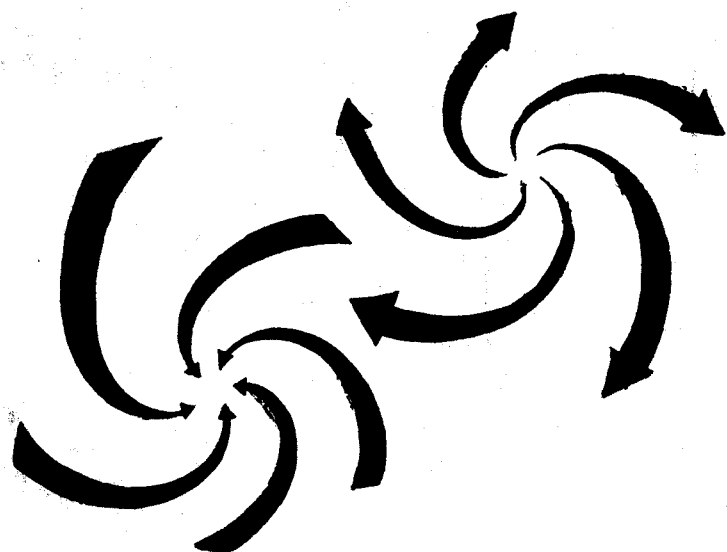


大專用書

大氣科學

殷來朝譯



大專用書

大氣科學

154/34
殷來朝譯

國立編譯館出版

序 言

本冊係因需要而著作之教科書，用以供替通常於大學中所授大氣科學之幾種基礎課程；即大學三、四年級及研究所初期程度之基礎觀察課程，大學部之物理氣象與天氣實習。本課程灌輸學生以大氣科學依據之基本物理原理，對高等課程中詳加討論之廣泛大氣現象予以初步描述及解釋。策劃本書時已假定選讀本課程之學生已具有大學一年級微積分及普通物理基礎，並在高中修畢化學。

本書材料幾就物理氣象與動力氣象完全平均分配。物理氣象之一般範圍內介紹大氣流體靜力學與熱力學之基本原理，雲物理與輻射傳送（分別列第二、四、六章）。此外，並加入大氣化學，氣懸膠體物理學，大氣電學，高空氣象學及物理氣候學內之特選課題。動力氣象之範圍包括大規模大氣運動（特別著重於中緯度）之描述，基本方程之介紹與大氣環流之初步解釋（分別列第三、八、九章）。討論雲物理與風暴（第五章）時，曾揉合取自物理及動力氣象之材料。安排各章時並特將天氣學置於本書開始部份（第三章），俾將若干基本觀察課程中重要之天氣圖討論介紹納入。

本書共分為九章。大部基本理論性材料係包括於偶數（二、四、六及八）章。第一、三章幾全屬描述性，第五、七、九章主要為解釋性。奇數章內之大部材料可直接由指定參考書中獲得，尤以研究所課程為然。但既使廣泛指定參考書，作者亦認為類此篇幅之教科書，幾不可能於一學期中授畢，尤以作大學部課程時，更屬如是。為求本書能適合此項課程使用，作者特將涉及理論各章加以編排，故可將最難之節段予以省略，而不致嚴重損害其連貫性。此等節段利用腳註標明。其他各章描述與解釋性的材料，講授者亦可自行考慮刪略。

2 序

本冊包含 150 個計算題與 208 個問答題，由之可瞭解各項基本物理原理在大氣科學問題上之應用。此外尚有 48 個計算題附有答案。作者命題時特將數學運算減至最低限度以着重於物理原理之正確應用。計算題求解所需之通用常數與其他數據附於Ⅷ至Ⅺ頁。

值得注意者為各章末所命之若干計算題，須經學生獨立思考。作者認為此等習題對鼓勵教室中討論及幫助學者準備考試，均甚有用。

本書中所常援引之國際單位體系（簡稱SI單位），皆已經由大氣科學界所接納，此單位與符號表列於第Ⅷ頁至Ⅺ頁。

書中含有傳記註腳，將對大氣科學具有重大貢獻之科學家之生活與事績加以概括介紹。文雖簡短，作者希望能使學生體認氣象學歷史之長久以及其在物理科學內具有之穩固基礎。但在原則上註腳中僅包括去世或退休之科學家。

作者對華盛頓大學與國家科學基金會（National Science Foundation）特致謝意，因其在吾等教學、研究與學術活動等之支助對此著作均有貢獻。寫此書時作者之一（J.M.W.）曾獲准前往蘇聯新西伯利亞（Novosibirsk）之蘇維埃科學院之計算機中心作為期六個月之交換訪問，並由美國大氣科學國家中心（U.S. National Center for Atmospheric Science）高級研究計劃援助至該中心訪問一年。上述二機構之職員及客座人員對本書之科學內涵均有貢獻。此外科學界若干其他人員亦曾提供協助與指導，特併致謝。

