

自然地理學

楊達源 編著

第一部分 地球與地球系統

地球是太陽系中九顆行星之一（圖I-1,表1_1）

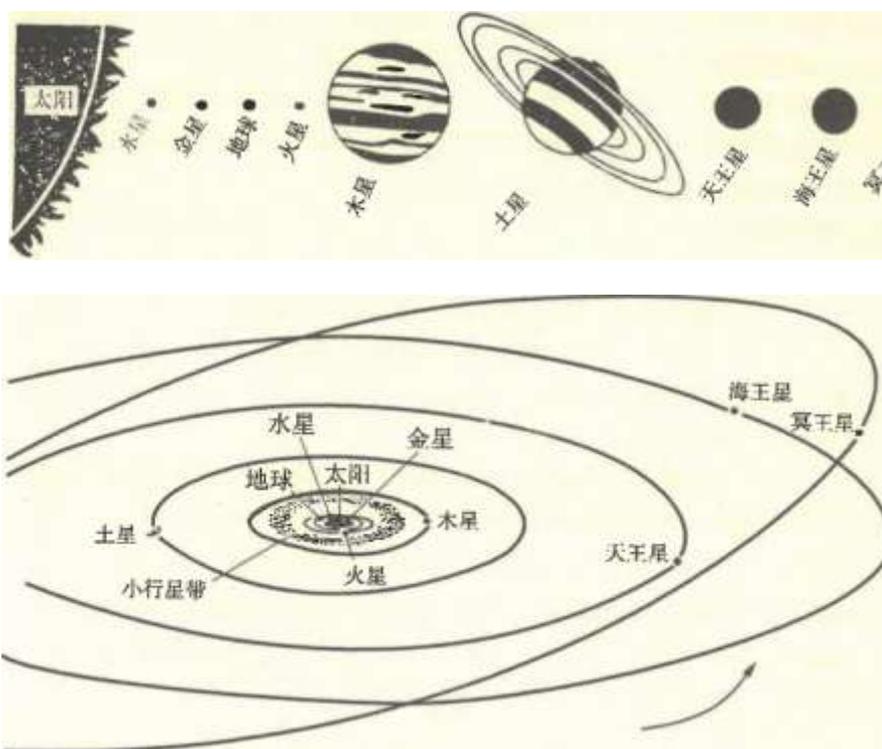


圖1-1 太陽系及其行星的比較示意圖

表1-1太陽系主要星體的基本參數

行星	赤道半徑km	扁率	品質地球=1	密度g/cm ³	重力(地球=1)	恒星日長	赤道對軌道傾斜	繞太陽旋轉一周(地球年)	衛星數	公轉(平均)半徑(Ⅲ)
地組										
水星	2 440	0.0000	0.0500	5.46	0.38	58.6d	<10°	0.241	0	58x 10 ⁶
金星	6050	0.0000	0.8200	5.26	0.89	243d	6°	0.616	0	109 x10 ⁶
地球	6 378	0.0034	1.0000	5.52	1.00	23h56min	23°27'	1.00	1	150 xW ⁶
火星	3 395	0.0052	0.1100	3.96	0.38	24h37mm	24°55'	1.88	2	229 x10 ⁶
木組										
木星	71400	0.0620	317.9400	1.33	2.64	9h50min	3°4'	11.99	17	779 x10 ⁶
土星	60000	0.1080	95.1800	0.70	1.17	10h14min	26°45'	29.50	23	1427 x 13
天王星	25 900	0.0100	14.6300	1.24	1.03	約24h	97° 53'	84.00	20	2871x 13
海王星	24 750	0.0260	17.2200	1.66	1.50	約23h	28° 48'	165.00	2	4496x 10 ⁶
冥王星	1350		0.0024	1.50		6.39d		248.00	1	5 913 x 10 ⁶
太陽	69.6x10		33x10	1.409	日面赤道自轉週期25d			表面溫度5770K沖心溫度1500 x 1/K		
月球	1738.2		1/81	3.341	月地平均距離 3.844 x 1 ⁶ km(3.564 x 1 ⁶ km- 4.067x10 ⁵ km), 月球公轉平面不超過地球上28°36'N - 28°36'S區間					

♠ 地球的形狀與大小。地球極半徑為6356.779 km, 南極比北極半徑短15.2m; 地球赤道半徑為6 378.14 km, 某些地方相對高出 430 m; 地球平均半徑為 63 電.03 km; 地球圓周長39 840km;

♠ 地球表面海洋面積 3.524 x 1⁶ km², 占地球表面約71%。平均水深3729 m, 最深點-11 033m; 海洋水面的隆高最大+ 76m; 海洋水面的低窪最低-104m。

♠ 地球表面陸地面積 1.484 x 1⁶ km², 占地球表面約29%。在南半球陸地面積約占 17%, 在北半球陸地面積約占39%。陸地平均高度+ 875 m, 陸地上的最高點為珠穆朗瑪峰 (+ 8 848m)。陸地上的最低水面為死海水面(-392m)。

♠ 地球的圈層結構：

一散逸層, 約> 800km

廠高層大氣——熱離子層, 約80km ~ 800km

一中間層, 約52km ~ 80km

一大氣層——臭氧層, 約12km ~ 55km

一平流層, 約10km ~ 52km

一對流層, 約0km~10km(極地上空8km, 赤道上空16km ~ 18km)

一海洋水層——若全鋪地球表面平均水層厚度約2.8km

一地殼——平均厚度17km, 品質2.6x 10⁴kg, 平均密度2.8g/cm³

——地幔——平均厚度2 900km, 品質4.0 x 1Wkg, 平均密度4.48g/cm³

——地核——平均厚度3 470km, 品質1.95 x 10kg, 平均密度10.7g/cm³

(5) 地球品質為5.976 x 10kg, 平均密度5.52g/cm³

第一章地球系統是開放系統

芬囂葛爰 人類對地球系統的探測推動了科學與技術的進步。地球系統是個開放的巨
iKSJ系統,物質流與能量流曾導致地球的誕生和地球的演化。

系統根據其性質可以分為孤立系統、封閉系統和開放系統。孤立系統與外界沒有能量與物質的交換。封閉系統可與溫度確定不變的外界交換能量而不交換物質,體系溫度保持恒定。開放系統可與外界交換能量和物質。在孤立系統中實際發生的過程,總是使系統的熵增加,狀態只能自發地從非平衡轉變為平衡,從有序轉變為無序,而不可能逆轉。對於封閉系統,當體系和外界同一的絕對溫度足夠低時,有可能形成低熵的有序平衡結構,如結晶和相變。對於開放系統,在一定時間間隔內,體系熵的改變等於熵流加熵的產生。目前,已能從以下幾個方面來討論地球系統是開放系統。

1.1關於宇宙“大爆炸”

宇宙“大爆炸”理論是20世紀30年代由G. Lemaitre與G. Gamov, E.Hubble等提出來的,認為宇宙大爆炸導致宇宙擴張,並壓迫空間物質變為超緻密團。宇宙“大爆炸”直接證據自1965年以來才有所發現。當時,有兩位科學家聲稱測到了“大爆炸”殘餘微波,但未能對“大爆炸”後四處擴散的物質,如何重新凝聚從而形成星球及星系的問題做出解釋。1988年,著名英國科學家史蒂芬·霍金(S.W. Hawking)在《時間簡史:從大爆炸到黑洞》中說,宇宙最初的模樣像一個豌豆大小的物體,懸浮於一片沒有時間的真空中,在“大爆炸”前瞬間發生極其快速的膨脹過程,時間為距今約 120×10^{10} 年。1989年,美國太空總署發射了一顆“宇宙背景探測衛星”,它發回的資料表明,該衛星觀測到了在宇宙的遙遠邊際存在著一堆極其龐大的波浪形物質,這種波浪形物質伸展達 9.50×10^{10} 光年,並且已有 1.50×10^8 a歷史。由於該波浪形物質是在宇宙大爆炸僅 30×10^{-32} s後便已形成,所以它被喻為是宇宙誕生的證據。這種波浪形物質形成後,萬有引力使愈來愈多的物質複凝聚起來,最後變成星系。後來,一個國際科學家小組利用歐洲航天局紅外太空觀測衛星(ISO)的觀測資料,對一種氦氫分子進行分析測算後發現,在距地球約1500光年的獵戶星雲中高度活躍的恒星形成區,氦原子與氫原子的比例為 $1:10 \times 10^4$ 。宇宙中所能探測到的所有氦元素,可能都是在宇宙“大爆炸”幾分鐘後的原始核聚變過程中產生的,有關氦元素豐度的最新測算結果再次證實,宇宙中正常物質總是無法遏止宇宙無限膨脹的趨勢。

黑洞是廣義相對論所預言的一種暗天體,它有一個封閉的視界面,外來物質能夠進入而視界內任何物質卻不能逃出視界。現在認為黑洞由解體的星球殘餘物質形成。英國科學家在

哈勃天文望遠鏡拍攝的照片上，去除一層層耀眼光環後，觀察到了整個星系相互碰撞並被黑洞吞噬的景象。黑洞比億萬顆太陽還要大，星系相互碰撞後的物質，首先被吸進強旋渦中心，在被黑洞吞噬之前釋放出巨大能量。黑洞甚至吸收光線。黑洞吸引周圍物質下落而發出X射線。日本科學家花了15年時間分析來自外太空的無線電波後，於1999年說已發現銀河中心有24個黑洞。黑洞的一種模型是晚期恆星。哈勃天文望遠鏡曾拍到一張垂死恆星的照片，以及在1995年拍到獵戶座中新星的照片，新星環繞成熟的星運行。另據觀測資料分析，1054年與1604年還曾發生過恆星爆炸與超新星的發生。災難性恆星爆炸，恆星的亮度可能會猛增百萬倍甚至更多，恆星爆炸裂成無數碎片，大部分物質以大約 9000 km/s 的速度拋向太空，在太

空中消失，而恆星只保留下原來物質的一小部分，並賴強大的內向拉力而發生濃縮，壓縮了的核心成為中子星。超新星則含有膨脹的塵埃和氣體。蟹狀星雲的膨脹塵埃和氣體的速度達 1200 km/s ，1054年以來蟹狀星雲的直徑已超過42光年。1999年德國的天文學家聲稱發現了距今約700a的一次超新星爆發留下的氣體雲，其溫度估計為 $3000 \times 10^4\text{ K}$ ，為太陽核心溫度的兩倍，氣體雲延伸的直徑達到25光年。

因此，在宇宙空間中可能不均勻地漫布著由“大爆炸”或恆星炸裂而產生的塵雲物質，它們有可能被吸引聚積而形成星體。

據天文觀測，在星際空間和星雲中，有大約99%氣體和1%灰塵組成的稀疏物質，氣體大部分是氫和氦，塵狀物則類似於地球物質的成分，如矽化合物、二氧化鐵、冰晶以及包括有機分子在內的許多細小分子，於是提出了分凝序列模型。1944年韋紫克的計算結果表明在一大旋

渦作湍動收縮時，就產生出一些子旋渦，一個子旋渦足以產生一個太陽系，在太陽旋渦的外緣有一些亞子旋渦，兩個亞子旋渦的嚙合部位塵埃粒子的碰撞結合，從而形成星子一行星。另

一種模式是旋轉星雲冷卻時，由氣體凝聚出各種固體化合物，形成顆粒，逐漸群集成為細小塊體或微行星，它們再吸引聚結。在距離太陽近的地方，是高沸點物質聚結，如水星富鐵；在較遠離太陽的地方是較輕的成岩化合物，如由鎂、矽、氧構成的物質，在“較冷”環境中迅速凝聚，揮發物質如水、甲烷、氨，大部分逸散在地球族行星上，但會在太陽系的冷週邊凝聚成冰；更遠離太陽的木星和土星，保持著原始行星的成分。1999年德國科學家報告說，在太平洋海底發現了來自約90光年外“1978 A”超新星在 $500 \times 10^{16}\text{ BP}$ 爆炸時產生的星際塵埃，一種罕見的放射性鐵- ^{60}Fe 。不過，上述仍然是一種可能的模型，以後還會有進一步的細化或者新模型的誕生。

