

由腸胃道生理機制探討運動時 水分吸收與運動飲料功能

蔡忠昌

國立彰化師範大學

摘要

運動時以喝運動飲料方式補充身體流失的水分與電解質相當普遍，然而，就水分吸收生理與相關研究結果來看，並不是運動就一定要喝運動飲料才能夠補充水分，也不是運動飲料在小腸中水分的吸收速率就一定高於其他飲料，事實上，在某些情況下，白開水在小腸的被吸收速率比起運動飲料更為快速。本文目的在從腸胃道的生理機制探討水分的吸收，以及運動飲料添加成分的生理意義，藉以釐清運動時水分補充的準則。

關鍵字：水分吸收、胃腸生理、運動飲料、運動表現

壹 前言

人體於運動期間，爲了排除因肌肉收縮所產生的熱能，因此需要藉由流汗，以水分的蒸散(evaporation)方式降低體內溫度。運動時，人體排汗的速率隨著肌肉收縮劇烈程度增加(Sawka and Montain, 2000)。輕度運動，如慢跑，排汗速率約在每小時 0.5~1 公升之間。劇烈運動，如運動員在運動比賽期間，排汗速率約在每小時 1~3 公升，以馬拉松選手爲例，2 個多小時比賽期間，排出的汗液可能多達 5 公升左右。人體水分的流失除了排汗之外，運動期間因換氣量變大，經由呼吸散失的無感水分流失(insensible water loss)也跟著增加，因此，長時間或是炎

熱潮濕環境下運動，身體水分流失的速率頗為快速，因而容易造成脫水引發諸如中熱衰竭或中暑等熱病，輕者影響運動表現，嚴重者甚至有生命的危險。所以，不論是一般人或是運動員在運動期間，特別是在炎熱高溫的環境下，都必須注意水分的補充。然而，水分的補充必需適量，水分補充太少不足以補充身體流失的水分，補充過多又容易引起胃腸不適或低血鈉(hyponatremia)的症狀，本文希望從胃與腸道生理的角度，探討運動時如何補充適量的水分，以避免上述情形發生。

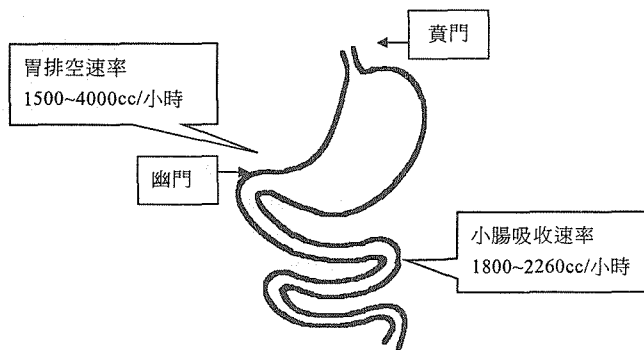
人體水分的吸收由消化系統執行，水分必須透過腸胃道的吸收進入血液當中，才能真正補充身體所流失的水分。人體內水份包括細胞內液(intracellular fluid, ICF)與細胞外液(extracellular fluid, ECF)，細胞內液指的是細胞內水分，由於被限制在細胞膜之內，正常狀況下其體積變動不大(Guyton and Hall, 2000)。細胞外液指的是細胞間液與血液中水分，其體積的變動較大。運動流汗時，汗液中的水分主要來自於血液，會使得細胞外液水分減少。人體經口腔所攝入之水分，只要停留在腸胃道中，都不能夠視為是身體內的水份，對於身體水分的減少並沒有幫助，消化道中的水分應視為身體外水分，只有在經小腸吸收進入血液才成為體內水分的一部份。因此，運動時水分的補充並不在於喝得有多快，關鍵在於消化系統吸收水分的速率有多快。

