltd., Caesara, Israel)无创内皮功能检测仪测定外周动脉血管内皮功能，自动分析仪测定结果即充血反应指数(RHI)<sup>[11]</sup>。研究对象在检测前 12 h 内避免烟草暴露及饮用咖啡因类饮料。采集研究对象空腹 EDTA 抗凝血 5 ml，由首都儿科研究所附属儿童医院检验科使用终点法测定 FPG、血脂。对 182 例 15~17 岁研究对象的血浆分别采用化学发光法和酶联免疫法测定胰岛素、内皮素含量。

3. 诊断标准：儿童青少年肥胖按中国肥胖工作组(WGOC)制定的标准<sup>[12]</sup>。高血压诊断标准，采用水银血压计和电子血压计非同日 3 时点测量，每时点测量血压 3 次，各时点间隔 1 周，前 2 个时点血压均偏高者测量第三次。SBP 和(或)DBP 均值超过参考人群同性别同年龄组第 95 百分位数参考值则确诊为高血压<sup>[13]</sup>。根据稳态模式评估法(HOMA)计算胰岛素抵抗指数(HOMA-IR) {HOMA-IR=[空腹胰岛素值(μIU/ml)×FPG 值(mmol/L)]/22.5}<sup>[14]</sup>。

4. 统计学分析：统计学分析采用 Stata 11.0 (StataCorp LP, College Station, TX, USA)软件。正态分布计量资料使用  $\bar{x} \pm s$  表示，非正态计量资料使用  $M(Q_R)$  表示，分类变量使用百分比表示。参照李辉等<sup>[15-16]</sup>制定的参考值，对身高(ht)、BMI 标准化，分别得到  $z_{ht}$ 、 $z_{BMI}$  值，即  $z_{ht} = (ht - \bar{x})/s$ ， $z_{BMI} = [(BMI/m_{BMI})^{1/BMI} - 1]/(1/BMI \times s_{BMI})$ ，式中均

值和标准差分别为李辉等研究参考人群对应性别、年龄段的ht均值和标准差,  $m\_BMI$ 、 $s\_BMI$ 、 $l\_BMI$ 分别为对应年龄、性别下BMI曲线上相应的M值、变异系数和偏度系数。SBP、DBP、baPWV、RHI分别根据百分位数曲线进行正态化处理得到对应z值, 如  $z\_SBP = (SBP - \bar{x})/s$ , 式中均值和标准差分别为同年龄组研究对象对应测量值的均值和标准差。对偏态分布的血生化指标取对数做正态性转换。为观察动脉顺应性、血管内皮功能测量值随年龄变化规律, 避免肥胖研究对象测量结果对分布产生影响, 在正常体重儿童青少年人群中使用简单线性相关分析观察两者与年龄的关系, 采用Box-Plot图描述baPWV、RHI随年龄的分布情况。在整体研究人群(包含正常体重和肥胖研究对象)中, 使用t检验观察  $z\_baPWV$ 、 $z\_RHI$ 在性别间的差异, 使用简单线性相关分析观察  $z\_baPWV$ 、 $z\_RHI$ 与体格测量指标、血生化指标的关系。  $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

### 结 果

1. 一般特征: 有452例体重正常和94例肥胖研究对象完成动脉顺应性、内皮功能检测, 其中胰岛素、内皮素检测完成182例。其中男性299例(54.76%), 高血压34例(6.23%), FPG值升高96例(17.58%)。见表1。

2. baPWV、RHI原始值随年龄和性别的分布: 正常体重者baPWV、RHI原始测量值随年龄的分布情况见图1。7岁正常体重儿童baPWV中位水平为850.5 cm/s, 在7~12岁呈下降趋势, 至12岁降至最低水平(761.0 cm/s), 12岁后呈逐渐上升趋势, 14岁时接近7岁同等水平, 17岁时达到最高值957 cm/s。简单线性相关分析显示, 7~17岁baPWV与年龄整体上呈弱的正相关关系( $r=0.33, P<0.01$ ); 如图2所示, RHI中位数则随年龄一直呈上升趋势, 至14岁上升至1.72 ml/mmHg × 100 (1 mmHg=0.133 kPa)后不再升高, 中位水平维持在1.70 ml/mmHg × 100, 线性相关分析显示RHI与年龄整体上呈弱正相关关系( $r=0.36, P<0.01$ )。