1.2 流星和隕星

俗稱的流星是指夜空中星光如箭掠過的現象，實際上是星際空間被叫做流星體的較細小物體，在它們闖入地球大氣層時因摩擦而燃燒發光的現象。1999年8月12日，當地時間下午7時，在北美見到每小時50顆~150顆流星燃燒著掠過天際，那是一年一度的英仙座流星雨。英仙座流星雨跟其他流星雨一樣，本是慧星殘骸。1999年撞入澳大利亞沙漠的一顆流星，發出“不可置信的藍色亮光”和“藍白色閃光”，歷時數分鐘之久。1833年11月13日，北美見到了稱為“獅子座流星群”型的流星雨，它看起來像是從獅子座中某一點輻射出來的，高空“焰火盛會”長達幾小時之久。1873年11月27日一夜間有16萬顆流星劃過夜空，那是因為大批慧星塵闖入地球軌道。

隕星是指品質較大的流星體在地球大氣層中未完全燒毀而落到地面上的碎塊。荷馬史詩《伊利亞特》中提到一個作為獎品的粗糙鐵塊，可能是西元前3000年左右的一塊隕鐵。《春秋·

莊公七年》記有“夜中星隕如雨”。1834年瑞典化學家柏澤裡率先對隕石進行化學分析。按化學成分隕石分為五類，即石隕星（隕石）、鐵隕星（隕鐵）和石鐵隕星、冰隕石和玻璃隕石，前三者各占約92%、6%和2%。美國宇航局的科學家還在1998年3月22日的一塊隕石裡發現藍色的岩鹽晶體以及在其中漂浮的小泡水。經測定，該塊隕石原本生成於45 x 10⁶aBP。目前已知最大的隕鐵重約60t，保存在納米比亞。在新疆維吾爾自治區青河縣境內的一塊隕鐵重約30t。1976年3月8日，吉林地區的一場隕石雨散落範圍達500km²，已收集到完整的隕石100多塊，共重2t多，其中最大的一塊重達1770kg。

隕星降落衝撞地面形成的坑穴稱隕星坑（隕石坑）。隕星坑形狀近乎圓形。地球上所見最

大的隕星坑在加拿大魁北克清水湖處，直徑26km。化石隕星坑中著名的是美國亞利桑那州科科尼諾的巴林傑隕星坑（圖1-1）、加納的亞山蒂隕石坑以及墨西哥灣尤卡坦半島的巨大隕星

坑。巴林傑隕星坑直徑1300m，深180m，周圍緣高30m~45m，它形成於25000aBP。尤卡坦隕星坑的地質年代約6500 x 10³，恰是地球上恐龍滅絕的年代。月球上的環形山實際上也是隕

星坑。火星和其他行星、衛星上也有隕星坑。1998年，許多人借助望遠鏡目睹了蘇梅克-列維9號彗星碎裂後連續撞擊木星的壯觀景象。火星上的隕星坑高點與低點高差達32km，是太陽系中所知最高的山與最深的盆地。



圖1-1美國亞利桑那州巴林傑隕星坑

落到地球上來的隕星，多是彗星的碎塊裂片，彗星核中噴出冰、塵和石塊中未融部分組成彗星尾。一顆彗星每次接近太陽，可能損失0.5%的品質。彗星還會發生崩潰，19世紀的“貝拉慧”就是在天文學家的眼前發生崩潰的，在它的軌道上留下了一片流星雲。另外，美國科學家分析哈勃天文望遠鏡拍攝的照片，發現名為“灶神星”的一顆微型行星可能是小行星之母。灶神星的直徑只有531km，其上的一個隕星坑卻寬達459km，深約13km，估計是由其他天體撞擊形成的。但是，1936年美國天文學家尼爾格曾提出，玻璃隕星可能是巨大的隕星撞擊月球時從月球表面濺射出來的碎片，然後又被地球吸引過來的。散佈在澳大利亞和東南亞的玻璃

隕石形成於70 x 10⁶aBP。在中國海南島等地稱那時期的玻璃隕星為“雷公墨”。澳大利亞的玻璃隕星則與旅行者7號探測飛船登月採集的月球上太丘隕星坑緣的岩石驚人相似。

另外，還在菲律賓等地共發現了 12 塊本為火星碎片的隕星，在菲律賓發現的那塊火星碎片隕星長 4mm，寬和高各 2mm，重 0.28g。1972 年 8 月 10 日白天，美國加利福尼亞州上空 58km 處掠過一

顆巨大的火球，並傳出隆隆巨響，美國宇航局的空間紅外探測器記錄表明，它是一顆小行星，直徑約10m，質量數千噸，當時的飛行速度為15km/s。1908年6月30日晨，一顆燃燒著的小行星在西伯利亞通古斯上空8km高處爆炸，強大的衝擊波與高溫大火摧毀了約2000km²的原始森林，並留下了3個直徑為90m~200m的爆炸坑。該事件產生的亮光持續兩三天，使裡暫托爾（1^h0^m旭1,92°9, W、52°27N）可借其亮光徹夜打板球。

日本科學家在昭和南極基地以南300km處的大和山一帶，找到了4000餘顆隕星，人們在南極已發現了5700餘顆隕星。1957年，地球物理學家彼得森據夏威夷山頂上收集的氣塵樣分析認為，每年落到地球上的流星塵總量約500 x 10⁶ to 1964年，羅森據氣球採集的氣塵樣分析測算為每年約4.00 x 10⁶ 美國的另一名地球物理學家於1998年還曾提出，估計每年在地球 ± 1000 km ~ 24000km的高空氣化的太空冰總量約2x 10⁸ t，但是有的學者認為它不是太空冰，有可能是“太空雷球”。

1.3 太陽粒子流

馬可尼於1901年做無線電實驗，把電信號從英國康沃爾發到了3400 km以外的加拿大紐芬蘭，於是海維賽特和肯涅利提出在大氣層高處有一個帶電粒子層，它反射電信號。阿普頓進而測定它的高度在100km（白天）到220km以上，它就是“電離層”。

極光是在極區上空運動著的五顏六色的光流，18世紀中期又發現極光光流好像是沿著地磁場磁感線方向運動，在磁感線最密集的地方彙聚起來的，在磁暴期間甚至可以在紐約（40°43'N、74°W）看到極光。在確定磁暴是1.5 x 10¹⁷ / km² 以外的太陽耀斑射向地球的帶電粒子洪流所造成之後，派克於1958年始把從太陽發生的穩定粒子流定名為“太陽風”，估計太陽風使太陽每分鐘喪失100 x 10¹⁷ t物質，自太陽形成以來，由太陽風而喪失的品質尚不到太陽品質的萬分之一。太陽風粒子到達地球附近的速率約440 km/s，然後被約束在地球磁感線上，並構成兩個主要的輻射帶，即“範艾倫輻射帶”（圖1-2），後來又改名為“磁層”。

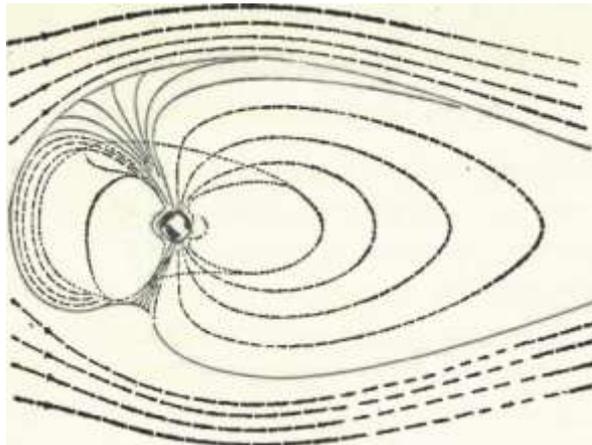


圖1-2 人造衛星探測到的地球上空的範艾倫輻射帶

(I·阿西摩夫,1979)

地球磁層頂在朝向太陽的方向高約 $10^4 \times 10^4$ 在另一側它的淚滴狀尾部可一直延伸到

100 x 1 / km- 200 x 10 km 以外。進一步探測發現，月球、金星和火星沒有輻射帶，可能的原因是月球沒有“鐵核”，金星自轉太慢（8個月自轉一周），火星自轉太快（週期是24.5h），它們沒有磁場或磁場太微弱，金星的磁場強度只有地球的1 / 60。但太陽系中的木星、土星以及天王星、海王星則均有輻射帶。木星的磁場強度是地球的12倍 ~ 16倍。

太陽粒子流“風暴”平均每10a ~ 11a 一次，所釋放的能量相當於 $10^4 \times 10^4$ 個 1×10^4 噸級的

核彈，會對地球上的電子通訊、輸電及對人類的宇宙航行等產生嚴重的影響。另外，據1999年報導，美國三位元天文學家觀察鄰近類似太陽的其他恒星，發現了9宗恒星爆發的“超級耀斑”的個案，它將輻射和帶電粒子射向太空，令環繞該恒星的行星大受影響，進而推測若太陽爆發“超級耀斑”，地球上空會到處泛起陣陣極光，電離層會瓦解，臭氧層會被毀，地球氣溫會迅速上升，致命的輻射和帶電粒子直射地面，會令地球上幾乎所有生物喪命，僅深海生物能倖免於難，雖然似乎太陽尚未爆發過那樣的超級耀斑。英國科學家則發現太陽磁場強度自1964年以來增強了約4倍，推算自1901年以來增強了約1.3倍。太陽磁場實際上是太陽發出的帶電粒子形成的。太陽磁場的變動可能額外促使大氣中水珠凝聚，增強雲團的形成，對地球雲層產生影響，從而對地球氣候變化產生作用。那幾位英國科學家推測，在過去的130a中，全球氣候變暖

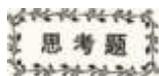
的一半可能是由太陽磁場強度增強所產生的。從1970年以來太陽活動因素對地球氣候變化加劇所起作用降為只有1 / 3 左右，另2 / 3 為人類活動的作用。中國的“風雲二號”衛星實測到2000年7月14日發生的太陽風暴，產生的X射線8 min到達地球，耀斑造成的高能質子流，數小時後到達地球，而速度較慢的太陽風暴帶電粒子流經過30多個小時後與地球相遇。

1.4 太陽輻射（見第十三章）

1.5 星體引力（見第二章）

\$關鍵字*

宇宙大爆炸 隕石 太陽粒子流 開放系統



1. 怎麼理解地球系統是開放系統？

从人类对地球系统认识的进步得知你该如何学习和推动科学技术的进步

專題1 人類為何執著地探索火星

近来,随着美国“火星探路者”号飞船成功地在火星阿瑞斯平原着陆,这颗“神秘”的星球又一次成为世人瞩目的焦点。从1965年“水手4号”火星探测飞船首次探测火星起,迄今人类已先后向火星发射过十几次探测飞船,三次在火星陆地着陆,耗资十分巨大。人类为何如此执着

地探索火星奧秘？

宙生；國薦嘗：“i X 驚讐警為’地球人對火星執著的探索，實際是人類在探索宇點 蠶
 常 常 蕙 根 將 器 嵩 牒 當 為 這 需
 地球筭起源年代重新研究。結果表明，地球上出現生命的時間器器書蠶〔器
 38 x僭服如果此次“火星探路者”，探索飛船能在火星 為，蠶駕
 將有助於揭開地球生命及人類起源的奧秘。① 5至上生命存在的證據，那

