

·运动人体科学·

累积与持续运动对不同性别久坐青年运动后低血压的影响

闫旭洁¹, 贾琳², 麻晓鸽³, 王松涛¹

(1.华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510006; 2.沈阳国际旅行卫生保健中心, 辽宁 沈阳 110179;
3.广东海洋大学 体育与休闲学院, 广东 湛江 524088)

摘 要: 为观察急性累积运动和持续运动后血压动态变化并探讨其性别差异, 招募24名久坐青年(男女各半)随机参与3次实验:久坐对照(CON)、持续运动(CE)、累积运动(AE)。采用64%VO_{2max}强度跑台运动, 持续运动为运动1次, 持续60 min; 累积运动为运动6次, 每次10 min, 各次间隔1 h。测量运动前与运动后4 h内动态血压, 计算血压二次差值($\Delta\Delta$ SBP和 $\Delta\Delta$ DBP)及其曲线下面积(AUC)。结果显示: (1)久坐男性运动后 $\Delta\Delta$ SBP和 $\Delta\Delta$ DBP均 <0 , 且CE的 $\Delta\Delta$ SBP_{AUC}和 $\Delta\Delta$ DBP_{AUC}较AE更大; (2)久坐女性在CE和AE运动后 $\Delta\Delta$ SBP均 <0 ; 但 $\Delta\Delta$ DBP仅在AE运动后 <0 。AE的 $\Delta\Delta$ SBP_{AUC}和 $\Delta\Delta$ DBP_{AUC}较CE更大。研究认为: 持续运动和累积运动均可诱导久坐青年出现运动后低血压。对于久坐男性, 持续运动的运动后低血压效应更大; 对于久坐女性, 累积运动的运动后低血压效应更大。

关 键 词: 运动医学; 运动后低血压; 累积运动; 久坐; 性别差异

中图分类号: G804.5 文献标志码: A 文章编号: 1006-7116(2023)06-0141-08

The effect of accumulative and continuous exercise on post-exercise hypotension in sedentary youth with different genders

YAN Xujie¹, JIA Lin², MA Xiaoge³, WANG Songtao¹

(1.School of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510006, China;
2.Shenyang International Travel Health Care Center, Shenyang 110179, China;
3.School of Sports and Leisure, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: This study aims to observe and compare the effects of acute accumulative exercise and continuous exercise on post-exercise blood pressure in sedentary youth with different genders, and 12 male and 12 female young sedentary adults were enrolled, who underwent three separate trials: six 10-min running bouts throughout the afternoon (AE), a single 60-min running (CE), and prolonged sitting (CON) in random order with 3~5 day intervals. Participants ran on a treadmill at 64% VO_{2max}, and ambulatory blood pressure was measured before and 4 h after exercise, and the corrected value of blood pressure ($\Delta\Delta$ SBP/ $\Delta\Delta$ DBP) and the area under the curve (AUC) were calculated. The results show that: (1) for sedentary males, $\Delta\Delta$ SBP and $\Delta\Delta$ DBP were both <0 after exercise, but $\Delta\Delta$ SBPAUC and $\Delta\Delta$ DBPAUC were greater in CE compared to AE. (2) For sedentary females, $\Delta\Delta$ SBP was <0 after exercise in both CE and AE; only the AE group had $\Delta\Delta$ DBP <0 after exercise. $\Delta\Delta$ SBPAUC and $\Delta\Delta$ DBPAUC were greater in AE. The conclusion reveals that: both AE and CE could all induce post-exercise hypotension in the sedentary youth. For the sedentary men, the post-exercise hypotensive effect was greater with CE, whereas for sedentary women, the post-exercise hypotensive effect was greater with AE.

Keywords: sports medicine; post-exercise hypotension; accumulative exercise; sedentary; gender difference

收稿日期: 2023-04-06

基金项目: 广东省科技计划项目(2017A020220001); 华南师范大学科研创新计划(2016wkxm02)。

作者简介: 闫旭洁(1986-), 女, 博士研究生, 研究方向: 运动与心血管健康。E-mail: yanxj0515@126.com 通信作者: 王松涛

心血管疾病是健康和寿命的“头号杀手”，而高血压是导致心血管疾病最重要的危险因素之一。高血压常发病在中老年，但起源于中青年。久坐少动是高血压形成与发展的重要致病因素。研究发现，一次长时间的久坐会使血压升高，血管舒张功能降低，同时还伴随对心血管代谢的负面影响^[1]。当今，屏幕工作和娱乐时间的大幅度增加，久坐行为日益普遍与严重，这会导致一天中的安静血压长时间处于较高水平，久而久之会发展为高血压。荟萃分析也显示，长时间不间断地坐着(>1 h)会升高收缩压(SBP)和平均动脉压，该现象在年轻群体中更加显著^[2]。处于高血压前期的中青年的比例明显增加，成为高血压的高危人群。

运动作为一种非药物手段，被认为是控制血压的有效方式。一次急性运动后血压会低于运动前或安静对照水平，并持续一定时间(数分钟到数小时)，这种现象被称为运动后低血压(post-exercise hypotension, PEH)^[3-4]。PEH是一种普遍的生理现象，在不同血压水平人群中(高血压、临界高血压和正常血压)和实验动物(鼠、兔和狗等)均存在，且血压越高急性运动后血压下降幅度越大^[5]。

高血压的传统运动干预方式多采用持续运动，近期累积运动的作用逐渐引起重视。累积运动(accumulated exercise, AE)是指分布在一天中的多次短时运动。AE作为一种新的运动形式，目的是打断久坐状态，同时增加身体活动量。AE可穿插在工作或学习之间，对久坐的人群更容易完成。前人研究指出，AE

