

运动时体液平衡与心血管适应的研究进展

郭红¹, 邓树勋¹, 史小才²

(1. 华南师范大学体育科学学院, 广东广州 510631; 2. 美国佳得乐运动科学研究所, 美国伊利诺斯州)

摘要: 脱水的出现不仅降低体温调节能力和运动能力, 而且影响正常的心血管功能, 通常这种影响随着脱水程度的变化而变化。当机体在运动中逐步脱水时, 环境温度是影响心血管功能变化的一个重要因素。但是, 当机体处于一个体液平衡的状态下, 这种影响的显著性就消失了。运动时补液可以防止和纠正脱水, 维持和改善运动时的心血管功能。补液的影响直接与补液量、补液时间和补液饮料的成分相关。

关键词: 补液; 脱水; 心血管功能

中图分类号: G804.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7116(2004)01-0056-04

Body fluid balance and cardiovascular adaptation

GUO Hong¹, DENG Shu-xun¹, SHI Xiao-cai²

(1. College of Physical Education, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Gatorade Sport Science Institute, Illinois, USA)

Abstract: Dehydration affects not only temperature regulation, performance, but also normal cardiovascular functions. Usually, the negative effects induced by dehydration vary with dehydration levels. When a human body is gradually dehydrated during exercise, the environmental temperature is an important factor influencing cardiovascular functions. However, when a human body is well hydrated, this effect becomes not significant. Fluid replacement during exercise can prevent and correct dehydration, maintain and improve cardiovascular functions. It has been also suggested that the effect of fluid replacement on cardiovascular functions is directly related to ingested volume, ingesting time and the composition of ingested beverage.

Key words: dehydration; fluid replacement; cardiovascular functions

体液的丢失导致脱水, 而脱水会继发对人体正常生理功能产生不良影响, 降低运动能力。运动补液可作为机体复水的良好手段, 防止或减少脱水对运动能力的影响。作为氧运输系统之一的心血管系统在运动过程中起着举足轻重的作用, 因此, 运动时脱水及补液对心血管功能的影响一直是运动生理学者研究的重要课题之一。有关运动时脱水、补液和心血管功能的研究可追溯于 20 世纪初, 早在 40 年代就有文献记载有关脱水与运动能力关系补液与心血管功能的关系的研究。而真正在补液和心血管功能方面比较系统的研究是始于 80 年代末。本文从脱水和补液对心血管功能影响的角度, 探讨运动时心血管功能对补液的适应。

1 脱水对心血管功能的影响

运动时机体通过出汗来蒸发散热, 体液的丢失可导致各种心血管反应。运动时流向肌肉和皮肤的血液增加, 使血液灌注压产生变化而直接影响毛细血管内外滤过和重吸收的平衡, 加上毛细血管表皮面积以及水分从呼吸和皮肤的蒸发

率增加, 导致了体液平衡的重新分配和偏移。

1.1 脱水程度与“心血管漂移”

许多研究表明, 运动时脱水可导致血浆容量减少、出汗率下降和血浆渗透压浓度升高^[1], 同时体温和心率增加, 每搏量、心输出量、肌肉和皮肤血流以及平均动脉压则下降^[2-5]。这种心血管功能在运动时的变化, 被称为“心血管漂移”(cardiovascular drift)^[6,7]。运动时脱水引起的“心血管漂移”主要是运动时血液向体表转移的结果^[8], 且这些相应的生理变化又因脱水程度轻重而不同。Montain 等^[4]通过给受试者不同的补液量, 研究了运动时不同程度脱水对“心血管漂移”和体温升高的影响。结果发现, 运动时心率的增加以及每搏量、每分量和中心静脉压的下降都直接与体重丢失(脱水)有关, 而且脱水程度越大, 每搏量、每分量和前臂血流的下降以及心率的上升也越大。这一结果与 Montain^[3]此前的发现一致。在先前的研究中, 受试者也是在热环境中以 65% 最大吸氧量踏自行车 2 h, 但每次运动时, 受试者接受无补液、大量补液(80% 的体液丢失量)或静脉输液(53 mL/kg,

质量分数6%葡萄糖的生理盐水,足以补回80%的汗液丢失量)。结果发现,与无补液组相比,静脉输液组的每搏量下降减少了50%,从而防止了心输出量的下降。可见,运动中血液容量的下降是“心血管漂移”出现的原因之一。运动时补液可帮助维持较高的每搏量、每分量、血液容量和较低的心率^[9]。运动时减少“心血管漂移”的最有效方法是以体液丢失的速率来补液,减少脱水程度。