吾等對系中同仁尤加感謝，彼等為精神支援之不斷泉源，提供建設性之批評及鼓舞性之新觀念。最後對協助整理多次前稿及最後稿之各位先生小姐表達誠摯謝意。

J. M. W.

P. V. H.

單位與常用數據

書中所用單位均符合國際單位體系 (Système International d'Unités) (即 SI 體系)，該體系即為國際所公認之公尺制。

量	單位名稱	符號	定義
基本單位			
長度	公尺	m	
質量	公斤	kg	
時間	秒	s	
電流	安培	A	
溫度	愷氏 (Kelvin) 度	°K	
導出單位			
力	牛頓 (newton)	N	Kgms^{-2}
壓力	巴斯可 (pascal)	Pa	$\text{Nm}^{-2} = \text{Kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$
能量	焦耳 (Joule)	J	$\text{Kgm}^2\text{s}^{-2}$
功率	瓦特 (Watt)	W	$\text{Js}^{-1} = \text{Kgm}^2\text{s}^{-3}$
電位差	伏特 (Volt)	V	$\text{WA}^{-1} = \text{Kgm}^2\text{s}^{-3}\text{A}^{-1}$
電荷	庫倫 (coulomb)	C	As
電阻	歐姆 (ohm)	Ω	$\text{VA}^{-1} = \text{Kgm}^2\text{s}^{-3}\text{A}^{-2}$
電容	法拉 (farad)	F	$\text{AsV}^{-1} = \text{Kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^4\text{A}^2$
頻率	赫茲 (hertz)	Hz	s^{-1}
攝氏溫度	攝氏度	°C	$^{\circ}\text{K} - 273.15$
溫度差距	度	deg 或 °	K 或 C 不必指明
可採用者			
容積	公升 (liter)	L	10^{-3}m^3

2 單位與常用數據

氣壓	毫巴(millibar)	mbar	10^2 Pa
		(本書中 簡寫 mb)	

下列英文前置字(prefixes)用以十進乘各項單位

倍數	前置字	符號	倍數	前置字	符號
10^{-1}	deci	d	10	deca	da
10^{-2}	centi	c	10^2	hecto	h
10^{-3}	milli	m	10^3	kilo	k
10^{-6}	micro	μ	10^6	mega	M
10^{-9}	nano	n	10^9	giga	G
10^{-12}	pico	p	10^{12}	tera	T
10^{-15}	femto	f			
10^{-18}	atto	a			

常用數據

通用常數

通用氣體常數(R^*)	$8.3143 \times 10^3 \text{ J deg}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$
波爾茲曼(Boltzmann)常數(k)	$1.381 \times 10^{-23} \text{ J deg}^{-1} \text{ molecule}^{-1}$
亞佛加德羅(Avogadro's)數(N_A)	$6.022 \times 10^{26} \text{ R mol}^{-1}$
史蒂芬波爾茲曼(Stefan - Boltzmann)常數(σ)	$5.6696 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ deg}^{-4}$
蒲郎克(Plank s)常數(h)	$6.6262 \times 10^{-34} \text{ J s}$
光速(c)	$2.998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
真空中之誘導率(Permittivity)	$8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

地球

平均半徑 (R_E)	$6.37 \times 10^6 \text{ m}$
地球表面重力加速度 (g_0)	9.81 ms^{-2}
旋轉角速度 (Ω)	$7.292 \times 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$
太陽至地球表面平均距離(d)	$1.50 \times 10^{11} \text{ m}$
在一距離太陽 d 之垂直平面上之太陽照射度 (irradiance)	$1.38 \times 10^3 \text{ W m}^{-2}$
乾空氣	
視分子量 (apparent molecular weight)	28.97
氣體常數 (R_d)	$287 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 與 1000mb 壓力下之密度 (隨 P / T 而變)	1.275 kg m^{-3}
定壓比熱 (C_p)	$1004 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
定容比熱 (C_v)	$717 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 時之導熱係數 (不隨氣壓改變)	$2.40 \times 10^{-2} \text{ J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-1}$
水	
分子量 (M_w)	18.016
水汽氣體常數 (R_v)	$461 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 時液體水之密度	$1.000 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
0 °C 時冰之密度	$0.917 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
定壓水汽比熱	$1952 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
定容水汽比熱	$1463 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 時液體水比熱	$4218 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 時冰之比熱	$2106 \text{ J deg}^{-1} \text{ kg}^{-1}$
0 °C 時汽化潛熱	$2.500 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$
100 °C 時汽化潛熱	$2.25 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$
0 °C 時熔解潛熱	$3.34 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}$

