

原著

Roger TannerThies

譯者

袁宗凡

慈濟大學醫學系生理學科 助理教授

# 彩色圖解生理學

案例分析、評估與詳解

## Physiology

An Illustrated Review



合記圖書出版社 發行

# 彩色圖解生理學

## 案例分析、評估與詳解

### Thieme圖解複習系列叢書簡介 可檢測應考USMLE準備狀況的簡明課程複習書

Thieme的圖解複習系列叢書是專為醫學生規畫的系列叢書，其目的在幫助學生精簡複習課程內容並為USMLE (美國醫師執照考試) 做準備。內容涵蓋醫學院的所有基礎課程以及USMLE第一階段的考試範圍。

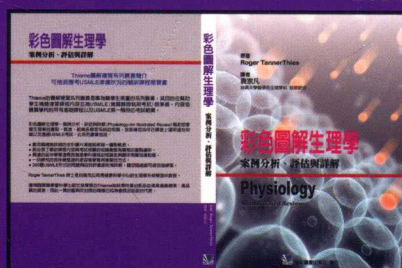
彩色圖解生理學—案例分析、評估與詳解 (Physiology-An Illustrated Review) 幫助您掌握生理學的重點、概念、組織各器官系統的知識，並教導您如何在課堂上運用這些知識以及通過USMLE考試。此系列叢書包括：

- 數百幅精美詳細的全彩圖片清楚說明每一重點概念。
- 將必須了解的課程內容與考試相關的知識彙整為簡潔的重點編排。
- 頁邊的延伸學習連貫跨基礎學科領域的知識並與臨床相關知識對應。
- 一目瞭然的表格彙整提供更容易學習與複習的方法。
- 200題USMLE形式的問題與自我評量都附有詳解，讓您隨處都可做加強練習。

Roger TannerThies 博士是自奧克拉荷馬健康科學中心的生理學系榮譽退休教授。

獲得國際醫學暨科學出版社榮譽獎的Thieme始終秉持著出版品必須具備高標準、高品質的信念，因此一貫的藍與灰封面的商標已成為優良出版品的代表。

0263  
2054



ISBN 978-986-126-964-1



9 789861 269641  
HCBN 2211-051C



原著

Roger TannerThies

譯者

袁宗凡

慈濟大學醫學系生理學科 助理教授

# 彩色圖解生理學

案例分析、評估與詳解

## Physiology

An Illustrated Review



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

彩色圖解生理學：案例分析、評估與詳解/ Roger  
TannerThies原著；袁宗凡譯。--初版。--  
新北市：合記，2014.01  
面：公分  
譯自：Physiology: an illustrated review  
ISBN 978-986-126-964-1 (平裝)

1.人體生理學

397

102026556

### 彩色圖解生理學：案例分析、評估與詳解

原 著 Roger TannerThies  
譯 者 袁宗凡  
創 辦 人 吳富章  
發 行 人 吳貴宗  
發 行 所 合記圖書出版社  
登 記 證 局版臺業字第0698號  
地 址 新北市汐止區(221)汐平路二段1號  
電 話 (02)86461828  
傳 真 (02)86461866  
網 址 www.hochitw.com  
80 磅 雪銅紙 352頁

西元 2014年 2 月 10 日 初版一刷

#### 版權所有・翻印必究

敬告：本書內容之資料及療程僅供參考，如有任何疑問讀者須  
自行請教醫師或專家確認無誤後再使用。

#### 總經銷 合記書局

郵政劃撥帳號 19197512

戶名 合記書局有限公司

北醫店 電話 (02)27239404

臺北市信義區(110)吳興街249號(臺北醫學大學附設醫院正對面)

臺大店 電話 (02)23651544 (02)23671444

臺北市中正區(100)羅斯福路四段12巷7號(臺大校本部對面巷內)

榮總店 電話 (02)28265375

臺北市北投區(112)石牌路二段120號(臺北榮總附近北護旁)

臺中店 電話 (04)22030795 (04)22032317

臺中市北區(404)育德路24號(中國醫大附設醫院立夫大樓斜對面)

高雄店 電話 (07)3226177

高雄市三民區(807)北平一街 1 號(高醫附設醫院旁)

花蓮店 電話 (03)8463459

花蓮市(970)中央路三段836號(慈濟大學正對面)

成大店 電話 (06)2095735

台南市北區(704)勝利路272號(臺南成功大學附設醫院附近)

# Physiology

## An Illustrated Review

By Roger Tanner Thies, PhD

ISBN 978-1-60406-202-1

**Copyright © 2012 by Thieme Medical Publishers, Inc., New York, USA.**

All Rights Reserved. This book, including all parts thereof, is legally protected by copyright. Any use, exploitation, or commercialization outside the narrow limits set by copyright legislation without the publisher's consent is illegal and liable to prosecution. This applies in particular to photostat reproduction, copying, mimeographing or duplication of any kind, translating, preparation of microfilms, and electronic data processing and storage.

