

大氣的組成和結構

1-1 大氣的成分

1-3 大氣的垂直分層

1-2 大氣的密度和氣壓

廣義的地球不僅指固體的岩石圈、液體的水圈部分，也應包括氣體的氣圈在內，我們在第一冊已經開宗明義說明過。但因人類生活在空氣中如此自然，常令我們忽略了它的存在。其實，我們和大氣的關係真是息息相關，不可須臾或離的。本冊內容以地球的大氣部分為對象，來認識它的基本性質、變化現象，以及和人類生活的種種關係。

本章先介紹大氣的組成，其次介紹何以氣象會變化無窮？這需要從三項基本熱力變數——密度、氣壓和氣溫開始說起。氣溫所涉較廣，所以另立一章，但不可誤會它可以獨立於其他兩項之外。本章最後要討論大氣的垂直分層。氣圈固然是一個整體，不容分割，但大氣科學家為了討論方便和研究上的需要，常就其特性分成若干層來分別處理。

1-1 大氣的成分

1-1.1 大氣和空氣

所謂**大氣**是指包圍在星體外面的一層氣體。但除非特別指明，我們所提到的大氣都指地球大氣而言。

如果我們從大氣取來一些樣本，除去懸浮其中的雜質後，就是空氣。組成大氣的實體固然是空氣，但是這兩個名詞並非同義語，因為討論時所著眼的空間尺度大有不同，其間的關係類似海洋和海水、地殼和岩石。

1-1.2 主要成分

空氣是多種氣體的混合物，在大約 80 公里以下的低層大氣中混合得十分均勻，而且各種成分氣體的混合比例多數非常固定，只有少數特殊氣體的含量因時、因地而變化不定，其中尤以水汽為最。

假定以沒有水汽的乾空氣來分析它的成分，氮、氧、氫、二氧化碳四種氣體的容積百分比就超過了 99.997。

1-1.3 變動氣體

氮和氧雖然是組成空氣的主要成分，但在氣象意義上，它們的重要性卻遠不如為量甚微的三種所謂變動氣體：水汽、臭氧和二氧化碳。其中尤以水汽含量的變動最大，在 0.0~4.0% 之間，它是造成天氣現象的主角，也是吸收絕大部分長波輻射（紅外線）的能手，詳細情形將在第三章再作說明。

二氧化碳的含量平均在 0.033%，它在生物圈的循環是動、植物賴以生存的主要機制，在氣象意義上也能吸收地球發射出去的長波輻射，而擔任能量收支平衡的重要角色。不幸的是，人類正在介入二氧化碳的自然循環中，使它在大气中的含量有逐漸增加的趨勢，影響所及，可能破壞整個地球的熱平衡，而導致全球性的氣候、農業、經濟各方面的巨變。

至於臭氧雖然為量極微，而且集中在高度 20~30 公里處，它的容積百分比只有 $0.1\sim 0.2\times 10^{-4}$ ，卻能有效地吸收來自太陽的短波輻射（紫外線），使其不致長驅直入到達地球表面，否則絕大多數生物都難倖存。

現在我們把低層大氣內固定成分和變動成分中較重要的幾種氣體及其含量百分比列如表 1-1。

表 1-1 低層大氣的重要成分

固 定 成 分		變 動 成 分	
氣體名稱	容積百分比	氣 體 名 稱	容 積 百 分 比
氮 (N ₂)	78.084	水汽 (H ₂ O)	0~4
氧 (O ₂)	20.946	二氧化碳 (CO ₂)	0.033
氬 (Ar)	0.934	臭氧 (O ₃)	0~0.07×10 ⁻⁴ (地面) 0.1~0.2×10 ⁻⁴ (20-30公里)
		二氧化硫 (SO ₂)	<1×10 ⁻⁷
		二氧化氮 (NO ₂)	<0.02×10 ⁻⁷
		一氧化碳 (CO)	2×10 ⁻⁵