可以改善葡萄糖和脂质代谢^[6]，防止长时间工作和学习后的精神疲劳^[7]，并改善久坐者的工作和学习状态^[8]。

间断久坐带来的生理变化存在一定的性别差异。最近研究指出，中断坐姿会使得心率上升，该现象在健康女性中更加明显^[9]。但不同类型的急性运动后血压变化是否具有性别差异，仍有待实验验证。

基于此，本研究以久坐青年作为受试者，旨在探讨：(1)与传统的持续运动相比，累积运动是否会诱发类似或者更显著的运动后血压降低现象；(2)久坐青年运动后的血压变化是否存在性别差异。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募 24 名在校大学生(男女各 12 名)，受试者纳入条件：(1)日常工作学习以静坐少动为主，且每日久坐时间>8 h；(2)除日常的身体活动外，无规律的运动习惯(每周中等强度运动时间<150 min 或大强度运动时间<60 min)。排除条件：(1)患有高血压和心脑血管疾病或服用控制血压及其他健康问题的药物；(2)临床认为不适宜参加运动者；(3)3 个月内体重出现大幅度波动。全部受试者签订知情同意书。经过华南师范大学科学研究伦理委员会批准，审批号为：SCNU-SPT-2021-007。使用 Gpower 3.1.1 软件计算研究对象样本量，采用重复测量方差分析(ANOVA)，效应量选取为 0.4，显著性水平为 0.05，检验功效为 0.9，重复测量次数为 9，计算出总共需要 24 个参与者(见表 1)。

表 1 受试者基本情况($\bar{x} \pm s$)

性别	n/人	年龄/岁	身高/m	体重/kg	BMI/(kg·m ⁻²)	VO _{2max} /(mL·min ⁻¹)
男	12	24.63±1.51	1.76±0.05	67.74±8.42	20.53±2.09	3 698.13±603.60
女	12	25.71±2.14	1.63±0.04 ¹⁾	54.63±5.08 ¹⁾	22.26±2.46	2 165.14±287.23 ¹⁾
合计	24	25.13±1.85	1.70±0.08	61.62±9.61	21.35±2.35	2 982.73±918.80

1)与男性比较, P<0.05

1.2 研究设计

采用自身交叉对照实验设计，全部受试者均按照随机的顺序参加 3 次实验：久坐对照(sedentary control, CON)、持续运动(continuous exercise, CE)、累积运动(accumulated exercise, AE)。CON 为持续久坐；CE 为进行 1 次 64%VO_{2max} 强度的 60 min 跑台运动；AE 为进行 6 次 64%VO_{2max} 强度的 10 min 跑台运动，每次间隔 1 h。两次运动实验的平均运动强度、总运动时间和总运动负荷均相同。各次测试间隔 3~5 天。女性受试者所有实验均选在月经周期中的黄体期进行。

受试者须在实验当日 08:00 到达实验室，佩戴体动记录仪(Forerunner 235, Garmin, China)以监控当日身体活动量。08:30~11:00 受试者按照平日习惯进行学习或工作(保持静坐少动状态)。中午，根据受试者膳食调查结果提供午餐和适量饮用水(11:40 结束午餐)。饭后 1 h，受试者自由活动，可进行午休或者其他屏幕娱乐活动。12:40 测试受试者坐姿基础血压，随后完成当日实验操作。

累积运动实验(AE)在 13:00 开始第一次运动，之后每隔 1 h 运动 1 次，共 6 次。持续运动实验(CE)在

18:00 开始运动, 共 1 次。持续运动与末次累积运动均在 19:00 结束当日全部运动。在运动结束后的 0~4 h 进行血压动态监测, 运动结束后 1 h 内每 10 min 测试 1 次血压, 随后每小时测试 1 次。

实验前 72 h 禁止服用药物及维生素等补剂; 实验前 48 h 禁止酒精、刺激饮料和大强度运动; 整夜禁食。实验室温度保持在 $(25.3 \pm 2)^\circ\text{C}$; 湿度保持在 $(54 \pm 5)\%$ 。

1.3 指标测试

1) 问卷调查。

采用成年人久坐行为量表(The Sedentary Behavior for Adults scale)进行每日各种久坐行为持续时间调查; 采用长版国际体力活动量表 IPAQ(International Physical Activity Questionnaire)进行每日身体活动量和运动习惯的调查。

实验前进行连续两日膳食调查(不包括节假日)。为排除饮食对实验结果的影响, 受试者在 3 个实验日(久坐对照、持续运动和累积运动)的对应餐次均根据膳食调查的结果提供相同的饮食(种类、质量和烹饪方法)。

2) 身体形态和体成分测试。

利用身高器和体重计测量受试者身高和体重。利用 Inbody 体成分分析仪(BIOPACE 公司, 韩国)测量受试者体成分。

3) 最大摄氧量测试。

利用跑台(h/p/cosmos Pulsar, h/p/cosmos 公司, 德国)和代谢气体分析仪(K5-COSMED, Rome, Italy), 通过递增运动负荷实验测试受试者最大摄氧量。以 4 km/h 速度, 热身 2 min, 随后每 2 min 增加 1.2 km/h, 直至速度到达 10 km/h, 保持速度不变, 每 1 min 增加 2% 坡度, 直至力竭。利用 Borg 分级评分表和心率带(Polar, Finland)分别记录运动中用力程度(RPE)和心率。判断达到最大摄氧量的标准(满足 3 项): 呼吸商 >1.15 ; 运动至力竭; 摄氧量出现平台; 到达最大心率。

