



天氣學原理

陳泰然 · 著

陳泰然著

天氣學原理

大學科學叢書⑨



大學科學叢書編審委員會

劉廣定(召集人)

王 鑫	王亢沛	呂助增	李國偉
游復熙	黃仲嘉	黃良平	黃啓穎
蔡清彥	蔡義本		

大學科學叢書⑨

天氣學原理

78.11.1055

中華民國七十八年十一月初版

保有版權·翻印必究

Printed in R. O. C.

定價：新台幣450元

著者 陳 泰 然
發行人 王 必 成

出版者 聯經出版事業公司
臺北市忠孝東路四段561號
電話：7631000-706
郵政劃撥帳戶第0100559-3號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第0130號

ISBN 957-08-0118-2

· 33015-9 ·

叢書弁言

數學、物理學、化學、生物學、地球科學及天文學等純粹科學是應用科技的基礎。但在我國，多年來這些基礎科學一直不如應用科技那樣受到政府及民間的重視。由於一些有識之士不斷地呼籲和鼓吹，從民國七十一年起，政府才漸漸認識基礎科學的重要，開始增加有關的研究發展及教育方面的經費，也訂定了一些鼓勵學者積極從事研究及優秀青年攻讀基礎科學的辦法。然而，其他方面的配合卻仍顯著不足，尤其是科學參考書之出版，幾付闕如。

國立臺灣大學前校長虞兆中先生，為著名之工程學家，一向對基礎科學十分重視，於推動科學中文化也極為熱心。自公職退休後，於民國七十四年擔任聯經出版事業公司董事長期間，鑑於坊間缺乏適當的大學程度之中文科學參考書，對初學、進修及自習者均有所不便，實有碍我國科學之發展，乃倡議出版「大學科學叢書」，邀請國內從事科學教學與研究、且對科學教育素具熱誠之學人，就教學研究心得，配合我國學生程度及需要，撰寫涵蓋基礎科學各個領域的中文書籍，提供最新素材，以供大學在校學生及社會人士參考利用。七十四年初囑廣定邀中央研究院李國偉、蔡義本，臺灣大學王鑫、王亢沛、游復熙、黃仲嘉、黃良平、黃啟穎、蔡清彥及清華大學呂助增各位先生組成本叢書編審委員會，與聯經出版事業公司編輯委員會共同規劃出版事宜。於是年

九月邀定作者，開始撰著工作。

本叢書計有數學三種、物理學四種、化學三種、生物學八種、地球科學七種、及天文學一種，分由三十餘位學有專精之有關學人撰寫。兩年來，承虞先生多方鼓勵，聯經出版事業公司充分支援，廣定謹代表本叢書編審委員會各同仁，致由衷的謝意。現各書即將開始陸續出版，謹誌始末，並祈科學界先進及海內外讀者，對本叢書的內容不吝指教是幸。

劉廣定 謹識

中華民國七十六年九月十六日
於臺灣大學化學系

自序

天氣學 (Synoptic Meteorology) 與大氣動力學 (Atmospheric Dynamics), 同為研究大氣環流系統的結構及其生成與演變過程的基礎學門。後者注重在由原因推求結果, 屬先驗的科學, 亦即屬 a Priori 取向的科學; 前者則注重在由結果追溯原因, 屬歸納的科學, 亦即屬 a Posteriori 取向的科學。兩者相輔相成, 缺一不可, 為探討大氣環流系統不可或缺的主要基本學門。天氣學既然由大氣內發生的事實 (結果) 著手去探究原因, 並由觀測結果出發, 以大氣動力學為基礎來探討大氣環流系統運作的原理, 因此也可稱為天氣動力氣象學。 (Synoptic-dynamic Meteorology)。Synoptic 一字的原意為綜觀的, 也就是在做歸納時需要綜合研判所有的觀測結果之意, 所以 Synoptic Meteorology 也可稱為綜觀氣象學。但是, 將 Synoptic Meteorology 稱為天氣學也很恰當, 因為它是一門研究與天氣 (Weather) 直接有關的學門。探討如何將天氣學原理應用到日常天氣預報作業的學門, 稱為天氣預報學。因此, 天氣學可視為大氣動力學與天氣預報學的溝通橋樑。

天氣學在研究大氣環流系統的結構及生成與演變等方面, 具有三重不同層次的任務, 它們分別為(1)是什麼 (What) 現象? (2)是如何 (how) 發生的? (3)為什麼 (Why) 如此? 大學三年級必修課程天氣學, 注重在環流系統的分析、認識及其運動學

(Kinematics) 的探討，傾向於第一重任務。本書注重在環流系統的後兩重任務，也就是傾向於現象發生與演變的詮釋 (interpretation) 與解釋 (explanation)，故定名為《天氣學原理》(Fundamentals of Synoptic Meteorology)。本書可做為具有已修習大學三年級必修課程天氣學與大氣動力學背景者的參考書，也可做為大學四年級或研究生修習 (高等) 天氣學一個學期課程的教科書。