消化系統中，胃和小腸的生理作用影響水分吸收最為關鍵。當我們喝下飲料時，飲料經由口腔、食道進入到胃，這段時間很短，可能只有幾秒鐘，對於水分吸收沒有太大的影響。飲料進入胃以後，一般會停留一段時間，這是因為胃通往十二指腸的幽門開口很小，只容許少量食糜通過，胃中的食糜或液體要通過幽門進入小腸並不是很容易，每分鐘約只有 20 至 40 cc 左右(Gisolfi and Ryan, 1996)。因此，即使你一次喝下 500 cc 的水，它們在幾秒內進入胃中，卻需要經過一二十分鐘後才能全部進入小腸。而即使水分進入了小腸，水分留在腸腔當中，對於身體水分的減少仍然沒有幫助，水分必須經小腸上皮組織一段時間的吸收才能進入血液，而真正補足身體在運動過程中所流失的水分。所以，對於水分補充而言，消化道中主要有兩個限制其吸收速率的關卡，第一道關卡是胃，雖然胃並不吸收水分，水分卻需停留在胃中一段時間，第二道限制的關卡在小腸上皮細胞，因為細胞需要藉由特定運輸方式完成水分吸收，也需要耗費時間。以下將針對這兩個器官對於水分吸收的生理機制作更進一步的探討。

貳、胃的排空速率

胃為有彈性之囊袋狀構造(見圖一)，最多可容納一至二公升的食物，胃的入口為贛門，或稱食道下括約肌，與食道相連，此一括約肌強度較小，自口腔經食道吞嚥進來的食物或飲料，通常很快進入胃內。胃的出口為幽門，也是括約肌構成，下與十二指腸相連，此一括約肌強度大，因而所形成的開口很小，胃內內容物要通過幽門進入十二指腸並不容易。通常，食物需要經過胃壁肌肉反覆收縮研磨至很細的狀態，才能通過幽門進入十二指腸，而即使我們所喝進的飲料並沒有太多顆粒，它們也無法一口氣通過幽門全部進入十二指腸，在胃內通常需要數分到數十分鐘不等，如前所述，水分通過幽門的速率每分鐘約只有 20 至 40 cc。食物或飲料通過胃進入小腸的速率稱為胃排空速率(gastric emptying rate)，對於飲料而言，胃排空速率越快，飲料越容易進入小腸，就越快能被吸收以補充水分。相反地，胃排空速率越慢，飲料越不容易進入小腸，水分補充的速率就越慢。我們所喝飲料的胃排空速率與飲料本身的滲透壓、體積、溫度有關。飲料滲透壓越高，液體內的溶質越多，胃排空速率越慢，也就越不利於水分快速補充(Burks, *et al.*, 1985)。

另外，飲料體積也會影響胃排空速率，一次所喝下的飲料體積越多，進入胃以後對於幽門形成的壓力越大，胃排空速率會加快，不過，飲料體積越多胃排空速率的越快的情形有一極限，一次喝下飲料體積在超過 600 cc 以上就無法讓胃排空更快，也就是說，就加快胃排空速率而言，一次喝下 600 cc 會比一次喝下 100 cc 來得快，可是一喝下 1000 cc 並不會比一次喝下 600 cc 更快。飲料的溫度對於

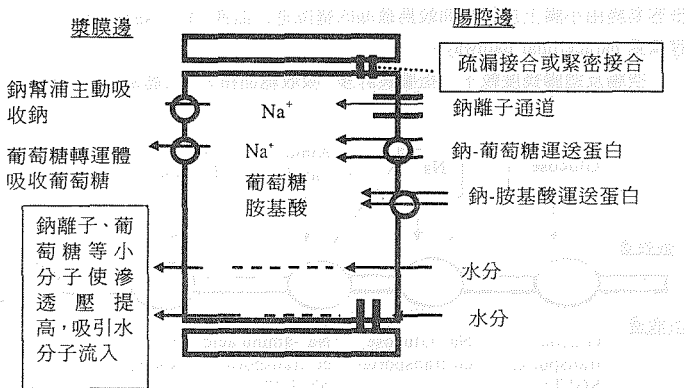


圖一 胃排空與小腸水分吸收速率比較 (根據 Gisolfi and Ryan, 1996)

胃排空速率也有影響，溫度超過 20°C 的飲料胃排空速率較慢。此外，飲料的胃排空速率也和運動員當時運動的強度有關 運動強度越大，胃的血流量減少，因此胃排空的速率減慢，身體補充水分的速率也減慢(Costill and Saltin, 1974)。