4) 血压测试。

受试者坐姿安静休息 10 min 后, 将血压计袖带

(HEM-7200, Omron, China)缠绕在右上臂(下端距离肘关节 2~3 cm), 进行 2 次测量, 计算平均值。测量过程中保持环境安静, 受试者不受外界干扰。

分别在运动前、运动后 10、20、30、40、50、60、120、180、240 min 采集动脉血压, 并计算收缩压(SBP)和舒张压(DBP)的二次差值, 以消除同一个体的基础血压在不同测试日之间的差异。血压二次差值计算公式为: $\Delta\Delta\text{SBP}$ 或 $\Delta\Delta\text{DBP}=(\text{Post exercise}-\text{Pre exercise})-(\text{Post control}-\text{Pre control})$ 。当 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}<0$ 说明出现运动后低血压, 且负值越大说明血压降低幅度越大。利用 Graphpad Prism 8.0 软件计算“Time— $\Delta\Delta\text{SBP}/\Delta\Delta\text{DBP}$ ”曲线下面积(AUC), 分别记为 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 。

1.4 统计方法

采用 SPSS 23.0 软件进行数据分析, 数据结果用均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。正态性检验采用 Shapiro-Wilk 检验。单一时间点的指标、多时间点动态监测指标的曲线下面积及其性别差异采用独立样本 t 检验。相同性别中, 不同运动方案间及不同时间点间数据的比较采用重复测量双因素方差分析检验及 Newman-Keuls 事后检验。显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同形式运动后血压动态变化

不同形式运动后, 受试者 SBP 的动态变化见表 2。测试时间($P=0.000$ 3)和运动形式($P=0.001$ 2)均显著的影响运动后 SBP。在所有受试者中(不分性别), AE 与 CE 运动后 SBP 均显著低于 CON。其中与 CON 相比, AE 的 SBP 在运动后 30~240 min 的差异具有统计学意义($P<0.05$ 或 $P<0.01$); CE 的 SBP 在运动后的 60~240 min 的差异具有统计学意义($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。与 CE 相比, AE 的 SBP 在运动后 30 min 非常显著性降低, 差异具有统计学意义($P<0.01$)。

表 2 不同方式干预后 SBP 动态变化 ($\bar{x} \pm s$)

方式	Pre	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	120 min	180 min	240 min
CON	120.46 \pm 10.60	118.71 \pm 11.20	119.29 \pm 9.90	118.18 \pm 8.60	117.54 \pm 9.80	119.93 \pm 10.00	119.64 \pm 8.30	121.32 \pm 10.10	122.32 \pm 9.10	121.64 \pm 12.40
CE	119.96 \pm 10.60	118.85 \pm 10.50	112.46 \pm 8.20 ¹⁾	114.58 \pm 7.40	114.32 \pm 8.10	114.23 \pm 5.60	112.39 \pm 5.80 ¹⁾	115.18 \pm 7.60	115.00 \pm 10.70 ²⁾	118.36 \pm 11.00
AE	118.96 \pm 10.80	116.81 \pm 8.80	114.26 \pm 9.00	109.54 \pm 5.50 ²⁾³⁾	109.58 \pm 6.30 ¹⁾	110.85 \pm 6.60 ²⁾	112.92 \pm 8.80 ¹⁾	114.62 \pm 9.90 ¹⁾	113.77 \pm 8.90 ²⁾	116.00 \pm 12.60 ¹⁾

1)与 CON 比较, $P<0.05$; 2)与 CON 比较, $P<0.01$; 3)与 CE 比较, $P<0.01$

不同形式运动后, 所有受试者 DBP 的动态变化见表 3。与 SBP 不同, 测试时间和运动形式对运动后 DBP

无显著性的影响, 运动后各时间点的 DBP 在 3 次实验之间无显著性差异。

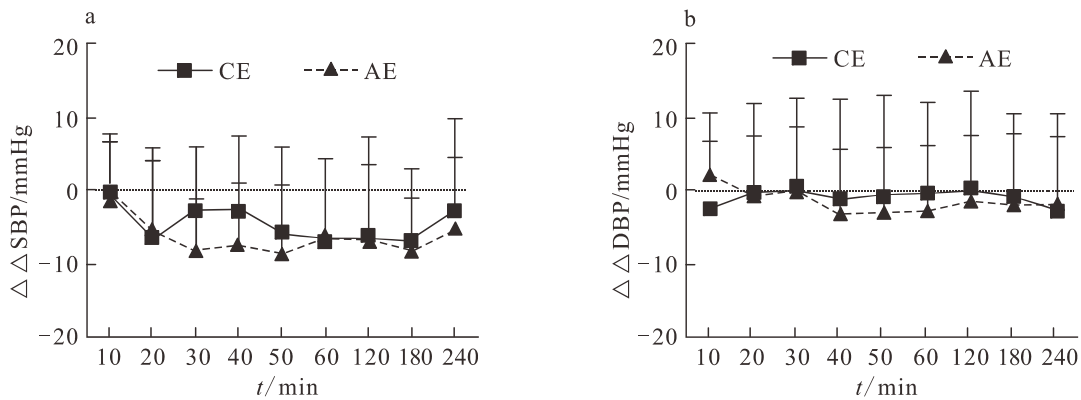
表3 不同方式干预后 DBP 动态变化 ($\bar{x} \pm s$)