明此星翁鏡子’，’，’了解地球後的命濕潤，最近的物長探蠶查

驚：豐：籃的三現柱除南北極存在“水冰”外，大部分地區是極乾燥的“戈壁灘”：由
 盤警；層子外線直接照射到火星地表’使生物難以生存。通過對火星深入研究，可以使豎
 遼解豐球的歷史變遷’更好地保護我們自己的星球免遭毀滅。比如科學家登上月球後，
 豐豐坑誓：瞭解到地球在歷史上曾遭受過許多“宇宙炮彈”的轟擊，從而對恐龍滅絕等二然
 事書有了新的認識。登上火星後，對地球人如何保護環境、保護資源等也有了更清醒的認
 識。因為火星是一個失敗的“地球”。

探索火星，最終也是為人類征服火星作準備。不少科學家設想，隨著科學技術飛速發展，人類有
 可能在火星上建立適合人類生存的“生態環境圈”，或利用先進技術改造火星環境，讓火星成為“第二個
 地球”，成為地球人未來最佳的“避難所”。（竇靖江，〕妙）

①2000年的“火星探路者”未能在火星上著落。

第二章地球外部環境

乎;啓號K j 地球外部環境中的物質流、能量流與星體引力作用對人類生存環境有著極為深刻的影響。地球運動的種種變化又使上述因素對地球環境的影響產生種種時、空兩方面的不均，從而演化出極為複雜的地球環境變遷歷史。

據宇航員說，從宇宙飛行器上看地球，地球像是一間黑屋中的一個小亮體，有時甚至很難一下子把它找出來。從彩色螢幕上看到的，由執行月球探測任務的阿波羅宇宙飛行器發來的地球影像，它雖然很小，但它是由藍色的海洋、綠或褐色的陸地以及捲曲的白雲組成的彩球。地球，在宇宙空間中仍然是一顆十分神奇的星球。1989年錢學森在重新界定“地球表層”空間概念的同時，把“地球表層”之上的外太空與比其更深的地球內部概為“地球表層的環境”。我們為了便於描述和討論，試把地球系統中“地球表層”之上的外太空概為“地球外部環境”，把“地球表層”更深的部分概為“地球內部環境”。第一章討論了地球外部的物質流與能量流，本章主要討論地球在其中的運動，外部物質流與能量流對地球環境的影響，由此產生種種時、空兩方面的不均。

2.1 地球隨太陽在銀河系中運動

“渾天”概念始於春秋時代，但直到20世紀20年代人們才開始認真討論太陽系繞銀河中心旋轉的運動。銀河系是一個旋渦星系，與之相當的還有仙女座星系、大麥哲倫雲、小麥哲倫雲等19個星系，組成一個“本星系團”，相鄰星系間的平均距離約 2.000×10^4 光年（1光年等於 9.46053×10^{12} km）。銀河系中大約有 1×10^{11} 顆~ 2×10^{12} 顆恆星，總直徑約 1×10^5 光年，圓盤的中心厚度約 0.2×10^5 光年。目前，太陽在銀河系中的位置如圖2-1所示，它距銀河系中心約 0.33×10^5 光年，在銀道面一側約26光年處，位於銀河系的一個旋臂——獵戶臂的內側邊緣。太陽系的空間規模在銀河系中延伸約幾百億公里。地球隨太陽系在銀河系中的運動是以銀河系中心與銀道面為參照系的。

2.1.1 地球隨太陽圍繞銀河系中心做旋轉運動

太陽繞銀心旋轉一周約 2.8×10^8 a~ 3×10^8 a，平均速度約250 km/s，軌道偏心率為0.07~0.10之間，它的近銀點是退行的。同時，太陽還在做追趕旋臂的相對運動，並以19.7 km/s的速度向著鄰近恆星武仙星座的一個點做相對運動。

與太陽繞銀河系中心旋轉運動週期相當的是近10000a以來地球表面曾發生過四次大

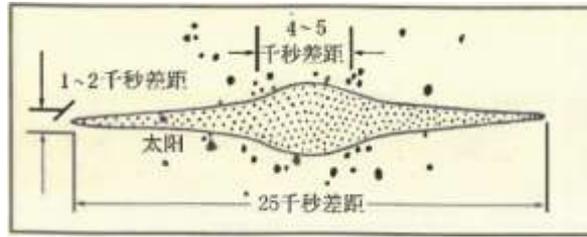


圖2-1太陽在銀河系中的位置示意圖

(任振球,1990)

規模的冰川作用，每次延續數千萬年之久，最盛時期的年代分別為 $9.5 \times 10^8 \text{ a BP} \sim 9.4 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $6.2 \times 10^8 \text{ a BP} \sim 5.7 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $3.2 \times 10^8 \text{ a BP} \sim 2.6 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.1 \times 10^8 \text{ a BP} \sim$ 現代，分別相當於前震旦紀、早震旦紀、前寒武紀、早寒武紀、石炭紀、二疊紀和晚新生代至今。大冰川作用時期，地球大氣中 CO_2 的含量偏低。1976年伊爾文和普爾拉赫(E.Irving and G.PuUaiah)曾將地磁極性比率按 $5 \times 10^6 \text{ a}$ 、 $10 \times 10^6 \text{ a}$ 、 $25 \times 10^6 \text{ a}$ 、 $50 \times 10^6 \text{ a}$ 、 $100 \times 10^6 \text{ a}$ 的時間長度分別進行滑動平均，取其平均時段進行最大爛譜分析，最大爛譜中最顯著的平均週期為 $2.97 \times 10^8 \text{ a}$ ($2.7 \times 10^8 \text{ a} \sim 3.03 \times 10^8 \text{ a}$)，似與上述大冰川作用週期較接近。而太陽繞銀河系中心旋轉運動週期與地球上大冰川作用週期近於吻合，有關學者認為可能與太陽定期穿越高密度塵埃星雲區有關。

2.1.2 地球隨太陽穿越銀道面運動

太陽在銀道面上上下往返運動的距離約 $\pm 300 \times 10^3 \text{ km}$ ，時間週期為 $0.67 \times 10^8 \text{ a}$ ，兩次穿越銀道面的時間間隔為 $(0.33 \pm 0.03) \times 10^8 \text{ a}$ ，最近幾次穿越銀道面的具體時間為 $2.59 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $2.27 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.97 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.66 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.35 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.00 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.64 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.01 \times 10^8 \text{ a BP}$ 。特別有意義的是中生代以來的三疊紀、侏羅紀、白堊紀、第三紀之間的分界時代分別為 $1.95 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.37 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.65 \times 10^8 \text{ a BP}$ (有的分界時代與這些數字有點差別)，和地球上多次多量生物滅絕的時代 $2.45 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $2.17 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.93 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.76 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $1.01 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.91 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.65 \times 10^8 \text{ a BP}$ 、 $0.37 \times 10^8 \text{ a BP}$ (任振球,1990)，均與太陽多次穿越銀道面的時代大致接近。另外，菲舍爾等(A.G.Fischer and M. A. Arthur)研究 $2 \times 10^8 \text{ a}$ 以來的地表溫度變化，發現低溫期的時間間隔為 $0.32 \times 10^8 \text{ a}$ ；阿格爾(D.V.Ager)研究中生代海面變化，發現主要的海退具有 $0.3 \times 10^8 \text{ a}$ 的週期，它們與太陽穿越銀道面的時間間隔也大體相近。至於上述事件之間的相互關係，W.Alvarer, M.R.Rampino、陳道漢等許多學者認為地球上的生物危機與太陽系行達銀道面附近遇隕星雲而地球易遭隕星或其他天體撞擊有關，有的學者還認為由於銀道面附近恒星的分佈比較集中，引力的異常也是導致地球上發生上列事件的原因(任振球,1990)

2.2 太陽和日-地系統

太陽是一個熾熱的光球，品質為 $1.989(1) \times 10^{30} \text{ g}$ (占太陽系總品質的 99.86%，平均密度 1.409 g/cm^3 ，直徑約 $139.2 \times 10^4 \text{ km}$ ，轉動慣量約 $5.7 \times 10^{42} \text{ g-cm}^2$ ，角動量 $1.63 \times 10^{41} \text{ g-cm}^2 \text{Vs}$)。太陽中心溫度約 $1500 \times 10^6 \text{ K}$ ，表面溫度約 5770 K 。太陽在約 $46 \times 10^8 \text{ a}$ 以前由氣體和塵粒

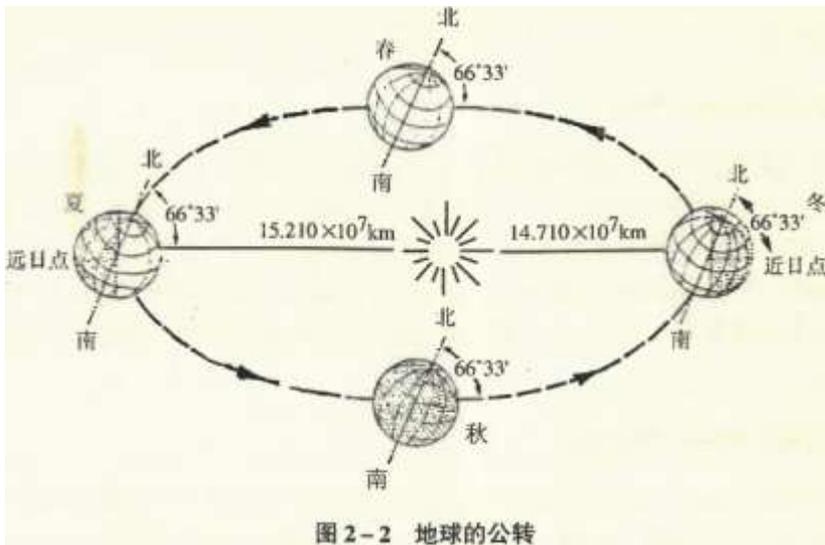
物質開始積聚而從星雲中形成。物質積聚、收縮或凝結使其內部的壓強和溫度急劇升高，溫度升高到

足以發生核聚變，以至太陽最終成為一顆恆星。產生核聚變要求的最低溫度估計約 500×10^8 K。氫聚變反應式為：



即 4 個氫原子核聚合形成 1 個氦原子核並釋放出能量。該能量是品質減少的轉變，按愛因斯坦的著名方程 $E=mc^2$ 來測算，每秒鐘約有 5×10^8 t 品質變成能量，並將 600×10^8 t 的氫變成氦，太陽還能維持約 50%。

太陽對地球的貢獻大體可以分為以下幾個方面：①太陽輻射能（詳見第十二章）；②太陽粒子流（詳見第一章）；③太陽引力；④迫使地球圍繞太陽公轉（圖2-2），



日-地之間的引力 (F) 是據牛頓創立的萬有引力公式計算的：

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

G 為引力常數，由著名的卡文迪許 (H.Cavendish, 1731 ~ 1810) 實驗而算得，現在通用的 G 值為 $6.6720 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{s}^2$ 。G 分別為相距 r 的兩質點的品質值。上式既可用以計算兩質點之間的引力 F，也可以借助於測得的 F 值來推算或陀其中之一的品質。

兩質點之

間距離的遠近，對其間引力的大小起著十分重要的作用。所以，太陽的品質比月球要高出 2700×10^3 倍，但日-地距比月-地距要大約 400 倍，日-地引力只有月-地引力的 1/6。月-地引力對地球的影響比日-地引力的影響要大得多。

2.2.1 公轉

地球圍繞太陽的周年旋轉運動，稱地球公轉運動，也稱軌道運動。地球公轉軌道為一橢圓，長軸半徑 $1.4959 \times 10^8 \text{km}$ ，短軸半徑 $1.4957 \times 10^8 \text{km}$ ，偏心率 0.016722 。太陽位在地球公轉橢圓軌道內的一個焦點上，地球的近日距離為 $1.471 \times 10^8 \text{km}$ ，遠日距離為 $1.521 \times 10^8 \text{km}$ ，近日點時間為每年的 1 月 3 日或 4 日，遠日點為 7 月 2 日或 3 日。地球公轉的平均速度為 29.79km/s 。由於地球繞日運動的向徑在等時間內掃過的面積相等，因而在地球近日點時公轉速度最快達 30.27km/s ，遠日點時最慢，僅 29.27km/s 。因此，北半球處冬半年（自秋分至春分）的時間為 179 天，夏半年（自春分至秋分）為 186 天。南半球的情況相反。