表中所列其他變動氣體如 SO₂、CO 等所占比例本來都微不足道，但自從進入工業時代後，這類有毒氣體因人為因素而大量增加，製造出空氣污染問題，是值得重視的研究課題。

1-1.4 氣懸膠體

懸浮在空氣中的雜質也應該算是大氣的組成成分。它們大多是固體微粒，名目繁多，種類各異，其量因時、因地而變動很大，總稱**氣懸膠體**。它們包括各種微粒，例如塵土微粒、森林火災產生的煙燼、火山灰、工廠和汽車排出的煤煙和廢氣、花粉和微生物，以及從海水來的細鹽粒等。其中廢氣是空氣污染的主要來源，它和工業化有密切關係。大氣中氣懸膠體太多時，可能阻止一部分太陽輻射到達地面，而使氣溫降低，影響氣候；近地面的微塵則會減低能見度而影響交通安全。其實氣懸膠體對人類也有益處，因為它們是良好的凝結核，可幫助水汽凝結，成雲致雨而有利民生。

習題 1-1

1. 人類能否影響空氣的組成成分？試舉一例說明這種人為過程。
 2. 請將組成空氣為量最多的四種氣體分別計算其質量百分比（計算至小數兩位）。
-
-

1-2

大氣的密度和氣壓

大氣科學研究的對象是大氣，它可以視為理想氣體，我們可用理想氣體的基本定律來了解大氣的主要熱力性質。

描述一定質量某種氣體的熱力狀態，我們只需用少數物理量，如容積（ V ）、溫度（ T ）、壓力（ p ）就足夠了。但在研究大氣現象時和在實驗室中不同的是容積很難測量，也不易控制。所以改用密度來代替容積，因為密度是單位容積內所含的質量

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-1)$$

以上所述的 V （或用 ρ ）、 T 、 p 都是最基本的熱力變數。三者之間的相互關係可用一個十分簡單的方程式來表示，稱為理想氣體的熱力狀態方程式，簡稱狀態方程式。

1-2.1 狀態方程式

狀態方程式從實驗得來，是波以耳定律和查理定律（或稱給呂薩克定律）的聯合。波以耳定律說在定溫下定量氣體的壓力與容積成反比，

$$pV = \text{常數} \quad (1-2)$$

查理定律則說：在定壓下，定量氣體的容積和溫度成正比，

$$\frac{V}{T} = \text{常數} \quad (1-3)$$

其中的T以絕對溫度來表示 ($T^{\circ}\text{K} = 273 + t^{\circ}\text{C}$)。

如果用氣體分子莫耳數 n 表示氣體量，以上兩式便可寫成一個方程式

$$pV = nRT \quad (1-4)$$

其中 R 是一個常數，適用於任何理想氣體，所以稱為**通用氣體常數**，其值可在標準狀況 (STP) 下，代入各變數定值而計算得之。如果用國際公制單位表示， R 為 $8,314 \text{ 焦耳} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{千克莫耳}^{-1} (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kgmol}^{-1})$ ；若以公分克秒 (cgs) 制單位表示，則為 $8.314 \times 10^7 \text{ 厄格} \cdot \text{度}^{-1} \cdot \text{莫耳}^{-1} (\text{erg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$ 。

(1-4) 式可略加改變，使其更能適合於大氣研究。

假設容積為 V 的氣體質量是 M ，而該氣體分子量是 m ，則 $n = M/m$ ，代入 (1-4) 式後成爲：

$$pV = \frac{M}{m} R T \quad (1-5)$$

再用 (1-1) 式關係改寫爲：

$$p = \rho \frac{R}{m} T \quad (1-6)$$

這就是大氣科學所適用的狀態方程式了。

有時我們令 $R' = R/m$ ，上式就可寫成 $p = \rho R' T$ ， R' 稱爲**個別氣體常數**，因爲它不是通用的常數，而是個別氣體特有的常數。例如氫的個別氣體常數爲：

$$R'_{\text{H}_2} = \frac{R}{m_{\text{H}_2}} = \frac{8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kgmol}^{-1}}{2 \text{ kg} \cdot \text{kgmol}^{-1}} = 4,157 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

