



諾爾將大百年鑑

新陳代謝

Nobel Prize in Chemistry

物質代謝 與
光合作用

■ 百年來的成就豐富了20世紀
也影響未來的化學之路 ■

北京大學化學系 陳耀全

華東理工大學精細化工系 陳沛然 ◇合著

江斐瑜 ◇校訂

新陳代謝

物質代謝與光合作用



作者／陳耀全、陳沛然

校訂／江斐瑜

主編／羅煥耿

責任編輯／黃敏華

編輯／陳弘毅、李欣芳

美術編輯／錢亞杰、鄧吟風

發行人／林正村

出版者／世潮出版有限公司

登記證／局版臺業字第 5108 號

地址／台北縣新店市民生路 19 號 5 樓

電話／(02) 22183277

傳真／(02) 22183239〈訂書專線〉

(02) 22187539

劃撥／17528093

單次郵購總金額未滿 200 元(含)，請加 30 元掛號費

網址／www.coolbooks.com.tw

電腦排版／繁簡通電腦排版公司

印刷廠／世和印製企業有限公司

法律顧問／北辰著作權事務所

版權所有·翻印必究

初版一刷／2005 年 1 月

定價／180 元

本叢書中文繁體字版權由上海科技教育出版社授予

本書如有破損、缺頁、裝訂錯誤，請寄回更換

Printed in Taiwan

諾貝爾獎百年鑑



新陳代謝 物質代謝與光合作用

100

Nobel Prize

北京大學化學系
華東理工大學精細化工系

陳耀全 ◇ 合著
陳沛然

江斐瑜 ◇ 校訂



策劃序

從1901年開始頒發的諾貝爾獎，可以說是20世紀物理學、化學和生命科學發展的縮影。它記錄了百年來這三大學科的幾乎所有重大成就，對世界科學事業的發展產生很大的促進作用，被公認為科學界的最高榮譽。人們崇敬諾貝爾獎，讚嘆諾貝爾獎得主們的科學貢獻，並已出版了許多相關書籍。

那麼，我們為什麼還要策劃出版這套《諾貝爾獎百年鑑》叢書呢？

這是因為，有許多熱愛科學的讀者，很希望有這樣一套書，它以具體的科學內容為基礎，使社會公眾也能對科學家們的成就有一定的感性認識；它以學科發展的傳承性為主線，讓讀者領略科學進步的永無止境；它還是簡明扼要、通俗易懂的，令讀者能輕鬆閱讀，愉快受益。

基於這種考慮，本叢書將百年來三大學科的全部諾貝爾獎按具體獲獎內容分為26個領域，每個領域寫成一卷8萬字左右的小書，以該領域的進展為脈絡，以相關的諾貝爾獎獲獎項目為重點，讀者將不但能了解這些諾貝爾獎成果的科學內容，更能知道這個領域的發展歷程。叢書的分卷不局限於一級學科的分類，以體現現代科學之間的交

融。此外，叢書還另設了3卷綜述，便於讀者對這三大學科的全貌有一個宏觀認識。叢書29卷內容如下：

20世紀物理學革命	現代有機化學
20世紀化學縱覽	無機物與膠體
20世紀生命科學進展	材料物理與化學
X射線與顯微術	現代分析技術
核物理與放射化學	生物分子結構
量子物理學	量子與理論化學
基本粒子探測	蛋白質、核酸與酶
場論與粒子物理	遺傳與基因
粒子磁矩與固體磁性	細胞生物學
超導超流與相變	生理現象及機制
測量技術與精密計量	內分泌與免疫
天體物理學	臨床醫學與藥物
物理學與技術	傳染病與病毒
熱力學與反應動力學	神經與腦科學
物質代謝與光合作用	

在叢書策劃基本成形後，我們曾到上海、北京、南京等地的許多著名高校及中國科學院、中國醫學科學院等科研院所徵求專家們的意見，得到了他們的大力支持。許多學者不顧事務繁忙，慨然為叢書撰稿。我們謹向他們表達由衷的感謝和深深的敬意。