**Copyright © 2014 for the Taiwanese edition by Ho-Chi Book Publishing Co.**

All rights reserved. Published by arrangement with Thieme Medical Publishers, Inc., New York, USA.

### Ho-Chi Book Publishing Co.

|             |                                                                                                                        |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Head Office | No.1, Sec. 2, Xiping Rd., Xizhi Dist., New Taipei City 221, Taiwan<br>TEL: (02)8646-1828 FAX:(02)8646-1866             |
| 1st Branch  | No.249, Wuxing St., Xinyi Dist., Taipei City 110, Taiwan<br>TEL: (02)2723-9404 FAX:(02)2723-0997                       |
| 2nd Branch  | No.7, Ln. 12, Sec. 4, Roosevelt Rd., Zhongzheng Dist., Taipei City 100, Taiwan<br>TEL: (02)2365-1544 FAX:(02)2367-1266 |
| 3rd Branch  | No.120, Sec. 2, Shipai Rd., Beitou Dist., Taipei City 112, Taiwan<br>TEL: (02)2826-5375 FAX:(02)2823-9604              |
| 4th Branch  | No.24, Yude Rd., North Dist., Taichung City 404, Taiwan<br>TEL: (04)2203-0795 FAX: (04)2202-5093                       |
| 5th Branch  | No.1, Beiping 1st St., Sanmin Dist., Kaohsiung City 807, Taiwan<br>TEL: (07)322-6177 FAX:(07)323-5118                  |
| 6th Branch  | No.836, Sec. 3, Zhongyang Rd., Hualien City, Hualien County 970, Taiwan<br>TEL: (03)846-3459 FAX:(03)846-3424          |
| 7th Branch  | No.272, Shengli Rd., North Dist., Tainan City 704, Taiwan<br>TEL: (06)209-5735 FAX:(06)209-7638                        |

本書經原出版者授權翻譯、出版、發行：版權所有。  
非經本公司書面同意，請勿以任何形式作翻印、攝影、  
拷錄或轉載。

本書謹獻予我的家人：

， 妻子，南熙 (Nancy)

兒子，艾瑞克 (Eric) 與大衛 (David)

與前妻所生的孩子，

克提斯 (Curtis) 與克里斯緹娜 (Christina)

## 前言 (Preface)

人體生理學是一門探討身體功能的學問，所涵蓋的範圍從分子反應到生物體整體的運作方式。對從事身體健康相關工作的專業人員而言，人體生理學是必須了解的一門學問。我們所謂健康就是身體各系統適切運作的狀態。當任一個系統的功能出了問題，即使我們的身體具有許多自我修正的方法，但也可藉由專業人員的建議與協助而受惠。若要順利地解決問題，專業人員必須能正確地診斷出問題的癥結、給予適切的處置，並隨時掌控功能恢復的時機與狀態。這一連串的事件都要仰賴對生理學知識的了解。

我們對生理學的了解是從一個半世紀前，經過數千位醫學科學家的努力逐漸累積而來。在150年前，法國生理學家克勞德貝爾納 (Claude Bernard) 將他對身體各功能的了解，著作成一本名為基礎實驗醫學 (The Basis of Experimental Medicine) 的書。其中至今仍被廣為引用的概念是內環境 (internal environment) 以及其具有不變的特性。身體所有的細胞都浸潤在稀釋的鹽水溶液中，其成分如同遠古時代的海水。我們的身體透過調節這溶液的成分來維持細胞的生存。有一部分的生理學便是在探討身體調節此溶液的方法。直到約100年前，瓦特坎農醫師 (Walter Cannon, MD) 創出恆定 (homeostasis) 一詞來說明內環境不變的狀態。此不變的狀態並非靜止不動，而是得需要消耗能量才能維持此溶液的穩定狀態。大約50年前，偉大的生理學教師－亞瑟蓋統醫師 (Arthur Guyton, MD) 與其他生理學家運用工程學控制系統的理論與概念來解釋生理現象。負回饋控制便是他們運用來解釋生理現象的一個例子。因此直至目前為止，生理學的知識依然持續在發展中。