方式	Pre	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	120 min	180 min	240 min
CON	75.57±7.10	78.61±6.40	78.21±6.80	76.75±6.40	80.18±7.70	78.79±6.40	78.46±7.20	76.36±7.20	77.04±6.60	77.64±8.30
CE	75.25±7.10	76.38±5.80	77.68±6.60	76.75±6.00	78.19±5.40	77.82±6.80	77.85±7.70	76.36±5.60	75.96±6.30	74.79±8.20
AE	74.58±7.90	79.92±3.60	76.77±5.40	75.96±4.20	75.96±4.80	74.92±3.80	75.15±5.50	74.65±6.50	74.62±6.00	75.00±7.80

为了排除基础血压在不同测试日的差异,本研究计算了血压的二次差值 $\Delta\Delta$ SBP 和 $\Delta\Delta$ DBP, 当 $\Delta\Delta$ SBP 或 $\Delta\Delta$ DBP<0 时, 说明出现运动后低血压。不同形式运动后, 所有受试者 $\Delta\Delta$ SBP 和 $\Delta\Delta$ DBP 变化见图 1。

由图 1a 可知, 在所有受试者中, CE 和 AE 的

$\Delta\Delta$ SBP 在运动后 10~240 min 均<0, 且 CE 曲线各点均高于 AE。由图 1b 可知, CE 的 $\Delta\Delta$ DBP 在运动后 20~30 min 及 60~120 min>0, 其余时间点均<0。除运动后 10 min, CE 曲线各点均高于 AE, 说明 AE 和 CE 运动后均出现 PEH 现象, 且相较于 CE, AE 诱导的 PEH 幅度更大。



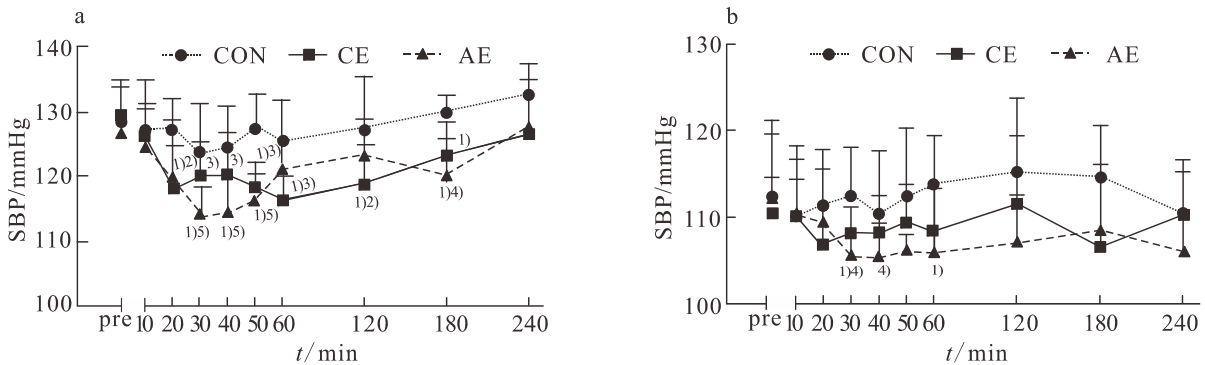
(a 为 AE 和 CE 运动后 $\Delta\Delta$ SBP 变化; b 为 AE 和 CE 运动后 $\Delta\Delta$ DBP 变化; $\Delta\Delta$ SBP 或 $\Delta\Delta$ DBP = (Post exercise - Pre exercise) - (Post control - Pre control); $\Delta\Delta$ SBP 或 $\Delta\Delta$ DBP<0 代表出现运动后低血压)

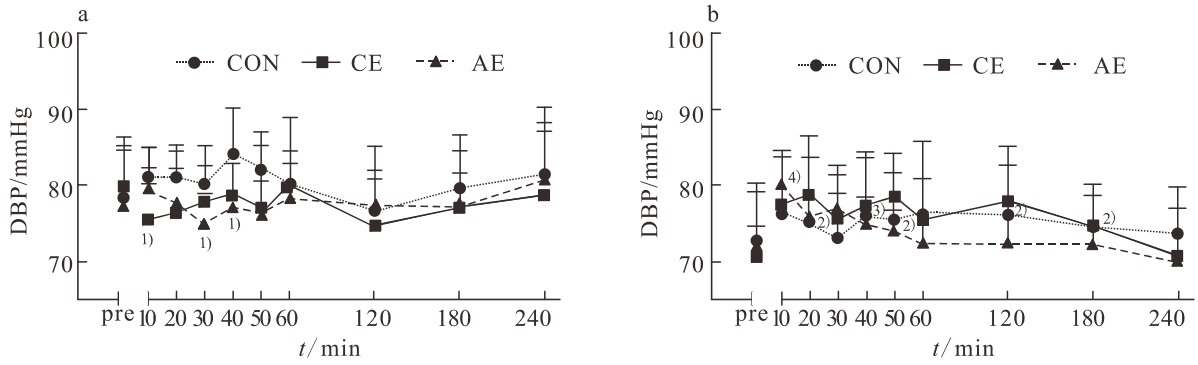
图1 不同形式运动后 $\Delta\Delta$ SBP 和 $\Delta\Delta$ DBP 变化

2.2 不同形式运动后血压动态变化的性别差异

不同性别受试者 3 次实验后的血压动态变化见图 2 和图 3。由图 2a 可知, 在男性受试者中, 时间($P<0.01$)和运动方式($P<0.05$)均对 SBP 有显著影响。由图 3a 可知, 男性受试者在 CE 和 AE 中, $\Delta\Delta$ SBP 及 $\Delta\Delta$ DBP 在运动后 10~240 min 均<0。在运动后 10~240 min, CE