地球自轉軸與地球公轉軌道面即黃道面的交角為 $66^{\circ}33'$ ，即地球赤道面與黃道面的交角

(黃赤交角)約 $23^{\circ}27'$ 。由於地球自轉軸的空間指向與黃道面之間有個交角，且地球均勻地自轉，造成太陽輻射在一年中直射地球表面的緯度發生變化，並導致地球表面晝夜的長短變化和一年四季的變化。夏至(每年的6月21日或22日)時，太陽直射北緯 $23^{\circ}27'$ 即北回歸線，北半球白天最長、黑夜最短，北極圈(北緯 $66^{\circ}33'$)內為極晝；南半球黑夜最長、白天最短，南極圈(南緯 $66^{\circ}33'$)內為極夜。冬至(每年的12月21日到23日間)時，南、北半球的情況相反。最大的晝、夜時間差，赤道為零小時零分，向極區方向逐漸增大，極圈處達24小時零分。

在一年當中，實際上是地球繞太陽公轉一周，但從地球上相對於太陽高度角由大到小又由小到大的二次反復，也相當於太陽在恒星間的視運動相對於地球運行一周。中國創立的二十四節氣，即以春分點起算，每隔黃經 15° 劃出一個節氣，比較宏觀地表達了各時期太陽輻射量與溫濕條件的變化。

2.2.2 地球繞太陽系質心運動

嚴格地說，地球的公轉並非地心繞日公轉，而是地-月系質心繞太陽系公共質心的公轉。在黃道面上，九大行星的力矩效應對日心至太陽系公共質心的距離變化有比較大的影響，僅木星的力矩效應就可使所述的距離偏差 $7.4 \times 10^4 \text{ km}$ ，若出現如下所述的九星會聚中的地心會聚那樣的極端情況，會使日地距離縮短1%左右，並影響到地球在公轉軌道上運行的速度；還會使太陽的自轉角動量發生變化，並使太陽活動也受到影響；且兩者都會使地球氣候和地理環境發生一些變化。

2.2.3 地球公轉軌道偏心率的变化

據張家祥推算，公轉軌道偏心率變化的範圍為 $0.0024 - 0.0571$ ，據伯格爾推算為 $0.0005 - 0.0607$ 。偏心率最大的時候，地球的遠日距 $1.581 \times 10^8 \text{ km}$ ，近日距要遠 $0.171 \times 10^8 \text{ km}$ 左右，比目前的 $0.05 \times 10^8 \text{ km}$ 要大3.4倍左右；偏心率最小的時候，公轉軌道近於正圓。公轉軌道偏心率從最小到最大又到最小的變化週期為 $9.5 \times 10^4 \text{ a}$ 或 $10 \times 10^4 \text{ a}$ 。據糜枕生計算，目前近日點位於冬至日附近，太陽輻射強度在近日點大於遠日點7%。因此，當偏心率增大和遠日公轉速度放慢的時候，地球接收的太陽輻射總量就會有所減少，尤其是北半球夏半年的太陽輻射總量會比較多地減少，會出現連續幾萬年的氣候變冷。從米蘭柯維奇(M. Milankovitch)開始，有

許多學者認為地球公轉軌道偏心率的變化，是近百萬年以來地球氣候准 10^4 週期性冰期

間冰期交替變化的主要的起啟動作用的原因。冰期時代，高緯地帶發育厚逾 3000 m 的冰蓋，緯向氣候帶均向赤道推移，中國東部季風氣候區發展冷槽，比世界同緯度其他地區更為偏冷偏幹一些(楊懷仁等,1987)。因為引起地球公轉軌道偏心率發生變化的攝動並不穩定，所以其偏

心率的變小，有可能是日地距離平均增加到與遠日點日地距離相近，於是地球接收的太陽輻射總量減少，地球上變冷並出現冰期

2.2.4 黃赤交角的变化

黃赤交角是地球自轉的赤道面與繞日公轉的黃道面之間的夾角，又稱黃道傾斜。黃赤交

角決定著太陽光直射在一年內到達最北(北回歸線)與最南(南回歸線)的地理緯度，同時也決定著一年內出現極晝與極夜(北極圈與南極圈)的地理緯度，還決定著地球表面各緯度帶年內

接收的太陽輻射量。黃赤交角變小時,南(北)回歸線向赤道靠攏,而南(北)極圈向極地推移;黃赤交角變大時,上述四線均反方向移動。黃赤交角的變化相當於地球自轉軸傾斜角度的變

化，或赤道平面傾斜度的變化。黃赤交角變化的範圍在 $22^{\circ}.00, \sim 24^{\circ}.30$ 之間，即回歸線的地理緯度變化在南、北緯 $22^{\circ}.00, \sim 24^{\circ}.30$ 之間，南、北極圈的地理緯度變化在南、北緯 $68^{\circ} \sim 65^{\circ}.30$ 之間。它的變化週期為 4.1×10^4 年，上一次黃赤交角達最大值的時間是 9×10^4 a B P，達最小值的時間是 28×10^4 a B P。目前黃赤交角正以 $47''/100$ a的速度變小（表2-1），直到 15×10^4 a之後黃赤交角再一次達到最小。

表2-1 20世紀以來黃赤交角的變化

時間 (a)	黃赤交角	時間 (a)	黃赤交角
1900	$23^{\circ}27'8''.26$	1980	$23^{\circ}26'30''.78$
1930	$23^{\circ}26'54''.21$	1990	$23^{\circ}26'26''.10$
1950	$23^{\circ}26'44''.84$	2000	$23^{\circ}26'21''.45$
1970	$23^{\circ}26'35''.47$	17000左右	$22^{\circ}00'W'$

2.2.5 近日點進動

進動是轉動物體的轉軸繞另一旋轉軸的運動，它是由轉動物體受到垂直於其動量矩的外力矩作用而產生的。地球近日點進動表現為地球近日點在黃道上順地球公轉方向的移動，轉一周所需時間與地球軌道偏心率變化週期近於一致。

2.2.6 歲差

歲差即表現為地球自轉軸的進動引起春分點在黃道上反地球公轉方向的緩慢運行，而使回歸年比恒星年略短的現象。春分點在黃道上反時針方向運行的速度為 $50.2786''/a$ ，大約 2.58×10^4 a 運行一周。

近日點在黃道上順地球公轉方向移動，歲差春分點在黃道上反地球公轉方向移動，兩者在黃道上會合所需時間為 2.17×10^8 年。目前，地球在黃道上過近日點的時間為每年的1月3日或4日，過遠日點的時間為每年的7月2日或3日，上次近日點與冬至點重合的時間是西元1250年，近日點與夏至點重合的時間是11 x 年前，下次將是西元11 500年前。顯然，

近日點與冬至點重合或與夏至點重合，勢必影響到北半球直接接收的太陽輻射量。

2.3 行星和星-地系統

“行星”原本希臘文意為“遊蕩者”，意為它們之間及與地球之間的相對位置在不斷地變化。太陽系中的九大行星分別為水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星和冥王星。

九大行星中的前四顆較近太陽稱為地球族行星（地組），共同特點是體積小，平均密度大，自轉速度慢，衛星數少；後五顆距太陽較遠稱為大行星（木組），共同特點是體積大，平均密度小，自轉速度快，衛星數多（表I-1）。有些方面，如木組行星氣體（ H_2 、 He ）含量高、密度低等，使它們更像太陽，而不同於地球族行星。若以冥王星軌道為太陽系的邊界，太陽系直徑為79 個天文單位，約 1.2×10^8 km。各行星與太陽的距離按提丟斯-波得定則排列。按照這個定則，應在火星與木星軌道之間，即距太陽約 2.8 個天文單位處還有一顆同樣繞太陽運轉的行星，但始終沒有發現，恰在這個空間範圍內自1801 年以來相繼發現了穀神星、智神星等約2400 多顆小行星。它們的形狀不規則，繞太陽旋轉的週期為 $1a \sim 14 a$

右不等，很可能曾是一顆行星遭撞擊

破碎的產物。

九大行星都圍繞太陽作同方向自西向東的軌道運動，且軌道平面都接近於太陽的赤道平面。雖然各行星公轉一圈所需時間不盡相同，但它們的相對位置有一個平均為178.7a的會合週期(表1-1),聚列在一個展開角度較小的範圍內，過去稱為“行星直列”、“九星聯珠”，後來稱為“九大行星會聚”(九星會聚)。嚴格地說准週期178.7a的九星會聚，應將冥王星除外。最近幾次行星會聚的時間是1126年9月21日、1304年10月21日、1483年11月16日、1665年1

月6日、1844年1月24日、1982年11月2日，下一次將是2163年1月21日。格裡賓和普拉格

曼認為，當所有行星都在太陽的同一側排列時，對太陽施加的潮汐力可達到最大值，會引起太陽黑子增多和爆發，較多的太陽粒子到達地球的高層大氣，導致地球大氣的氣團異常移動，並由此改變地球自轉速度和觸發地震。但梅烏斯認為，實際上不可能出現九星於太陽同一側宜列的“日心會聚”，且行星對太陽的潮汐效應極微，因此不可能發生如格裡賓等認為的現象。之後，任振球(1990)認為九星的日心會聚多發生在1月~5月，且展開角偏大，不會產生多大的地理環境效應；唯九星的地心會聚，即地球單獨位於太陽的一側，其他行星在太陽的另一側，其時地球(繞太陽系質心)公轉半徑將變化1%，若值北半球冬季，那麼該年冬半年將延長1.79d，夏半年減少1.79d(1，再累積幾年，將導致北半球氣候變冷趨勢，以及地球自轉速度的放慢等，並有可能出現自然災害事件頻發群發，概如17世紀小冰期盛期的自然災害事件的群發。

若圍繞太陽旋轉的九大行星與月球等構成以地球為中心的十字串星，相對來說那些星體施加於地球的引力處於較大成分的平衡狀態，估計不會對地球環境異常有多大的直接影響”

2.4 月球和地-月系統

9大行星中有7個帶有衛星，最多的是土星有23顆衛星、木星有16顆衛星，天王星的20顆衛星中有15顆是近幾年才發現的，地球只有1個衛星即月球。地月品質的比值約81.3，地月平均密度比值約1.652。通過遙測和載人、不載人的登月探測，月球表面有盆狀月海，為熔岩流覆蓋，估計是隕石撞擊並引發熔岩噴溢所致；月球表土層是幾十億年來由微隕石、宇宙線與太陽粒子轟擊產生的岩石碎屑簡單堆積而成；月球重力只有地球的1/6，沒有如地球維持大氣圈的重力；月球上缺水；所找到的月球岩石都已磁化；在月球運行接近地球時，有時發生月震。據此推測，月球可能是由太陽系的另一部分，在失去揮發元素的高溫環境形成的，後來被地球捕獲而成為地球的衛星。2000年美國太空署的科學家又提出月球本是早期地球半熔融狀態尚未冷卻的時候，遭流浪行星撞擊而分裂出去的一塊。它最初形成於 47×10^8 aBP，月海中最激烈的玄武岩溢流發生在 38×10^8 aBP- 31×10^8 aBP，自那之後月球已基本終止演化。因此，在地球系統中的地-月支系統最突出的是引力作用。在太陽系內，月球與其繞轉的地球的品質比，高於其他衛星與其繞轉的行星的品質比。月球對地球的引力要比太陽對地球的引力大一倍多，其他行星對地球的引潮力則不到月球引潮力的萬分之一。