在整体研究人群中, baPWV在性别间差异有统计学意义( $P=0.042$ ), 男性  $z\_baPWV$ 比女性高0.17, 即平均高8 cm/s;  $z\_RHI$ 在性别间的差异无统计学意义( $P=0.782$ )(图3)。

3. baPWV、RHI与肥胖相关指标和心血管疾病危险因素的关系: 在整体研究人群中, baPWV的中位水平为841 cm/s, RHI中位水平为1.57 ml/mmHg × 100。

表1 研究对象特征

特 征	正常体重组 (n=452)	肥胖组 (n=94)
男性 <sup>a</sup>	231(51.1)	68(72.3)
年龄(岁, $\bar{x} \pm s$ )	12.56 ± 3.15	11.47 ± 3.09
体重(kg)	45(21.1)	61.5(34.0)
ht(cm, $\bar{x} \pm s$ )	152.80 ± 15.18	154.03 ± 15.14
$z\_ht(\bar{x} \pm s)$	0.14 ± 1.13	1.07 ± 1.26
BMI(kg/m <sup>2</sup> , $\bar{x} \pm s$ )	18.89 ± 2.96	26.78 ± 4.40
$z\_BMI(\bar{x} \pm s)$	0.01 ± 0.98	2.29 ± 0.51
SBP(mmHg)	114(14)	127(15)
$z\_SBP(\bar{x} \pm s)$	-0.45 ± 1.50	0.85 ± 0.86
DBP(mmHg)	65(11)	71(9)
$z\_DBP(\bar{x} \pm s)$	-0.13 ± 0.94	0.64 ± 0.92
高血压 <sup>a</sup>	11(2.43)	23(24.47)
高血糖 <sup>a</sup>	70(15.49)	26(27.66)
血脂异常 <sup>a</sup>	33(7.30)	25(26.59)
TC(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	3.94 ± 0.67	4.22 ± 0.81
TG(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	0.56(0.35)	0.81(0.64)
HDL-C(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	1.48 ± 0.29	1.31 ± 0.23
LDL-C(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	2.29 ± 0.59	2.64 ± 0.73
FPG(mmol/L, $\bar{x} \pm s$ )	5.08 ± 0.61	5.27 ± 0.62
胰岛素(μIU/ml)	4.91(3.49)	11.85(18.86)
HOMA-IR	1.15(0.79)	2.63(4.29)
内皮素(pg/ml)	0.69(0.34)	0.75(0.51)
baPWV(cm/s)	836(151)	853.5(183)
$z\_baPWV(\bar{x} \pm s)$	-0.08 ± 0.95	0.37 ± 1.11
RHI(ml/mmHg × 100)	1.58(0.75)	1.53(0.73)
$z\_RHI(\bar{x} \pm s)$	-0.03 ± 1.02	0.14 ± 1.10

注: <sup>a</sup>括号外数据为例数, 括号内数据为比例(%)