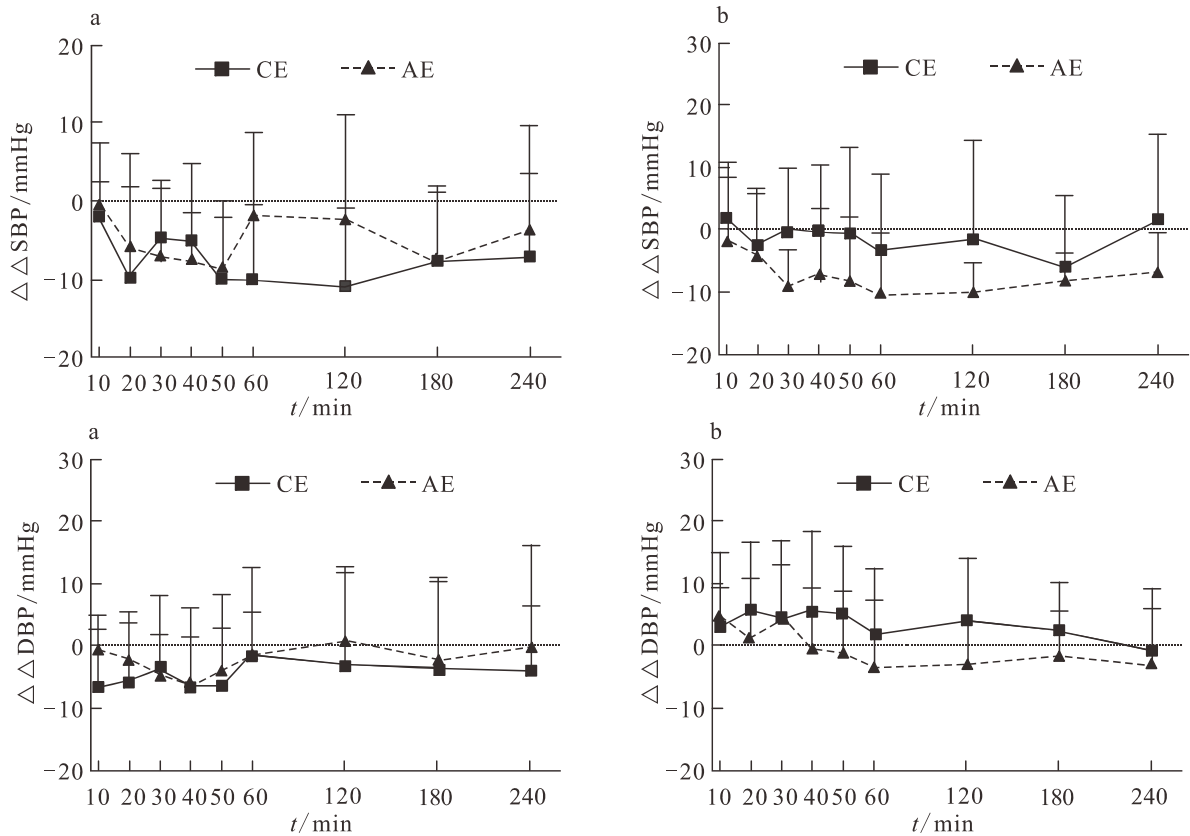
各时间点 $\Delta\Delta$ SBP 平均值为(-7.33 ± 2.9) mmHg, $\Delta\Delta$ DBP 平均值为(-4.75 ± 1.8) mmHg; AE 各时间点 $\Delta\Delta$ SBP 平均值为(-4.88 ± 3.4) mmHg, $\Delta\Delta$ DBP 平均值为(-2.36 ± 2.3) mmHg, 由此可知, 男性受试者 CE 的血压降低幅度大于 AE。说明 AE 和 CE 均可诱发青年男性出现运动后低血压, 且 CE 的血压降低幅度更大。





(a 为男性 3 次实验后 SBP 和 DBP 的变化; b 为女性 3 次实验后 SBP 和 DBP 的变化; 1)与 CON 相比, $P<0.05$; 2)与 CE 运动前相比, $P<0.05$, 3)与 CE 运动前比较, $P<0.01$; 4)与 AE 运动前比较, $P<0.05$, 与 AE 运动前比较, $P<0.01$)

图 2 不同性别 3 种干预方式后血压动态变化



(a 为男性受试者 AE 和 CE 运动后 $\Delta\Delta SBP$ 和 $\Delta\Delta DBP$ 变化; b 为女性受试者 AE 和 CE 运动后 $\Delta\Delta SBP$ 和 $\Delta\Delta DBP$ 变化; $\Delta\Delta SBP$ 或 $\Delta\Delta DBP = (\text{Post exercise} - \text{Pre exercise}) - (\text{Post control} - \text{Pre control})$; $\Delta\Delta SBP$ 或 $\Delta\Delta DBP < 0$ 代表出现运动后低血压)

图 3 不同运动方式后 $\Delta\Delta SBP$ 和 $\Delta\Delta DBP$ 变化的性别差异

由图 2b 可知, 在女性受试者中, 时间显著影响 DBP ($P<0.01$)。由图 3b 可知, 与男性受试者变化趋势不同, 较 CE 来说, AE 对于女性血压的降低幅度更大。CE 的 $\Delta\Delta SBP$ 在运动后 20~180 min 均 <0 , 而 $\Delta\Delta DBP$ 仅在运动后第 240 min <0 。AE 的 $\Delta\Delta SBP$ 在运动后 10~240 min 均 <0 , $\Delta\Delta DBP$ 在运动后 40~240 min <0 , 说明女性受试者 SBP 在 AE 运动后 10~240 min 中出现了