1.2 环境温度与心血管适应

一项早期的经典研究发现,在环境温度为43℃下的中等强度运动中,每搏量、每分量和中心血液容量均比环境温度26℃下的中等强度运动时低^[10]。这是由于在热环境中运动使皮肤血流增加,导致了较低的中心血液容量和心灌注压,从而减少了每搏量^[8,11]和每分量^[12]。此外,其他的研究证实,在热环境中运动时,每搏量、每分量和心率的变化不仅与环境温度和体温有关,也与脱水程度有关^[4],但血液容量下降对每搏量下降的影响只占到20%~27%^[3]。另一受试者在冷环境中运动的研究则发现,受试者运动时每搏量的减少较少,并且当血液容量得到恢复后,每搏量也恢复到正常水平。所以,在冷环境中每搏量的变化主要取决于血液容量的变化^[2]。最近有研究在控制中心体温和血液容量的同时,测定了在热(35℃)和冷(8℃)的环境中以中等强度(72%最大吸氧量)运动时皮肤血流和脱水对每搏量的影响。结果显示,在体液平衡时,热环境运动时的每搏量与冷环境运动时相似,但皮肤血流比冷环境下显著提高。在脱水状态下,每丢失1%的体重,热环境中每搏量下降(6.4±1.3)mL(4.8%),比冷环境中每搏量下降(3.4±0.4)mL(2.5%)更为明显,而皮肤血流在冷热环境中无显著差异。由此可见,在运动中,当体液被维持在一个平衡的状态下,环境温度对心血管指标没有显著的影响。当机体在运动中逐步脱水时,环境温度是一个心血管功能变化的重要因素。

2 补液对心血管功能的影响

纵观50多年的文献记载,早期注重运动时补液与心血管功能的研究很少,自20世纪80年代末起,有关心血管和补液的研究成果才不断出现,它们从不同角度研究了补液、补糖、补钠、补液量和补液时间对一些心血管指标的影响,从而使这个领域的研究明显地向前迈进一步^[3,4,9,13-16]。

2.1 “糖水”中的“心血管漂移”

在长时间、中等强度的运动中,补液有利于减小运动中高热和“心血管漂移”对运动能力的影响^[3,4,9,17-19]。这一观点已广为运动医学界接受。然而,在短时间、中高强度运动时,补液对心血管系统影响的研究尚不多见。Below等^[14]研究了中高强度运动时心血管系统对补液、补糖的反应。在这项研究中,受试者以其80%最大吸氧量骑车50min,紧接着进行一项运动能力的测试。此研究包括4次实验:1)大量补糖补液(质量分数为6%糖-电解质饮料1330mL);2)大量补液(电解质溶液1330mL);3)补糖(质量分数为40%多糖-电解质溶液200mL);4)安慰剂(电解质胶丸+200mL水)。8位受试者以随机的顺序完成4次实验。结果发现,

与小量补液(安慰剂)相比,大量补液和大量补糖补液显著地降低了运动时的心率。补糖对心率没有显著影响。运动时血浆容量变化只有补糖补液组维持恒定,且略有上升。其他3组的血浆容量随运动时间延长而逐步下降,并显著地低于补糖补液组。可见,大量补液并不能维持血浆容量的恒定。只有大量补液和适量补糖,血浆容量才能在运动时保持恒定。糖不仅为机体提供了必要的能量,也起到了维持血浆容量的作用。类似的研究结果在以往的研究中也有所发现^[18,20]。在运动时心率加快和补液复水可延缓运动时心率的问题上,Costill等^[21]发现,在没有完全复水的情况下,补回62%的体液就可以维持正常的心率。但是,其他一些研究报告,运动员在75%^[22]和65%^[23]复水的状况下,心血管功能包括心率和每搏量等尚未恢复。Hamilton等^[9]报告,运动时心率加快不完全是由于血浆容量下降而导致每搏量下降的缘故,输入葡萄糖可以减少循环系统儿茶酚胺的增加,防止“心血管漂移”。因此,运动时选择补水,还是补含有糖的溶液对“心血管漂移”有着直接的影响。

过去有关补液的研究大都采用骑车作为运动方式^[1,3,4,9,24,25]。然而,跑步是许多运动项目都涉及到的运动方式,并且对机体产生与骑车不同的生理效应^[26]。最近有一项有趣的研究,研究者让受试者在跑台和自行车功量机上分别运动90min,并在运动时进行补液或不补液试验,补液(清水)量为60%的体液丢失量。结果显示,补液显著地减小了骑车和跑步运动对心血管指标(每搏量和每分量)的影响,但是补液只显著地降低了跑步时的直肠温度上升,而对骑车时的直肠温度上升无影响^[27]。这可能与两种运动的不同体位和利用不同数量的肌肉而导致不同形式和程度的血流有关。