在地-月系統中，地球和月球均繞地-月系統公共質心運動。地-月系統公共質心位於地心與月心的連線上，距離地心 4.671×10^4 km，近於地球半徑的3/4。月地平均距離 3.844×10^5 km，近地距離 3.564×10^5 km，遠地距離 4.067×10^5 km，朔望月週期約29.53d，所謂月球繞地球一周，實際上是月球繞地-月系統公共質心運行一周，同時地球似偏心輪般也繞地-月系統公共質心旋

轉一周，所以月球始終是以其一個側面面向地球的。月球的繞行軌道比較接近各行星繞太陽運行的公轉平面，不會超過地球上 $28^{\circ}36'N \sim 28^{\circ}36'S$ 的區間。月球的繞行加上地球

自轉, 在地球表面產生比較規則的潮波, 包括海潮、固體潮, 並對大氣環流也有一定的影響。持之以恆的海潮被認為是地質歷史時期地球自轉速度趨於放慢的原因。

地球與月球繞地-月系統公共質心的旋轉運動有以下幾方面的變化。一是由於月球在旋轉軌道上有遠地與近地(球)之別, 遠地時地-月系統距離比近地時地-月系距離要遠約 $5.03 \times 10^4 \text{ km}$, 相當於近地距離的 14.1%, 可使地心與地-月系統公共質心之間的距離有 611 km 的變化。它又使地球圍繞地-月系統公共質心旋轉的慣性離心力發生變化。二是月球對地球的引潮力實際上是月球的引力與地球繞地-月系統公共質心旋轉的慣性離心力的合力。一方面由於地-月系距離在變化, 月球引力與地球的慣性離心力均發生變化; 另一方面由於月球軌道平面斜切赤道附近的緯圈並經常發生變化, 從而在地球表面產生複雜的多種月潮運動變化週期, 和潮高潮低的交替變化。三是以地-月系統繞太陽公轉, 真正的公轉軌道是地-月系統公共質心的軌道, 地心的運動軌道則時而在公轉軌道以內, 時而又在公轉軌道之外, 時而超前於地-月系統公共質心, 時而又落後於地-月系統公共質心。具體為在朔時(農曆初一)由於月球位在日-地之間, 故地心在公轉軌道之外 4671 km; 在望時(農曆十五或十六)地球在日-月之間, 故地心又在公轉軌道以內 4671 km; 在上弦時它超前地-月系統公共質心, 在下弦時又落後於地-月系統公共質心。也就是說, 實際上, 地球繞日公轉的速度是變化的, 自下弦至朔到上弦期間相對加快, 要從落後於地-月系統公共質心到超前於它, 所以地球公轉速度要加快, 超上去 9342 km; 自上弦至望到下弦期間則相反。自朔至望, 日-地距離要增大 9342 km; 自望至朔又相反。

中國古人比較重視地-月系統中月球的運行對地球表層環境與生命的影響。中國先哲樂於據日、月(“易”)運動的規律變化解釋自然、社會、人等一切事物的存在與變化現象。陰陽學說認為月亮為群陰之本, 並很早就發現了生物的朔望月週期節律和半個太陰日週期節律。如

《呂氏春秋》述: “月者群陰之本。月望則蚌蛤實, 群陰盈。月晦則蚌蛤虛, 群陰湫。”近來, 錢尚言與曹福崇認為“太極圖”代表日-地、地-月系之綜合, 有的學者專門研究月球朔望的不同相位變化與地球大氣環流和天氣現象之間的關係。

2.5 地球軌道平面上的微流星塵

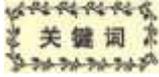
如上所述, 墮入地球大氣的流星總數很大, 估計每天有 2×10^4 顆流星重量在 1g 以上, 有將近 2×10^8 顆大到足以發出人眼可見的光, 此外還有幾十億顆更小的流星。借助於人造衛星上的傳感或擊聲記錄, 每天大致有 3×10^6 流星物質進入地球大氣, 占其中 5/6 的微流星構成

地球軌道平面內的微流星塵。

1962 年發射的金星探測器“水手 2 號”證實, 宇宙空間的灰塵濃度一般只有地球附近灰塵濃度的 $1/10^6$ 。因此, 美國天文學家曾懷疑, 月球可能是地球附近微流星塵的物源。空中取樣發現微流星塵有不尋常的形狀和很高的鐵含量, 至少與普通地球大氣中的灰塵大不相同。

在地球軌道平面附近有一種奇怪的“黃道光”, 它在太陽剛落下或剛要升起的地平面附近最為明亮, 而在天空的另一側則有次等亮度的“對日照”, 它實際上是微流星塵粒反射太陽光。

“黃道光”越明亮即微流星塵濃度越高。流星塵可能對人類生存環境有較大的影響, 一位澳大利亞學者曾提出, 流星塵粒可能是雨滴的核, 也就是說它對地球上的降雨可能有直接的影響



外部環境物質流能量流吸引力地球運動環境變遷

守思考題名

y

1. 地球外部環境距之很遠，能對地球表層系統產生重大影響嗎？
2. 怎麼比較太陽對地球的影響與月球對地球的影響？
3. 有沒有關於微流星塵的進一步研究？

第三章地球內部環境

fTxjyt 通過地球物理探測，地球內部在物質成分、物質密度、溫度以及相對運動方面均表現出圈層結構。人們在做進一步的探知並深入研究其成因。

地球內部的物質組成、物質運動與能量系統及其發展變化，主要借助於地球物理與地球化學探測、隕石、實驗分析及地面調查等給予推斷的，部分得到深鑽和深海鑽探的檢驗。地球科學家曾把地球外部環境比作以太陽能為動力的發動機，那麼地球內部就是一部由放射性物質作燃料、巨大而靈巧平衡的熱發動機。假如這部熱發動機運轉較慢，地球就會像月球那樣演變成滿布衝擊坑的死行星；又若發動機運轉較快，那麼火山氣體和灰塵就會遮蔽太陽，大氣就會受壓縮而變得密集，地表就會因每天的地震和火山爆發而發生變化。地球上的生命就是誕生於並生存於地球外部環境與地球內部環境的巧妙結合之中。

3.1 監測地震探明地球內部的圈層結構

早在幾千年前就有關於地震的記錄，如甲骨文記載西元前2598年（中國黃帝一百年）的“地震”，西元前2221年中國堯舜時代，有“三苗大亂，天命殛之，日妖宵出，雨血三朝，龍生廟，大哭于市，夏冰，地圻及泉，五穀變化，民乃大振”。17世紀至18世紀中期，世界曾充滿歡樂，不少思想家以為由伽利略和牛頓等科學家所創立的學說，似乎已使人類掌握了把地球改造成人間天堂的途徑。但是，1755年11月1日萬靈節，於當人們聚在教堂做禮拜時，里斯本市發生一次大地震，接著出現強海潮襲擊，估計僅里斯本市就有5萬人喪生。這次地震使人們驚醒，原來地球內部尚存在一種更為巨大的、無法預測的、人類所不能控制的自然力。地震監測始於中國東漢時代的張衡利用水力轉動的“渾天儀”和測定地震方位的“地動儀”。現代地震儀多借助於著地支架與懸錘相隨運動的時間差，記錄與地震波相應的地面運動，已能記下微弱到 10^{-8}cm 振幅的暫態地面運動。

地震仍然是地下局部能量積累的驟然釋放，岩石的突然錯斷或斷裂伴有強烈的振動，並伴有熱、聲、光學、岩石變形和永久性位移等一系列效應。從震源向外發射的地震波，按傳播方式分為以下三類。一是縱波，也稱推進波或P波。P波在固態、液態及氣態物質中均能傳播，

而且速度較快，在岩石中可達 5.5km/s - 7.0km/s ，最先從震源到達震中或設置地震儀的觀測地點，所以又稱初始波。二是橫波，也稱剪切波或S波。S波只能在固體中傳播，而且速度較慢。P波的傳播比S波快約1.7倍，故S波比P波晚到震中或設置地震儀的觀測地點，所以又稱次波。P波與S波穿透地球，合稱體波。三是面波，又稱L波，沿固-氣、

液-氣の介面傳

播，質點的運動兼有P波和S波的特點，近乎做圓周運動，在垂直介面的方向上迅速衰減。面波的波長長，振幅大，傳播速度比橫波小約1倍，但其振幅大，能使地面建築物遭受強烈破壞。由於地震波的傳播均系質點運動，所以在質點密度與質點結合方式不同的物質中，地震波的傳播速度也有差異，P波在鬆散砂層（密度 2.0g/cm^3 左右）中的傳播速度為 $0.5\text{km/s} \sim 2.0\text{km/s}$ ，在砂岩葉岩（密度 2.5g/cm^3 左右）中為 $1.5\text{km/s} \sim 4.5\text{km/s}$ ，在石灰岩（密度 2.5g/cm^3 左右）中為 $3.0\text{km/s} \sim 5.2\text{km/s}$ ，在白雲岩中為 $4.8\text{km/s} \sim 6.0\text{km/s}$ ，在花崗岩（密度 2.7g/cm^3 ）中為 $4.0\text{km/s} \sim 6.0\text{km/s}$ ，在玄武岩輝長岩（密度 3.0g/cm^3 ）中為 $4.8\text{km/s} \sim 6.0\text{km/s}$ ，在純橄欖岩（密度 3.3g/cm^3 ）中為 $7.3\text{km/s} \sim 7.8\text{km/s}$ 。

利用上述地震波的特徵及其反射折射的特點，分析世界各地地震儀觀測記錄，不僅可藉以確定地震的震級、烈度等，還可藉以查明地球內部物質密度與物相的差異（圖3-1）。多年來的重要發現是相繼確定了地球內部的多個不連續介面。如內、外地核的介面、古登堡面、軟流層的底面和頂面、莫霍洛維契克面和康拉德面等（圖3-2）。

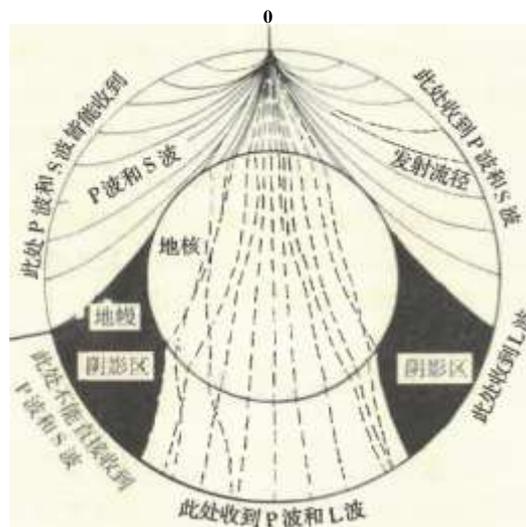


圖3-1 單個地震震源發出的地震波的傳播
(A-N-斯特拉勒等,1984)

內、外地核的介面深度約 $4\ 703\text{ km} \sim 5\ 154\text{ km}$ ，亦即其間存在厚約 5 km 的過渡層。過渡層以下的內地核，P波波速達 11.23 km/s 以上，並出現由P波派生出來的S波，說明內地核是固態物質，物質密度大於 $12\text{g/cm}^3 - 14\text{g/cm}^3$ 。

古登堡面是地核與地幔之間的介面，它的深度約 $2\ 900\text{ km}$ ，S波的傳播至此消失，P波的波速由 13.64 km/s 驟降為 8.10 km/s ，並出現P波的反射與折射，致使地面上較大跨度區域成為接收不到某個地震的P波的陰影帶（圖3-1）。古登堡面以下為外地核，它顯然是液態物質，密度從 9.71 g/cm^3 向下增加到 11.76 g/cm^3 左右。地核是由鐵與少量像、硫的混合物組成的，總品質約 1.947×10^{26} ，平均密度 10.7g/cm^3 。