PEH 现象, 而 DBP 在 AE 运动后 40 min 开始出现 PEH 现象。在运动后 10~240 min, CE 和 AE 的 $\Delta\Delta SBP$ 均值分别为 (-1.55 ± 3.0) mmHg 和 (-7.47 ± 2.8) mmHg; 而 CE 的 $\Delta\Delta DBP$ 仅在运动后 240 min <0 , AE 的 $\Delta\Delta DBP$ 在运动后 40~240 min <0 。在运动后 10~240 min, CE 和 AE 的 $\Delta\Delta DBP$ 均值分别为 (3.53 ± 2.1) mmHg 和 (-0.46 ± 3.1) mmHg, 由此可知, AE 运动后女性受试者的运

动后血压降低幅度更大。

2.3 运动后恢复期 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}$ 曲线下面积

AE 和 CE 运动后均出现了 PEH 现象, 为了进一步比较两种形式的运动对运动后 240 min 内的血压降低总效应是否存在差异, 同时排除不同测试日对血压的影响, 本研究采用 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}$ 曲线下面积来表征运动后 240 min 内血压变化的总效应。

在所有受试者中(图 4a), AE 和 CE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均 <0 , 且 AE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均值分别是 CE 的 1.18 和 3.79 倍。说明在久坐青年群体中, 与 CE 相比, AE 诱导的运动后低血压总效应更大。

在男性受试者中(图 4b 和 4c), AE 和 CE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均 <0 , 但 CE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均值分别是 AE 的 1.92 和 2.65 倍。说明在男性受试者中, CE 诱导的运动后低血压总效应较 AE 更大。

在女性受试者中(图 4b 和 4c), AE 和 CE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 均 <0 , AE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 均值是 CE 的 3.26 倍。AE 的 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}<0$, CE 的 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}>0$, 表明 AE 和 CE 在运动后 240min 收缩压均出现 PEH 现象, 而 AE 对舒张压的总效应是降低, 而 CE 对舒张压总效应是升高。因此, 女性受试者中, AE 诱导的运动后低血压总效应较 CE 更大。

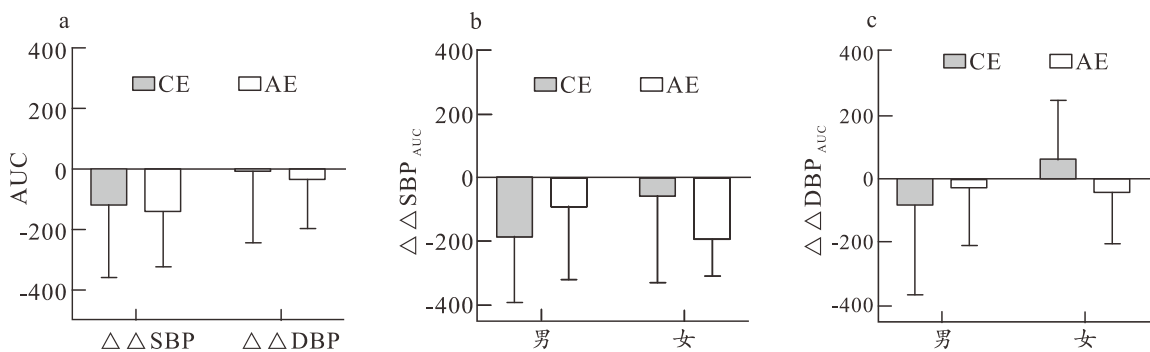


图4 不同形式运动后0~240 min的 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}$ 曲线下面积变化

3 讨论

与既往研究相似, 本研究也发现在所有受试者中, AE 与 CE 均能引起运动后低血压现象, 且运动后 SBP 降低幅度更大, DBP 变化不明显。在此基础上, 本研究进一步发现, 运动后低血压现象存在性别差异, 这为不同性别久坐人群制定个性化的血压干预运动处方提供了新的研究支持。

本研究在将男性和女性放在一起进行分析时, AE 和 CE 运动后 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 和 $\Delta\Delta\text{DBP}$ 均 <0 , 说明累积运动和持续运动均能诱导 PEH 现象, 这与既往研究结果相似。如 Cunha 等^[10]发现, 与对照组相比, 运动强度为 75% VO_2R (VO_2 reserve), 间隔 60 min 的 2 次 200 kcal 累积运动与相同运动强度的 400 kcal 的持续运动均引起运动后 SBP 和 DBP 下降。

急性运动后 SBP 和 DBP 的下降对降低久坐青年人群的心血管疾病风险具有巨大的潜在意义。临床流行病学研究表明, 收缩压下降 2 mmHg 可使与中风有关的死亡率降低 6%, 冠心病降低 4%, 若下降 5 mmHg 可能会使以上疾病的风险分别降低 14%和 9%^[11]。在本研究中, 久坐受试者 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 在 CE 和 AE 运动后分别为 (-4.49 ± 2.4) 和 (-6.36 ± 2.31) mmHg, $\Delta\Delta\text{DBP}$ 分别为