參、小腸吸收水分之分子生理機制

食物或飲料經胃排空進入到小腸後，靠著小腸壁平滑肌收縮攪拌得以推進，並充分地和小腸壁的絨毛細胞接觸，被分解食物飲料中的小分子連同離子水份分別經絨毛上皮細胞以不同運輸方式吸收。小腸上皮細胞吸收水分的機制，包含主動吸收與被動運輸兩階段（見圖二），主動吸收的階段是透過腸腔端細胞膜上的鈉-葡萄糖共同運送蛋白(Na⁺-glucose cotransporter)，此運送蛋白耗能地主動自腸腔吸收鈉離子與葡萄糖進入細胞中，細胞再分別藉著漿膜邊細胞膜上的鈉幫浦(sodium pump, 即 Na⁺-K⁺-ATPase)與葡萄糖轉運體將鈉離子與葡萄糖分子運送至漿膜邊的血液中。被動運輸的階段即水分子吸收的階段，由於先前主動吸收鈉離子與葡萄糖分子會使得漿膜邊的血液中的滲透壓增加，由於滲透壓與溶液中溶質的量有關，溶液中溶質越多，溶液的滲透壓越高，而水分子會由滲透壓高的地方往滲透壓低的地方移動，因此當鈉離子與葡萄糖分子往漿膜方向移動，使得上皮細



圖二 小腸上皮細胞水分吸收分子機制

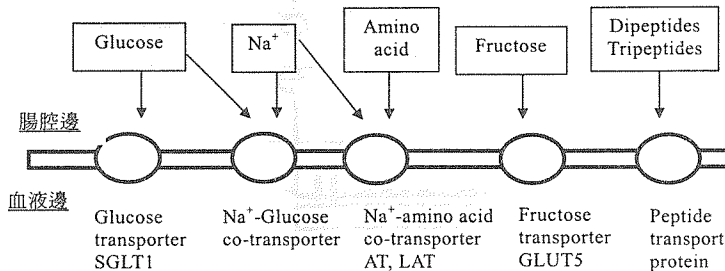
胞漿膜這端的滲透壓提高，腸腔中的水分子便會因為滲透壓的力量經上皮細胞或是細胞間的縫隙被動的進入血液之中(Ewe and Karbach, 1989; Schultz, 2001)。

小腸上皮細胞除了透過 Na^+ -Glucose cotransporter (SGLT1) 吸收葡萄糖及鈉離子造成滲透壓梯度以吸收水分的機制之外，還有其他小分子吸收機制增加水分吸收，如圖三所示，包括利用 fructose transporter (GLUT1) 吸收果糖，利用 Na^+ -amino acid cotransporter (AT) 吸收單胺基酸和鈉離子(Bauch, *et al.*, 2003)，以及利用 Peptide transport protein 吸收雙胺基酸性肽(di-peptide)和三胺基酸性肽(tri-peptide)等小分子(Kutchai, 1998)。這些由食物分解而來或是運動飲料中添加的小分子經小腸上皮細胞吸收後，腸腔中水分子均可以藉滲透壓力被動地進入血液中，真正地成為體內水分。

肆、不同段小腸吸收水分機制

一般解剖學將小腸分為十二指腸(duodenum)、空腸(jejunum)及迴腸(ileum)三段，就水分或營養分子吸收的生理機制而言，十二指腸、空腸及迴腸三段小腸之上皮細胞並不全然相同(Ewe and Karbach, 1989)。十二指腸長度約 25 公分，其上皮細胞的特徵為細胞間的接合並不緊密，或稱為疏漏接合(leaky junction)(見圖二)，因此，在十二指腸中，食物分解而來或是飲料中添加的小分子連同水分子，很容易經由小腸上皮細胞間較為疏漏的縫隙進入血液。經由細胞間縫隙吸收的途徑稱為 paracellular pathway。

