
為體內『代謝產物』正名

一談二氧化碳、尿素和氨的生理任務

林金盾

國立臺灣師範大學 生命科學系

前言

臺灣的一切都變化得這麼快，快得有時候連大學教授都有跟不上腳步的感覺。本來，社會多元的發展，可以讓大家都機會適才適性的發揮專長或潛能，教育改革也是其中的一項。自從一綱多本的教科書實施之後，在第一線的所有教師都比以前忙了許多。以往使用統一的國編本，只要將教科書的所有內容都弄熟，就保證學生參加各種考試的題目不致於沒教過而慚愧。現在不同了，市面發行多少版本的教科書，就得讀熟多少版本的內容，然後自行彙整成一本集大成的自編教材去教學生才能放心。然而，如果遇到各個版本對相同的現象使用不同的名詞或不同的敘述，就會陷入苦惱之中。因此，有關教材方面的問題顯得比以前更多、更複雜。

最近常被提到一個嶄新的觀念問題一到底二氧化碳、尿素和氨是「代謝產物」？還是「代謝廢物」？我個人認為，這是一個很值得藉此機會談一談的好問題。基本上，從字面可以理解前者是指生物體內代謝過程所產生的物質，可能有某些生理功能，也可能沒有；而後者則明白的表示沒有任何功能，必需趕緊排出，以免造成對生命不利的中毒現象。由此推知，

這些在傳統教科書裡稱為「代謝廢物」的物質，現在應該改稱為「代謝產物」較佳，也較切合實際狀況。理由何在？先看看，它們在動物體內的生理任務。

一、二氧化碳的生理任務

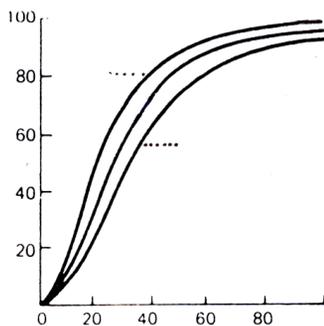
調節呼吸運動

我們的呼吸中樞在延腦，延腦和頸動脈、主動脈都有化學受器（chemoreceptors）對二氧化碳十分敏感，可以有效偵測出濃度的變化。當血液中二氧化碳的濃度上升而將訊息傳到呼吸中樞時，呼吸運動的次數和深度就快速的增加。相反的，如果缺乏二氧化碳的刺激時，呼吸運動會停止而死亡。所以有些學者認為二氧化碳是一種具有調節呼吸功能的無機激素（一般激素的成分為蛋白質、固醇類或脂肪酸，都屬於有機物質，極微量就可引起極大的效應），因為血液中二氧化碳的濃度輕微改變，就會明顯的影響呼吸運動的次數和深度。

調節血紅素與氧分子的親和力

二氧化碳對血紅素和氧分子的親和力，具有調節的生理功能，二氧化碳濃度

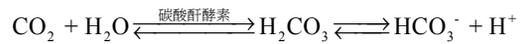
增加會降低血紅素與氧分子的親和力。在肺泡組織中，由於二氧化碳的濃度較低，使血紅素和氧的親和力增加，有利於血紅素攜帶更多的氧分子。當血液流到各個組織時，由於各個組織的活動量不同，所產生的二氧化碳和消耗氧氣的程度不同。例如運動時骨骼肌的活動量、飯後消化道的活動量都很大，該組織附近的二氧化碳濃度自然增加。於是血紅素與氧分子的親和力便下降，使釋放出更多的氧分子給活動中的組織，以配合該組織對氧的需求量。相反的，休息狀態的肌肉或是空腹狀態的消化道，組織的活動量減少，產生的二氧化碳自然減少。二氧化碳的濃度下降使血紅素對氧的親和力增加，所以不容易釋放氧氣出來，此時的肌肉或消化道所獲得的氧就比較少(圖一)，可見二氧化碳具有調節血紅素釋放氧氣的生理作用。



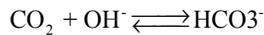
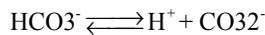
圖一 當二氧化碳的濃度降低時，氧血紅素飽和曲線會向左移動(甲)，因此 PO_2 在 40mmHg 的氧血紅素飽和度約為 80%。二氧化碳的濃度增加時，曲線向右移動(乙)，因此 PO_2 在 40mmHg 的氧血紅素飽和度約為 60%。總之，二氧化碳的濃度增加使更多的氧分子釋放出來。