(-0.81 ± 1.05) 和 (-1.34 ± 1.72) mmHg, 这提示 AE 和 CE 对于久坐青年人群心血管健康具有重要的保护作用。

本研究发现, 在久坐青年人中, AE 的 $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均值分别是 CE 的 1.18 和 3.79 倍, 说明 AE 诱导的运动后低血压总效应更大。本研究结果支持 Angadi 等^[12]的研究。对于血压正常的健康成年人, 在一天中进行 3 次 10 min, 间隔 4 h 的急性自行车运动, 比在上午进行一次 30 min 的运动更有效地降低当日下午和傍晚的收缩压。前人研究发现, 与对照组相比, 10 min 的运动也可以降低运动后血压, 且多次重复、短时间的累积运动可使一次急性运动的降压效应出现叠加^[13]。在本研究中, 与 CE 相比, AE 运动后受试者血压降低的幅度和总效应更大, 这可能与 AE 运动分布在全天, 间断久坐状态, 减少下肢静脉血液滞留, 产生更多舒血管活性物质以及改变交感-副交感神经平衡有关。研究发现, 持续运动后反应自主神经功能的心率变异性(HRV)分析指标 LF/HF 仅与 DBP 降低有关, 而累积运动后标准化 LF、HF 与 SBP 降低幅度有关, LF/HF 变化与 DBP 降低有关^[13]。此外, 长时间保持坐姿会使得年轻人 SBP 和 DBP 上升^[14], 且腿部血管功能受损^[15], AE 带来的身体姿势改变以及血流动力学

变化可使血压和心率等生理指标波动,通过血压调节的神经反射和血管舒缩物质的释放,提高外周血管舒张功能及内皮功能^[9]。一些研究显示短时间、多次重复的AE运动后下肢血管内皮细胞分泌了更多的舒血管物质,更有利于血压的降低,心血管系统会出现更大的变化^[16]。与单次40 min的持续运动比较,每次10 min,重复4次,每次间隔1 h的AE运动后血压下降更多,更有利于前期高血压患者血压控制。这也提示与CE相比,AE是久坐人群控制血压的更好的运动形式之一。

本研究进一步探讨了不同运动形式(持续和累积)对运动后血压影响的性别差异,揭示了运动后低血压存在性别差异。本研究发现,久坐男性中,CE运动后诱导的运动后低血压效应更大, $\Delta\Delta\text{SBP}_{\text{AUC}}$ 与 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}$ 均>AE,且 $\Delta\Delta\text{SBP}$ 下降幅度更大。有研究指出,青年男性产生PEH的主要原因可能是心输出量减少^[17],而心输出量的降低直接影响SBP。一篇meta分析也指出,CE运动后男性SBP降低幅度更大,而DBP仅出现小幅度降低^[18]。

在久坐女性中,AE诱导的运动后低血压效应更大。CE的 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}>0$,而AE的 $\Delta\Delta\text{DBP}_{\text{AUC}}<0$,这说明AE可以更好地改善久坐女性年轻人血压,尤其是运动后的舒张压。最新的MORGAM项目指出:仅在年龄<50岁的年轻健康人群中,舒张压与心血管疾病预后独立关联。在与包括收缩压的系统性心血管风险评价变量相比,舒张压降低显著地提高了生存曲线下面积,说明对于年轻个体来说,舒张压更具有健康预测意义^[19]。因此与CE相比,AE对于年轻的久坐女性来说或许是一种更佳的健康干预运动形式。

AE诱导久坐女性PEH效果更大可能与自主神经调节有关。有研究提出自主神经平衡在安静状态下和运动中的变化存在性别差异。安静状态下,女性副交感神经功能与男性相比更占据主导。在中等强度有氧运动中,女性心血管活动调节的副交感神经退让作用强于交感神经的激活作用^[20]。女性因为肌肉量和骨骼肌中交感神经数量较低,在相同的相对运动强度下(如 $\%V\text{O}_{2\text{max}}$)所激发的骨骼肌中代谢反射和机械反射较弱,对交感神经进一步激活作用亦较低,表现为在动态运动中,女性血管舒张反应更为强烈,而血管收缩反应较男性弱^[21]。本研究中,虽然运动强度相同($64\%V\text{O}_{2\text{max}}$),但男性平均跑速高于女性,这也意味着男性拥有更高的代谢水平以及交感神经激活。在运动后恢复期,女性自主神经平衡较男性表现为更强的副交感神经调节主导作用,交感神经张力较低,心脏压力反射敏感性(BSR)降低^[22]。在自主神经系统平衡中,女性以副交感神经变化为主,有利于AE运动后血压的快速恢复以

及在较长时间内保持较低水平。此外,久坐女性血压在AE后降低幅度更大还可能与女性循环系统的外周阻力较低,且在动态运动中,血管舒张反应更强有关。研究证实,女性下肢动脉中血流介导的舒张作用以及 β -肾上腺受体的血管舒张作用高于男性。女性体内 β -肾上腺受体介导的舒张作用削弱了 α -肾上腺受体介导的血管收缩,这使得去甲肾上腺素带来的血管收缩作用较低^[23]。本实验室之前的研究收集了相同运动负荷的AE和CE运动前和运动后共24 h尿液,发现AE的尿液中肾上腺素及其代谢产物水平高于CE。较高的儿茶酚胺类物质通过 β -肾上腺受体发挥更强的舒张血管作用可能是AE运动后女性DBP降低幅度更大的原因之一。累积运动中,一天多次的运动中骨骼肌交感舒血管效应可能会发生叠加效应,导致每次运动后以及全天中更显著的血压下降效应。

本研究采用随机交叉自身对照的实验,降低了个体差异对实验结果的影响。并且严格控制了血压的潜在影响因素:饮食、饮水量、身体活动、以及血压基础值等。然而,本研究也存在不足,只监测了运动后4 h的血压动态变化,没有持续至夜间,无法完整了解急性运动对夜间血压的影响,也未能涉及急性运动对全天血压的影响。此外,本研究受试者为正常血压个体,急性运动对该群体的血压影响可能不同于高血压群体,因此该研究发现是否适用于高血压疾病群体有待进一步验证。