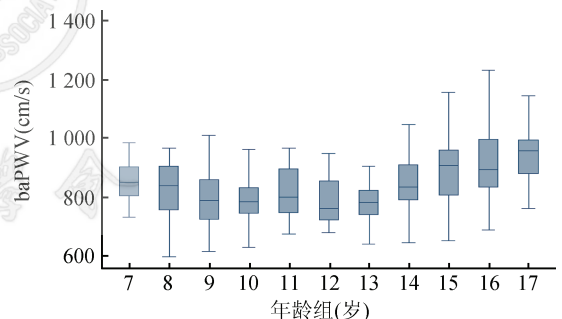


图1 正常体重者baPWV原始值随年龄变化的分布

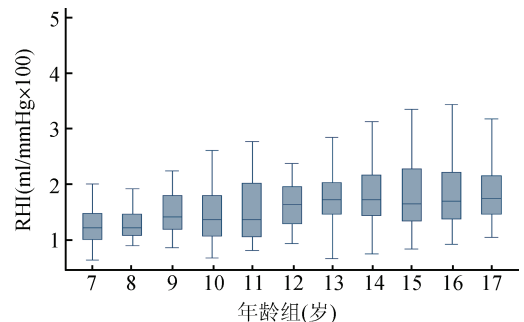
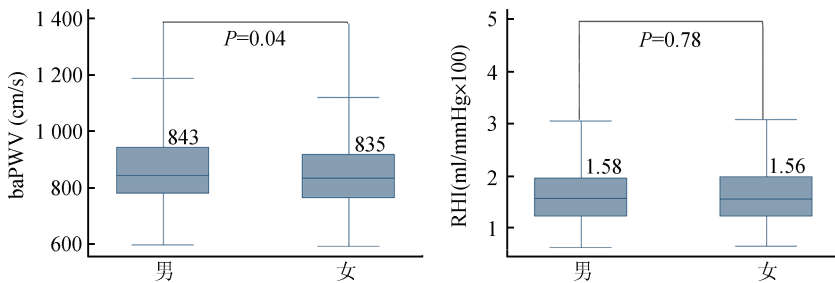


图2 正常体重者RHI原始值随年龄变化的分布

mmHg × 100。如表2所示, 通过年龄标准化后,  $z\_baPWV$ 与  $z\_BMI$  ( $r=0.13, P=0.002$ )、SBP ( $r=0.20, P<0.01$ )、DBP ( $r=0.27, P<0.01$ )、TG ( $r=0.11, P=0.010$ )、胰岛素 ( $r=0.21, P=0.004$ )、





注: P 值为经年龄标准化的 baPWV 值、RHI 值

图 3 baPWV、RHI 值的性别间差异

表 2 baPWV、RHI 值与肥胖和心血管疾病危险因素指标相关性分析

指 标	baPWV		RHI		功效值	
	r 值	P 值	r 值	P 值	baPWV	RHI
z_BMI	0.13	0.002	0.10	0.018	0.57	0.59
z_ht	-0.05	0.202	0.02	0.727	0.63	0.86
z_SBP	0.20	<0.001	-0.02	0.686	0.95	0.83
z_DBP	0.27	<0.001	-0.10	0.016	0.99	0.58
TC	0.05	0.232	0.05	0.219	0.67	0.65
TG <sup>a</sup>	0.11	0.010	0.02	0.644	0.59	0.79
HDL-C	-0.09	0.039	0.06	0.179	0.63	0.69
LDL-C	0.08	0.059	0.05	0.268	0.62	0.71
FPG	0.03	0.483	0.02	0.659	0.74	0.81
胰岛素	0.21	0.004	0.08	0.269	0.58	0.68
HOMA-IR <sup>a</sup>	0.21	0.005	0.08	0.274	0.61	0.68
内皮素 <sup>a</sup>	0.02	0.815	0.01	0.875	0.91	0.90

注: 相关分析前 baPWV 和 RHI 值做正态化处理; <sup>a</sup> 原始值经对数转换

HOMA-IR ( $r=0.21, P=0.005$ ) 呈弱正相关关系, 与 HDL-C 呈弱负相关关系 ( $r=-0.09, P=0.039$ ), 未观察到 baPWV 与 ht、TC、LDL-C、FPG、内皮素的相关性 ( $P>0.05$ )。z\_RHI 与 z\_BMI 呈弱正相关关系 ( $r=0.10, P=0.018$ ), 与 DBP 呈弱的负相关关系 ( $r=-0.10, P=0.016$ ), 未观察到 z\_RHI 与 ht、SBP、TC、TG、HDL-C、LDL-C、FPG、胰岛素、HOMA-IR、内皮素的相关性 ( $P>0.05$ )。肥胖各项指标、心血管疾病危险因素与动脉顺应性、内皮功能相关性的功效值为 0.57~0.99, 内皮素与动脉顺应性、内皮功能相关性的功效值分别为 0.91、0.90。

### 讨 论

既往研究证实成人期动脉顺应性、内皮功能是反映血管功能的重要指标, 动脉顺应性升高和内皮功能损伤及其对血流动力学的影响与心血管不良事件的发生密切相关<sup>[17]</sup>, 也是心血管疾病发病的重要危险因素。本研究通过线性相关分析观察到 7~17 岁儿童青少年 baPWV 和 RHI 测量值随年龄呈上升趋势。其中 baPWV 值随年龄逐渐升高, 提示血管弹性有逐渐降低的趋势; 而 RHI 值逐渐升高提示血