調節體液的正常酸鹼度

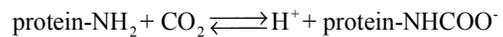
二氧化碳是每個細胞表現生命現象必需產生的代謝產物之一，可藉細胞中的碳酸酐酶 (carbonic anhydrase) 的催化作用，和水分子結合而轉變成碳酸 (H_2CO_3)，再分解為重碳酸離子 (HCO_3^-) 與氫離子 (H^+)。其化學反應式如下：



有些情況下，也有下列反應產生：



二氧化碳也可與含胺基 (amino group) 的蛋白質 (例如血漿蛋白、血紅素等) 結合，形成可逆的碳胺化合物 (carbamino compounds)，其結合程度隨著該蛋白質所含可利用的胺基數量、酸鹼度或二氧化碳濃度而不同。其反應簡式如下：

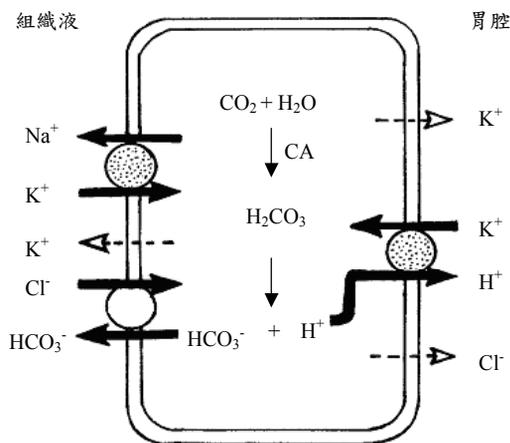


所以，在血液中的二氧化碳有五種不同的形式： CO_2 、 H_2CO_3 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 和碳胺化合物，其比例的多寡隨著血液的酸鹼度、溫度等因素的不同而不同。例如在人體正常的體溫 ($37^\circ C$) 和酸鹼度 (pH 值在 7.35-7.45 之間) 情況下， CO_2 對 H_2CO_3 的比例為 1,000 比 1，而 CO_2 對 HCO_3^- 的比例為 1 比 20。可見在正常的血液中， CO_2 大多數以 HCO_3^- 的形式存在著。 HCO_3^- 為弱鹼性物質，有利於維持體液正常的酸鹼度。所以 HCO_3^- 和 HPO_4^{2-} 都是體液酸鹼度恆定所需最佳的酸鹼緩衝劑 (buffer)，維持體液 (包括血液、組織液) 酸鹼度恆定 (pH

值在 7.35-7.45 之間)。換言之，正常的血液中不可能完全沒有任何形式的二氧化碳。

胃黏膜的壁細胞分泌鹽酸

圖二表示，胃黏膜中的壁細胞分泌鹽酸 (HCl) 時，其中的 H^+ 是由水分子而來，但是二氧化碳也參與其中的反應，成為不可或缺的步驟。



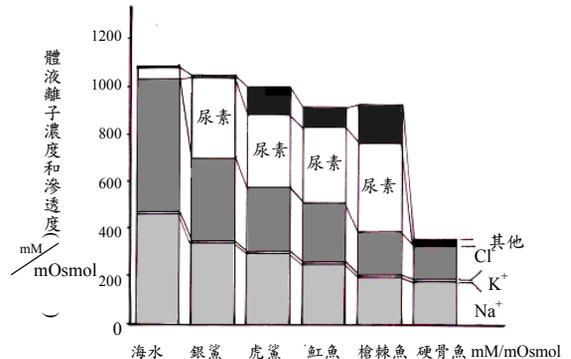
圖二 胃黏膜層的壁細胞分泌鹽酸示意圖。鹽酸中氫離子的來源與二氧化碳的水化作用有關。二氧化碳與水化合形成碳酸的過程，需要碳酸酐酶 (carbonic anhydrase, CA) 的催化。

二、尿素的生理任務

維持海生動物的體液滲透壓

尿素是由蛋白質分解產生的含氮代謝物質之一，對於在海中生活的板鰓類動物 (如鯊魚) 和槍棘魚 (coelacanth) 而言，是維持體內滲透壓的重要溶質。海水的滲透壓約為 1,000mOsmol/L，而狗鮫鯊 (Dogfish shark) 的體液滲透壓為 1075mOsmol/L、槍棘魚 (Latimeria) 為

