

# 不同运动及特殊环境下运动对脑血流影响的研究述评

郭 红

(华南师范大学 体育科学学院, 广东 广州 510631)

**摘 要** :综述了有关不同强度和形式的运动,以及特殊环境下运动对脑血流和脑自动调节影响的研究。结果说明中小强度的运动可引起脑血流速度的升高,而高强度运动则使其降低。与动力性运动不同,静力性运动不改变脑血流速度。运动中血流的改变与交感激活引起的血管舒缩和二氧化碳改变有关。通常脑血流自动调节能力不因运动而改变,但力竭运动可使之减弱。热环境下运动时脑血流速度加快以增加散热,但高热下运动时脑血流速度会因过度通气而下降,从而使脑内热积聚,导致疲劳。低氧环境下运动时脑血流速度明显加快以保证大脑足够的氧供,但急性低氧暴露可抑制运动对脑血流的增加效应。

**关 键 词** :脑血流速度;脑自动调节;运动强度;热环境;低氧暴露

中图分类号 :G804.2 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7116(2006)04-0057-04

## Effect of different exercises and exercis under special environment on cerebral blood flow

GUO Hong

(College of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract** :This review summarized the effect on cerebral blood flow (CBF) and cerebral autoregulation (CA) of different kind of exercises with different intensity or under special environment. CBF is increased during moderate exercise but decreased in heavy exercise, as well as augmented in dynamic exercise yet maintained in static exercise. The change of CBF is due to the sympathetic activation and carbon dioxide change during exercise. Also, CA is not changed with the exercise, but might be impaired by exhaustive ones. CBF is enhanced for the heat remove during exercise in heat, yet reduced with hyperthermia because of the hyperventilation. And exercise under hypoxic exposure causes the more rapid CBF to provide adequate oxygen to brain, though acute hypoxic exposure inhibits this reaction.

**Key words** :cerebral blood flow velocity; cerebral autoregulation; exercise intensity; hyperthermia; hypoxic exposure

自从测量脑血流量(cerebral blood flow, CBF)的技术产生以来,科技的进步已使其有了很大发展并广泛应用于临床监测和基础科研。如采用短半衰期同位素技术,用<sup>133</sup>Xe吸入或静脉注射直接定量测定CBF;或间接通过脑电图、近红外光谱和经颅多普勒(transcranial doppler, TCD)技术非定量地监测CBF或脑缺血。其中,TCD技术虽然不能直接定量反映脑血流量,但因其可无创、连续地监测脑血流速度的变化并反映局部脑血流和脑灌注的变化,已经被广泛应用于运动对脑血流和脑血流动力学影响的研究。

众所周知,大脑作为人体最重要的器官之一,对缺血缺氧极为敏感。运动中大脑的氧供直接影响到脑代谢和脑功能,并与疲劳的发生密切相关。运动致缺氧或直接低氧下的运动可影响大脑血管的舒缩反应,并通过调节脑血流量来保证大脑中足够的氧供。但因测试技术的限制,运动对脑血流的影响的研究相对于其他系统如心血管、呼吸、代谢等的研

究起步较晚,在国内的相关研究更是少见报道。本文综述了近年来国内外对运动与脑血流的研究,探讨不同强度、形式的运动,以及特殊环境下运动对脑血流的影响,对进一步了解运动对大脑功能的影响提供参考。

## 1 运动对脑血流和脑自动调节的影响

### 1.1 不同强度的运动对脑血流的影响

早期 Thomas 等<sup>[1]</sup>采用<sup>133</sup>Xe清除法测试动力性运动对脑血流量的影响,研究中用起始斜率指数(ISI)和第一区域血流量(F1)来表示脑血流量。结果发现,以56%最大吸氧量(VO<sub>2max</sub>)进行半仰卧位功率自行车运动15 min后,脑血流ISI增加31%,F1增加58%,直接表明动力性运动可提高脑血流量。另一用<sup>133</sup>Xe清除法观察运动对左半球局部脑血流量(rCBF)的研究表明,仰卧位25 W或100 W的功率自行车运动中,所有测试区域中的脑血流量都比安静时明显升高,且