這幾年生理學也有許多突破性的發展，使我們了解腦與許多生理狀態影響身體其他器官或系統功能的機制。分子基因學不僅發現許多造成疾病的基因缺陷，也針對此缺陷提出處置建議。在40年前認為存在於骨骼肌肉組織的衛星細胞 (satellite cell)，現在在許多組織中也被發現，且可能與組織，甚至器官的再生與修復作用有關。生理學的知識日益擴增，醫學科學便可發展治療策略來延長並改善人類的生活品質。

《彩色圖解生理學－案例分析、評估與詳解》一書的內容涵蓋生理學所有範圍，並針對生理學課程重點以及 USMLE (美國醫師執照考試) 所需的內容將其彙整，是生理學課程的精簡輔助教材。亦是每日臨床工作時隨身重要的知識參考書籍。

這本書簡要地以重點的方式撰寫，並囊括數百張全彩的圖解來闡述生理作用的過程。

頁邊也針對一些重點議題，以文字來加以闡述，包括正常生理功能（橘色），基本生化、基因、與胚胎機制（綠色）及疾病與治療策略（藍色）。

本書有自我測驗的題目，包含學校的考試與 USMLE 題型的問題。所有的問題都有答案與詳細的解釋。這些問題可加強學生的練習、提供即時學習狀況的回饋並使讀者知道需加強的部分。

若您使用這本書，請到 [IllustratedReview@thieme.com](mailto:IllustratedReview@thieme.com) 提供您寶貴的意見與建議，供我們日後改進的參考。

## 致謝 (Acknowledgements)

這本書源自於奧克拉荷馬生理學註解 (Oklahoma Notes Physiology, 1987 到 1995) 一書。這本書由生理學科的教師共同撰寫 (作者群包括 Kirk W. Barron、Robert C. Beesley、Siribhinya Benyajati、Robert W. Blair、Kenneth J. Dormer、Jay P. Farber、Robert D. Foreman、Kennon M. Garrett、Stephen S. Hull, Jr.、Philip A. McHale、Y.S. Reddy、Rex D. Stith 與 Roger Thies)。我保留本書的大綱架構，並加入 2000 個題目編纂成 Biotest Physiology。同時由 Stephen S. Hull, Jr. 重新編寫心血管與呼吸生理學的內容。全書經 Norman Levine、Carl L. Thompson 與 Norman Weisbrodt 校閱後出版。

我要感謝下列的教師與學生，他們分別對本書不同的章節進行校閱與更新：John P. Pooler (Emory University School of Medicine)、Henry Edinger (New Jersey Medical School)、Ronaldo P. Ferraris (New Jersey Medical School)、Paul Greenman (Nova Southeastern University)、Norman Levine (Nova Southeastern University)、Nicholas Lufti (Nova Southeastern University)、Micheal Markus (Wright State University)、Kenneth D. Mitchell (Tulane University School of Medicine)、James Michael Olcese (Florida State University College of Medicine)、William H. Percy (Sanford School of Medicine at the University of South Dakota)、Dexter Speck (University of Kentucky College of Medicine)、Carl Thompson (New York Medical College)、Gabi N. Waite (Indiana University School of Medicine)、Douglas Wangenstein (University of Minnesota)、Anthony Cheng (Feinberg School of Medicine, Northwestern University)、Catherine Howard (Tulane University School of Medicine)、Chris Lee (Harvard Medical School)、Joshua Lennon (Albany Medical College) 與 Kelly Wright (John H. Stronger, Jr., Hospital of Cook County)。

在本書中，我使用許多 Thieme Flexibook 系列的圖來支持並強化本書的內容，並總結許多重點幫助加強讀者的學習。我特別要感謝 Ruediger Gay 與 Astrid Rothenburger 兩位製圖者，以及 Color Atlas of Physiology 作者 Agamemnon Despoupoulos。本書數幅主要的圖示摘自於此書。

我同時也感謝 Thieme 編輯群對本書的協助與貢獻。編輯總監—Cathrin Weinstein 與 Anne Vinnicombe 提供本書編寫最初的指導、加強本書的組織架構並使之以更多元的方式呈現。發展編輯-Rebecca McTavish 協助統整本書的資料、添增說明並賦予文字生命。發展編輯-Julie O'Meara 凸顯出本書的重點，使之更具結構性並加強臨床的關聯。發展編輯-Avalon Garcia 加強問題與解答的內容。在製作編輯 Megan Conway 指導下完成本書的最後風貌。