管内皮功能处在不断发育成熟的过程。剔除生长发育因素作用后, baPWV 与 BMI 以及心血管疾病危险因素呈弱的正相关关系, 表现为 BMI、SBP、DBP、TG、胰岛素、HOMA-IR 水平越高 baPWV 值越高, 提示在儿童青少年期, baPWV 所代表的动脉顺应性随肥胖程度增加、心血管疾病危险因素水平升高, 已有向损伤

发展的趋势, 与来自成年人群的研究结果一致。除 RHI 与 BMI 有弱正相关关系外, 未观察到与血糖、血脂、胰岛素抵抗等心血管疾病危险因素的相关性。反之, 表现为 BMI 水平较高的儿童青少年其 RHI 所代表的内皮功能也越好, 推断肥胖一定程度上有可能刺激 RHI 的发育。

本研究在 7~17 岁体重正常人群中观察到 baPWV 与年龄呈弱的正相关关系, 提示该年龄段儿童青少年动脉顺应性逐渐降低、血管弹性减弱的趋势, 与国内外一些研究结果类似。Niboshi 等<sup>[18]</sup>观察了 970 例 9~17 岁正常体重儿童青少年 baPWV 值随年龄分布的情况, 同样观察到 baPWV 随年龄逐渐升高的规律。本研究观察 baPWV 随年龄的原始分布, 显示在 7~12 岁时有小幅下降, 之后升高, 提示动脉弹性在 12 岁时可能达到最佳, 随后至 17 岁动脉弹性呈现逐渐降低趋势。

本研究发现 baPWV 与心血管疾病危险因素的关系, 与既往在儿童青少年人群及成年人群中观察到的趋势基本一致。黄晖明等<sup>[19]</sup>观察了 4 585 例 20~80 岁社区自然人群 BMI 与 baPWV 的关系, 发现呈正相关关系, 与本研究结果一致。既往一些在成年人群研究显示 baPWV 与 SBP、DBP 呈正相关关系<sup>[20-21]</sup>, 与本研究中去除生长发育因素后 baPWV 与血压的关系一致。方福生等<sup>[22]</sup>分析 1 046 例正常体检人群胰岛素含量与 baPWV 的关系, 发现血胰岛素水平与 baPWV 呈弱的正相关关系。陈盼盼等<sup>[21]</sup>同时观察到 baPWV 与 TG 的相关性。结合本文分析结果, 提示无论在儿童青少年还是在成人期, BMI、血压、胰岛素水平和血脂与动脉顺应性均呈正相关关系。

本研究还观察到 RHI 通过年龄标准化和剔除生长发育因素后, 与 SBP、血糖、胰岛素、HOMA-IR、血脂等血生化指标无相关性, 与既往研究结果相似<sup>[23]</sup>。剔除年龄效应后 RHI 与 BMI、DBP 呈弱的正相关, 即提示 BMI、DBP 越高, 内皮功能越好的趋

势,与Radtke等<sup>[24]</sup>观察到的健康学龄儿童BMI与RHI正相关的发现一致。结合本研究观察的7~17岁儿童青少年RHI随年龄增加基本呈线性增长趋势,推测该年龄组人群血管内皮功能正处发育期,肥胖对RHI的作用有限,尚不能抵消RHI自身随年龄发育的趋势。研究中观察到RHI与DBP的正相关关系,与Pareyn等<sup>[7]</sup>观察结果一致,也符合以上的推测。Hamburg等<sup>[25]</sup>对成年人的研究发现RHI与TC呈弱的负相关关系,提示TC水平异常与内皮损伤有一定的联系,而本研究为正常儿童青少年人群,则未观察到二者的线性关系。

本研究存在局限性。首先本文为横断面研究,仅测定了研究对象一个时间点的动脉顺应性、内皮功能水平,但如获得大样本纵向研究数据难度较大;其次目前尚缺乏儿童青少年RHI分年龄、分性别的正常参考值;此外所得动脉顺应性、内皮功能与BMI、HOMA-IR相关性的功效值 $<0.8$ ,今后需要在允许范围内进一步扩大样本量以验证本文结果。