100 W 组的增加又明显比 25 W 组多<sup>[2]</sup>。运动中 CBF 的增加通常被解释为是由于交感激活和脑代谢功能性激活的共同作用<sup>[2-3]</sup>。但一例用<sup>133</sup>Xe 吸入法的研究报道,尽管运动中有明显的心输出量(CO)、血压(BP)的增高和动脉二氧化碳分压(PaCO<sub>2</sub>)轻度减少,CBF 并没有明显变化,不过脑血管的紧张性增加了 38%,而外周血管紧张性减少 33%,提示与大脑的自动调节(cerebral autoregulation,CA)机制有关<sup>[4]</sup>。

随着 TCD 技术的应用,许多研究通过测试脑中动脉(MCA)平均血流速度(VMCA)的变化来间接反映运动对脑血流速度和脑灌注的影响。研究结果证明动力性运动可增加脑血流和脑灌注<sup>[5-12]</sup>,与用<sup>133</sup>Xe 清除法测得的结果一致。

Jorgensen 等<sup>[13]</sup>比较 3 种转速(21、60 和 102 r/min)无负荷和固定转速(60 r/min)有负荷(30、60 和 149 W)的自行车运动对脑血流速度的影响,发现 3 种转速无负荷自行车运动的 PaCO<sub>2</sub> 不变而 VMCA 分别增加 4%、10% 和 27%( $P < 0.05$ ),增加幅度随转速增加而增加;而 3 种负荷下的自行车运动中,VMCA 分别增加 19%、25% 和 32%( $P < 0.01$ ),PaCO<sub>2</sub> 略有变化,增加幅度随负荷增大而增加。此外,在逐级递增负荷运动对全脑 CBF 影响的研究中,也测得中等强度(60% - 67% VO<sub>2max</sub>)运动中 VMCA 比安静时增加了 14%,左颈内动脉血流增加了 17%,而左颈总动脉血流增加了 33%,明显增强了全脑的血流灌注<sup>[14]</sup>。

CO<sub>2</sub> 是强力的脑血管床扩张剂,运动中脑血流速度的变化与 PaCO<sub>2</sub> 的变化密切相关。PaCO<sub>2</sub> 不变,则脑血流速度的升高是稳定的。一旦由于过度通气导致 PaCO<sub>2</sub> 下降时,脑血流速度将减少。与中等强度比,高强度运动更易导致过度通气而引起脑血流速度的下降。14 名健康男性以每 4 min 递增 50 W 进行逐级递增负荷的自行车运动至力竭,VMCA 在 57% VO<sub>2max</sub> 时从安静时的 53 cm/s 提高到 75 cm/s,然后逐渐降低,在达到 VO<sub>2max</sub> 时下降至 59 cm/s。相应的,潮气末二氧化碳(PETCO<sub>2</sub>) 在 57% VO<sub>2max</sub> 时从安静时的 5.9 kPa 增加到 7.4 kPa,但达到 VO<sub>2max</sub> 时又下降到 5.9 kPa。提示高强度运动时脑血流速度的下降与过度通气导致的 PaCO<sub>2</sub> 下降有关<sup>[10]</sup>。另一研究也发现,在功率自行车上的中等强度运动开始时,VMCA 增加 51%,但此后的最大强度运动中,尽管 HR 继续升高 10%,收缩压升高 5%,VMCA 反而下降 20%;研究认为高强度运动时 VMCA 后继的降低是由运动中过度换气引起的小动脉收缩所致<sup>[7]</sup>。此外,其他研究也表明当逐级递增负荷达到 80% ~ 90% VO<sub>2max</sub> 时,VMCA 和左颈内动脉血流的增加趋于减少<sup>[14]</sup>。