954mOsmol/L，能夠維持與海水相差無幾的體液滲透壓，就是依靠體內能夠堆積適量的尿素(圖三)而來。

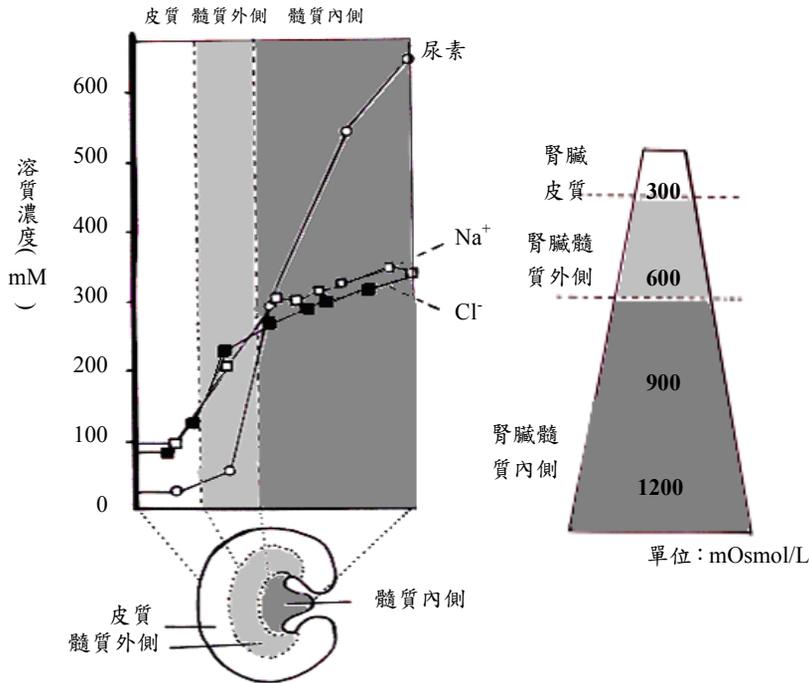


圖三 軟骨魚 (如鯊魚、紅魚) 和槍棘魚能夠在體內儲存大量的尿素，以增加體液的滲透壓使之接近於海水的滲透壓，而有利於在海水中生活。

維持人體腎臟的正常滲透壓梯度

人體腎臟分為靠外側的皮質部和內側的髓質部，二者的滲透壓不同，由皮質部往髓質部的滲透壓，逐漸增加 (圖四)，由 300 mOsmol/L 到 1200 mOsmol/L，以利下視丘所分泌而儲存在腦垂腺後葉的抗利尿激素 (antidiuretic hormone, ADH) 促使集合管的管壁細胞再吸收水分，有效保留水分而排出濃縮尿液。

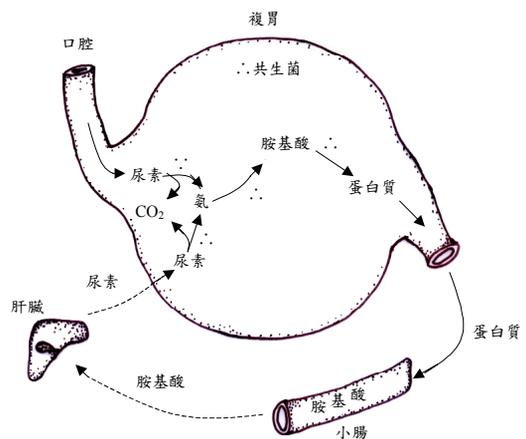
這個由皮質部到髓質部所建立的滲透壓梯度，主要靠大量鈉離子、氯離子和尿素的儲存。研究結果顯示在最內層的髓質部，尿素的濃度幾乎成直線增加，而鈉離子和氯離子則否 (圖四)。可見尿素在腎臟的正常功能的表現上具有重要的貢獻，而非傳統教科書所描述毫無用處的代謝廢物。



圖四 人體腎臟的滲透壓梯度與鈉離子、氯離子和尿素濃度的關係圖。從皮質到髓質外側而髓質內側，滲透壓由 300 到 600 而 1200 (mOsmol/L) 漸漸增加，形成腎臟的滲透壓梯度與尿素的堆積有關。研究證明在髓質外側鈉離子和氯離子濃度的增加比尿素大，但是在髓質內側，則鈉離子和氯離子濃度的增加不如尿素明顯。

