



# Reading to Learn PE

We build physical wellness through exercise, nutrition, and rest.  
We increase mental capacity through reading, writing, and thinking.

<http://www.hkpe.net/reading>

## 運動與能量

### 概述

任何的體育活動，都要透過肌肉收縮(muscular contractions)而得以完成，但肌肉收縮則要在能量<sup>1</sup>(energy)供應充足的情況下，才能夠正常運作，所以能量可說是各項體育活動的基本要素。體育鍛煉可以改善人體內能量的儲備，從而提高運動表現。不過，在編排及製訂訓練計劃的同時，對人體內能量消耗及補充的方式就要有充分的認識了。

食物是肌肉活動所需能量的**間接來源**<sup>2</sup>，在人體內經過一系列的化學反應後，食物被分解時所釋放的能量，就會被用來製造一種名為三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, 簡稱 ATP)的高能量化合物，並儲存於肌肉細胞之中，當 ATP 被分解的時候，就能夠提供能量作肌肉活動之用了。

### ATP 與能量

**ATP** 其實是由一個結構非常複雜的腺苷酸(adenosine)部分和三個相對地較為簡單的磷酸鹽(phosphate)小組所構成。當 1 摩爾<sup>3</sup>(mole) ATP 被分解的時候，就能夠產生 7 至 12 千卡<sup>5</sup>(kcal)的能量。

<sup>1</sup>能量 (energy) 在科學上的定義為物體作功的能力，而功 (work) 則是力 (force) 和力作用點 (point of action) 沿力作用線 (line of action) 所移動距離 (distance moved) 的積 (product)。

<sup>2</sup>食物在人體內分解時所釋放出的能量，並不能直接應用於肌肉活動上，這些能量必須先用來製造一種名為三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, 簡稱 ATP)的高能量化合物，並儲存於肌肉細胞之中，只有 ATP 被分解時所釋放出的能量，才能直接被應用到肌肉活動當中。

<sup>3</sup>1 摩爾 (mole) 是指某一化合物的重量，主要按組成該化合物的原子類別和數量而定。



可是，ATP 在肌肉內的儲存量極為有限<sup>6</sup>，人體全身的肌肉內只有 120 至 180 微摩爾<sup>7</sup> (mM) 的 ATP，或 1.2 至 1.8 千卡的能

量，僅足以維持三數秒的盡最大努力活動 (all-out efforts) 之用。所以，肌肉活動若要繼續進行下去，就得重新合成 ATP 了。可是，重新合成 ATP 原來也是要用上能量的。人體內就有三個供能系統，可以供應能量作為重新合成 ATP 之用。

### 供能系統

人體內有三個供能系統，其中兩個可以在沒有氧氣的情況下工作，所以是無氧系統 (anaerobic systems)；另一個則要在氧氣充裕的情況下才能正常運作，所以是有氧系統 (aerobic system)。

### 無氧系統

**A**naerobic 本身是指沒有氧氣的意思，無氧系統 (anaerobic system) 亦即是能夠在沒有氧氣的情況下重新合成 ATP 的供能系統。人體內總共有兩個無氧系統，它們分別是三磷酸腺苷－磷酸肌酸系統 (ATP-PC system) 和乳酸系統 (lactic acid system)。

<sup>4</sup>ATP 被分解時，最末端的一個磷酸鹽 (phosphate) 分子便會脫離母體 (ATP)，並同時釋放出能量。

<sup>5</sup>1 千卡 (kilocalorie, 簡稱 kcal) 相當於把 1 千克 (kg) 水升高攝氏 1 度 (°C) 所需的熱能。

<sup>6</sup>根據 Hultman(1967)及 Karlsson(1971)，每千克 (kg) 的肌肉內有 4 至 6 微摩爾 (mM) 的 ATP，若以每 1 摩爾 (mole, 等於 1000 微摩爾) ATP 平均可釋放 10 千卡 (kcal) 能量計算，這相當於 0.04 至 0.06 千卡的能量。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以全身肌肉內 ATP 的儲存量為 120 至 180 微摩爾，亦即相當於 1.2 至 1.8 千卡的能量。