## 1.2 不同形式的运动对脑血流的影响

Rogers 等<sup>[15]</sup>用<sup>133</sup>Xe 清除法研究了静力性运动和动力性运动对 CBF 的影响。研究发现,安静和运动时左右半球的 CBF 没有区别;且不同于动力性腿部运动,虽然静力性腿部运动中 HR 和平均动脉压(mean arterial pressure,MAP)都增加,但并不引起 CBF 的增加。Jorgensen 等<sup>[16]</sup>通过 TCD 测试 VMCA 的研究也证明了这点。该实验发现,静力运动和大强度动力运动中 MAP 以相近的幅度增加,动力性运动中 VMCA 增加 24%,静力性运动虽然主观感觉更吃力,但 VMCA 却无

明显变化。该实验测得的运动中 VMCA 的变化与用<sup>133</sup>Xe 清除法测得的起始斜率指数变化一致,提示静力运动中脑灌注的变化似乎并不依赖于动脉血压或肌肉代谢感受器引起的脑激活,而更依赖于机械性感受器的影响。

大肌肉群的重复抗阻运动可导致血压的迅速变动,研究抗阻运动对 VMCA 的影响表明,单个重复的抗阻运动中 VMCA 随 MAP 波动,但即使 MAP 增加,多组重复的平均 VMCA 无明显变化。提示抗阻练习中单个肌肉收缩引起的 MAP 的变化似乎太快,不能被脑血管自动调节纠正,但多个收缩导致的 MAP 持续增加可被纠正从而保持脑血流速度不变<sup>[17]</sup>。

## 1.3 运动对脑自动调节的影响

脑血流的自动调节能力可保证 MAP 在 8 ~ 20 kPa 的范围内变动而 CBF 保持不变。此自动调节机制在一定程度上也可在 VMCA 上反映出来,但 VMCA 自动调节的下限为 11 kPa(83 mmHg),高于 CBF。即只要 MAP 下降不低于 11 kPa 时,VMCA 可保持不变。研究发现,在 MAP 83 mmHg 时,VMCA 不变。在此水平下,VMCA 与 MAP 平行减少直至 MAP 减少到 50 mmHg。在更低的 MAP 水平,VMCA 接近低限 25 cm/s,当舒张压下降至 21 mmHg 时,MCA 中没有血流。相反的运动后即使 MAP 增加到 140 mmHg,也并不影响 VMCA。所以,VMCA 可反映脑灌注及自动调节反应<sup>[9]</sup>。此外,脑自回归移动均数(ARMA)和脑自动调节指数(ARI)也可用于脑动态自动调节的研究,反映运动中 MAP 和 VMCA 的动态关系<sup>[8]</sup>。

对运动增加交感活性及其相应的 CO<sub>2</sub> 改变是否会削弱 CA 尚有些争论。运动使脉压大幅度增加,可能使收缩压超过脑自动调节的血压范围上限。但研究发现,即使是在高强度运动中,动态 CA 仍然能调节脑血流速度,使 VMCA 升高<sup>[11]</sup>。而且递增运动中即使 HR、BP 和 CO<sub>2</sub> 显著提高,CA 功能也并不改变<sup>[5,19]</sup>。但力竭运动被证实会减弱脑的自动调节<sup>[20-21]</sup>。Ogoh 等<sup>[22]</sup>则提出运动导致的交感兴奋和脑与外周循环的血液重新分配改变了 VMCA 和 CO 的关系,所以安静和运动时主要由中心血容量的变化影响 VMCA,而不依赖于 CA。

## 2 特殊环境下运动对脑血流的影响

### 2.1 热环境下运动对脑血流的影响

对热环境下运动和脑血流的研究主要在于热应力对脑的影响及其与疲劳的关系。运动可迅速提高体核温度,而高的体内温度可被认为是热环境运动中导致疲劳的独立因素。实验研究发现,当体核温度超过 40 °C 时,运动的受试者开始力竭。

脑温度是影响运动的重要因素。高热环境下的动力运动时,脑电图表现为逐渐减慢,然而肌电并不受影响,说明高热导致的疲劳与脑活性的改变有关,而非由外周疲劳引起。脑血流的一个重要作用是脑的散热,但高热下运动时脑血流速度减少近 20%,散热减少的同时伴随运动致产热的增加,可在脑内逐渐形成热积聚而使脑温度升高<sup>[23]</sup>。有研究发现老年人在热环境下脑梗塞的几率增高,且更易发生在中