综上所述,一次长时间久坐会导致外周血压升高。等运动量且相同运动强度的急性累积运动和持续运动均可诱导久坐青年出现运动后低血压。对于久坐男性,持续运动诱导的运动后低血压效应更大;对于久坐女性,累积运动诱导的运动后低血压效应更大。

参考文献:

- [1] GARTEN R S, HOGWOOD A C, WEGGEN J B, et al. Aerobic training status does not attenuate prolonged sitting-induced lower limb vascular dysfunction[J]. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2019, 44(4): 425-433.
- [2] WOLTERS M C, SCHMETZER J, MÖSER C V, et al. Exercise-induced changes in bioactive lipids might serve as potential predictors of post-exercise hypotension. A pilot study in healthy volunteers[J]. *Cells*, 2020, 9(9).
- [3] HALLIWILL J R, TAYLOR J A, ECKBERG D L. Impaired sympathetic vascular regulation in humans after acute dynamic exercise[J]. *The Journal of Physiology*, 1996, 495(Pt 1): 279-288.

- [4] CAMPBELL R, FISHER J P, SHARMAN J E, et al. Contribution of nitric oxide to the blood pressure and arterial responses to exercise in humans[J]. *Journal of Human Hypertension*, 2011, 25(4): 262-270.
- [5] PESCATELLO L S. Exercise measures up to medication as antihypertensive therapy: Its value has long been underestimated[J]. *British Journal of Sports Medicine*, 2019, 53(14): 849-852.
- [6] SHAMBROOK P, KINGSLEY M I, TAYLOR N F, et al. Multiple short bouts of exercise are better than a single continuous bout for cardiometabolic health: A randomised crossover trial[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2020, 120(11): 2361-2369.
- [7] ZHENG L, ZHANG X, ZHU W, et al. Acute effects of moderate-intensity continuous and accumulated exercise on arterial stiffness in healthy young men[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2015, 115(1): 177-185.
- [8] BHAMMAR D M, SAWYER B J, TUCKER W J, et al. Breaks in sitting time: Effects on continuously monitored glucose and blood pressure[J]. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2017, 49(10): 2119-2130.
- [9] BATES L C, ALANSARE A, GIBBS B B, et al. Effects of acute prolonged sitting and interrupting prolonged sitting on heart rate variability and heart rate in adults: A meta-analysis[J]. *Frontiers in Physiology*, 2021, 12: 664628.
- [10] CUNHA F, MIDGLEY A W, PESCATELLO L, et al. Acute hypotensive response to continuous and accumulated isocaloric aerobic bouts[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2016, 37(11): 855-862.
- [11] COSTA E C, HAY J L, KEHLER D S, et al. Effects of high-intensity interval training versus moderate-intensity continuous training on blood pressure in adults with pre- to established hypertension: A systematic review and meta-analysis of randomized trials[J]. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 2018, 48(9): 2127-2142.
- [12] ANGADI S S, WELTMAN A, WATSON-WINFIELD D, et al. Effect of fractionized vs continuous, single-session exercise on blood pressure in adults[J]. *Journal of Human Hypertension*, 2010, 24(4): 300-302.
- [13] PARK S, RINK L D, WALLACE J P. Accumulation of physical activity leads to a greater blood pressure reduction than a single continuous session, in prehypertension[J]. *Journal of Hypertension*, 2006, 24(9): 1761-1770.
- [14] PATERSON C, FRYER S, STONE K, et al. The Effects of acute exposure to prolonged sitting, with and without interruption, on peripheral blood pressure among adults: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine(Auckland, N.Z.)*, 2021.
- [15] BUFFEY A J, HERRING M P, LANGLEY C K, et al. The acute effects of interrupting prolonged sitting time in adults with standing and light-intensity walking on biomarkers of cardiometabolic health in adults: A systematic review and meta-analysis[J]. *Sports Medicine*, 2022, 52(8): 1765-1787.
- [16] BHAMMAR D M, ANGADI S S, GAESSER G A. Effects of fractionized and continuous exercise on 24-h ambulatory blood pressure[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(12): 2270-2276.
- [17] PARKER B A, SMITHMYER S L, PELBERG J A, et al. Sex differences in leg vasodilation during graded knee extensor exercise in young adults[J]. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. 1985)*, 2007, 103(5): 1583-1591.
- [18] CARPIO-RIVERA E, MONCADA-JIMÉNEZ J, SALAZAR-ROJAS W, et al. Acute effects of exercise on blood pressure: A meta-analytic investigation[J]. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 2016, 106(5): 422-433.
- [19] VISHRAM-NIELSEN J K K, KRISTENSEN A M D, PAREEK M, et al. Predictive importance of blood pressure characteristics with increasing age in healthy men and women: The mORGAM project[J]. *Hypertension*, 2021.
- [20] BAJDEK N, MERCHANT N, CAMHI S M, et al. Racial differences in blood pressure and autonomic recovery following acute supramaximal exercise in women[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(9).
- [21] QUEIROZ A C C, REZK C C, TEIXEIRA L, et al. Gender influence on post-resistance exercise hypotension and hemodynamics[J]. *International Journal of Sports Medicine*, 2013, 34(11): 939-944.
- [22] FU Q, OGOH S. Sex differences in baroreflex function in health and disease[J]. *The Journal of Physiological Sciences: JPS*, 2019, 69(6): 851-859.
- [23] HART E C, HEAD G A, CARTER J R, et al. Recording sympathetic nerve activity in conscious humans and other mammals: Guidelines and the road to standardization[J]. *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*, 2017, 312(5): H1031-H1051.