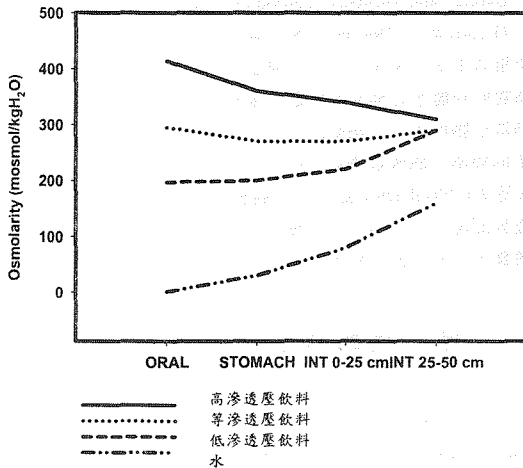
空腸及迴腸長度較十二指腸長許多，吸收總面積大，人體需要的糖類、脂肪、



圖三 影響小腸水分吸收之小分子運送蛋白

胺基酸、維生素、礦物質及水分等營養分子，主要都在此被吸收。空腸及迴腸上皮細胞與十二指腸最大的差異為細胞間的連結較為緊密，為緊密接合(tight junction)(見圖二)，營養分子大多無法經細胞間縫隙進入血液中，必須經細胞膜上運送蛋白等分子機制進入上皮細胞內，再經漿膜側細胞膜進入血液中。經由細胞質吸收的途徑稱為 transcellular pathway。

由於十二指腸與空腸、迴腸細胞吸收機制的差異，飲料中水分與小分子在不同段小腸的吸收並不一致。如圖四所示，不管所喝的飲料是白開水、低滲透壓或是高滲透壓，在經過十二指腸時，因為十二指腸細胞間的縫隙大，飲料中溶質與細胞或血液間的溶質快速移動的結果，其滲透壓均會因此改變而接近與細胞或是血液等滲透壓(iso-osmotic)的狀態(Lambert, *et al.* 1997)。而低滲透壓飲料或是白開水也因為滲透壓的關係，在經過十二指腸時較容易被吸收。滲透壓越高的飲料在經過十二指腸時水分被吸收速率越慢。所以，雖然十二指腸只有 25 公分，比起空腸迴腸短許多，但是在水分吸收的重要性並不會較低。根據 Gisolfi 等人



圖四 小腸上皮細胞與水分吸收。INT 0-25 cm 表示小腸前 25 公分段落，即十二指腸段，INT 25-50 cm 表示小腸 25 到 50 公分段落，為空腸前段。比較四種飲料在通過口腔、胃、十二指腸及空腸前段時之滲透壓變化，其滲透壓會逐漸趨近於血液滲透壓。(根據 Gisolfi, *et al.*, 1998)

(1998)的報告，白開水在十二指腸吸收水的速率頗高，可以說當你喝下一大杯白開水，經胃排空陸續進入小腸後，大部分的水分在十二指腸裡頭就已經被吸收了。

伍 運動對水分吸收的影響

運動期間，心臟輸出血液大多供應至肌肉，流到腸胃血液比休息時來得少，這種現象隨著運動強度的增加更為明顯，甚至可以減少 80% 血流減少勢必影響水分吸收(Rehrer, 1994)。尤有甚者，在馬拉松選手中，約有 2~30% 的比例有因為長時間且劇烈的跑步產生腸胃道出血的現象(Eichner, 1989)。另外，運動期間若因水分補充不足而引起身體水分減少(hypohydration)或是體溫升高現象時，胃排空速率也跟著下降。Neufer 等人(1989)的實驗顯示當身體水分減少體重 5%，胃排空速率減少了 20-25%，而這種現象不利於身體水分的補充。

至於運動是否影響小腸水分吸收速率則因不同的研究結果而眾說紛紛(Gisolfi, 2000)。Barclay and Turnberg (1988)的研究顯示，運動期間空腸段水分吸收明顯減少。而 Gisolfi 等人(1991)的研究則顯示，十二指腸及空腸段的水分吸收在休息與運動之間沒有太大差異，並不因運動而減少其水分吸收速率。