R'_2 通常簡寫爲 R'_{H_2} 。

1-2.2 乾空氣的個別氣體常數

如果將 (1-6) 式用在乾空氣上，立刻就遭遇到一個問題：乾空氣是

一種混合氣體，怎麼可能有分子量呢？因為乾空氣的組成比例非常固定，所以可設法利用道耳吞分壓定律求出平均「分子量」 m_d 來，

$$m_d = 28.966$$

適用於乾空氣的狀態方程式便成爲：

$$p = \rho \frac{R}{m_d} T = \rho R_d T \quad (1-7)$$

其中 R_d 指乾空氣的個別氣體常數，約爲 $287\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

1-2.3 大氣的密度

密度是大氣三個基本熱力變數之一，但它遠不如壓力、溫度之容易被測定，所以常由 p 、 T 的觀測值藉狀態方程式而間接求得。

我們在日常生活中，常常直接感受到壓力、溫度的變化及其影響，但很少感受到密度的影響。可是在任何大氣物理方程式內，密度仍是不可少的變數。

在一個大氣壓和 15°C 的海平面正常狀況下，乾空氣的密度約爲 1.23 公斤／公尺³，僅及水密度的八百分之一。濕空氣因含有密度較低的水汽，所以其密度比乾空氣爲低。

大氣的密度常隨時間與空間而有所不同，尤以垂直方向的變化最大。例如，在離地 18 公里處，密度約減爲海平面的 $1/10$ ，在 35 公里處約爲 $1/100$ ，在 50 公里處約爲 $1/1,000$ ，而在 100 公里處則只有 $1/2,500,000$ 了。可見大氣的質量集中在底層。

1-2.4 氣壓

氣壓是大氣所施的壓力，氣壓值之大小由所在高度以上的空氣柱重量所決定，所以氣壓永遠隨著高度而減低，兩者之間具有一定的關係，利用氣壓計可以估計山地或飛機的高度。

氣壓是觀測最多、應用最廣的一項氣象要素。它和天氣變化的相關

性，早為人們所察覺，所以從前也用氣壓計做為晴雨計，以推測天氣。

根據壓力的定義，氣壓的單位可用任意一組力和面積的單位來表示。例如在力學上：

MKS 制，用牛頓／公尺²

cgs 制，用達因／公分²

在實用上：

水銀柱高度：公分、公釐、吋

氣象應用：毫巴（1 毫巴 = 10^3 達因／公分²）

更有以大氣壓本身為氣壓單位的，所謂一個大氣壓（atm）是指 760 公釐高的水銀柱，在緯度 45° 的海平面（ $g = 9.806$ 公尺／秒²）上，溫度為 0°C 時所施的壓力。大氣壓單位不僅用於氣象，也廣為化學界、工業界所採用。

現在我們來計算一個大氣壓等於多少力學單位，

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= (0.760\text{m}) \times (1.359 \times 10^4 \text{kg m}^{-3}) \times (9.806 \text{m sec}^{-2}) \\ &= 1.0133 \times 10^5 \text{Nm}^{-2} \end{aligned}$$

如果換算成其他單位，其間關係如下：

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 1.0133 \times 10^5 \text{Nm}^{-2} \\ &= 1.0133 \times 10^6 \text{dyne cm}^{-2} \text{（力學應用）} \\ &= 1,013.3 \text{mb} \text{（氣象應用）} \end{aligned}$$

雖然現在各國都提倡國際公制，但因習慣和過去紀錄等因素，大氣科學中仍有很多物理量沿用 cgs 制，甚至還有沿用英制或其他單位的。上述氣壓就是一例，航空界至今仍用吋表示，而天氣圖上卻慣以毫巴來表示。