午前和运动时<sup>[24]</sup>。

Nybo 等<sup>[20]</sup>在颈内静脉和大动脉内置热电偶测试脑内动静脉的温度差来研究运动中脑温度的变化,结果显示无论是否在热环境下,运动时的平均脑温度至少要比体核温度高 0.2℃。研究还发现运动中颈内静脉的温度始终比动脉中高,表明了脑血流的散热作用。但热环境下运动时颈静脉的散热减少(30±6)%,而动静脉温度差又无明显变化,说明此散热的减少是由脑血流速度的下降(20±6)%所引起。谢培增等<sup>[26]</sup>研究南沙群岛驻岛官兵在高温高湿环境下训练前后的脑血流动力学变化,发现体温的增高与脑血流速度的变化明显相关。训练结束后受试官兵脑血流速度较训练前均显著增高,训练后受试者体温在 39℃ 以下的脑血流量适度增加,39.5~40.5℃ 之间的脑血流速度明显增加,超过 40.5℃ 脑血流速度则有减少趋势。陈镇洲等<sup>[27]</sup>的研究也证明高温高湿环境运动后脑血流速度变化显著,较运动前有明显升高。

热环境下运动对脑血流的影响与热应力和运动强度有关,同时依然依赖于动脉中二氧化碳分压的变化。安静状态下 VMCA 和 PaCO<sub>2</sub> 呈线性相关,但运动中和高热下二者表现为曲线相关。研究发现高热下运动至力竭时 PaCO<sub>2</sub> 减少(1.1±0.2)kPa,VMCA 下降(28±10)%,提示运动中脑血流速度的变化主要由 PaCO<sub>2</sub> 决定<sup>[28]</sup>。此外,研究持续运动导致的体热增加对全脑血流(gCBF)的影响发现,运动后体温升高(体核温度 39.5℃)的受试者在运动结束时 gCBF 下降了 18%,这与其动脉二氧化碳浓度下降 18% 有关<sup>[29]</sup>。有学者提出,高热下的持续性运动可能打破中枢神经系统的平衡,对心肺、运动系统和大脑都是挑战。持续紧张性运动可使脑温度超过 40℃,引起脑代谢改变和中枢疲劳;而高热下长时间运动导致的低血糖使脑的糖摄取减少,可加速疲劳的发生<sup>[19]</sup>。

## 2.2 低氧暴露下运动对脑血流的影响

低氧环境可引起一系列的生理功能适应,提高机体的氧运输和利用能力。但低氧也可提高过氧化导致的组织损伤,抑制免疫系统,并可导致大脑缺氧<sup>[30]</sup>。研究表明低氧环境下以 30% VO<sub>2max</sub> 运动时,血氧饱和度(rSO<sub>2</sub>)达到最大,然后在高强度的运动中逐渐下降。而脑血管紧张性随 rSO<sub>2</sub> 和 PETCO<sub>2</sub> 的变化,在次最大强度运动时下降但最大强度运动时升高,脑血流速度随之变化。提示高海拔下大强度运动时 rSO<sub>2</sub> 和氧运输能力的下降会限制高原运动能力,并可能与急性高原反应和高原脑水肿有关<sup>[31]</sup>。

梁丽娟等<sup>[32]</sup>利用常压低氧屋模拟 2 500 m 高原急性缺氧,测试在常氧和急性缺氧情况下中等强度运动对 VMCA 的影响。结果显示,急性低氧暴露下 VMCA 明显提高,此环境下运动后即刻 VMCA 显著增加,但常氧下相同强度的运动后 VMCA 的增加幅度更高。提示动脉氧含量下降时氧供的增加主要是通过脑血流量的增加来实现,但急性低氧暴露抑制了运动对脑血流速度的增加效应。不同低氧暴露时期运动对脑血流影响的研究<sup>[33]</sup>也表明,急性和慢性间歇性低氧暴露下运动致 VMCA 增加的幅度明显小于常氧,但低氧适应后