作者簡介

陳耀全，男，1936年生。1963年北京大學化學系畢業，1967年中國科學院上海有機化學研究所研究生畢業。中國科學院上海有機化學研究所研究員。中國化學會第22、23屆理事會理事，上海市生物化學與分子生物學學會第7屆理事會理事。

陳沛然，男，1973年生。1995年華東理工大學精細化工系畢業。現為中國科學院上海有機化學研究所博士研究生。

校訂者簡介

江斐瑜，台灣大學農業化學所碩士，現任高中生物科教師。

目錄

1 何謂「代謝」 / 009

代謝中的能量 / 009

分解與合成 / 012

化學語言 / 016

2 從簡單分子開始的接力賽 / 019

他跑了三次「第一棒」 / 019

從「尿酸」開始的核酸化學 / 022

糖，甜蜜的糖 / 024

蛋白質化學的基石 / 030

3 醣類的結構與代謝 / 033

單醣、雙醣和多醣 / 033

肝糖——動物體內的葡萄糖倉庫 / 039

動物怎樣製造多醣 / 047

脂質中間體 / 055



4

糖的酒精發酵 / 061

關於糖水發酵的爭論 / 061

布赫納的貢獻 / 065

承先啟後的研究者 / 071

發酵與酶 / 077

輔酶——酶的左右手 / 081

5

食物怎樣轉化成能量 / 087

檸檬酸循環的建立 / 087

神秘的二碳化合物 / 092

輔酶A和乙醯輔酶A / 095

6

奇妙的小分子化合物 / 101

性激素 / 101

生物鹼 / 104

維生素及其他 / 108

7

葉綠素和血紅素 / 117

綠葉的秘密 / 117

花兒為什麼這樣紅 / 123

血紅之謎 / 126

自然母親的孿生子 / 129

8 光合作用和生物能 / 133

地球上最重要的化學反應 / 133

光合作用中的碳循環 / 138

生命活動的能量 / 146

9 生物固氮和蛋白質生產 / 155

生態農業與維爾塔寧 / 155

生物固氮 / 158

造福無窮的AIV方法 / 160

10 結束語 / 165

本卷大事記 / 169



1

何謂「代謝」

代謝中的能量

我們所生活的這個世界，萬物競茂，生生不息。而任何一個生命，都一定要進行物質的吸收和能量的轉化，這就是「新陳代謝」，簡稱「代謝」。

「代謝」(metabolism)一詞源自希臘語，原義為「變化」。生物體中進行著數目驚人的化學反應，即使在像大腸桿菌那樣簡單的生命中，進行的化學反應也超過千個。「代謝」就是生物體內的活細胞中所有化學反應的總稱。它使生物得以生長、維持其本性、繁殖以及與環境進行物質和能量的交換。代謝中的化學反應數目雖多，但類型相對較少。這些反應高度組織，形成代謝反應通路。在反應通路上有秩序地進行著化學反應，不時有中間產物從岔道離開一個通路，進入另一個通路。這種情景，倒有點像行駛著汽車的高速公路。

活細胞代謝的各種反應都由酶來催化。激素（如胰島

素、腎上腺素等)對代謝的調節起重要的作用。一旦代謝的某一環節失調,就會引起疾病,如糖尿病等。

自由能變化是判斷一個化學反應能否發生的指標。如果一個反應的自由能變化是負值,這個反應能自發發生;反之,就不能發生。代謝中有些反應在能量上是不利的,單獨地看似乎不能發生。但代謝的反應是偶聯反應,如果第一個反應的自由能變化是正值,但與它偶聯的下一個反應的自由能變化是負值,而且兩個反應的自由能變化相加還是負值,則第一個反應還是能夠發生。這就像一位精明的商人,賠本的生意他是不做的。但是,第一筆賠本的交易如果能為他帶來取得更大盈利的第二筆交易,這生意他是一定要做的。

生物體需要不斷攝取自由能,以滿足三項需求:(1)肌肉收縮和別的細胞運動作機械功;(2)分子和離子的活性運輸;(3)從簡單的前體化合物合成大分子和其他複雜分子。這些生命活動需要一種通用的自由能載體,作為能量「通貨」,這就是ATP。ATP是腺核苷三磷酸的英文名字的縮寫,它由腺嘌呤、核糖和三磷酸三個部分構成。它的結構可以用圖1來表示。為了簡明起見,其中與碳原子直接相連的氫原子沒有畫出。