**Roger Tanner Thies**  
Jefferson City, MO

## 目錄 (Contents)

|          |     |
|----------|-----|
| 前言 ..... | v   |
| 致謝 ..... | vii |

### I 細胞生理學

|                 |    |
|-----------------|----|
| 1 細胞膜 .....     | 1  |
| 2 神經傳導 .....    | 16 |
| 3 肌肉細胞生理學 ..... | 22 |
| 複習問題 .....      | 31 |

### II 神經生理學

|                  |    |
|------------------|----|
| 4 自主神經系統 .....   | 34 |
| 5 感覺系統 .....     | 46 |
| 6 運動系統 .....     | 65 |
| 7 更高層的皮質功能 ..... | 78 |
| 複習問題 .....       | 82 |

### III 心血管生理學

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 8 心臟的電生理 .....             | 88  |
| 9 心臟就像個幫浦 .....            | 94  |
| 10 循環 .....                | 100 |
| 11 心血管系統對重力、運動與失血的反應 ..... | 116 |
| 複習問題 .....                 | 119 |

### IV 呼吸生理學

|                  |     |
|------------------|-----|
| 12 通氣與肺血流 .....  | 126 |
| 13 氣體交換與運輸 ..... | 136 |
| 14 呼吸的控制 .....   | 145 |
| 複習問題 .....       | 149 |

### V 腎臟生理學及酸鹼平衡

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 15 腎臟的構造、體液、腎絲球過濾與腎臟的清除作用 ..... | 152 |
| 16 腎小管的運輸作用 .....               | 162 |
| 17 水平衡的調節與尿液的濃縮及稀釋 .....        | 177 |

|               |     |
|---------------|-----|
| 18 酸鹼平衡 ..... | 183 |
| 複習問題 .....    | 194 |

## VI 腸胃生理學

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 19 腸胃道的結構與調節機制 ..... | 199 |
| 20 腸胃的運動 .....       | 205 |
| 21 腸胃的分泌作用 .....     | 214 |
| 22 消化與吸收 .....       | 227 |
| 複習問題 .....           | 237 |

## VII 內分泌生理學

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 23 內分泌生理學的一般原則 ..... | 242 |
| 24 腦下腺 .....         | 245 |
| 25 甲狀腺素 .....        | 252 |
| 26 鈣的代謝 .....        | 260 |
| 27 腎上腺激素 .....       | 269 |
| 28 內分泌胰腺 .....       | 279 |
| 複習問題 .....           | 286 |

## VIII 生殖生理學

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 29 性別分化、青春期與男性及女性的生殖功能 ..... | 292 |
| 複習問題 .....                   | 313 |

|          |     |
|----------|-----|
| 索引 ..... | 317 |
|----------|-----|

# 1 細胞膜 (The Cell Membrane)

## 1.1 細胞膜的結構 (Structure of the Cell Membrane)

### 細胞膜的組成 (Membrane Components)

#### 脂質雙層 (Lipid Bilayer)

細胞膜是由雙極結構的磷脂質 (amphipathic phospholipid) 所組成，它具有極性（親水性）的頭端以及非極性（疏水性）脂肪酸的尾端（圖 1.1）。雙極分子具有減少其疏水性部分與水分子接觸面積的傾向，因此會自然地形成脂質雙層 (lipid bilayer) 的結構。膽固醇分子在脂質雙層中影響細胞膜的流動性 (fluidity)。

#### 蛋白質 (Proteins)

嵌膜蛋白 (integral membrane protein) 包埋於脂質雙層內，部份結構暴露於細胞內液與細胞外液。大部份此類蛋白質會穿透脂質雙層數次。周邊膜蛋白 (peripheral membrane protein) 則附著於磷脂質的頭端（親水性）或其它嵌膜蛋白上。

#### 碳水化合物 (Carbohydrates)

有些寡醣分子 (oligosaccharide residue) 會接在暴露於細胞膜外的脂質或蛋白質上，形成醣脂質 (glucolipid) 或醣蛋白 (glycoprotein)。

- ▶ 醣脂質與醣蛋白皆參與維持細胞膜結構的穩定性。
- ▶ 醣蛋白也是細胞辨識與免疫反應中非常重要的物質。

### 細胞間的連結 (Intercellular Connections)

#### 緊密接合 (Tight Junctions)

緊密接合 (tight junction) 是兩個鄰近的上皮細胞互相黏著在一起。

- ▶ 真正的「緊密」接合可以防止溶質及水分子穿過細胞間的空間，到細胞的另一側。
- ▶ 「滲漏」的緊密接合則可作為溶質與水分子穿越上皮細胞層到另一側的一條通路。