<sup>7</sup>1 微摩爾 (mM) 相等於 1/1000 摩爾 (mole)。

## 1. ATP-PC 系統

ATP-PC 系統是一個較為簡單的無氧系統。在人體的肌肉細胞內，其實還儲存著另一種高能量化合物－磷酸肌酸（phosphocreatine，簡稱 PC）。當 PC 被分解<sup>8</sup>的時候，就會釋放出能量，而這些能量就可以用來重新合成 ATP。不過，PC 在人體內的儲存量也是極為有限<sup>9</sup>，人體全身的肌肉內只有 450 至 510 微摩爾 PC，或 4.5 至 5.1 千卡的能量，而且要重新合成 PC 的話，原來也是要用上 ATP 被分解時所釋放出來的能量，只不過這過程會在運動後人體處於恢復狀態之下才進行。因此，當 PC 在極高強度肌肉活動（如短跑）中被消耗殆盡時，便要等待運動結束後才可以得到恢復了。

以一個人的體重為 70 千克計算，全身肌肉的重量約為 30 千克，肌肉內 ATP 及 PC 的總存量為  $120 + 450 = 570$  至  $180 + 510 = 690$  微摩爾，亦即相當於 5.7 至 6.9 千卡的能量<sup>10</sup>，僅足以維持不到十秒的盡最大努力活動。由此可見，ATP-PC 系統所能提供的能量極為有限，但它的重要性並不在於能夠提供能量的多寡，而在於能夠提供**即時**的能量作肌肉活動之用。因此，對於那些強度大、速度高，並且只需在數秒間完成的活動，如起跑、跳躍、投擲、舉重等，ATP-PC 系統的作用尤為重要。

由於 ATP-PC 系統並不需要把氧氣輸送到肌肉中才能運作，所需的燃料（ATP 及 PC）亦早已儲存於肌肉細胞之中，而且當 PC 被分解時所涉及的化學反應亦較另外兩個供能系統少，所以 ATP-PC 系統是人體內最迅速的能量來源。

## 2. 乳酸系統

除了 ATP-PC 系統外，人體還可以在沒有氧氣的情況下，借助乳酸系統來產生能量供肌肉活動之用。首

<sup>8</sup>與 ATP 被分解時的情況相類似，PC 被分解時，最末端的一個磷酸鹽（phosphate）分子便會脫離母體（PC），並同時釋放出能量。

<sup>9</sup>根據 Hultman(1967)及 Karlsson(1971)，每千克(kg)的肌肉內有 15 至 17 微摩爾 (mM) 的 PC，若以每 1 摩爾 (mole) PC 同樣可釋放 10 千卡 (kcal) 能量計算，這相當於 0.15 至 0.17 千卡的能量。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以全身肌肉內 PC 的儲存量為 450 至 510 微摩爾，亦即相當於 4.5 至 5.1 千卡的能量。

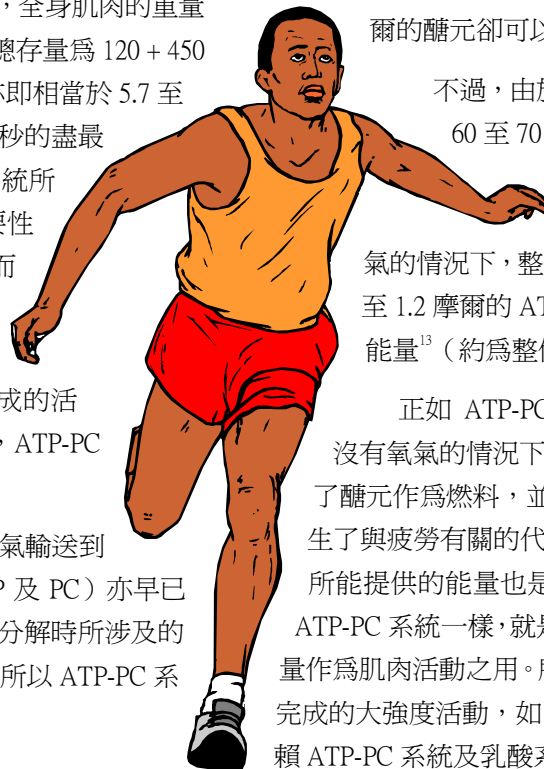
<sup>10</sup> Hultman (1967)及 Karlsson (1971)。