ATP之所以富含能量,是因為它的三磷酸部分含有兩個高能磷酸酐鍵。當1莫耳ATP水解為1莫耳腺核苷二磷酸(ADP)和1莫耳無機磷酸,或者1莫耳腺核苷一磷酸

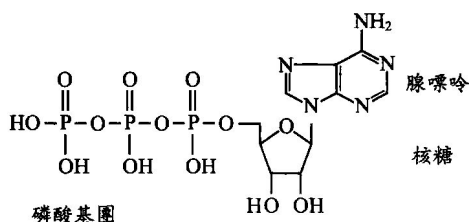


圖 1 ATP 的結構

(AMP) 和 1 莫耳焦磷酸時，都會釋放出 7.3 千卡 (1 卡 = 4.18 焦耳) 能量。ATP、AMP 和 ADP 之間是可以互相轉化的，這一轉化由一種稱為「腺苷酸激酶」的 Z 催化。ATP - ADP 循環是生物體系能量變化的基本模式。生物體系裏 ATP 在能量交換中的中心作用是在 1941 年由李普曼 (Fritz Albert Lipmann) 和卡爾卡 (H. Kalckar) 發現的。

ATP 不斷形成又不斷消耗。在生物體系中，ATP 主要是作為即時的自由能供體而不是自由能的長期儲存形式。它的更新率極高。例如，一個靜息中的人在 24 小時內要消耗約 40 公斤 ATP。而在激烈的運動中，ATP 的利用率可高達每分鐘 0.5 公斤。

根據獲得能量的途徑的不同，我們地球上的生物可以分成異營生物和自營生物兩大類。自營生物包括綠色植物和光合微生物，它們藉由光能在光合作用的過程中製造有機化合物並產生 ATP；異營生物包括動物和需要從外界汲取養分的微生物，它們通過食物的氧化得到能量。所以，地球上所有生物的能量都直接或間接地來自太陽光。

分解與合成

活細胞的代謝由「分解代謝」和「合成代謝」偶聯而成。分解代謝指結構複雜的食物分子分解為結構簡單的分子。它的作用是為在合成代謝中合成新的結構複雜的分子提供「構件」，或在分解以後被氧化，為細胞及器官的活動提供能量，對溫血動物而言，該能量部分轉化為熱量，以維持體溫。合成代謝指從簡單的分子合成結構複雜的分子，如由單糖合成多糖、由胺基酸合成蛋白質、由核苷酸合成核酸等，這是個消耗能量的過程。

食物通過氧化產生能量的過程分為3個階段。首先，食物中的大分子水解成各自的小分子組成單元，如蛋白質水解成胺基酸、多糖水解成葡萄糖、脂肪水解成脂肪酸和甘油。這一階段產生的能量較少，而且多以熱能形式釋放，不能被細胞利用。在第二階段中，這些小分子組成單元進行不完全氧化，其最終產物除了二氧化碳和水外，主要是以乙醯輔酶A的形式出現的乙酸鹽。乙醯輔酶A是在代謝過程中形成的又一個高能化合物，每莫耳乙醯輔酶A水解時釋放出7.5千卡自由能。這一階段會產生一些ATP（例如，每分子葡萄糖經不完全氧化，最後生成2分子丙酮酸並淨得2分子ATP），但對於能量的產生而言，第三階段是最重要的。在這一階段，不完全氧化的產物進入檸檬酸



循環 (TCA cycle) 而被完全氧化，最終產物是二氧化碳和水，營養物中全部可用的化學能都轉化為 ATP。每分子乙醯輔酶A 經過檸檬酸循環可淨產生 12 分子 ATP。細胞中只有 46% 的化學能能夠轉化為 ATP，其餘的作為熱能而流失。

食物氧化產生能量涉及一系列電子轉移過程。在需氧生物中，氧是最終的電子受體。但是，電子並非直接從食物分子轉移給氧分子，而是轉移給一些特殊的電子載體。這些載體在化學上屬於 吡啶核苷酸或黃素化合物。這些載體的還原形式然後通過位於粒線體內膜上的電子轉移鏈把它們的高電位電子轉移給氧。這一電子流動的結果是使 ADP 和無機磷酸生成了 ATP。這些電子還被用於還原性的生物合成。