軟流層的頂、底面深度分別為 $50\text{ km} \sim 70\text{ km}$ 與 250 km 左右。在軟流層厚度範圍內，S波的傳播速度由 4.6 km/s 驟降為 $4.2\text{ km/s} \sim 4.0\text{ km/s}$ ，P波的波速也由大於 8.1 km/s 降為 7.8 km/s ，往下又增達 97 km/s ，所以軟流層也稱低速帶。實驗證明地震波在液態結晶混合物中速度減慢並衰減，推測軟流層有 $1\% \sim 10\%$ 的物質始融玄武岩漿源，並使其上的岩石圈

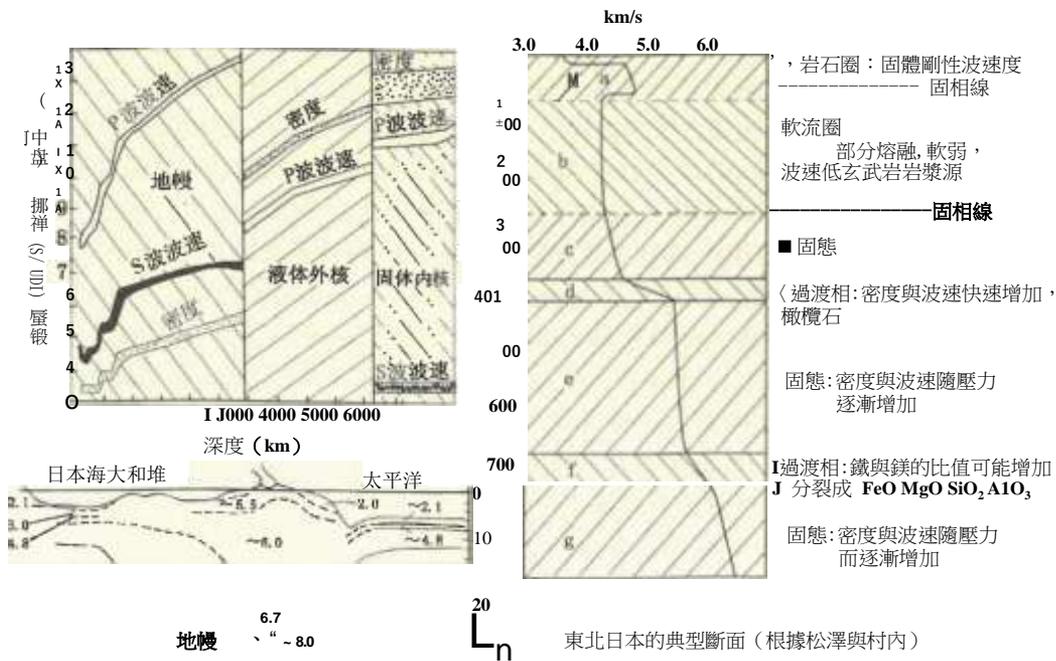


圖3-2由地震波傳播的變化所揭示的地球內部的圈層結構
(F•普雷斯等,1990)

板塊易於平移和局部向下楔入。

莫霍面是地殼與地幔之間的介面，P波的波速由6 km/s~7 km/s 陡然增加到8 km/s ~ &11 km/s。莫霍面的深度于海洋深處海底以下只有5 km左右，于高山和青藏高原以下埋深達64 km~70 km以下，平均深度17 km左右。莫霍面以上為地殼，平均密度2.8 g/cm³。莫霍面以下的地幔物質的密度約3.32 g/cm³- 3.5 g/cm³，至古登堡面增達5.66 g/cm³，平均4.48 g/cm³。大體在400 km深度與700 km深度為兩個波速與密度的較快變化帶。按相應的溫度與壓力實驗可以證明地幔由超基性岩類物質組成，為55%的橄欖石、35%的輝石與10%的石榴子石的混合物，下地幔則可能含有更多的鐵、鎂物質。自上而下，隨著溫度與壓力的增加，物質的相態變化也比較大。

康拉德面位於地殼內，表現為P波波速從6 km/s 向下增達6.6 km/s，有的地方為突變，有的地方為漸變，海洋地殼中則沒有這樣的介面。因此，康拉德面反映了大陸地殼與大洋地殼的差異以及大陸地殼的雙層結構。大陸地殼的上層由花崗岩與花崗岩成分的變質岩和薄層沉積岩組成，也稱矽鋁層；下層由玄武岩或輝長岩組成，也稱玄武岩層或矽鎂層。矽鋁層厚10 km 左右，矽鎂層厚20 km以上。大洋地殼只有矽鎂層，平均厚度7 km ~ 8 km。

專題2關於地震

地震是地下局部積聚能量的釋放，受力岩塊的突然錯斷或斷裂伴隨發生劇烈的振動，向四周發射P波、S波，傳到地-氣或地-水、水-氣介面，並成為兼有P波與S波特徵的面波，使地面上的建築遭受破壞以及生命傷亡。

地下地震波的起始點稱為震源。地面上距離震源最近的一點稱為震中震源深盧小千70km的叫淺源地震，70km ~ 300km的叫中源地震，300km ~ 700km以上的叫深材地震Q統一個震源發出的地震波其與地帶或和達巨與地驚割豐的岩石圈深及地幔。地震學家用地震儀記錄到的地震波振幅的大小確需地震的

震規模的10¹⁵J。但地震震級每升高一級相當於釋放能量增大約3.3倍。一次7級軸震釋放甜量弓10¹⁵J。記錄到的最大地震是1960年的智利地震8.9級，釋放能量約8.8x 10¹⁶J，不僅伴有強烈的火山噴發，而且伴隨發生強海嘯，在智利沿海浪高約7.3m，並橫掃太平洋把日本曲宙了豐豎高的碼頭上。地震造成的地面破壞程度稱為烈度，一般分蟲、蠶、鳶：

聯集由震源傳播將烈度即在外震區轉松地面出現裂縫。①猛烈毀滅性破壞震向外烈遞減烈度相等的連稱為

等震線-破壞性地震

破壞性地震延續分號豎帶稱地震活動帶。全球規模的地震活動帶有環太平洋地震活動帶（釋放地震能醫球地辰釋放能量的80%）、地中海-喜馬拉雅一爪哇地震活動帶、各大洋的蠶

陸裂谷系地震活動帶，大板塊內有板內地震活動帶（圖3-1在時間為營::器蠶躍

期〔地Y活動平靜期的交替。在中國，(4)7年“739年間有破壞蠶為〔地器2活

17警年鹽8次,1785年~ 1976年間有508次，90年代中期則又開始了一個新的上震活動活

躍期。美國加利福尼亞州大地震的時間間隔為50a~ 100a。全球每年地震約500萬次i*t k能直接感覺到的地震約5萬次，破壞嚴重的地震約〕次~2次20世紀90年代發生了寫譏

>7.0的大地震（見表3_1）。一正“年代發生了 13次M

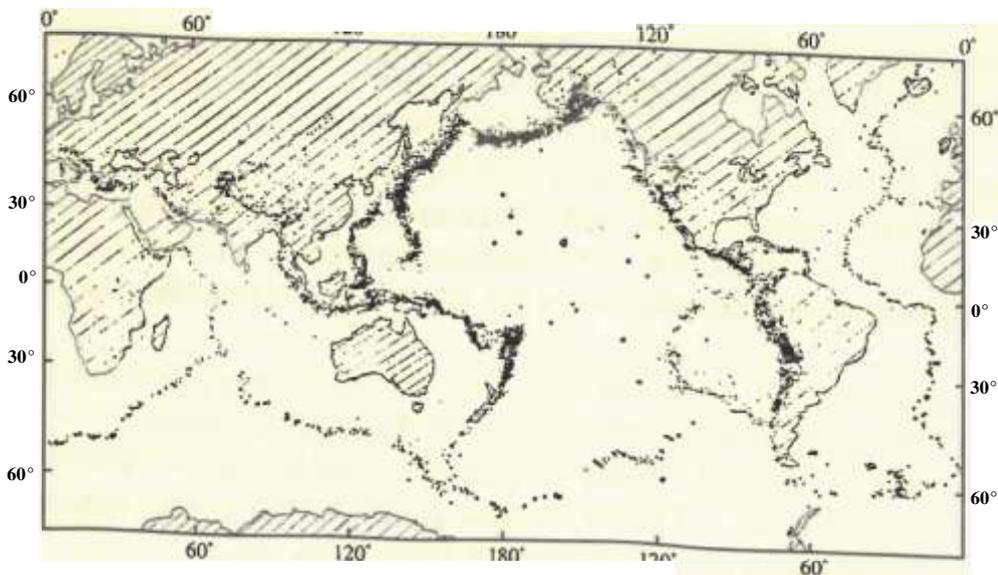


圖3-3 1961年~歸年間記錄到的（0km~ 700km）約3萬次地震廉中的分佈
(F•普雷斯等，1982)

表3-1 90年代裡氏震級大於7的地震

時 間	地 區	地震震級	死亡人數
1990.06.21	伊朗西北部	7.7	>40000
1990.07.16	菲律賓呂宋	7.7	1621
1990.07.21	伊朗裡海沿岸	7.7	35 000
1992.12.12	印尼佛羅科斯	7.5	2 500
1993.07.12	日本北海道	7.8	248
1995.01.17	日本神戶	7.2	6 308
1995.05.28	俄國庫頁島	7.5	2700
1996.02.05	中國雲南麗江	7.0	322
1996.02.17	印尼西伊裡安	8.0	145
1997.03.01	巴基斯坦	7.3	>1000
1997.05.10	伊朗東北部	7.1	2400
1998.05.30	阿富汗北部	7.1	5 000
1999.08.17	土耳其	7.8	15 600
1999.09.21	中國臺灣	7.6	2295

地震前兆有聲、光、電、熱、放射性活動及地下水活動異常、地形變異常等，最典型的是主震前越來越密、越來越強的前震，有的發生在當地，有的發生在主震的週邊。歷次地震，有不同的孕震過程及地質背景，地震前兆也千差萬別，因此，應選擇不同的地震預測方法和技術，預報不同地點下次地震發生的時間、地點、可能的震級大小以及破壞程度。

3.2 重力測量與重力均衡運動

重力即地球表面物體所受到的地球引力，但它還受到地球自轉而產生的慣性離心力的細微影響。重力儀，其原理並不比稱重彈簧秤更複雜。現代重力儀已能測到 $0.01 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 的變化。在19世紀中期，在印度進行大地測量，一種方法是地面測量；另一種方法是所謂的天文測量，觀測星球位置與鉛垂線之間夾角的變化，鉛垂線即是受地球引力作用而指向地心的重力線。兩種方法測量的結果是喜馬拉雅山南約100 km的卡利納(Kalians)與約600 km的卡利安普(Kalianpur)之間距離存在約150 m的誤差不能彌合。在這種情況下，提出了錘擺受喜馬拉雅山體吸引而發生偏斜的解釋，但實際計算又發現由喜馬拉雅山體的吸引所引起的距離誤差應是450m而不是150m。由此而誕生了均衡補償理論和重力測量校正。

重力測量的自由空氣校正是考慮到與地心距離遠近的不同，為此要把不同高度的實測重力值統一歸算到海平面位置上來。重力測量的布格校正是考慮觀測台站與海平面位置之間岩石品質的引力效應，即扣除地形對重力實測值影響的校正(圖3-4)。在山地丘陵區，大約每高出海平面1m，扣除岩石引力效應 $0.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。海上重力測量要對低密度水作布格校正，增加實測重力值。重力測量首先為論證地球形狀系旋轉橢球體做出了貢獻：離心力的作用總使

地球表面物體趨於飛離旋轉體，赤道位置距地心比極地距地心距離要遠，所以同一物體於赤道位置的重力較小，向極地方向隨緯度增加而增大，到極地的重力達相對最大，要增大約0-5%，相當於 $5.172 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ 。地球表面的重力加速度 g 的標準值是 9.80665 m/s^2 ，度45 噸 g 值是 9.80612 m/s^2 。