由此可见,补液能减小或防止运动时“心血管漂移”的程度或发生。补液和补糖则使运动时出现“心血管漂移”的可能性降到最低,使心血管在“糖水”中难以“漂移”。

2.2 补钠维持血浆容量

相对于血浆,汗是低渗的。出汗使机体丢失大量的水分(可以是细胞内液或细胞外液)和少量的钠^[28],因此,运动时排汗往往使血浆渗透压浓度和钠浓度升高^[4,29,30]。大量补水或补充含低钠的碳水化合物溶液可以防止血钠和血浆渗透压浓度升高,有助维持体温调节,但是,对血浆容量的降低没有很大的影响^[17,25,29,30]。这可能是因为大量补液使血浆渗透压浓度降低,从而抑制了抗利尿激素的作用,使肾脏滤过增加而导致细胞外液丢失增加^[31,32]。

如果运动员在运动时不仅注意补液,而且注意补回其由汗液丢失的钠,是否会影响血浆容量变化?是否会影响“心血管漂移”?Sanders等^[33]研究了在长时间运动中,当运动员几乎100%地补回汗液丢失的体液和钠时的血浆容量变化和体液平衡。实验结果显示,运动员饮用含100mmol钠的多糖溶液,可降低肾脏的水滤过,尿量减少,使细胞外液和血浆容量增加。运动时血浆容量的增加可增进静脉回心血量和每搏量,从而减小“心血管漂移”出现的可能性。

运动后体液平衡和心血管功能的快速恢复对下一次训

练和比赛极为重要。研究表明,在运动后恢复期,为了取得快速和完全的恢复,运动员应该饮用大于其运动时体液丢失量的液体,并且补液品需含足够的钠来避免大量尿液的生成^[16,34]。由于细胞外液的平衡与钠平衡紧密相关,一些研究建议,饮品的钠含量应与汗液丢失的钠量相似^[35,36]。那么,当饮品的钠含量与汗液钠含量相似时,补充大于体液丢失的液体是否影响心血管功能或“心血管漂移”呢? Mitchell 等^[34]研究了 2.9%脱水后 3 h 的体液恢复过程和心血管功能的恢复。研究采用了 4 种补液方法:低液量低钠(100%的体液丢失量 + 25 mmol 钠);低液量高钠(100%的体液丢失量 + 50 mmol 钠);高液量低钠(150%的体液丢失量 + 25 mmol 钠)和高液量高钠(150%的体液丢失量 + 50 mmol 钠)。研究发现,钠量对“心血管漂移”没有影响。高钠有利于细胞外液的恢复,而高液量有利于细胞内液的恢复。

可见,在不影响口味和饮用量的前提下,运动前后补充含有相对高钠的饮品,有利于保持和恢复血液容量和细胞外液,促进良好的心血管适应。

2.3 补液时间与心血管适应

在长时间的耐力运动中,何时补液以及不同时间的补液对体温调节和心血管功能的影响至今尚未得到广泛的研究。早期的研究报道,运动员在运动时开始补液越早,就越有利于维持体温,保持运动时机体的“冷却”^[36,37]。但是,这些研究结果受到了实验设计不完善的限制,如受试者补液量的不同和没有测定受试者在相同水合状态时的中心体温等,因此,这些数据并不能全面地反映补液时间在运动时产生的生理效应。Montain 等^[15]比较全面地观察了有关补液时间对体温调节和心血管适应的影响。结果发现,虽然在运动结束时所有指标均无显著差异,但是,血液容量、渗透压浓度和血钠浓度都显示出补液越早,效果越好的趋势。尤其是运动中直肠和食道温度以及心率的变化,运动初始补液组显著地低于其他组。不过,运动后期和结束时,不同时间补液对各项指标都没有显著的影响。虽然这项实验没有每搏量和每分量的数据,但其结果至少说明一点,即运动前的水合状态与运动时的体温调节和心血管适应直接相关。运动时补液越早,体液平衡的时间维持越长,“心血管漂移”出现越晚。

2.4 补液量决定了“心血管漂移”的程度

在早期的研究中,Pitts 等^[37]报道了补充水、稀释的盐水(质量分数 0.2%氯化钠)和质量分数 3.5%的葡萄糖溶液可以同样有效地降低运动时上升的心率和体温。但是,当补液量超过受试者的随意补液量,并接近其汗液丢失量时,补液的效果远远超出随意补液对运动时心率和体温的影响。自 20 世纪 90 年代初起,一系列有关补液量与心血管功能的研究使运动时大量补液的观点在运动医学界和体育界得到逐步的认可。Hamilton 等^[9]在研究补液和补葡萄糖对“心血管漂移”的影响时指出,在 2 h 低至中等强度运动时,饮用足以补回体液丢失量的液体,可以有效地防止每搏量的下降,维持心输出量,防止“心血管漂移”。此后,Montain 等^[3,4]的研究提出了两个观点:1)在运动中补充 80%汗液丢失量的液体,可通过增加流向体表的血液来降低体温,但体表血流增