#### 裂隙接合 (Gap Junctions)

裂隙接合 (gap junction) 是貫穿兩細胞，並允許細胞內物質彼此流通的通道。

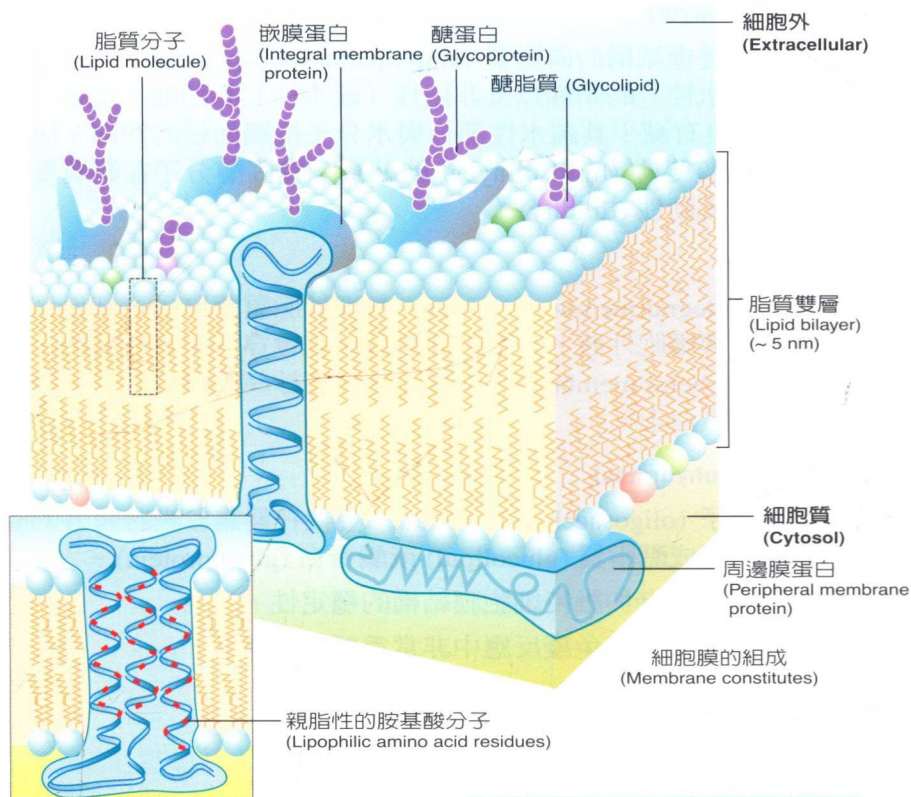
- ▶ 小分子（如離子、三磷酸腺苷酸 (ATP)、環化單磷酸腺苷酸 (cAMP) 等）能穿過裂隙接合。
- ▶ 裂隙接合亦連結細胞間的電訊號，因此這些細胞整合成一個功能性同步體 (functional syncytium)（如心肌與消化道的平滑肌）。

## 1.2 穿透細胞膜的物質運輸 (Transport across Membranes)

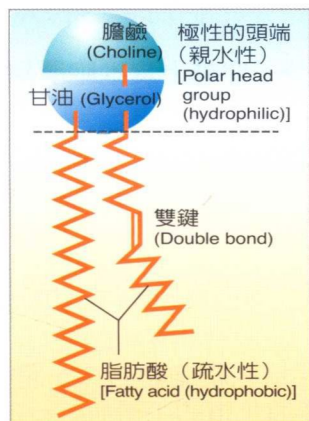
細胞膜對物質具選擇性運輸的特性使細胞能調節細胞的內含物，並執行重要的功能，例如受神經與內分泌活性控制的分泌與吸收作用。