目 錄

序言

單位與常用數據

第一章 大氣之簡要觀察

1—1	引言.....	1
1—2	大氣之由來與成分.....	4
1—3	大氣質量與氣體成分之分佈.....	12
1—4	大氣中之帶電質點.....	18
1—5	溫度分佈.....	24
1—6	地球大氣內之風.....	31
1—7	降水.....	41
	習題.....	49

第二章 大氣熱力學

2—1	氣體定律.....	53
2—2	流體靜力方程與其應用.....	59
2—3	熱力學第一定律.....	69
2—4	潛熱.....	76
2—5	絕熱過程.....	76
2—6	大氣中之水汽.....	81
2—7	穩定度概念.....	94

2 目錄

2—8	熱力學第二定律與熵.....	101
2—9	熱力函數與平衡條件.....	117
	習題.....	121

第三章 溫帶綜觀天氣幅度擾動

3—1	500 mb 氣流.....	131
3—2	地面天氣要素.....	134
3—3	地面天氣報告解說.....	145
3—4	高層結構.....	154
3—5	厚度及其與垂直結構之關係.....	163
	習題.....	168

第四章 大氣中之氣懸膠體與雲之微物理過程

4—1	大氣中之氣懸膠體.....	174
4—2	水汽凝結之成核.....	192
4—3	暖雲之微結構.....	204
4—4	暖雲中雲滴之增長.....	206
4—5	冷雲之微物理.....	224
4—6	雷雨.....	252
	習題.....	260

第五章 雲與風暴

5—1	雲之形態.....	271
5—2	氣團雷雨.....	291
5—3	劇烈風暴.....	302
5—4	颶風.....	316

5-5	溫帶氣旋風暴.....	318
5-6	雲之人工改造與降水.....	329
	習題.....	343

第六章 輻射傳送

6-1	輻射譜.....	349
6-2	分子對輻射之吸收與發射.....	351
6-3	輻射之定量論述.....	354
6-4	黑體輻射.....	358
6-5	吸收率與發射率.....	363
6-6	大氣對太陽輻射之吸收.....	370
6-7	大氣對紅外輻射之吸收與發射.....	378
6-8	太陽輻射之散射.....	383
6-9	輻射傳送在全球能量平衡上擔任的角色.....	386
	習題.....	388

第七章 全球能量平衡

7-1	全球平均大氣能量平衡.....	397
7-2	高層大氣之能量平衡.....	406
7-3	對流層之能量平衡.....	415
7-4	地球表面之能量平衡.....	425
7-5	能量平衡之時間變化.....	429
	習題.....	445

第八章 大氣動力

8-1	坐標系.....	455
-----	----------	-----

4 目錄

8-2	旋轉坐標系中之視似力	460
8-3	真力	468
8-4	水平運動方程	473
8-5	垂直運動方程	484
8-6	溫度風	485
8-7	熱力能量方程	492
8-8	連續性方程	501
8-9	基本方程	512
	習題	515

第九章 大氣環流

9-1	引言	521
9-2	無旋轉時之熱推動環流	523
9-3	行星旋轉對熱推動環流之影響	529
9-4	熱帶內之熱推動環流	535
9-5	斜壓擾動	543
9-6	動能之消散	551
9-7	動能循環	556
9-8	大氣環流在水文循環中所擔任的角色	559
9-9	大氣對能量之輸送	561
9-10	大氣類似熱引擎	563
	習題	565

第一章 大氣層之概觀

1—1 引言

大氣科學包括若干有關與重疊之學科，旨在描述與瞭解地球與其他行星上大氣中之現象。傳統上大氣科學被分為二門：氣象學（原自希臘字 *meteoros* 意為高及 *Logos* 原意為推想）涉及大氣現象與其隨時間而變之狀況，氣候學涉及大氣形成氣候（舉例言之，可測計量如溫度之平均值與變距，各種事象如降雨與強風之頻率，為地理位置、季節、及一日各時之函數）之長期統計特性。