加与血液容量增加无关。2)运动时体温、心率上升以及每搏量下降的幅度与补液量呈相反关系,即补液量越大,体温和心率上升以及每搏量下降的幅度就越小。Below 等^[14]指出,补液和补糖分别有助于提高运动能力,其作用是叠加的——大量补液和适量补糖可维持较高的血液容量,减小心率和体温上升幅度,增进运动能力。

运动后体液完全而迅速地恢复则要求更大的补液量。Shirreffs 等^[16]的研究表明,补充相当于 50%汗液丢失量的液体(含钠 23 或 61 mmol)不足以恢复血浆容量;100%的补液量虽然一度能使血浆容量恢复至起始水平,但在恢复后期,由于体液的重新分布和尿液的形成,机体仍然处于脱水状态;150%的补液量在恢复期先出现一个血浆容量超量恢复的过程,然后逐步达到体液平衡;200%的补液量虽然可以与 150%补液量一样达到最终的复水目的,但是,过量的液体除了产生大量的尿液,并没有带来额外的益处。所以,运动后血浆容量的增加和体液的恢复直接与补液量大小相关。

因此,运动中和运动后大量补液在心血管功能的维持和恢复过程中起到了积极的作用。小量补液虽然有一定的作用,但是大量的补液能使机体及时地获取足量的水分,显著地增加血液容量和重获细胞内液和外液的平衡。从某种程度上讲,补液量左右了“心血管漂移”的程度。

运动中脱水导致血液容量的下降而产生“心血管漂移”。当体液平衡时,环境温度对心血管指标没有显著的影响,但是,当机体在运动中逐步脱水时,环境温度便成为影响心血管功能变化的一个重要因素。补液有利于减小运动时“心血管漂移”的程度,或防止其发生。补液加补糖则更使运动时“心血管”在“糖水”中难以“漂移”。在不影响口味和饮用量的前提下,运动前后补充含相对高钠的饮品,有利于保持和恢复血液容量和细胞外液,促进良好的心血管适应。补液应及时,尽早的补液可使运动中体液平衡的时间维持较长,“心血管漂移”出现越晚。大量的补液能为机体提供足量的水分,以增加血液容量和重获细胞内外液的平衡,控制“心血管漂移”的程度。

参考文献:

- [1] Candas V, Libert J P, Brandenberger G, et al. Hydration during exercise: effects on thermal and cardiovascular adjustments[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1986, 55: 113 - 122.
- [2] Gonzalez - Alonso J, Mora - Rodriguez R, Below P R, et al. Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1995, 79: 1487 - 1496.
- [3] Montain S J, Coyle E F. Fluid ingestion during exercise increases skin blood flow independent of increases in blood volume[J]. *J Appl Physiol*, 1992, 73: 903 - 910.
- [4] Montain S J, Coyle E F. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1992, 73: 1340 - 1350.