1-2.5 氣壓的垂直和水平分布

氣壓隨高度而減低的變化很快。以海平面的標準氣壓作為一個大氣壓（1,013.3mb），到離地 16 公里高度時只賸 1/10，30 公里處賸 1/100，50 公里處氣壓已不足 1 mb，僅及地面的千分之一弱了。

相對而言，氣壓在水平方向的變化要小得多，大約只有垂直變化的萬分之一。所以除極端情形外，海平面的氣壓變化一般在 980 到 1,040 毫巴之間。

由於氣壓高低的分布，會產生大氣的運動，進而形成不同的天氣現象，這些將在第四、第五章內加以討論。

習題 1-2

1. 試自氣體的標準狀況（ $T=273\text{K}$ ， $p=1.0133\times 10^6$ dyne/cm²），計算通用氣體常數 R 值。
 2. 在海平面正常狀況下，乾空氣的密度用 cgs 制表示約為多少？（ $T=15^\circ\text{C}$ ， $p=1$ atm）
 3. 飛機上的高度計實際上是何種儀器？它利用什麼原理測出飛行中的高度？
-

1-3 大氣的垂直分層

大氣圈沒有一定的上限，因為空氣隨高度而逐漸稀薄。到了五、六百公里以上，由於空氣質點的密度已經太小，彼此碰撞機會極少，部分質點就此一去不返，逃離地球。這一部分最外圍的大氣圈稱為外氣層。

由於觀點不同，大氣的分層有好幾種標準，例如前面提過80公里以下的大氣成分混合得很均勻，80公里以上的高層大氣則不然，故可分別稱為**均勻層**和**不均勻層**，這是從組成的觀點來分的。也有從物理、化學過程的不同性質而分，則有**臭氧層**、**電離層**、**中性層**、**光化層**等名詞。但是最常用的一種分層是以溫度的垂直分布為畫分標準的，自地面向上依序可分為**對流層**、**平流層**、**中氣層**、**熱氣層**等四層（參閱圖 1-1）。事實上各層之間的界限並不能截然畫分，各層頂的高度也隨著時間和地點常有變動，圖