先要認識到人會把體內的碳水化合物（carbohydrates）先轉化為葡萄糖（glucose），然後供機體使用，或者以肝醣（liver glycogen）及肌醣（muscle glycogen）的形式，分別儲存於肝及肌肉內。

在沒有氧氣的情況之下，乳酸系統會把這些醣元（以上各種糖類的統稱）分解，產生一種名為乳酸（lactic acid）的代謝產物，並同時釋放出能量。由於醣元未能被完全氧化（oxidized），所以乳酸系統在無氧醣酵解（anaerobic glycolysis）的情況下，產生的能量遠比在氧氣充裕的情況下作有**氧**醣酵解（aerobic glycolysis）來得少。例如，在無氧的情況下，1 摩爾或 180 克 (g) 醣元理論上可以產生 2 摩爾或 180 克乳酸及 3 摩爾 ATP，但在氧氣充足的情況下，同樣是 1 摩爾的醣元卻可以產生 39 摩爾的 ATP。

不過，由於運動時肌肉及血液只能承擔 60 至 70 克的乳酸，之後機體便會出現疲勞的現象<sup>11</sup>，影響正常的肌肉活動，所以在沒有氧氣的情況下，整個乳酸系統實際上只能提供 1 至 1.2 摩爾的 ATP<sup>12</sup>，即相當於 10 至 12 千卡的能量<sup>13</sup>（約為整個 ATP-PC 系統的 2 倍）。

正如 ATP-PC 系統一樣，乳酸系統可以在沒有氧氣的情況下產生 ATP，不同之處卻是用上了醣元作為燃料，並且在產生 ATP 的同時，亦產生了與疲勞有關的代謝產物－乳酸。雖然乳酸系統所能提供的能量也是非常有限，但其重要性和 ATP-PC 系統一樣，就是能夠在很短的時間內提供能量作為肌肉活動之用。所以一些需要在 1 至 3 分鐘內完成的大強度活動，如 400 米及 800 米跑，均非常依賴 ATP-PC 系統及乳酸系統來提供能量。



<sup>11</sup>根據 Sahlin(1978)及 Trivelpde 與 Danforth(1966)，當肌肉的乳酸增加時，體液的酸鹼度便越趨下降，因而抑制了一些有助於無氧醣酵解（anaerobic glycolysis）的酵素（enzymes）正常運作，於是亦影響了肌肉的活動能力。

<sup>12</sup> 1 摩爾 (mole) 或 180 克 (g) 的醣元 (glycogen) 在無氧醣酵解 (anaerobic glycolysis) 下可產生 180 克乳酸 (lactic acid) 及 3 摩爾 ATP。因此，當只有 60 至 70 克乳酸能夠從醣元在無氧醣酵解下產生時，所能提供的 ATP 便只有  $3 \times 60 \div 180 = 1$  至  $3 \times 70 \div 180 = 1.2$  摩爾了。

<sup>13</sup>若以每 1 摩爾 (mole) ATP 平均可釋放 10 千卡 (kcal) 能量計算，1 至 1.2 摩爾 ATP 便相當於 10 至 12 千卡的能量了。

## 有氧系統

**在** 氧氣充足的情況下，1 摩爾醣元可以被完全氧化成二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 和水 (H<sub>2</sub>O)，並產生 39 摩爾 ATP<sup>14</sup>，整個步驟要用上 6 摩爾，即 134.4 升 (L) 的氧氣 (O<sub>2</sub>)<sup>15</sup>。換句話說，在有氧系統運作之下，若以醣元作為燃料，每重新合成 1 摩爾 ATP，人體便要攝取  $134.4 \div 39 = 3.45$  升的氧氣了。在安靜的時候，這可能要用上 10 至 15 分鐘的時間，但從事劇烈運動的時候，則可能只是 1 分鐘以內的事罷了。

除了醣元之外，有氧系統還可以用脂肪 (fats) 及蛋白質 (proteins) 作為燃料來重新合成 ATP。就以棕櫚酸 (palmitic acid，一種典型的脂肪酸) 為例，1 摩爾的棕櫚酸 (約半磅) 經氧化後能夠產生 130 摩爾 ATP。不過要完全氧化 1 摩爾的棕櫚酸，人體就要攝取 23 摩爾，即 515.2 升的氧氣<sup>16</sup>。這也是說，在有氧系統運作之下，若以脂肪 (如棕櫚酸) 作為燃料，每重新合成 1 摩爾 ATP，人體便要攝取  $515.2 \div 130 = 3.96$  升的氧氣。因此，有氧系統若以脂肪作為燃料，要產生同量的 ATP，便要比用醣元作為燃料時消耗多約 15% 的氧氣了。