- [5] Sawka M N, Knowlton R G, Kritz J B. Thermal and circulatory responses to repeated bouts of prolonged running[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1979, 11:177 - 180.
- [6] Ekelund L G, Holmgren A. Circulatory and respiratory adaptation, during long term, non - steady state exercise, in the sitting position[J]. *Acta Physiol Scand*, 1964, 62:240 - 255.
- [7] Saltin B, Stenberg J. Circulatory response to prolonged severe exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1964, 19:833 - 838.
- [8] Rowell L B. Human Circulation. Regulation During Physical Stress[M]. New York: Oxford University Press, 1986.
- [9] Hamilton MT, Gonzalez - Alonso J, Montain S J, et al. Fluid replacement and glucose infusion during exercise prevent cardiovascular drift[J]. *J Appl Physiol*, 1991, 71:871 - 877.
- [10] Rowell, Marx, Bruce, et al. Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise[J]. *J Clin Invest*, 1966, 45:1801 - 1816.
- [11] Johnson J M, Rowell L B. Forearm skin and muscle vascular responses to prolonged leg exercise in man[J]. *J Appl Physiol*, 1975:920 - 924.
- [12] Gonzalez - Alonso, Teller, Anderson, et al. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat[J]. *J Appl Physiol*, 1999, 86:1032 - 1039.
- [13] Gonzalez - Alonso J, Mora - Rodriguez R, Coyle E F. Stroke volume during exercise: Interaction of environment and hydration[J]. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 2000, 278:H321 - H330.
- [14] Below P R, Mora - Rodriguez R, Gonzalez - Alonso J. Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1 h of intense exercise[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1995, 27:200 - 210.
- [15] Montain S J, Coyle E F. Influence of the timing of fluid ingestion on temperature regulation during exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1993, 72(2):688 - 695.
- [16] Shirreffs S M, Taylor A J, Leiper J B, et al. Post - exercise rehydration in man: effects of volume consumed and drink sodium content[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1996, 28(10):1260 - 1271.
- [17] Barr S I, Costill D L, Fink W J. Fluid replacement during prolonged exercise: effect of water, saline or no fluid[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1991, 23:811 - 817.
- [18] Carter J E, Gisolfi C V. Fluid replacement during and after exercise in the heat[J]. *Med Sci Sport Exerc*, 1989, 21:532 - 539.
- [19] Gisolfi C V, Copping J R. Thermal effects of prolonged treadmill exercise in the heat[J]. *Med Sci Sports*, 1974, 6:108 - 113.
- [20] Davis J M, Burgess W A, Slentz C A, et al. Effects of ingesting 6% and 12% glucose/electrolyte beverages during prolonged intermittent cycling in the heat[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1988, 57:563 - 569.
- [21] Costill D L, Sparks K E. Rapid fluid replacement following thermal dehydration[J]. *J Appl Physiol*, 1973, 34:299 - 303.
- [22] Nielsen B, Sjagaard G, Ugelvig J, et al. Fluid balance in exercise dehydration and rehydration with different glucose - electrolyte drinks[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1986, 55:318 - 325.
- [23] Heaps C L, Gonzalez - Alonso J, Coyle E F. Hypohydration causes cardiovascular drift without reducing blood volume[J]. *Int J Sports Med*, 1994, 15:74 - 79.
- [24] Ekblom B, Greenleaf C J, Greenleaf J E, et al. Temperature regulation during exercise dehydration in man[J]. *Acta Physiol Scand*, 1970, 79:475 - 583.
- [25] McConell G K, Burge C M, Skinner S L, et al. Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise[J]. *Acta Paediatr Scand*, 1997, 160:149 - 156.
- [26] Gore C J, Scroop G C, Marker J D, et al. Plasma volume, osmolality, total protein and electrolytes during treadmill running and cycle ergometer exercise[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1992, 65:302 - 310.
- [27] Nassis G P, Geladas N D. Effect of water ingestion on cardiovascular and thermal responses to prolonged cycling and running in human: a comparison[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2002, 88:227 - 234.
- [28] Nose H, Mack G W, Shi X, et al. Shift in body fluid compartments after dehydration in humans[J]. *J Appl Physiol*, 1988, 65:318 - 324.
- [29] Greenleaf J E, Brock P J. Na⁺ and Ca²⁺ ingestion: plasma volume - electrolyte distribution at rest and exercise[J]. *J Appl Physiol*, 1980, 48:838 - 847.
- [30] Powers S K, Lawler J, Dodd S. Fluid replacement drinks during high intensity exercise: effects on minimising exercise induced disturbances in homeostasis[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1990, 60:54 - 60.
- [31] Brandenberger G, Candas V, Follenius M, et al. The influence of the initial state of hydration on endocrine responses to exercise in the heat[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1989, 58:674 - 679.
- [32] Nose H, Mack G W, Shi X, et al. Involvement of sodium retention hormones during rehydration in humans[J]. *J Appl Physiol*, 1988, 65:332 - 336.
- [33] Sanders B, Noakes T D, Dennis S C. Sodium replacement and fluid shifts during prolonged exercise in humans[J]. *Eur J Appl Physiol*, 2001, 84:419 - 425.
- [34] Mitchell J B, Grandjean P W, Pizza F X, et al. The effect of volume ingested on rehydration and gastric emptying following exercise - induced dehydration[J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1994, 26:1135 - 1143.
- [35] Maughan R J, Leiper J B. Sodium intake and post - exercise rehydration in man[J]. *Eur J Appl Physiol*, 1995, 71:311 - 319.
- [36] Brown A H. Water shortage in the desert[A]. In: Adolph E F *Physiology of Man in the Desert*[C]. New York: Interscience, 1947, 136 - 159.
- [37] Pitts G C, Johnson R E, Consolazio F C. Work in the heat as affected by intake of water, salt and glucose[J]. *Am J Physiol*, 1944, 142:253 - 259.