煙鹼醯胺腺嘌呤二核苷酸 (NAD^+) 是食物氧化中主要的電子受體。接受 2 個電子後， NAD^+ 轉化為還原形態 NADH。食物氧化的另一種電子受體是黃素腺嘌呤二核苷酸 (FAD)，它的還原形態是 FADH_2 。在還原性的生物合成中，煙鹼醯胺腺嘌呤二核苷磷酸 (NADP) 的還原形態 (NADPH) 是主要的電子供體。在大多數生物合成中，前體比產物具有更高的氧化態。因此，除了 ATP 外，還需要電子。例如，在脂肪酸的生物合成中，加入的酮基經過幾步被還原成次甲基，這一系列反應淨需 4 個電子。

從 NAD^+ 、NADH、FAD 和 FADH_2 的結構式中我們可

以看到，代謝過程的許多中心分子是核糖核苷酸。圖2是 NAD^+ 的化學結構，圖中虛線方框內的部分就是核糖核苷酸。為什麼活化載體如ATP、 NADH 、 FADH_2 和輔酶A都含有腺核苷酸單元呢？一個可能的解釋是，在進化中核糖核酸（RNA）先於蛋白質和去氧核糖核酸（DNA）出現。最早的催化劑很可能是RNA分子，它把一些非RNA成分（如異咯嗪）結合在它的分子中作為輔酶，用作活化的電子載體。我們可以想像 FADH_2 的腺嘌呤環和有催化活性的RNA中的尿嘧啶基通過鹼基配對而發揮作用。當蛋白質取代了RNA作為主要的催化劑後，核糖核苷酸輔酶由於已經很適應於在代謝中的作用而基本上保持不變。代謝中的分子和基元在所有生命形態中都是共同的，這證明了它們有共同的起源，通過數十億年的進化，依然保持著它們起作用的模式。

與分解代謝產生能量不同，合成代謝是耗能的，需要消耗ATP。合成代謝有兩個主要步驟，第一，由分解代謝產生的中間產物生成生物大分子的前體；第二，由這些前體合成蛋白質、核酸、多醣和脂類化合物。合成前體的材料除了由分解代謝提供外，還來自一些維持檸檬酸循環的輔助反應。葡萄糖以核苷二磷酸葡萄糖的形式參與各種多醣和非葡萄糖單醣的合成；脂類的前體甘油和脂肪酸以及磷脂合成中的絲胺酸、肌醇和 α -磷酸甘油均由酵解和檸檬酸循環的中間產物合成，再由它們合成各類脂肪；蛋白質

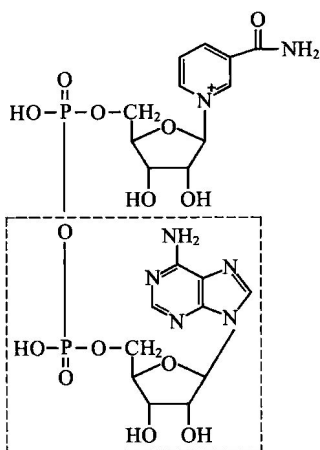


圖2 NAD⁺的化學結構

的前體胺基酸在高等植物中可由胺和硝酸鹽合成，脊椎動物和一些細菌只能合成部分胺基酸，其餘的必須由食物補充，合成蛋白質時各胺基酸的裝配順序受遺傳訊息支配；許多生物能合成嘌呤和嘧啶核苷酸，由它們合成DNA和RNA，DNA合成時用細胞中已有的DNA作模板，以保證生物遺傳的忠實性，RNA的合成也以DNA為模板，以確保遺傳訊息的正確轉錄。

在細胞中分解代謝和合成代謝既通過磷酸轉移反應和電子傳遞體系發生聯繫，又通過多種方式而能同時起作用。這是因為：合成與分解常在細胞的不同區間內進行；催化兩類代謝的酶也存在於不同的細胞組分中；催化兩種代謝中相同步驟的酶有不同的性質；合成某一成分的起始