圖 1.1 細胞膜的結構。

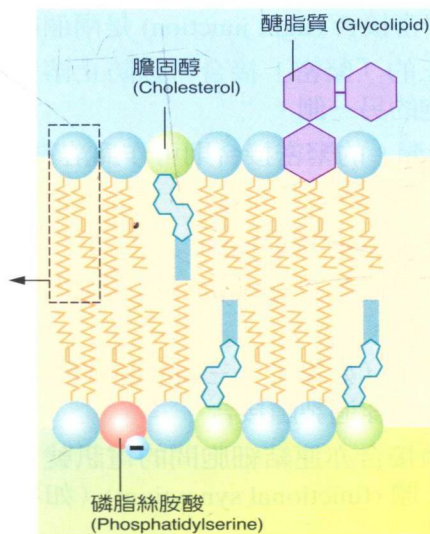
細胞膜由磷脂質雙層 (phospholipid bilayer) 組成，每個磷脂質分子都有一個甘油組成的頭端 (親水性) 以及兩個脂肪酸組成的尾端 (疏水性)。疏水性的尾端會在雙層的結構內彼此面對面地排列。嵌膜蛋白與膽固醇包埋於雙層結構內，其它蛋白則附著於細胞膜周圍。有些碳水化合物分子會接在位於細胞膜外側的脂質與蛋白質上，形成醣脂質與醣蛋白。



穿透細胞膜數次的嵌膜蛋白  
(Multiple membrane-spanning integral protein)



磷脂質 (磷脂膽鹼)  
[Phospholipid (phosphatidylcholine)]



細胞膜脂質  
(Membrane lipids)

## 自由擴散 (Free Diffusion)

自由擴散 (*free diffusion*) 是分子以隨機運動的方式由濃度高往濃度低的區域移動的現象 (圖 1.2)。

- ▶ 自由擴散不需要外加能量，因此屬於被動式的運動。
- ▶ 例如：氧分子 ( $O_2$ ) 與二氧化碳分子 ( $CO_2$ ) 穿過細胞膜順著其濃度梯度降低的方向移動的擴散作用。

## 費氏定律 (Fick's Law)

擴散的費氏第一定律 (*Fick's first law of diffusion*) 說明一個物質的淨流速 (net flow,  $J$ ) 與細胞膜通透性 (membrane permeability,  $P$ )、濃度差 (concentration gradient,  $\Delta C$ ) 與擴散面積 ( $A$ ) 成正比：

$$J = PA (\Delta C)$$

其中

$J$  是淨流速 (mmol/s)

$P$  是細胞膜通透性 (cm/s)

$A$  是面積 ( $cm^2$ )

$\Delta C$  是濃度差 (mmol/ $cm^3$ )

## 細胞膜通透性 (Membrane Permeability)

細胞膜通透性 (*membrane permeability*) 是費氏定律中的一個變項，下列的狀況可以提高通透性：

- ▶ 溶質的脂溶性越高
- ▶ 細胞膜厚度越薄
- ▶ 溶質體積越小

故脂溶性、體積小、非離子型態的物質最容易通透細胞膜 (圖 1.3)。

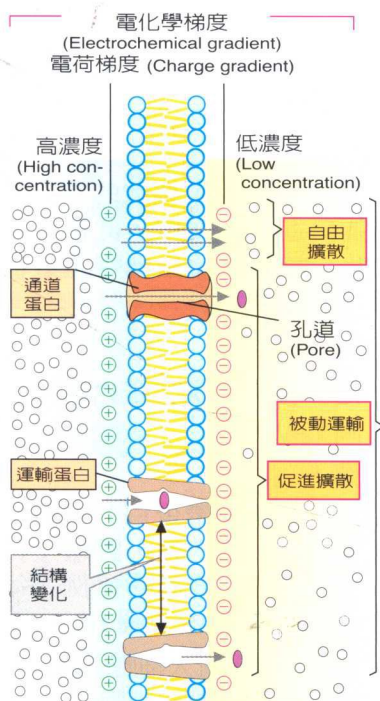
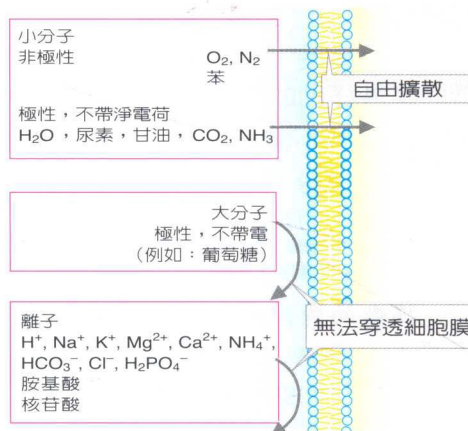


圖 1.2 被動運輸：自由擴散與單道運輸。

自由擴散是物質順著其電化學梯度的方向移動穿過細胞膜。當此移動需要藉著轉運蛋白 (或稱攜帶蛋白) 時，被稱為單道運輸 (uniport) 或促進擴散 (facilitated diffusion)。轉運蛋白是利用結構變化來執行細胞膜的物質運輸。無論是否需要轉運蛋白，這兩種穿過細胞膜的運輸作用都是被動的，因為都不需外加能量。