因此，運動對於身體水分補充的影響主要在於胃排空速率的下降，一旦飲料進入小腸，特別是小腸前段十二指腸部分，水分吸收的速率並不受運動的影響，如上一段有關不同段落小腸吸收機制所提，這可能是因為十二指腸細胞間通透性較高所致。Pals 等人(1997)的研究顯示，小腸對於小分子如 lactulose 的通透性隨著運動強度的提昇而增加。Lactulose 為糖類分子，一般食物內沒有此種分子，因此可以讓受試者食入，其尿液含量多寡可反映小腸上皮通透性之高低。

陸、運動時水分之補充

有關運動時水分之補充，一般最被接受的標準為美國運動醫學學會(American College of Sports Medicine [ACSM], 1996)所提出對於運動時水分補充的建議(Position stand on exercise and fluid replacement)，其內容摘要為

1. 運動前一天，均衡飲食，適當飲水，以增加身體水分含量。
2. 運動前 2 小時，飲水約 500 ml。
3. 運動期間，每間隔 15-20 分鐘，飲水 150-350 ml。

4. 飲水溫度最好低於外界溫度（避免增加體內熱量）。
5. 超過一小時的運動，飲水中可補充碳水化合物，以增加可利用能量，延遲疲乏的時間。碳水化合物補充量約 30-60 公克，即含 4-8% 碳水化合物飲料 600-1200 ml。碳水化合物種類可為 glucose, sucrose, maltodextran 等。
6. 鈉的補充每公升飲料 0.5-0.7 克，以避免低血鈉(hyponatremia)情形發生。

此一標準的基礎源自胃腸水分吸收的機制，運動前補充 500ml，運動期間補充 150-350ml 是因為這樣的量與胃排空、腸吸收速率互相吻合。水分補充量過多，雖然可以增加胃排空速率，但是假如超過胃排空速率（1000 ml/hr），多餘的水分將留在胃裡頭，增加運動時胃不舒服的發生機會(Morton *et al.*, 2004)。相反地，若喝的不夠，則很可能無法補充因流汗所造成的水分損失。按照此一標準，針對一個小時的運動，運動前及運動期間的水分補充約在 1100 到 1600ml 左右，在大部分的情形下，應可補充身體水分，而不至有脫水狀況產生。

另外，飲料中添加碳水化合物的目的在於提供可立即利用之能量。依照小腸吸收小分子及水分的速率，飲料中糖類分子可以在喝下數分鐘之後陸續為小腸吸收進入血液，成為運動時各組織可立即利用之能量。飲料中電解質，特別是鈉的補充目的在於人體所流失的汗液中含有許多電解質，其中鈉的濃度最高，平均約在 35mM 左右(Sawka and Montain, 2000)，按此濃度計算，每公升汗液約含鈉 0.8 克。其他電解質如鉀、鎂、鈣等濃度約只在 5mM 以下，含量甚低。因此，每公升飲料補充鈉 0.5-0.7 克應足以補充因汗液蒸散所流失的電解質。

柒、運動飲料對於水分補充與其他功能之探討

針對前段所述原則，加上運動飲料廠商廣告的推波助瀾，運動時利用喝運動飲料方式補充身體流失的水分與電解質已經相當普遍(林志遠、莊瑞平, 2002)。一般運動飲料主要含水分，電解質 Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} 等，以及 6-8% 碳水化合物(邱麗玲、郭家驊, 2000)。通常，運動飲料商業廣告裡頭所強調的理由大致有兩點：其一為可增加身體水分吸收速率，其二為碳水化合物可以提供運動時立即可用能量，能夠增進運動的表現，使成績更好。

以下按上述兩點探討運動飲料的碳水化合物的功能。第一，碳水化合物在小腸中會被分解為單糖，如前所述，單糖之類的小分子或加上鈉離子可以使小腸利用 Na^+ -Glucose cotransporter 以及 fructose transporter 等機制增加腸腔與血液兩端滲透壓梯度，使水分吸收速率更快。另外，目前也有廠商標榜添加胺基酸運動飲