傳統上氣象學又被分為三大部門：物理氣象、天氣學及動力氣象。物理氣象討論大氣結構與成分，電磁輻射與聲波在大氣中之傳送，成雲致雨所涉及之物理過程，與物理及化學有密切關係之其他廣泛問題。晚近物理氣象學中復發展出超高層大氣學（*aeronomy*），專門討論高層大氣中之現象。天氣學研究大幅度大氣運動之說明，分析與預報。自約本世紀起始創立觀測網供應大範圍同時（綜觀）天氣記錄後，始奠定以經驗作天氣分析與預報之基礎。動力氣象學亦係研討大氣運動及其時間演變，其與天氣學不同處係以流體動力學原理從事分析。隨同天氣分析與預報方法之進展，天氣學與動力氣象學之差異迅速減少。真正僅有之純動力氣象學家為不知天氣圖為何物者，而真正僅有之純天氣學家則為從不使用控制大氣運動之方程者！兩者均漸趨絕跡。

氣候學亦可劃分為若干門。最基本之劃分大致為物理氣候學研討

形成氣候之原因；氣候誌 (climatograph) 研究如何將氣候統計以全球性、地區性、局地性與微地區性簡化表達；應用氣候學研討如何應用氣候統計以解決實際問題。各種範圍之氣候顯然均係取決於氣象過程。因之物理氣候學與氣象學間目前所存之區分並分指明二者有任何明確分野，而大部係緣於二者個別歷史發展之反映。由於對氣候亦係改變認識之增多，氣象學與氣候學之分別亦遠為減少。多數氣象現象必須視同時間有關問題處理，氣候學亦不能再僅靠單純之統計蒐集全部決定其特性。

一如大氣科學中各部門之分界已漸趨不清，大氣科學與其他科學從事者亦不似以往之孤獨。茲舉數例：

- 超高層大氣學家，太陽物理學家，太空物理學家研究太陽擾動所生之機構對地球高層大氣中所產生多種現象。
- 重研寫地球之氣候史須由大氣科學家，地球化學家，地質學家，海洋學家與冰河學家之通力合作。
- 大氣與海洋之相互作用已為大氣科學家與海洋學家更行重視。
- 應用數學家及電子計算機專家從事研究涉及模型之大氣問題者，人數日多。
- 空氣污染問題需具有大氣科學，氣懸膠體物理學與化學智識之專家。
- 其他行星大氣，以往僅為思考課題，目前正在由實驗，遙測技術，太空探測及理論方法加以研究。

目前大氣科學之能活躍有力，乃因人造衛星技術日趨進步，使科學家可從太空中理想地點對全球大氣獲得前所未有之觀測與監視，而對更複雜與科學性問題加強重視（參閱 1-1 圖），且高速計算機使以數值模型處理複雜之物理問題變為可能。此等新觀測與計算工具提供解決複雜與科學問題之基礎，甚至在十年前均無法辦到。

大氣科學增長之大量智識正廣泛應用於許多實際問題，包括



圖 1-1 1975 年六月 12 日 1700 GCT (格林威治民用時) 在反射的可見光輻射中所看到的地球攝影。(NOAA 衛星攝)

- 預報影響人類活動之大氣現象(例如逐日天氣、飛機危險、乾旱、劇烈風暴，高層大氣中發生中斷無線電信情事)，
- 估量人類活動對大氣環境之衝擊(例如地區空氣污染、大氣成分、天氣與氣候之不良改變)。
- 局部範圍內某等選定物理過程之有利改變(例如除霧、退雹、增加或重分配降水)，與

提供基本大氣統計以供長程計劃需要（例如土地利用、建築物設計、飛機與太空船規範）。

本書內將納入目前跨入大氣科學之廣泛與科學性工作同時對大氣科學傳統教育所本之基本觀念予以相當深度之闡述。

1—2 大氣之由來與成分

地球上之大氣與太陽上者相較顯然缺少稀有（noble）氣體（氦、氖、氬、氪與氙）。解釋地球大氣缺少此等元素之學說頗多。一般相信若非地球形成時因某種途徑有系統地排除氣體（例如類似隕石凝聚小塊固體物質）（註①），即為於地球形成後原有大氣中之氣體物質迅速消失。不論在何種情況下可能在 4.5×10^9 年前或略後地球形成時可能並無大氣。目今吾人所觀察到之大氣相信係因火山活動時自內部排出之揮發性物質，如圖 1—2 所顯示。