至於蛋白質方面，一般認為除非身體是處於飢荒、醣元消耗殆盡或非比尋常的耐力項目 (如歷時數天的超長距離跑) 之中，否則蛋白質對提供能量作為肌肉活動的貢獻只是微不足道。在安靜及大部分的體育活動中，醣元和脂肪仍然是主要提供能量以重新合成 ATP 的燃料。

比較起另外兩個無氧系統來說，有氧系統在 ATP 的總生產量可說是難以估計，因為無論是醣元、脂肪，甚至是蛋白質均可以用作重新合成 ATP。不過單從醣



元方面計算，人體全身有肌醣 390 至 450 克<sup>17</sup>，肝醣 80 至 100 克<sup>18</sup>，再加上 5 至 6 克的血糖<sup>19</sup>，人體內醣元的總存量为 475 至 556 克，共可產生 102.9 至 120.5 摩爾 ATP，即相當於 1029 至 1205 千卡的能量<sup>20</sup>。

由於有氧系統能夠在大量合成 ATP 之餘而不會產生導致疲勞的代謝產物，所以是人體處於安靜狀態時供能系統的最佳選擇。此外，對於長時間的耐力性項目 (如馬拉松長跑) 來說，有氧系統因為能夠用上醣元和脂肪作為燃料，所以亦只有它可以供應充足的能量作這類活動之用<sup>21</sup>。

## 安靜時的能量來源

**人** 體處於安靜狀態時，因為心肺系統能夠供應充足的氧氣給肌肉細胞使用，所以能量主要是由有氧系統提供，而且無論是醣元或脂肪，均可以被用作供能的燃料。在安靜的情況下，約有三分之二的能量是來自脂肪的代謝，另外的三分之一則是來自醣元的有氧醣酵解，而蛋白質的貢獻只是微乎其微。

## 運動時的能量來源

**運** 動的時候，無氧系統和有氧系統均會供應能量作肌肉活動之用，只不過各個供能系統的重要性會按個別運動項目的種類、運動員的訓練狀態及膳食等方面而有所差異。原則上大部分的運動項目皆可被歸納為兩個類別：(1) 時間短而強度大的運動，和 (2) 時間長而強度較小的運動。當然，還有其他的一些項目是未能歸入這兩個類別之中。

<sup>17</sup> 根據 Hultman (1967)，人體每千克 (kg) 肌肉內有 13 至 15 克 (g) 的肌醣。假設一個人的體重為 70 千克，則全身的肌肉重量約為 30 千克，所以肌醣的總量為  $13 \times 30 = 390$  至  $15 \times 30 = 450$  克。

<sup>18</sup> Hultman 與 Nilsson (1971)。

<sup>19</sup> 陳吉棣 (1983)。

<sup>20</sup> 475 克醣元可產生  $475 \div 180 \times 39 = 102.9$  摩爾 (mole) ATP，以 1 摩爾 ATP 平均可產生 10 千卡 (kcal) 能量計算，即相當於 1029 千卡的能量。按同樣的計算原則，556 克醣元可產生  $556 \div 180 \times 39 = 120.5$  摩爾 ATP，亦即相當於 1205 千卡的能量。

<sup>21</sup> 根據 Costill 與 Fox (1969) 及 Fox 與 Costill (1972)，要跑畢一次馬拉松長跑 (比賽距離為 42.195 千米或 26.2 英里) 可以用上近 150 摩爾 (mole) 的 ATP (約每分鐘 1 摩爾 ATP)。

<sup>14</sup> 正如其他兩個無氧系統一樣，一切有關的化學反應均發生在肌肉細胞之內，但有氧系統涉及的化學反應都要比其他兩個系統來得多和複雜，而且都只發生在肌肉細胞的線粒體 (mitochondria) 之中。

<sup>15</sup> 由於 1 摩爾 (mole) 的任何氣體在標準溫度及壓力 (standard temperature and pressure) 之下會佔上了 22.4 升 (L) 的體積，所以 6 摩爾便相當於  $6 \times 22.4 = 134.4$  升的氧氣。