料的功效，胺基酸分子如同單糖分子，可以使小腸利用 Na^+ -amino acid cotransporter 吸收單胺基酸和鈉離子，也可以增加腸腔與血液兩端滲透壓梯度，使水分吸收速率更快，至於胺基酸飲料所標榜減除疲勞等其他功效(Blomstrand and Saltin, 2001)，則不在本文討論範圍之內。因此，運動飲料中的碳水化合物甚或是胺基酸均能增加水分吸收速率，特別是在細胞間接合緊密的空腸及迴腸。第二，葡萄糖等單糖分子進入血液中，可以隨者血液運送到代謝旺盛的組織如肌肉，成為骨骼肌收縮時可利用的能量。由於肌肉中肝醣(Glycogen)含量減少是造成肌肉疲乏的主要原因之一(Chryssanthopoulos, *et al.*, 2002; Johnson, *et al.* 2004)。運動飲料中的碳水化合物在為小腸吸收進入血液之後，可以減少肌肉中肝醣的分解速率，延遲肌肉疲乏的發生，以增加持續運動的時間(Angus, *et al.*, 2000)。在運動時間較長，食慾減低的情況下，運動飲料中的碳水化合物更有補充能量的功能(蔡忠昌, 2001)。此外，近來許多報告顯示飲料中的碳水化合物對於免疫功能有所助益(Bacurau, *et al.* 2002)，以及減低運動期間壓力荷爾蒙的釋放(Braun and von Duvillard, 2004)。

然而，碳水化合物等小分子是造成運動飲料滲透壓的主因。滲透壓高的飲料不利胃排空，在小腸中，特別是在十二指腸，因為細胞間疏漏接合的關係，水分反而容易從血液中往腸腔移動，剛好與水分吸收方向相反，不利於水分吸收。這也是運動飲料的碳水化合物濃度一般為 6~8%，超過 10%反而會降低胃小腸吸收水分的速率，不利身體水分的補充。

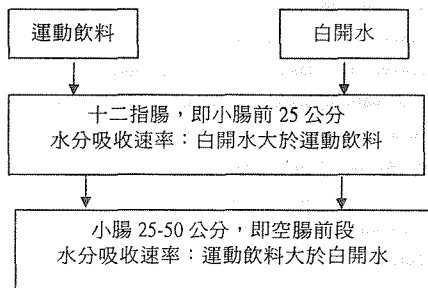
除了碳水化合物的功效之外，運動飲料中的鈉離子濃度是否能夠增加小腸水分吸收速率，也是學者探討重點。如前所述，小腸上皮必須利用 Na^+ -Glucose cotransporter 或 Na^+ -amino acid cotransporter 等分子吸收水分，似乎有可能在飲料中添加適量鈉離子而能夠使水分吸收速率更快。然而，Gisolfi 等人(2001)的研究顯示，飲料中的鈉離子濃度對於水分在小腸被吸收速率並無顯著的影響，他們調配五種含不同鈉離子濃度的低滲透壓飲料，受試者於運動中喝下後，測量五種飲料在十二指腸及空腸前段水分被吸收的速率，結果並無顯著差異。

至於，運動飲料是否能夠增進運動的表現？則不同的研究結果有不同的解讀。Armstrong and Maresh(1996)整理了 1979 到 1995 年 20 篇有關添加碳水化合物飲料與運動表現的研究報告發現，37 個試驗中，23 個試驗結果沒有差異，14 個試驗結果對於運動表現有顯著助益。從這個結果來看，可以說，並不是運動時喝運動飲料就一定能夠讓運動成績更好。

捌、胃腸對運動飲料與白開水吸收速率的比較

運動飲料確實能夠在運動期間幫助身體維持水分與離子的平衡，但是並不代表運動就一定要喝運動飲料。事實上，運動飲料的碳水化合物與電解質使得飲料滲透壓提高，如前所述，小腸吸收速率會因為飲料滲透壓提高而減低其吸收速率。根據 Gisolfi 等人(1998)的報告，拿滲透壓 0 的白開水跟等滲透壓的運動飲料比較，如圖五所示，白開水在十二指腸的倍吸收速率遠大於運動飲料，運動飲料要到空腸因為 Na^+ -Glucose cotransporter 以及 fructose transporter 等機制的運作下，其水分被吸收的速率才會高於白開水。所以運動飲料在補充身體水分的速率上是不是比較快，仍有爭議。Gisolfi 等人(1998)指出，許多證實運動飲料水分吸收速率較高的研究當中，其十二指腸的吸收往往被忽略，僅注意到空腸與迴腸的吸收。