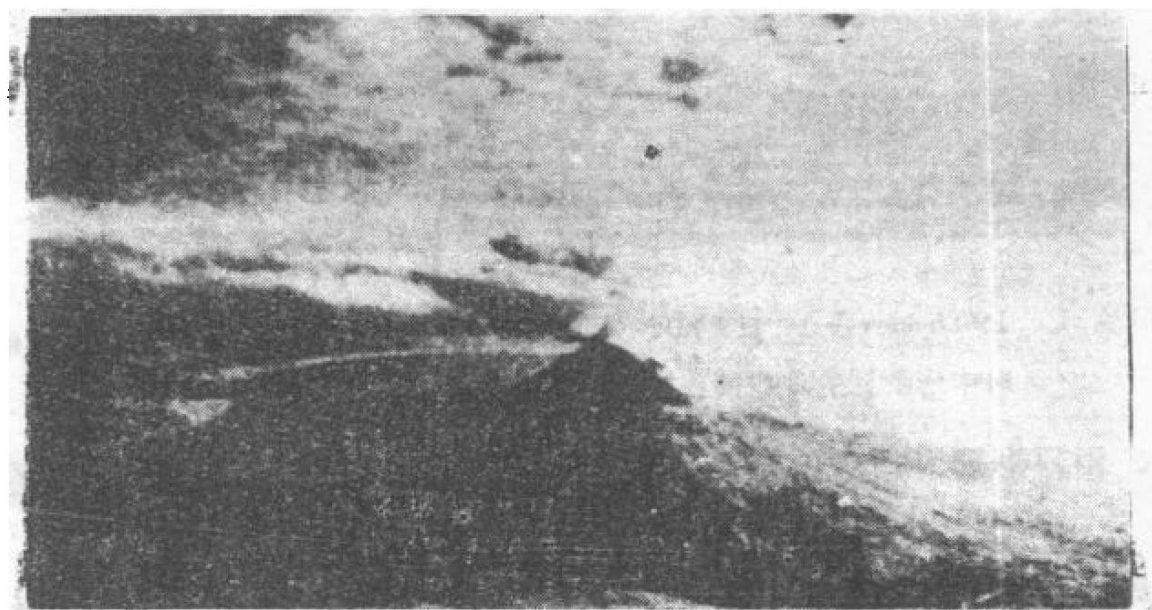


圖 1—2 阿拉斯加之聖·奧古斯丁（St. Augustine）火生在 1976 年二月一次大爆發之後的噴射。（L. F. Radke 攝）

註①：此等物質大約包括少量揮發性物質（在目前地面溫度範圍內可能呈氣體之物質）如水，可能為水或與固體物化合。

在活動火山可噴距離內任何人均難相信吾人已知之大氣與所放出之原物質二者有相似之處。目前大氣就質量論約為氮 76 % 與氧 23 % 如表 1 - 1 所示。而火山發出之氣體為約含水汽 85 %，二氧化碳 10 % 與不及 5 % 氮與硫或硫化合物（二氧化硫與硫化氫）。其中顯無自由氧。

表 1 - 1

100 公里以下地球大氣之成分

成 分	分 子 量	含 量
		(佔全部分子之分數)
氮 (N_2)	28.016	0.7808 (就質量論 75.51 %)
氧 (O_2)	32.00	0.2095 (就質量論 23.14 %)
氫 (A)	39.94	0.0093 (就質量論 1.28 %)
水汽 (H_2O)	18.02	0 - 0.04
二氧化碳 (CO_2)	44.01	325 p. p. m. (parts per million)
氖 (Ne)	20.18	18p. p. m.
氦 (He)	4.00	5p. p. m.
氪 (Kr)	83.7	1p. p. m.
氙 (H)	2.02	0.5p. p. m.
臭氧 (O_3)	48.00	0 - 12 p. p. m.

欲瞭解如何由地球內部排出之揮發性物質形成目前大氣，必須不以大氣為獨立之整體，而為一個聯合體系之一環，該體系包括水界 (hydrosphere) (地球表面上所有水質之全部質量)，生物界 (biosphere) (所有動物與植物) 以及陸界 (lithosphere) 之沉積部份 (地殼)。此聯合體系中之全部揮發性質量約為地球質量之 0.025 %。此外亦應牢記另一重要事項，即大氣之質量與其他二環相較極為微小，舉例言之其質量僅為水界之 1 / 300。

1 — 2 — 1 水界之生成

火山爆發時噴入大氣中之水汽，大氣僅能存留其極小部份，此點將於 2 — 6 節討論。因之最早地球上火山活動必曾成雲致雨，而造成地面上大量水體。現今水界情況經查列如表 1 — 2。

表 1 - 2
水界組成表^{a, b}

項 目	水界質量之百分比
海 洋	97.
冰	2.4
淡水 (地下)	0.6
湖泊、河流等之淡水	0.02
大 氣	0.001

a. 地面上之全部質量 = $1.36 \times 10^{21} \text{ kg} = 2.66 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2}$

b. 資料來源：藍布 (H. H. Lamb) 氣候：目今、過去與未來 (Climate: Present, Past and Future)。Methuen Co. Ltd; London 出版 1972，482 頁