<sup>16</sup> 同樣道理，23 摩爾便相當於  $23 \times 22.4 = 515.2$  升的氧氣了。

## 時間短、強度大項目

一切只可以維持 2 至 3 分鐘的運動項目，如 100 米、200 米、400 米及 800 米跑等，均可被視爲時間短而強度大的項目。由於人體的攝氧能力始終是有上限（見表一），就以 100 米跑來說，往往便需求到每分鐘近 8 升的氧氣，單靠有氧系統根本是無法供應足夠能量作這類活動之用。再者，就算人體的攝氧能力可以達到如此的需求，機體仍需要 2 至 3 分鐘的時間，以作出各種有關的生物化學及生理上的調整。因爲這類時間短而強度大的項目經常要求到機體在氧氣短缺（oxygen deficit）的情況下提供能量作肌肉活動之用，所以無氧系統（包括 ATP-PC 系統及乳酸系統）是這類項目的主要供能系統。



表一、最大攝氧量比較

最大攝氧量 (每分鐘)	受訓練運動員	一般人
男 (升)	5.0 <sup>22</sup>	3.2 <sup>23</sup>
女 (升)	3.0 <sup>24</sup>	2.2 <sup>25</sup>

對於時間極短而強度非常大的項目而言，ATP-PC 系統是主要的無氧供能系統。雖然 PC 會於很短時間之內下降至非常低的水平，並一直維持於該水平至運動結束爲止，不過在運動結束後的數分鐘內，PC 便可以完全恢復。

當乳酸系統逐漸取代 ATP-PC 系統而成爲主要的無氧供能系統後，無氧醣酵解的活動迅速活躍起來，隨之而來的也就是同樣急劇的乳酸積聚，這情況特別以 2 至 10 分鐘內完成的項目爲顯著，乳酸的濃度甚至曾記錄得高出正常情況下（10 mg%<sup>26</sup>）的 20 倍之多<sup>27</sup>。

<sup>22</sup> Saltin 與 Astrand (1967)。

<sup>23</sup> Fox, Billings, Bartels, Bason 與 Mathews (1972)。

<sup>24</sup> Drinkwater (1973)。

<sup>25</sup> Drinkwater, Horvath 與 Wells (1975)。

<sup>26</sup> 10 mg% 是每 100 毫升 (mL) 血液內含有 10 毫克 (mg) 的意思。

<sup>27</sup> Robinson (1974)。

因此，乳酸濃度也是乳酸系統活躍程度的最佳指標。在 PC 接近衰竭及乳酸濃度不斷提高的情況下，活動亦只得停止下來或改以較低的強度繼續進行。

## 時間長、強度較小項目

任何可以維持較長時間（10 分鐘或以上）的運動項目，都可以被歸納於這個類別之中。有氧系統是這類活動的主要供能系統。20 分鐘以內的運動項目主要以醣元作爲燃料，脂肪次之。當運動持續下去（如 1 小時或以上），醣元的儲備明顯下降時，脂肪便會逐漸取而代之成爲有氧系統的主要燃料。

對於這類時間長而強度較小的項目來說，ATP-PC 系統及乳酸系統只在運動開始的階段，即機體的攝氧量進入穩定狀態（steady state）之前（通常需要 2 至 3 分鐘），或運動中途及尾段要作加速或最後衝刺時，才會起著積極的作用。因此，雖然血液內的乳酸濃度亦可以相當之高，但通常不及乳酸系統主導時般嚴重。

時間較長的項目如馬拉松長跑（一般需要 2.5 小時以上），運動員於比賽完結時血液內乳酸的濃度往往只是安靜時（10 mg%）的 2 至 3 倍<sup>28</sup>。對於這類運動員來說，導致疲累的原因包括：（1）肝醣耗盡以致血糖濃度下降，（2）肌醣耗盡而出現局部的肌肉疲勞，（3）水分和電解質流失導致體溫上升，及（4）心理上感到沉悶等<sup>29</sup>。

時間更長的項目如步行、哥爾夫球或日常的勞作等，因爲單憑 ATP-PC 系統已足夠應付機體進入穩定狀態前額外的能量需求，所以血液內乳酸的水平一般與安靜時無異，而且疲勞的情況亦得以壓後或甚至不會出現。