总之,本文提示7~17岁正常体重儿童青少年动脉顺应性变化与BMI、血压及HOMA-IR值升高相一致;而血管内皮功能与SBP、HOMA-IR、血脂水平等心血管疾病危险因素则未表现出相关性,BMI值较高反而内皮功能越好。为此针对儿童青少年人群动脉顺应性测量作为心血管疾病危险的早期评估指标,可能比血管内皮功能测量更加敏感。

利益冲突 无

#### 参 考 文 献

- Devan AE, Seals DR. Vascular health in the ageing athlete [J]. *Exp Physiol*, 2012, 97 (3) : 305-310. DOI: 10.1113/expphysiol.2011.058792.
- Vlachopoulos C, Aznaouridis K, Terentes-Printzios D, et al. Prediction of cardiovascular events and all-cause mortality with brachial-ankle elasticity index: a systematic review and meta-analysis [J]. *Hypertension*, 2012, 60 (2) : 556-562. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.112.194779.
- 赵地,张明明,米杰,等.儿童期至成年期血压变化对成年期肾功能的影响[J]. *中华儿科杂志*, 2008, 46 (10) : 763-768. DOI: 10.3321/j.issn.0578-1310.2008.10.010.
- Zhao D, Zhang MM, Mi J, et al. Effect of blood pressure status changes from childhood to adulthood on hypertension related cardiac renal function in adulthood [J]. *Chin J Pediatr*, 2008, 46 (10) : 763-768. DOI: 10.3321/j.issn.0578-1310.2008.10.010.
- Deanfield J, Donald A, Ferri C, et al. Endothelial function and dysfunction. Part I: Methodological issues for assessment in the different vascular beds: a statement by the Working Group on Endothelin and Endothelial Factors of the European Society of Hypertension [J]. *J Hypertens*, 2005, 23 (1) : 7-17.
- Lerman A, Zeiher AM. Endothelial function: cardiac events [J]. *Circulation*, 2005, 111 (3) : 363-368. DOI: 10.1161/01.CIR.0000153339.27064.14.
- Rubinshtein R, Kuvvin JT, Soffler M, et al. Assessment of endothelial function by non-invasive peripheral arterial tonometry predicts late cardiovascular adverse events [J]. *Eur Heart J*, 2010, 31 (9) : 1142-1148. DOI: 10.1093/eurheartj/ehq010.
- Pareyn A, Allegraert K, Verhamme P, et al. Impaired endothelial function in adolescents with overweight or obesity measured by peripheral artery tonometry [J]. *Pediatr Diab*, 2015, 16 (2) : 98-103. DOI: 10.1111/pedi.12139.
- Tryggestad JB, Thompson DM, Copeland KC, et al. Obese children have higher arterial elasticity without a difference in endothelial function: the role of body composition [J]. *Obesity* (Silver Spring), 2012, 20 (1) : 165-171. DOI: 10.1038/oby.2011.309.
- 全国学生体质健康调研组,教育部体育卫生与艺术教育司. 2010年全国学生体质健康调研工作手册[M]. 北京:教育部, 2010.
- National student physical health research group, department of sports, health and arts education. 2010 National Student Physical Health Research Handbook [M]. Beijing, Ministry of Education of the People's Republic of China, 2010.
- Zheng XM, Jin C, Liu YQ, et al. Arterial stiffness as a predictor of clinical hypertension [J]. *J Clin Hyperten*, 2015, 17 (8) : 582-591. DOI: 10.1111/jch.12556.
- Axtell AL, Gomari FA, Cooke JP. Assessing endothelial vasodilator function with the Endo-PAT 2000 [J]. *J Vis Exp*, 2010, 44 (44) : 2167. DOI: 10.3791/2167.
- 中国肥胖问题工作组. 中国学龄儿童青少年超重、肥胖筛查体重指数值分类标准 [J]. *中华流行病学杂志*, 2004, 25 (2) : 97-102.
- Group of China Obesity Task Force. Body mass index reference norm for screening overweight and obesity in Chinese children and adolescents [J]. *Chin J Epidemiol*, 2004, 25 (2) : 97-102.
- 米杰,王天有,孟玲慧,等. 中国儿童青少年血压参照标准的研究制定 [J]. *中国循证儿科杂志*, 2010, 5 (1) : 4-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5501.2010.01.002.
- Mi J, Wang TY, Meng LH, et al. Development of blood pressure reference standards for Chinese children and adolescents [J]. *Chin J Evid Based Pediatr*, 2010, 5 (1) : 4-14. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5501.2010.01.002.