反芻動物可藉共生微生物將尿素轉為胺基酸和蛋白質

反芻動物具有多個胃，例如駱駝、駱馬、羊駝有三個胃，而牛、羊、鹿都有四個胃。前兩個胃專門提供微生物發酵之用，含有多種共生微生物可以協助動物所攝入植物纖維素的分解，也可以將反芻動物所產生的尿素分解為氨（圖五），再轉化為胺基酸或蛋白質供微生物和反芻動物之用。這個過程不僅增加反芻動物合成蛋白質的機會，也可替生活在沙漠中的反芻動物（例如駱駝）減少體內水分的消耗而保留水分，有利在乾燥的環境中存活。

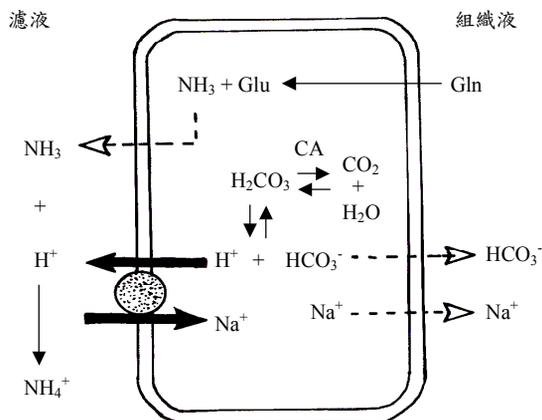


圖五 反芻動物複胃中的共生微生物（如細菌），可將動物的唾液所含的尿素經口腔攝入或肝細胞所合成的尿素逆行轉化為氨和二氧化碳，再將氨轉為胺基酸而合成蛋白質，供共生菌使用或流入動物的小腸分解為胺基酸而吸收。

三、氨的生理任務

協助腎小管細胞排出氫離子並產生新的重碳酸離子

氨(NH₃)是蛋白質分解為胺基酸再代謝的終產物，屬於一種極毒的含氮代謝物，但是溶解度很高，所以水生動物都能快速將其排至環境中，而陸生動物則少以氨的形式排出。細胞代謝所產生的氨會先在細胞中的轉氨基酵素之催化下，形成麩胺酸 (glutamine)。麩胺是體內胺基酸的一種也很容易通過細胞膜，但不容易排出體外。麩胺隨血液循環送到肝臟，在肝細胞分解為氨和麩胺酸 (glutamate)，再將氨和二氧化碳合成為尿素 (urea)。麩胺也會送到腎臟去，在腎小管細胞中再分解成氨和麩胺酸鹽，此時的氨在腎臟的腎小管細胞可與氫離子 (H⁺) 結合成為銨離子 (NH₄⁺) (圖六)。銨離子形成之後不能逆回腎小管細胞內，只能隨著尿液排出。如此既可排出氨又可排出氫離子，而且產生新的鹼性物質重碳酸離子 (HCO₃⁻)，可謂一舉多得，所以氨在體液酸鹼度的調節上也具有重要的生理任務。



圖六 腎小管的管壁細胞利用氨與氫離子結合成銨離子 (NH₄⁺) 的過程，增加氫離子的排出和重碳酸離子的產生，以利維持體液酸鹼度的恆定。其過程會涉及二氧化碳的水化反應，以產生氫離子和重碳酸離子。CA 為碳酸酐酵素 (carbonic anhydrase)，用於催化二氧化碳和水的反應。Glu 為麩胺酸而 Gln 為麩胺。

恆定作用

恆定作用是所有生物維持生命所必需的重要生理功能。我們的體溫能夠維持在 37℃ 左右，血液中的葡萄糖濃度維持在每 100ml 血液中含有 90~100mg 左右，都是體內維持恆定的結果。恆定作用的意思，簡單的說就是古人所說的「中庸之道」— 過猶不及，皆不理想 (好像政治人物都主張要走中間路線一樣)。換句話說，太多或太少都不好。例如血壓「太高」固然不好，但是血壓「太低」甚至沒有血壓，就活不成了。正常人在靜止的狀態下，心跳數多為每分鐘 70-80 次之間，激烈運動時會增加超過百次以上，運動過後心跳數又再回到正常的範圍，否則就表示心臟可能有問題。

生物體能夠維持體內的恆定，主要靠負回饋機制的運作，來避開「太多」或「太少」的不良影響。所謂的負回饋機制就是輸出端的結果會抑制輸入端的運作 (圖七)。當甲增加時會促進 (+) 乙增加，而乙增加時會促進 (+) 丙增加，而丙增加時又會促進 (+) 丁增加，最後的丁增加時卻會抑制 (-) 甲增加。因此，甲會減少，接