<sup>28</sup> Costill 與 Fox (1969)。

<sup>29</sup> Costill (1974)。

## 其他項目

**除**了以上兩個類別的項目外，還有一些運動項目是介乎於兩者之間的，這類項目的特點，就是需要到有氧系統及無氧系統的同時或交替運作刺次階段，無氧系統是主要的供能系統。另一方面，在活動的中段或穩定狀態階段，能量則主要由有氧系統供給。其實，不單止是徑賽項目如此，其他的運動項目如游泳、自行車，甚至是球類活動等，都有類似的情況出現。



## 總結

**其**實，供能系統的主導地位，主要是根據運動項目實際進行時的速度和時間而定。運動進行時的速度越高，強度通常也越大，能夠維持的時間亦越短。因為機體沒有足夠的氧氣補給，亦沒有充足的時間過渡至穩定狀態，所以能量只有靠無氧系統供給。速度越高，強度越大，ATP-PC 系統在提供能量上越加重要。當活動的時間持續，PC 接近耗盡的時候，乳酸系統便取而代之成為主導的供能系統。反過來說，耐力性項目或當活動的速度放緩，強度下降，機體得到充分的氧氣補給，並進入穩定狀態後，能量便可以單靠有氧系統來供應。不過當運動的速度或強度再度增加時，無氧系統又會重新投入工作，甚至再次成為主導的供能系統了。

## 參考資料

1. Costill, D. L. (1974). Muscular exhaustion during distance running. *Phys Sportsmed.*, 2(10), 36-41.
2. Costill, D. L., and Fox, E. L. (1969). Energetics of marathon running. *Med Sci Sports*, 1, 81-86.
3. Drinkwater, B. L. (1973). Physiological responses of women to exercise. In J. L. Wilmore (ed.), *Exercise and Sport Sciences Reviews, Volume 1*. New York: Academic Press, pp. 125-153.
4. Drinkwater, B. L., Horvath, S. M., and Wells, C. L. (1975). Aerobic power of females, ages 10 to 68. *J Gerontol.*, 30(4), 385-394.
5. Fox, E. L., Billings, C. E., Bartels, R. L., Bason, R., and Mathews, D. K. (1972). Fitness standards for male college students. *Int Z Angew Physiol.*, 31, 231-236.
6. Fox, E. L., Bowers, R. W., and Foss, M. L. (1993). *The Physiological Basis for Exercise and Sport* (5<sup>th</sup> ed.). Dubuque, IA: Wm. C. Brown.
7. Fox, E. L., and Costill, D. L. (1972). Estimated cardiorespiratory responses during marathon running. *Arch Environ Health*, 24, 315-324.
8. Hultman, E. (1967). Studies on muscle metabolism of glycogen and active phosphate in man with special reference to exercise and diet. *Scand J Clin Lab Invest (Suppl 94)*, 19, 1-63.
9. Hultman, E., and Nilsson, L. H. (1971). Liver glycogen in man: Effect of different diet and muscular exercise. In B. Pernow and B. Saltin (eds.), *Muscle Metabolism during Exercise*. New York: Plenum Press.
10. Karlsson, J. (1971). Lactate and phosphagen concentration in working muscle of man. *Acta Physiol Scand (Suppl)*, 358, 1-72.
11. Robinson, S. (1974). Physiology of muscular exercises. In V. B. Mountcastle (ed.), *Medical Physiology* (13<sup>th</sup> ed.), Volume 2. St. Louis: Mosby, p. 1279.
12. Sahlin, K. (1978). Intracellular pH and energy metabolism in skeletal muscle in man. *Acta Physiol Scand (Suppl)*, 455, 1-56.
13. Saltin, B., and Astrand, P.-O. (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology*, 23, 353-358.
14. Triveldi, B., and Danforth, W.H. (1966). Effect of pH on kinetics of frog muscle phosphofructokinase. *Journal of Biological Chemistry*, 241, 4110-4112.
15. 陳吉棣 (1983)：運動與糖。曲綿域 (主編)，*中國醫學百科全書：運動醫學*。上海：上海科學技術出版社。
16. 陳再晉等 (主編) (1996)：*華杏簡明醫學辭典*。台灣：華杏出版股份有限公司。