**圖 1.3** 細胞膜的通透性。

小的非極性分子與不帶淨電荷的極性分子能自由地擴散穿透細胞膜。大分子與帶電分子則無法自由地擴散穿透細胞膜，必須經由蛋白運輸的方式。



### 攜帶蛋白媒介的運輸 (Carrier-mediated Transport)

攜帶蛋白屬於嵌膜蛋白，可運輸親水性或體積太大無法簡單擴散穿透細胞膜的物質。它們也以比簡單擴散更快的速度運輸脂溶性物質。攜帶蛋白具有以下幾個特性：

- ▶ **選擇性 (Selectivity)**：大部分的攜帶蛋白傾向只運輸一種或一些類似的物質。
- ▶ **結合位置的競爭性 (Competition for binding sites)**：結構相似的物質會彼此互相競爭攜帶蛋白上的結合位置而抑制類似物質與攜帶蛋白的結合。例如：葡萄糖與半乳糖互相競爭腸細胞 (enterocytes) 的鈉依賴型共同轉運蛋白 ( $Na^+$ -dependent cotransporter, SGLT1) 的吸收作用。
- ▶ **攜帶蛋白的飽和性 (Saturation of carrier proteins)**：在溶質濃度高時，攜帶蛋白的運輸速率會達到它的極限而飽和，亦即當轉運蛋白數量固定時，運輸蛋白結構變化循環速率限制了它的運輸速率。

### 單道運輸 (Uniport)

單道運輸 (uniport，正式的名稱是促進擴散) 是一種藉由攜帶蛋白將物質順著其電化學梯度移動的運輸機制 (圖 1.2)。

- ▶ 不需要使用代謝能量，因此屬於被動式運輸。
- ▶ 例如：葡萄糖進入紅血球的運輸：L-葡萄糖無法以簡單擴散的方式進入紅血球，D-葡萄糖則藉由葡萄糖轉運蛋白進入紅血球，此葡萄糖轉運蛋白對其它糖分子的運輸作用非常低。當所有葡萄糖轉運蛋白皆在執行功能，D-葡萄糖的運輸速率則達到飽和狀態。

### 初級主動運輸 (Primary Active Transport)

初級主動運輸 (primary active transport) 是一種利用攜帶蛋白將物質往對抗其電化學梯度方向移動的運輸機制 (圖 1.4)。

- ▶ 需要代謝能量，使用 ATP 作為直接的能量來源。
- ▶ 例如：鈉－鉀 ATP 水解酶 ( $Na^+$ - $K^+$  ATPase，一種攜帶蛋白) 可對抗鈉離子與鉀離子的濃度梯度，分別將鈉離子打出細胞外，鉀離子打入細胞內，維持細胞內鈉離子濃度低，而鉀離子濃度高的比例。每打出三個鈉離子到細胞外就有兩個鉀離子被送到細胞內 (圖 1.5)。
- ▶ 例如：肌肉細胞的鈣 ATP 水解酶 ( $Ca^{2+}$ -ATPase) 在鈣離子流入細胞引發肌肉收縮後，可將細胞質內的鈣離子打回鈣離子儲存胞器內，或打出細胞。

#### 氫－鉀 ATP 水解酶 (又稱質子幫浦) [ $H^+$ - $K^+$ ATPase (the proton pump)]

氫－鉀 ATP 水解酶是一種位於胃臟主細胞 (parietal cell) 的穿膜的嵌膜蛋白，它可逆氫離子的電化學梯度，主動將氫離子打到胃臟腔內，並交換鉀離子進細胞 (一個氫離子交換一個鉀離子)。所需能量來自於水解一個 ATP 分子。在胃臟腔內的氫離子與氯離子則形成胃酸。質子幫浦抑制劑 (如：omeprazole) 藉由抑制氫－鉀 ATP 水解酶的活性，抑制胃酸分泌到胃臟腔，所以此藥物可用來治療消化性潰瘍 (peptic ulcer) 與胃食道逆流的疾病 (gastroesophageal reflux disease, GERD)。