中所示只是一種平均情況而已。

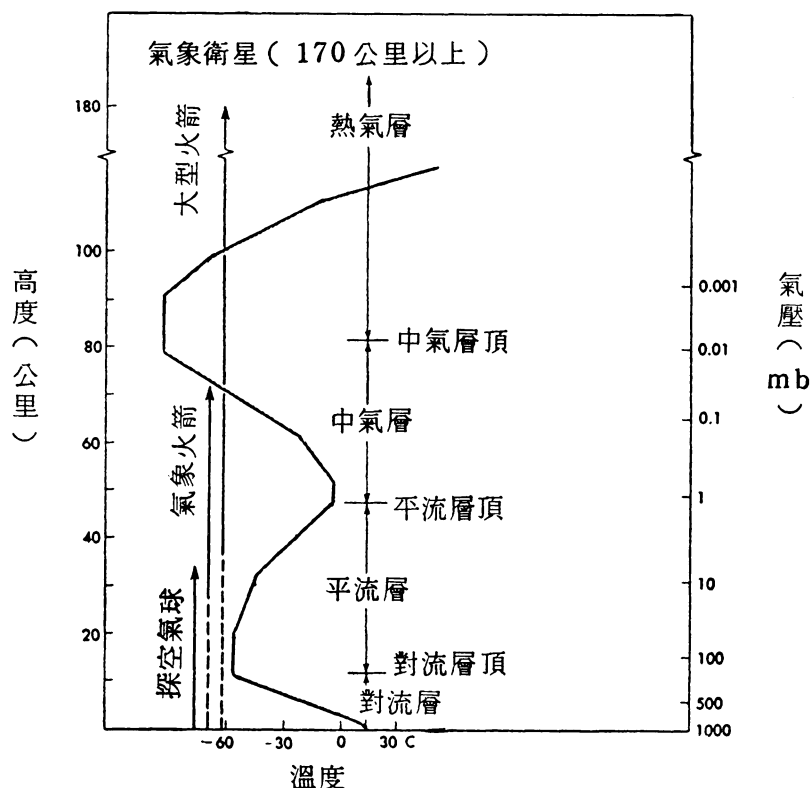


圖 1-1 大氣的垂直分層，圖左為觀測方法。170 公里以上溫度劇增，到 200 公里以上接近等溫。

1-3.1 對流層

對流層內的氣溫是隨著高度而遞減的，平均每公里約減 6.5°C 。既然地面較熱，越高越冷，空氣便易產生對流，經過上下翻攪而達到充分混合。這種對流和混合的上限稱為**對流層頂**，其高度在極區上空只有七、八公里，但在赤道上空可達十八公里。事實上，它隨著緯度、季節、地面溫度而變動不已。

綜合地說，對流層的特性主要有下列四項：

一、氣溫隨高度而降低。

二、風速隨高度而增大。

三、水汽含量集中在底部，向上迅速減少。

四、天氣現象幾乎都發生於本層以內，所以和人類生活息息相關。

最接近地面約一公里以內的大氣層，因有摩擦作用和小尺度的渦流，使能量與物質的交換過程變得特別複雜，所以對流層最低的這一部分另有名字，稱為**摩擦層**或**行星邊界層**。專門研究這一層內現象的**微氣象學**，對生態、農業、污染、軍事、交通等人類活動具有極密切的關係。

1-3.2 平流層

平流層的下限就是對流層頂，它的上限則在離地約 50 公里，氣溫上升到極大值的高度，稱為**平流層頂**。平流層內空氣主要為水平運動，故稱平流層。

平流層可再分為兩部分：

一、下平流層

下平流層氣溫在垂直方向大致不變，故早年被稱為同溫層。它的特性包括：氣層穩定、對流弱、空氣乾燥，除偶有卷雲生成外幾無天氣現象，對於航空極為有利。所以近年長程客機都在下平流層範圍內飛行，即取其經濟、舒適的優點。

二、上平流層

上平流層氣溫又隨高度緩慢增加，直到平流層頂為止。這是因為集中於此的臭氧，吸收紫外線能量的結果。在此高度上早就沒有水汽存在，但在高緯度偶可見到一種**貝母雲**，它由什麼質點組成，迄今仍不太了解。

1-3.3 中氣層

平流層頂以上便是**中氣層**範圍，氣溫從約 -5°C 開始又隨高度而降低，大約在離地 80 公里處降到 -95°C 的極小值，可說是整個大氣圈中溫度的最低點，我們稱之為**中氣層頂**。

中氣層命名的由來，是指它居於兩個能量吸收層的中間。上面是溫度非常高的熱氣層，下面是臭氧集中，吸收紫外線熱能的平流層。

這一層的氣象特性有下列幾項：

- 一、和對流層相似，熱源來自下面，所以氣溫也是隨高度遞減。
- 二、水平風速很大。
- 三、沒有任何天氣現象，但偶有**夜光雲**出現在 70~90 公里高度處，其來源和組成迄今不詳。

1-3.4 熱氣層

中氣層再向上就是**熱氣層**。氣溫從 90 公里起一直向上增加，最高可達 1,200°C 左右。

它缺乏明顯的層頂，按前述外氣層的定義來說，到五、六百公里的高度，應該算是熱氣層的上限了。

此層特性除了高溫以外，還有下列三項：

- 一、氧分子分解成兩個氧原子，空氣的組成和低層大氣迥然不同。
- 二、所有氣體高度游離化，能反射無線電波。
- 三、在高緯度地區可見到壯觀無比、變幻莫測的極光現象。

故就高度而言，熱氣層如以其他分層標準應屬不均勻層（組成），**光化層**（化學過程），或電離層（物理過程）。電離層的形成是紫外線照射氣體，使分子或原子游離化的結果。