VMCA 的变化特点与幅度逐渐与常氧时一致。

综上所述,运动可导致脑血流的变化,而不同强度和形式的运动可引起脑血流不同的改变。中小强度的运动可引起脑血流速度的升高,而高强度运动则使其降低。与动力性运动不同,静力性运动不改变脑血流速度。运动中血流的改变与交感激活引起的血管舒缩和二氧化碳改变有关。同时,运动对脑血流自动调节能力的影响也因运动不同而不同。通常脑血流自动调节能力不因运动而改变,但力竭运动可使之减弱。热环境下的运动使脑血流速度加快以增加散热,但高热下脑血流速度会因过度通气而下降,从而使脑内热积聚,导致疲劳。低氧下运动时脑血流速度明显加快以保证大脑足够的氧供,但低氧暴露可抑制运动对脑血流速度的增加效应。

## 参考文献:

- [1] Thomas S N, Schroeder T, Secher N H, et al. Cerebral blood flow during submaximal and maximal dynamic exercise in humans [J]. *J Appl Physiol*, 1989, 67: 744 - 748.
- [2] Herholz K, Buskies W, Rist M, et al. Regional cerebral blood flow in man at rest and during exercise [J]. *J Neurol*, 1987, 234: 9 - 13.
- [3] Sohn Y H. Cerebral hemodynamic changes induced by sympathetic stimulation tests [J]. *Yonsei Med J*, 1998, 39: 322 - 327.
- [4] Globus M, Melamed E, Keren A, et al. Effect of exercise on cerebral circulation [J]. *J Cereb Blood Flow Metab*, 1983, 3: 287 - 290.
- [5] Brys M, Brown C M, Marthol H, et al. Dynamic cerebral autoregulation remains stable during physical challenge in healthy persons [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2003, 285: H1048 - 1054.
- [6] Endres M, Gertz K, Lindauer U, et al. Mechanisms of stroke protection by physical activity [J]. *Ann Neurol*, 2003, 54: 582 - 590.
- [7] Hellstrom G, Wahlgren N G. Physical exercise increases middle cerebral artery blood flow velocity [J]. *Neurosurg Rev*, 1993, 16: 151 - 156.
- [8] Ide K, Secher N H. Cerebral blood flow and metabolism during exercise [J]. *Prog Neurobiol*, 2000, 61: 397 - 414.
- [9] Jorgensen L G. Transcranial Doppler ultrasound for cerebral perfusion [J]. *Acta Physiol Scand Suppl*, 1995, 625: 1 - 44.
- [10] Moraine J J, Lamotte M, Berre J, et al. Relationship of middle cerebral artery blood flow velocity to intensity during dynamic exercise in normal subjects [J]. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1993, 67: 35 - 38.
- [11] Ogoh S, Fadel P J, Zhang R, et al. Middle cerebral artery flow velocity and pulse pressure during dynamic exercise in humans [J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2005, 288: 1526 - 1531.
- [12] Samnegard H, Carlens P. Effect of physical exercise on internal carotid artery blood flow after arterial reconstruction [J]. *Scand J Thorac Cardiovasc Surg*, 1975, 220 - 228.