近一二十年來氣象研究的進展非常迅速，天氣學的領域也因此大為擴張，除以大氣動力學做為其基礎外，天氣學內容更涵蓋數值模擬 / 預報、衛星氣象與雷達氣象等方面對環流系統的探討，同時也包含中高緯度與熱帶地區不同尺度環流系統的研究。本書的編寫因注重在中緯度綜觀尺度 (synoptic scale) 系統的基本原理，故對於數值模擬 / 預報、衛星氣象、雷達氣象與熱帶氣象等方面較少討論。書內盡量避免公式推導，而偏重在數學方程的物理意義探討。此外，本書圖例大多採用發生於北美地區者，此乃因該區研究結果較為豐富較易選取之故。雖然環流系統可因地理位置不同而有所差異，但其物理原理無區域限制，故選用北美圖例應不致於造成討論與理解上的障礙。唯今後修訂再版時，當考慮多多選取東亞地區案例，依其原理探討功能之外，亦具其區域特徵。

本書共十三章，可區分成三大部分。第一部分為前三章，介紹天氣學上重要的基本概念。第二部分包括第四章至第十章，探討中緯度綜觀尺度系統。第三部分為最後三章，探討垂直運動、綜觀尺度擾動在大氣環流的角色以及大氣能量學。

本書的完成，作者十分感謝臺灣大學大氣科學系 (所) 的師生們，因為他們多年來持續不斷的提供作者互切互磋的絕佳環境。感謝氣象界的先進與同仁們，因為他們不斷的督促與勉勵，才能完成此書。感謝聯經出版社特約專家審查者提供寶貴的建議

與意見，使一些錯誤得以修正，模糊得以澄清。最後更感謝維權先生的繪圖與初稿抄謄，李瑞麟、張一心與陳正剛等三位先生的校稿。

目次

叢書弁言	i
自序	iii
第一章 天氣學上有用的概念	1
第一節 座標系	1
第二節 全微分展開	2
第三節 氣流線與軌跡線	4
第四節 平衡氣流	8
第五節 非轉動性與非輻散性速度場	12
第六節 相對渦（旋）度與輻散度	16
第七節 位渦度	19
第八節 垂直速度	20
第九節 變形（度）	21
第十節 能量	23
參考文獻	24
第二章 基本物理定律及應用	27
第一節 運動方程	27

第二節	連續方程	31
第三節	理想氣體狀態方程	32
第四節	能量方程	35
第五節	相當位溫	39
第六節	相當位溫與濕靜能之比較	44
第七節	氣象之確定性預報: 數值預報	47
	參考文獻	49
第三章	氣壓與風場之垂直結構	51
第一節	氣層厚度	51
第二節	垂直風切	52
第三節	熱力風	53
第四節	地轉溫度平流	54
第四章	溫帶氣旋	57
第一節	前言	57
第二節	氣旋發展	60
第三節	氣旋發展之垂直偶合	74
第四節	以皮得生發展方程解釋實例	78
第五節	爆發性旋生	83
第六節	中間尺度低壓	88
第七節	高層冷心低壓	90
第八節	熱帶氣旋轉變為溫帶氣旋	94
第九節	背風旋生	96
	參考文獻	100

第五章	準地轉理論及其應用	105
第一節	前言	105
第二節	熱力方程	105
第三節	動力方程	108
第四節	傾向方程	111
第五節	ω 方程	116
第六節	垂直運動之分布	119
第七節	非絕熱加熱和冷卻	122
第八節	扭轉項與垂直平流項	124
第九節	準地轉理論包含皮得生發展方程	125
第十節	邊界條件	127
第六章	鋒面與鋒生	133
第一節	前言	133
第二節	鋒面之定義	134
第三節	地面鋒與高層鋒	140
第四節	鋒面之垂直剖面結構	145
第五節	鋒生	147
第六節	非地轉垂直(次)環流	160
第七節	高層鋒面系統與斜壓波	163
	參考文獻	166
第七章	高對流層之輻散場	169
第一節	理想氣流之輻散場	169

第二節	輻散度在旋生之重要性	174
第三節	噴流所伴隨之輻散場形式	175
第四節	輻散場之垂直偶合實例	180
	參考文獻	182
第八章	噴流	183
第一節	前言	183
第二節	噴流之熱力結構	184
第三節	極鋒噴流之特徵	188
第四節	副熱帶噴流	188
第五節	噴流導致之垂直環流	204
第六節	噴流與旋生	207
第七節	噴流與劇烈天氣	211
第八節	噴流與晴空亂流	218
第九節	熱帶東風噴流	220
第十節	極夜噴流	221
第十一節	低層噴流	223
	參考文獻	224
第九章	反氣旋與阻塞	227
第一節	前言	227
第二節	高壓之生成與發展	228
第三節	極地高壓之移動和轉變	231
第四節	氣團變性	232
第五節	阻塞	233
第六節	阻塞之定義標準	235