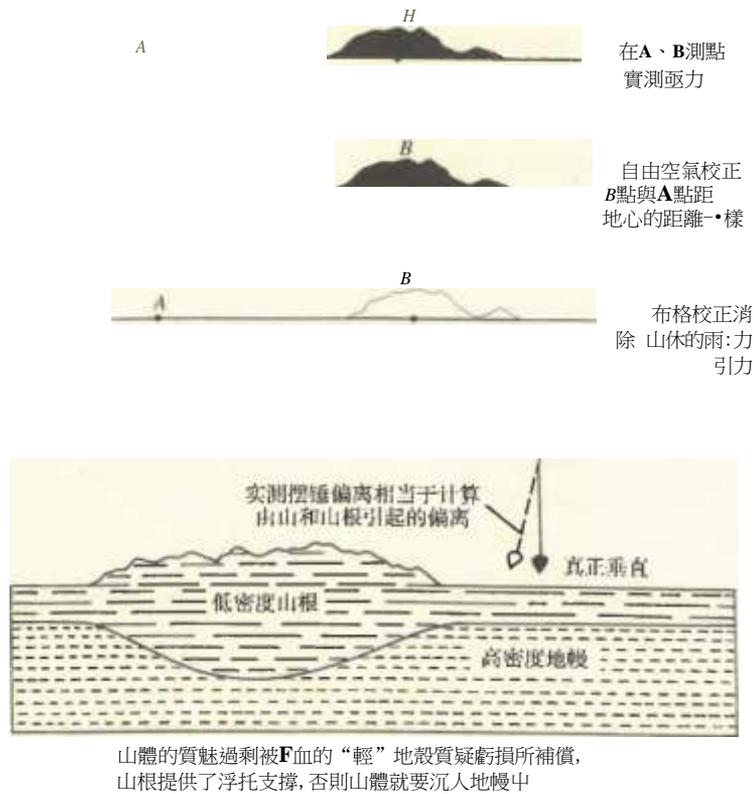


圖3-4重力測量的自由空氣校正和布格校正

根據引力計算出地球品質和地球的平均密度達 $5.518 \pm 0.004 \text{ g/cm}^3$ ，然而地表所見岩石的密度一般只有 $2.6 \text{ g/cm}^3 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ ，極少達到 3.3 g/cm^3 。墜落到地表的隕石，石隕石的密度為 $3.0 \text{ g/cm}^3 - 3.5 \text{ g/cm}^3$ ，石鐵隕石的密度為 $5.5 \text{ g/cm}^3 - 6.0 \text{ g/cm}^3$ ，鐵隕石的密度為 8.5 g/cm^3 。

所以，地球核心部分應該是具有很高密度的物質，且重力對於地球各圈層的形成、各圈層內以及各圈層之間的物質運動，也即對地球環境的形成乃至相對穩定，都起著決定性的作用。因此，有的學者認為重力在地球環境中起著最小“公分母”的作用，包括對地球上一切生命形式也起共同的作用。

重力異常是指實測重力值經過上述自由空氣校正與布格校正之後，仍不等於按公式計算的數值，比其大者為正異常，比其小者為負異常。它是由較高密度物質在地球內部分佈不均而引起的。1855年，艾利認為上述印度北部大地測量中鉛垂線偏離現象，是因為高山深處岩石的密度比相同深處其他地方的岩石密度要小。這一特徵被稱為“山根”。這種密度上的虧損基本上補償了山脈的附加品質。大洋盆地的高正重力異常表示品質過剩，密度較大的地幔岩非常接近地表。這個特徵也叫“反根”。因此，實測重力剖面線的起伏與莫霍面的起伏基本相似，它們與地形的高低起伏似呈鏡像反照（圖3-5）。這種關係反映均衡補償對地形起伏所起的作用。圖中海拔千米的盆地與山脈，地震探測揭示並不存在山根或反根，那兒的品質虧損由下面低密度地幔物質所造成。因此，引起均衡的動力是岩塊的重力。也就是說，地心對地球淺表各地的引力似是相等的，如果該地物質密度小，就以物質層趨於增厚來補償。

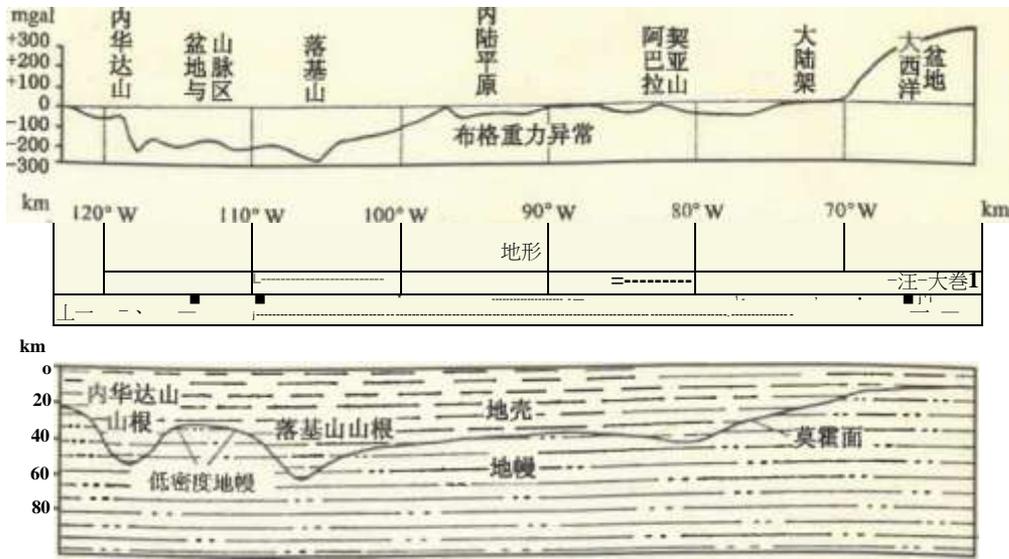


圖3-5橫越北美的實測重力剖面（上）、地形剖面（中）與莫霍面（下）深度的變化
(F·普雷斯等, 1982)

大陸剝蝕區不斷剝蝕、地面降低，就有重力均衡回升補償；沉積區不斷增積、地面增高，就有重力均衡沉降補償；大冰蓋區增厚冰體荷載就有重力均衡地面沉降補償，冰體消融減荷就有重力均衡冷地面回升補償；海洋或大湖區水層增厚、水位上升，就有重力均衡底面沉降補償；水層減薄、水位下降有重力均衡底面抬升補償等。上述的地面荷載增減，重力均衡均能影響到岩石圈層以下軟流層物質的潛移；在荷載增減與重力均衡補償之間，一方面存在時間上的滯後，另一方面由於岩石圈層的永久性變形而造成均衡補償升降幅值方面的損失。北歐斯堪的納維亞地區，于1萬多年以前冰期鼎盛時期曾發育厚逾2000 m~ 3000 m以上的大冰蓋，冰蓋消融後的瑞典中西部地區，近萬年來地面抬升了200m左右，平均速率達5cm/a,目前還有 $-50 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$ 剩餘重力異常，估計還將繼續上升200 m（圖3-6）。北美哈德遜灣地區也有類似的拱形隆起現象。

3.3 地熱與地幔對流

古人據熱泉和火山爆發噴出熔融岩漿等事實，早就推測地球內部比地表熱。中國華北鑽孔的測溫資料：近地表小於20 七，800 m深處40 七，1400 m深處60 七，5000 m深處180 七。該地的地熱增溫率或地溫梯度，即深度每增加100 m的溫度增加，在深度800 m以內為2.5 七/100 m, 1400m以內為2.86 七/100m, 5000m深度以內平均為3.2P/100m,相當於32七/km。

地熱是通過岩石傳導的。岩石的導熱率有比較大的差別（表3_2）。當地的岩石導熱率與地熱增溫率的乘積即為該地的地熱流值。如美國洛磯山某地的地熱增溫率為石您/皿，岩石標本的導熱率為0.033 J/cm s代，算得該地的熱流值為 $25 \times 10^{-6} \text{J/cm}^2 \cdot \text{s}$,即每秒每平方釐米傳

熱 $8.25 \times 10^{-6} \text{J}_0$ 根據全球5417·個熱流測量資料，全球每年的地熱流量為 $10.24 \times 10^{20} \text{J}$,超過了平均全年的地震釋放總能量的1000倍，超過了人類總消耗能量的10倍，超過把北美洛磯山

脈抬高1cm所需能量的1000倍，不過與來自太陽輻射的能量相比，它只有1/5000左右。

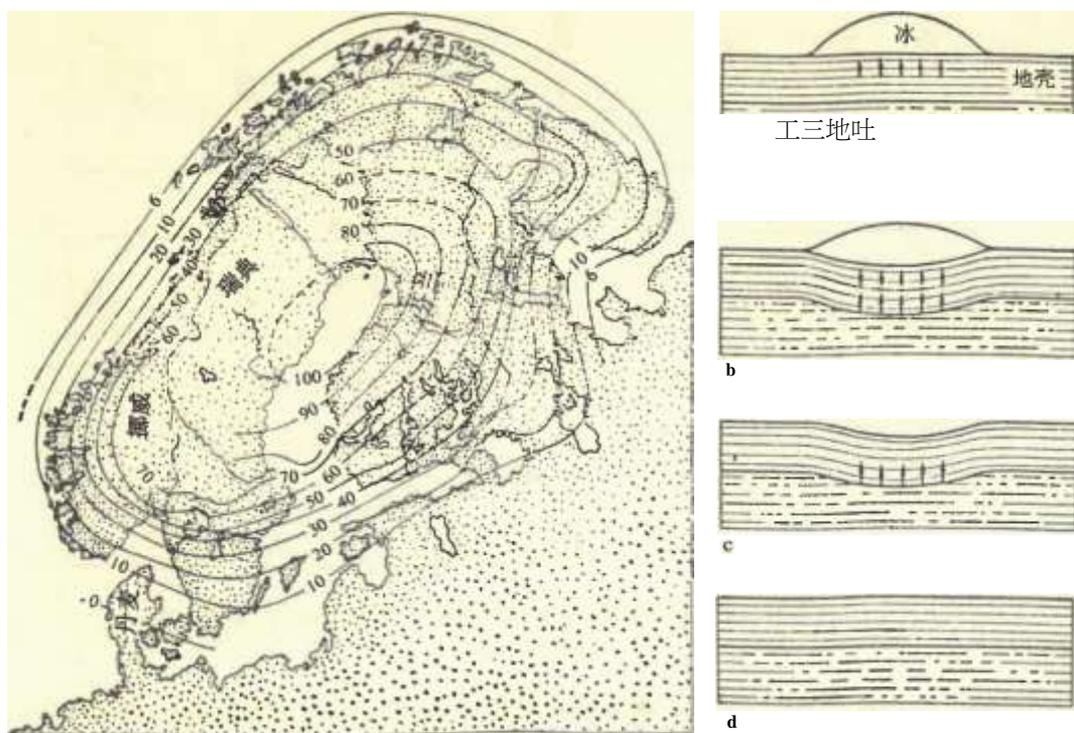


圖3-6近5 000年北歐斯堪的納維亞地區的地面上升
(單位:m) 與冰消後地面回升機制示意圖

表3-2岩石的導熱率 (x10¹¹ j/cm s代)

岩 石	導熱率	岩 石	導熱率
花崗岩	25-38	白雲岩	38-59
粗玄岩	29-33	砂岩	17-46
片麻岩 (垂直于片麻理)	21-38	葉岩	13-25
片麻岩 (平行于片麻理)	26-46	岩鹽	54-71
石英岩	29-79	含水的海洋沉積物	7-10
石灰岩	17~29		