除此之外，Ryan 等人(1998)的研究指出，當人體水分含量減少體重 3%，處於缺水(hypohydration)狀態，含碳水化合物 8% 以上的運動飲料，其水分被吸收的速率，在小腸前 50 公分段落遠遠低於白開水。人體水分含量減少體重 3% 的量其實不算很多，以 60 公斤體重計算，為流失水分 1.8 公升。在溼熱環境下，可能一個小時便流失這樣的量。在這種情形下運動飲料可能並無法達到快速補充身體水分的目的，白開水在小腸的吸收速率反而可能更好。



圖五 運動飲料與白開水在十二指腸與空腸前段水分吸收的比較

玖、結語

運動時，到底是喝運動飲料好，還是白開水就可以？答案可能是依情況而定。如果運動的時間沒有很長，不超過一個小時輕中度的運動，身體所流失的水分以及電解質質量並不是很多，其實喝白開水即可，不僅省錢而且可達到快速補充身體水分的目的。超過一個小時，或是汗液的流失相當多，因此身體水分與電解質的恆定遭受破壞，那麼運動飲料中添加的電解質與碳水化合物或胺基酸對於身體就很有幫助。一來，電解質的補充可以避免因電解質失衡而造成神經與肌肉細胞膜電位的改變，而延遲肌肉疲乏或減少抽筋的機會。二來，碳水化合物或胺基酸的補充可以增加空腸、迴腸水分的吸收速率，也可以增加血液能量分子的濃度，增加運動時肌肉或其他組織可利用的能量，而對運動表現有所助益。

參 考 文 獻

- 林志遠、莊瑞平 (2002) 運動飲料成分及調配之探討 *大專體育* 60, 150-157
- 邱麗玲、郭家驊 (2000) 運動飲料的设计與運用. *北體學報* 8, 74-80
- 蔡忠昌 (2001) 運動時身體水分及電解質的流失與補充 *彰化師大體育學報* 2, 65-70.
- American College of Sports Medicine (1996) Position stand on exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 28(1), i-vii
- Angus, D.J., Hargreaves, M., Dancy, J. and Febbraio, M.A. (2000) Effect of carbohydrate or carbohydrate plus medium-chain triglyceride ingestion on cycling time trial performance. *J. Appl. Physiol.*, 88(1), 113-9.
- Armstrong, L.E. and Maresh, C.M. (1996) Fluid replacement during exercise and recovery from exercise. In E.R. Buskirk and S.M. Paul (Eds) *Body fluid balance: exercise and sport* (pp259-281). U.S.A., CRC Press LLC.
- Barclay, G.R. and Turnberg, L.A. (1988) Effect of moderate exercise on salt and water transport in the human jejunum. *Gut*, 29(6), 816-20.
- Bacurau, R.F., Bassit, R.A., Sawada, L., Navarro, F., Martins, E. Jr and Costa Rosa, L.F. (2002) Carbohydrate supplementation during intense exercise and the immune response of cyclists. *Clin. Nutr.*, 21(5), 423-9.