- Haffner SM, Miettinen H, Stern MP. The homeostasis model in the San Antonio Heart Study [J]. *Diab Care*, 1997, 20 (7) : 1087-1092.
- 李辉,季成叶,宗心南,等. 中国0~18岁儿童、青少年身高、体重的标准化生长曲线 [J]. *中华儿科杂志*, 2009, 47 (7) : 487-492. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1310.2009.07.003.
- Li H, Ji CY, Zong XN, et al. Height and weight standardized growth charts for Chinese children and adolescents aged 0 to 18 years [J]. *Chin J Pediatr*, 2009, 47 (7) : 487-492. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1310.2009.07.003.
- 李辉,季成叶,宗心南,等. 中国0~18岁儿童、青少年体块指数的生长曲线 [J]. *中华儿科杂志*, 2009, 47 (7) : 493-498. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1310.2009.07.004.
- Li H, Ji CY, Zong XN, et al. Body mass index growth curves for Chinese children and adolescents aged 0 to 18 years [J]. *Chin J Pediatr*, 2009, 47 (7) : 493-498. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1310.2009.07.004.
- Laurent S, Boutouyrie P. Arterial stiffness: a new surrogate end point for cardiovascular disease [J]. *J Nephrol*, 2007, 20 Suppl 12: S45-50.
- Niboshi A, Hamaoka K, Sakata K, et al. Characteristics of brachial-ankle pulse wave velocity in Japanese children [J]. *Eur J Pediatr*, 2006, 165 (9) : 625-629. DOI: 10.1007/s00431-006-0135-y.
- 黄晖明,李森,许浩. 超重和肥胖与动脉僵硬度的相关性研究 [J]. *中华心血管病杂志*, 2011, 39 (10) : 950-954. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2011.10.016.
- Huang HM, Li S, Xu H. Association between overweight, obesity and arterial stiffness in community residents [J]. *Chin J Cardiol*, 2011, 39 (10) : 950-954. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3758.2011.10.016.
- Ahn JH, Kong M. The relationship among pulse wave velocity, ankle-brachial pressure index and heart rate variability in adult males [J]. *Korean J Fam Med*, 2011, 32 (7) : 406-411. DOI: 10.4082/kjfm.2011.32.7.406.
- 陈盼盼,顾东风,王梦琴,等. 代谢综合征各成分与臂踝脉搏波速度的关系研究 [J]. *中国循环杂志*, 2012, 27 (1) : 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2012.01.011.
- Chen PP, Gu DF, Wang MQ, et al. Relationship study between metabolic syndrome and brachial-ankle pulse wave velocity [J]. *Chin Circulat J*, 2012, 27 (1) : 37-40. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2012.01.011.
- 方福生,田慧,李春霖,等. 高胰岛素血症与脉搏波传导速度的相关性分析 [J]. *中华内科杂志*, 2011, 50 (4) : 299-302. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2011.04.009.
- Fang FS, Tian H, Li CL, et al. The correlation between hyperinsulinemia and pulse wave velocity [J]. *Chin J Intern Med*, 2011, 50 (4) : 299-302. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0578-1426.2011.04.009.
- Bhargoo A, Sinha S, Rosenbaum M, et al. Endothelial function as measured by peripheral arterial tonometry increases during pubertal advancement [J]. *Horm Res Paediatr*, 2011, 76 (4) : 226-233. DOI: 10.1159/000328455.
- Radtke T, Khattab K, Eser P, et al. Puberty and microvascular function in healthy children and adolescents [J]. *J Pediatr*, 2012, 161 (5) : 887-891. DOI: 10.1016/j.jpeds.2012.04.033.
- Hamburg NM, Keyes MJ, Larson MG, et al. Cross-sectional relations of digital vascular function to cardiovascular risk factors in the Framingham Heart Study [J]. *Circulation*, 2008, 117 (19) : 2467-2474. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.748574.

(收稿日期:2016-01-05)  
(本文编辑:张林东)