- [ 13 ] Jorgensen L G ,Perko G ,Secher N H .Regional cerebral artery mean flow velocity and blood flow during dynamic exercise in humans[ J ].*J Appl Physiol* ,1992 ,73 :1825 - 1830 .
- [ 14 ] Hellstrom G ,Fischer - Colbric W ,Wahlgren N G ,et al .Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise[ J ].*J Appl Physiol* ,1996 ,81 :413 - 418 .
- [ 15 ] Rogers H B ,Schroeder T ,Secher N H ,et al .Cerebral blood flow during static exercise in humans[ J ].*J Appl Physiol* ,1990 ,68 :2358 - 2361 .
- [ 16 ] Jorgensen L G ,Perko M ,Hanel B ,et al .Middle cerebral artery flow velocity and blood flow during exercise and muscle ischemia in humans[ J ].*J Appl Physiol* ,1992 ,72 :1123 - 1132 .
- [ 17 ] Edwards M R ,Martin D H ,Hughson R L .Cerebral hemodynamics and resistance exercise[ J ].*Med Sci Sports Exerc* ,2002 ,34 :1207 - 1211 .
- [ 18 ] Panerai R B ,Eames P J ,Potter J F .Variability of time - domain indices of dynamic cerebral autoregulation[ J ].*Physiol Meas* ,2003 ,24 :367 - 381 .
- [ 19 ] Schregel W ,Sihle - Wissel M ,Machraoui A ,et al .Transcranial Doppler sonography and hemodynamics[ J ].*Ultraschall Med* ,1989 ,10 :60 - 65 .
- [ 20 ] Koch A ,Ivers M ,Gehrt A ,et al .Cerebral autoregulation is temporarily disturbed in the early recovery phase after dynamic resistance exercise[ J ].*Clin Auton Res* ,2005 ,15 :83 - 91 .
- [ 21 ] Ogoh S ,Dalsgaard M K ,Yoshiga C C ,et al .Dynamic cerebral autoregulation during exhaustive exercise in humans[ J ].*Am J Physiol Heart Circ Physiol* ,2005 ,288 :1461 - 1467 .
- [ 22 ] Ogoh S ,Brothers R M ,Barnes Q ,et al .The effect of changes in cardiac output on middle cerebral artery mean blood velocity at rest and during exercise[ J ].*J Physiol* ,2005 ,569 :697 - 704 .
- [ 23 ] Nielsen B ,Nybo L .Cerebral changes during exercise in the heat[ J ].*Sports Med* ,2003 ,33 :1 - 11 .
- [ 24 ] Iwamoto T ,Akazawa M ,Ami M ,et al .Five elderly patients with cerebral infarction seen during a heat wave[ J ].*Nippon Ronen Igakkai Zasshi* ,1999 ,36 :565 - 571 .
- [ 25 ] Nybo L ,Secher N H ,Nielsen B .Inadequate heat release from the human brain during prolonged exercise with hyperthermia[ J ].*J Physiol* ,2002 ,545 :697 - 704 .
- [ 26 ] 谢培增 ,朱贤立 ,徐如祥 ,等 .高温高湿环境下守岛官兵训练时脑血流的变化[ J ].*解放军预防医学杂志* ,2005 ,23( 3 ) :168 - 170 .
- [ 27 ] 陈镇洲 ,徐如祥 ,姜晓丹 ,等 .高温高湿环境运动后人生命体征及脑血流的[ J ].*解放军医学杂志* ,2005 ,30( 7 ) :652 - 653 .
- [ 28 ] Rasmussen P ,Stie H ,Nielsen B ,et al .Enhanced cerebral CO<sub>2</sub> reactivity during strenuous exercise in man[ J ].*Eur J Appl Physiol* ,2006 ,96 :299 - 304 .
- [ 29 ] Nybo L ,Moller K ,Volianitis S ,et al .Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans[ J ].*J Appl Physiol* ,2002 ,93 :58 - 64 .
- [ 30 ] Bailey D M ,Davies B .Physiological implications of altitude training for endurance performance at sea level :a review[ J ].*Br J Sports Med* ,1997 ,31 :183 - 190 .
- [ 31 ] Imray C H ,Myers S D ,Pattinson K T ,et al .Effect of exercise on cerebral perfusion in humans at high altitude[ J ].*J Appl Physiol* ,2005 ,99 :699 - 706 .
- [ 32 ] 梁丽娟 ,熊开宇 ,田野 ,等 .急性缺氧暴露情况下运动对中动脉脑血流速度的影响[ J ].*体育科学* ,2005 ,25( 11 ) :40 - 42 .
- [ 33 ] 梁丽娟 ,熊开宇 ,田野 ,等 .间歇性低氧暴露期间运动对体育系大学生脑血流速度的影响[ J ].*中国运动医学杂志* ,2005 ,24( 1 ) :76 - 80 .

[ 编辑 :郑植友 ]