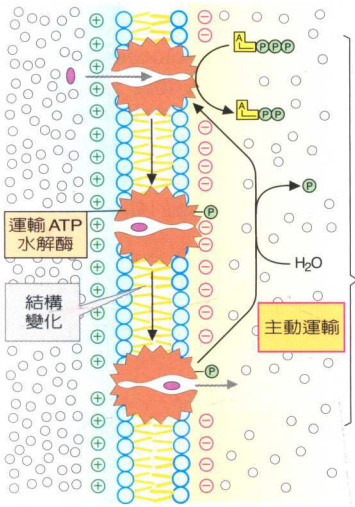


圖 1.4 主動運輸。

主動運輸是物質藉由運輸蛋白以逆其電化學梯度的方向穿透細胞膜的運輸作用。此過程需要三磷酸腺苷 (ATP) 做為能量，所以是主動運輸。此運輸蛋白（也是一種 ATP 水解酶）在細胞膜的一端與物質結合，在透過 ATP 依賴型的磷酸化反應後，造成結構改變而將物質從細胞膜的另一側釋出。

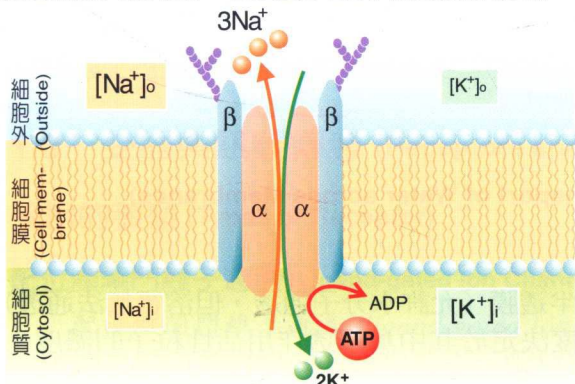
### 次級主動運輸 (Secondary Active Transport)

次級主動運輸 (secondary active transport) 是利用攜帶蛋白將一物質順著其電化學梯度移動所釋出的能量，將另一物質以逆其電化學梯度的方向運輸的作用。一物質順電化學梯度的移動提供另一物質逆電化學梯度運輸所需的能量 (圖 1.6)。鈉離子的電化學梯度通常是由鈉-鉀 ATP 水解酶幫浦來維持。

- ▶ 同向運輸蛋白 (symporters) 將不同的受質往相同的方向運輸。
  - 例如：小腸與腎臟中鈉離子與葡萄糖的共同運輸中，鈉離子被送進細胞的同時也帶著葡萄糖一起進細胞。
- ▶ 反向運輸蛋白 (antiporters) 將不同的受質以相反方向運輸。
  - 例如：紅血球細胞膜上重碳酸根-氯反向運輸 ( $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$  countertransport)。
  - 例如：心肌細胞膜上的 3 鈉-2 鈣反向運輸 ( $3\text{Na}^+ - 2\text{Ca}^{2+}$  counter-transport)。

圖 1.5 鈉-鉀 ATP 水解酶。

所有的細胞膜都有鈉-鉀 ATP 水解酶 (又稱為鈉-鉀幫浦)。它由兩個  $\alpha$  次單元與兩個  $\beta$  次單元組成。當  $\alpha$  次單元被磷酸化時造成的結構變化，形成離子運輸通路。在一個運輸的循環中藉由鈉-鉀 ATP 水解酶消耗一個 ATP，將三個鈉離子送到細胞外，並將兩個鉀離子送到細胞內。無論是鈉離子或鉀離子，都是逆其電化學梯度的方向運輸。(ADP：雙磷酸腺苷酸)



### 地高辛 (Digoxin)

地高辛是一種強心配糖體 (cardiac glycoside)，它曾經是治療心臟衰竭的第一線用藥。現今則對一些無法完全經標準化治療控制症狀的個案或進行標準化治療時併發嚴重心衰竭的個案在使用地高辛的做法有所保留。地高辛的療效與毒性皆來自於其對心肌細胞膜鈉-鉀 ATP 水解酶 (因此亦稱為毛地黃受器 (digitalis receptor)) 的抑制作用。當此幫浦受到抑制，鈉離子開始逐漸累積在細胞內，造成鈉離子濃度梯度變小，繼而影響細胞鈉-鈣的交換作用，造成鈣離子在細胞內堆積，導致細胞內有更多的鈣離子 (本來儲存在肌漿質內) 可被釋放到細胞質中，並可與細胞內執行興奮-收縮耦合程序 (excitation-contraction coupling process) 的收縮蛋白作用。在治療的劑量範圍中，地高辛可以提高心臟收縮的力量，但在致毒劑量下，地高辛抑制了鈉-鉀幫浦，也會影響鉀離子的濃度梯度：造成細胞內鉀離子濃度顯著地降低，容易導致心律不整。同樣地，細胞內過高的鈣離子或許也是加重心律不整的因素之一。