必須說明的是，熱氣層內氣溫是以質點的動能來計算，雖然高達一千多度，但在如此稀薄的空氣裏，質點碰撞到人體的機會很少（假定人類能夠暴露在這種接近真空的環境裏），所以人體不會感覺到如此高溫。

1-3.5 外氣層

大氣的上限究在何處，科學家看法不盡相同。有人以離地 600 公里左右為上限，因為其外的外氣層雖然尚有氣體，但密度已稀薄到失去氣體典

型特性，應可視之為太空。有人以離地三萬公里左右為上限，是因該高度地球重力已無法吸引氣體分子了。

以上看法是在下列兩項假定下推論而得：1. 大氣分子保持中性，2. 地球引力為主要作用力。實際上，空氣分子自 80 公里處就開始游離成多量帶電質點，達相當高度後，地球磁場對高層大氣的作用，已遠超過引力作用。以地球磁場為主要作用力的大氣層，稱為**磁性層**。

磁性層受**太陽風**（從太陽發出的高速帶電粒子流）衝擊，在地球背太陽的一面拉得很長，與彗尾性質相似，所以**磁性層頂**的形狀很不對稱，朝

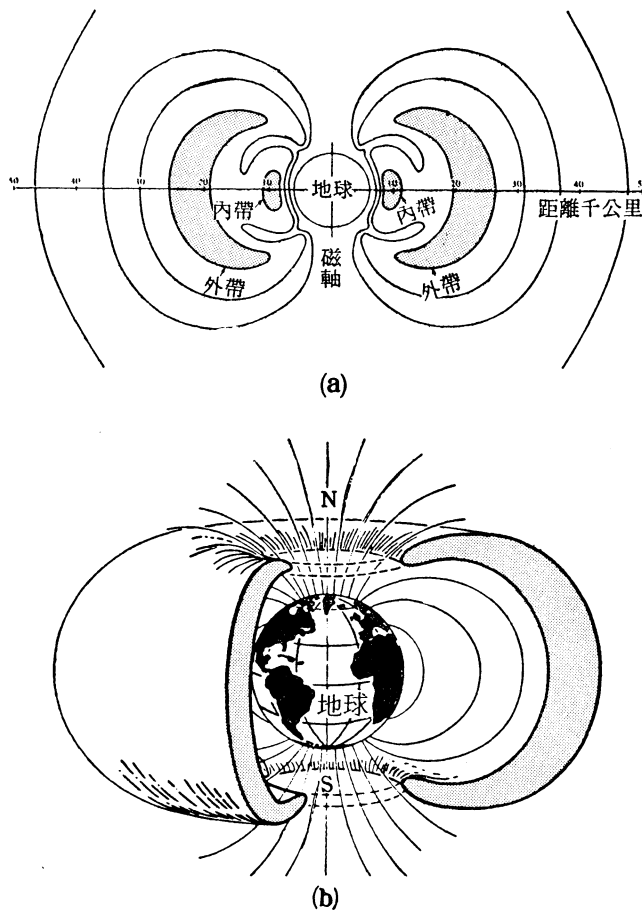


圖 1-2 范艾倫輻射帶

(a)剖面圖，

(b)立體圖（內帶未繪出）。

太陽的一面約在 600 公里左右，因此也有人主張，以此高度作為地球大氣的上限。

磁性層內有內、外兩重輻射特別強的區域，稱為范艾倫輻射帶，分別位於距地面約 3,200 公里及 16,000 公里高度，是地球磁場捕集太陽風粒子所形成，其形狀如圖 1-2 所示。

習題 1-3

1. 在對流層頂高度，赤道比兩極的氣溫高還是低？為什麼？
 2. 中氣層的氣溫垂直分布既然和對流層相似，為什麼沒有相似的天氣現象發生？
 3. 離地面 80 公里以上的大氣層具有那些特徵？除熱氣層外還有什麼其他名稱？
-
-