第七節	北半球阻塞之氣候特徵·····	237
第八節	行星波阻塞·····	241
第九節	海洋阻塞·····	245
	參考文獻·····	247
第十章	溫帶擾動之三維氣流型式·····	251
第一節	前言·····	251
第二節	寒潮爆發之三維氣流·····	252
第三節	溫帶氣旋之三維氣流·····	253
	參考文獻·····	257
第十一章	垂直運動之求取·····	259
第一節	前言·····	279
第二節	運動學法·····	260
第三節	熱力學法·····	266
第四節	等燄軌跡法·····	271
第五節	渦度法·····	272
第六節	準地轉($Q - G$) ω 方程法·····	277
第七節	平衡 ω 方程法·····	280
第八節	半地轉($S - G$) ω 方程法·····	282
第九節	直接觀測法·····	284
	參考文獻·····	285
第十二章	溫帶擾動在全球大氣之角色·····	289
第一節	前言·····	289

第二節	南北空氣交換與擾動演變·····	290
第三節	垂直熱量傳送和動能產生·····	293
	參考文獻·····	295
第十三章 中緯度綜觀尺度系統之能量學 ····		297
第一節	前言·····	297
第二節	基本概念·····	299
第三節	準地轉斜壓擾動之能量學·····	305
第四節	溫帶擾動之動能產生過程·····	307
第五節	能量分析方法·····	310
第六節	一些觀測資料分析結果·····	311
第七節	非絕熱過程之可用位能產生·····	318
	參考文獻·····	324
索引 ·····		329

第一章

天氣學上有用的概念

第一節 座標系

處理氣象問題使用的座標系，一般以球面座標最為適當，即地球水平面相當於座標面。自變數分別為緯度(ϕ)、經度(λ)、地心至球面距離(r)及時間(t)。但在處理地球部分區域之氣象問題時，為了方便起見，通常使用卡氏(Cartesian)座標，即採用 x 軸向東、 y 軸向北、 z 軸向上。嚴格地說，此種(x, y, z)座標已非卡氏座標，因為單位向量 \hat{i} ， \hat{j} ， \hat{k} 已非常數，而係位置之函數。

垂直座標很自然地可以採用幾何高度，但在氣象上為了方便起見(例如：簡化方程式)，常在垂直方向使用氣壓(p)座標以代替高度(z)座標。如此，自變數為 x, y, p, t ； p 軸由上向下指向氣壓較高處。因等壓面斜率在1:1,000至1:10,000之間，近似水平，故 p 軸幾乎垂直於水平面。

理論上，任一氣象參數之垂直分布若僅為氣壓(或高度)之單一值函數，則該參數即可用作垂直座標。例如：位溫(θ)可作為垂直座標。等位溫面斜率在1:100到1:10,000之間，在強烈水平溫度對比(即溫度梯度)區域和等壓面相交，故 θ 座標可較妥善分析鋒面斜壓區之梯度，即 θ 座標在鋒面區有較佳之垂直解

析度，此為 θ 座標優點之一。自Phillips (1957) 提出 σ 亦可作為垂直座標之後， σ 即為很多數值模式採用。 σ 為各層氣壓對地面氣壓做標準化所得之垂直座標，定義如下：

$$\sigma \equiv \frac{p}{p_s}; \quad p \text{ 為任一層氣壓; } p_s \text{ 為地面氣壓。}$$

$$\sigma = 0 \text{ 在 } p = 0 \text{ (即大氣層頂)}$$

$$\sigma = 1 \text{ 在 } p = p_s \text{ (即地面)}$$

$$\dot{\sigma} = 0 \text{ 在 } p = p_s; \quad 0$$

採用 σ 座標，則大氣層頂及地球表面永遠為座標面，上下邊界 ($p = 0$; p_s) 之垂直平流項為零，例如： $\dot{\sigma} \frac{\partial u}{\partial \sigma} = 0$ 。因地面變成座標面，故地形變化可自動納入而不會導致山脈附近非中差問題，亦不需有由地面高度至海平面氣壓推論的假定。因此， σ 座標在地形變化劇烈的區域特別有用。但連續方程變成預報方程，已不若使用 p 座標時之簡便。

在數值模式裏，選擇垂直座標之主要考慮有二，一為該座標是否可用最少層次來描述大氣之垂直結構，另一為該座標是否可最完善處理地形問題。有關各種不同垂直座標（例如：高度、氣壓、位溫及一般化垂直座標）之控制方程式組特徵及下邊界條件處理方式，請參閱Kasahara(1974)論文。

第二節 全微分展開

牛頓第二定律是在描述空氣塊 (air parcel) 之加速度 $\left(\frac{d\vec{V}}{dt}\right)$ 與其所受力之關係，熱力學第一定律則在描述空氣塊溫度隨時間之變化 $\left(\frac{dT}{dt}\right)$ 。此全微分或全變化 $\left(\frac{d}{dt}\right)$ ，係針對跟隨空氣塊運