- Bauch, C., Forster, N., Loffing-Cueni, D., Summa, V. and Verrey, F. (2003) Functional Cooperation of Epithelial Heteromeric Amino Acid Transporters Expressed in Madin-Darby Canine Kidney Cells. *J. Biol. Chem.*, 278(2), 1316-1322.
- Blomstrand, E. and Saltin, E. (2001) BCAA intake affects protein metabolism in muscle after but not during exercise in humans. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 281, E365-E374.
- Braun, W.A. and von Duvillard, S.P. (2004) Influence of carbohydrate delivery on the immune response during exercise and recovery from exercise. *Nutrition.* 20(7-8), 645-50.
- Burks, T.F., Galligan, J.J., Porreca, F. and Barber, W.D. (1985) Regulation of gastric emptying. *Fed. Proc.*, 44(14), 2897-901.
- Chryssanthopoulos, C., Williams, C. and Nowitz, A. (2002) Influence of a carbohydrate-electrolyte solution ingested during running on muscle glycogen utilisation in fed humans. *Int. J. Sports Med.*, 23(4), 279-84.
- Costill, D.L. and Saltin, B. (1974) Factors limiting gastric emptying during rest and exercise. *J. Appl. Physiol.*, 37, 679-683.
- Eichner, E.R. (1989) Gastrointestinal bleeding in athletes. *Physician Sportsmed.*, 17(5), 128-140.
- Ewe, K. and Karbach, U. (1989) Functions of the alimentary canal. In R.F. Schmidt and G. Thews (Eds) *Human physiology*, 2nd ed (pp693-734), Berlin, Germany, Springer-Verlag.
- Gisolfi, C.V., Spranger, K.J., Summers, R.W., Schedl, H.P. and Bleiler, T.L. (1991) Effects of cycle exercise on intestinal absorption in humans. *J. Appl. Physiol.*, 71(6), 2518-27.
- Gisolfi, C.V. and Ryan, A.J. (1996) Gastrointestinal physiology during exercise. In E.R. Buskirk and S.M. Paul (Eds) *Body fluid balance: exercise and sport* (pp19-52). U.S.A., CRC Press LLC.
- Gisolfi, C.V., Summers, R.W., Lambert, G.P. and Xia, T. (1998) Effect of beverage osmolality on intestinal fluid absorption during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 85(5), 1941-8.
- Gisolfi, C.V. (2000) Is the GI System Built For Exercise? *News Physiol. Sci.*, 15, 114-119.

- Gisolfi, C.V., Lambert, G.P. and Summers, R.W. (2001) Intestinal fluid absorption during exercise: role of sport drink osmolality and $[Na^+]$. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33(6):907-15.
- Guyton, A.C. and Hall, J.E. (2000) The body fluid compartments: extracellular and intracellular fluids; interstitial fluid and edema. In *Textbook of medical physiology* (10th ed, pp264-278). Philadelphia, Pennsylvania: W.B. Saunders Company.
- Johnson, N.A., Stannard, S.R. and M.W. Thompson (2004) Muscle triglyceride and glycogen in endurance exercise: implications for performance. *Sports Med.* 34(3), 151-64.
- Kutchai, H.C. (1998) Digestion and absorption. In R.M. Berne and M.N. Levy (Eds), *Physiology* (4th ed)(pp647-674). St. Louis, Missouri: Mosby Inc.
- Lambert, G.P., Broussard, L.J., Mason, B.L., Mauermann, W.J. and Gisolfi, C.V. (2001) Gastrointestinal permeability during exercise: effects of aspirin and energy-containing beverages. *J. Appl. Physiol.*, 90(6), 2075-80.
- Lambert, G.P., Chang, R.T., Xia, T., Summers, R.W. and Gisolfi, C.V. (1997) Absorption from different intestinal segments during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 83(1), 204-12.
- Morton, D.P., Aragon-Vargas, L.F. and Callister R. (2004) Effect of ingested fluid composition on exercise-related transient abdominal pain. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, 14(2), 197-208.
- Neufer, P.D., Young, A.J. and Sawka, M.N. (1989) Gastric emptying during exercise: effects of heat stress and hypohydration. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 58, 433-9.
- Pals, K.L., Chang, R.T., Ryan, A.J. and C.V. Gisolfi (1997) Effect of running intensity on intestinal permeability. *J. Appl. Physiol.*, 82(2), 571-6.
- Rehrer, N. J. (1994) The maintenance of fluid balance during exercise. *Int. J. Sports Med.*, 15(3),122-5.
- Ryan AJ, Lambert GP, Shi X, Chang RT, Summers RW, Gisolfi CV. (1998) Effect of hypohydration on gastric emptying and intestinal absorption during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 84(5):1581-8.
- Sawka, M.N. and Montain S.J. (2000) Fluid and electrolyte supplementation for exercise and heat stress. *Am. J. Clin. Nutr.*, 72(suppl), 564S-72S.
- Schultz, S.G. (2001) Epithelial water absorption: Osmosis or cotransport? *Proc. Natl.*