根據地熱流的觀測值推算地球深部的溫度 (表3 - 3) , 到50 km深處大約為980 七; 再根據地震波傳播速度變化情況推測,100km深處約1 100P ~ 1 200七,400km深處約1 500% : ,700km 深處約1 900T ,2 900km深處約4 000T,地球中心的溫度估計為5 500七左右 (圖3 - 7) 。

表3-3地表以下流體靜壓力與溫度的變化

深度 (km)	靜壓力 (x 10 ¹¹ kPa)	溫度 (t)	深度 (km)	靜壓力 (x10 ¹¹ kPa)	溫度代)
0	0	0	30	8.5	700
5	1.3	200	40	11.5	850
10	2.7	350	50	15.0	980
20	5.5	550			

據圖3-7,在部分熔融的軟流層，地溫達到了初始熔點;大部分地幔的溫度低於熔點;液

態鐵質外地核的地溫超過了熔點。實際上，不同地區的地溫隨深度的變化，有時是不一樣的。在盆地與山脈具較高的熱流意味著在該年輕活動區的深部溫度較高，於40 km深處溫度差不多上升1 000℃，而地質年齡更老、較穩定的美國東部，同樣深度的溫度才有500℃：

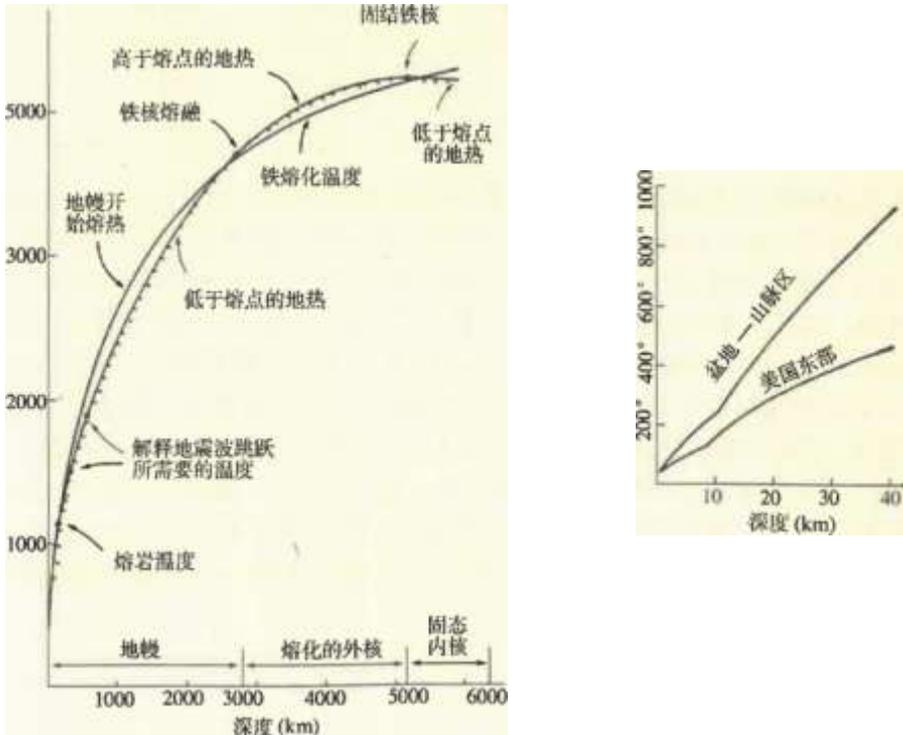


圖3-7從地表到地心的溫度變化
(F·普雷斯等,1982)

實測的地熱流值，於大陸上構造運動不活躍地區，如加拿大的中部和東部前寒武紀岩層出露的廣大地區大約為 $4.18 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$ ；在最新造山帶、火山活動區即構造運動活躍地區，如阿爾卑斯或美國西部約為 $4 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。世界大洋底的平均熱流值，在大洋中脊地帶平均大於 $8.4 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，大洋盆地區平均為 $5 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，大洋邊緣深海溝地帶平均小於 $4.18 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

大陸與大洋底的平均熱流值相近，原因在於大陸地殼的最外層大部分是花崗岩，花崗岩是放射性最強的一種岩石（表3-4、表3-5）。因此，大陸的地熱流是深層熱流與花崗岩深度乘花崗岩產熱量兩者之和的熱傳導。對於大洋底來說，洋底距地幔層頂一般只有幾公里到十幾公里。

表3-4普通火成岩的放射性產熱量
(夏邦棟等,1992)

石類	放射性元素含量 (g/g)			衰變產熱量 (J/g a)
	K	U	HI	
花崗岩	3.34×10^{-2}	3.5×10^{-4}	1.8×10^{-5}	29.47×10^{15}
中性岩	2.3×10^{-2}	1.8×10^{-4}	1.0×10^{-5}	13.94×10^{15}
基性岩	8.3×10^{-3}	5×10^{-5}	3×10^{-6}	4.97×10^{16}
超基性岩	3×10^{-4}	3×10^{-7}	5×10^{-5}	4.31×10^{16}

表3-5地球各圈層的放射性產熱量 ($\times 10^{18}\text{J/a}$)
(夏邦棟等,1992)

圈層	%	逸U	232班	你	合計	占總產熱量%
地殼	22.6	537.1	544.2	158.8	1262.8	763~
地幔	5.9	144.2	168.5	46	364.5	21.7
地核	0.8	16.7	14.6	-	32.2	2.0
共計	29.3	698.1	727.3	204.8	1659.5	100.0
占總產熱量%	1.7	41.7	44.3	12.8	100	

大洋洋底的地熱流，如果單靠岩石的導熱傳導的話，每傳導10m約需3a,100m厚的熔岩流大約要經300 a才冷卻，通過400 km厚的岩石大約需要50 x 1 %。後者差不多已超過地球年齡T₀。20世紀30年代由霍姆斯提出了對流作用的可能性，並認為它可能是魏格納提出的大陸

漂移的驅動機制。結合大洋中脊地熱流值高，且多火山熔岩、地勢相對較高等特點，由特科特和奧克斯伯提出了上地幔中可能的熱對流圖式(圖3-8)。大洋中脊部位是上升熱柱，然後往兩側擴張，在大洋的傳輸過程中冷卻、凝固而成冷的具脆性的岩石圈板塊。俯衝岩石圈即下降的冷柱，向下回流，在深層被加熱，再上升，在地表下幾百公里形成反向流而完成對流環。對流是由輕的、熱的上升柱的浮力和冷的、重的下降柱的下降力驅動的。按模式計算對流的速度與

海底擴張的速率是一致的，散失到地表的熱與實測熱流值符合得也很好(F·普雷斯等,1982)。圖3-8中右側的上升熱柱所代表的是下降柱與上豐岩石圈的摩擦熱，並導致局部熔融及向上穿插。

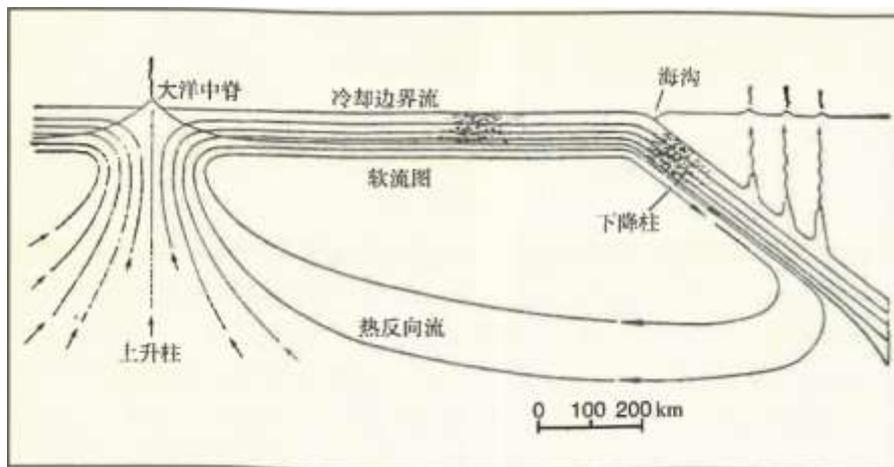


圖3-8上地幔中可能的熱對流圖式
(F·普雷斯等,1982)

3.4 地磁與地球的圈層運動

大約2500年前希臘人發現了天然鐵礦所具有的磁性，並把這種有磁性的礦物叫做磁鐵礦。在中

國, 據西元前3世紀的《韓非子·有度》記載, 已有用天然磁鐵礦琢磨成的指南針, 稱為“司南”。由於可自由轉動的磁鍼能在地球磁場中保持磁子午線方位, 所以可藉以辨別方向, 應

用於航海、旅行和行軍。1600年，英國伊莉莎白一世的醫生吉伯特發表了《磁性》一書，不僅解釋了磁羅盤的工作原理，還提出了“地球如同一個大磁鐵”的說法。

地球磁場恰似在地中心置有一巨大的磁棒（圖3-9）。磁極與地球的地理軸交角約 $11-5^\circ$ ；羅盤磁鍼與磁力線保持一致，指向地磁北極，它與地理北極之間的偏離稱為（地）磁偏角。在地球表面的磁極點，磁感線及磁鍼與地面垂直；在赤道附近它們又與地面近于平行；在地球表面其他地方，磁力線及磁鍼與地球表面之間的夾角叫（地）磁傾角-磁傾角（ i ）與地理緯度（ θ ）的關係為 $\tan\theta = 1/2\tan i$ 。

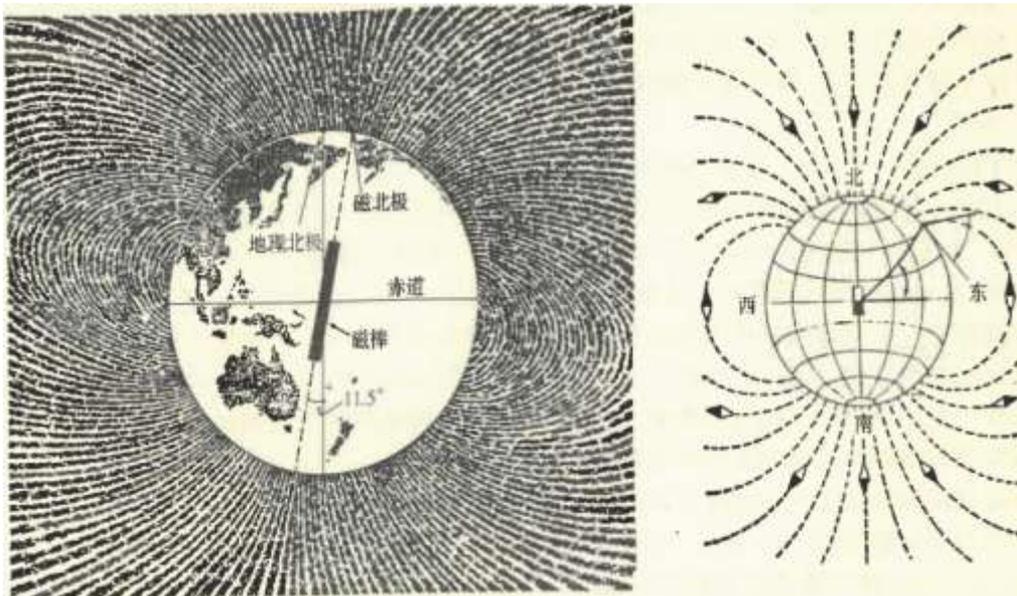


圖3-9地球磁場恰似在地中心置有一巨大磁棒與懸掛磁鍼在地球磁場方向的排列

為了使羅盤中的磁鍼能保持在近水平面上自由轉動，在北半球使用的羅盤就需在南半球磁鍼上加個重量，以抵消磁傾角造成的磁鍼的自然傾斜。普通馬蹄形磁鐵的磁場強度約 $10 \times 10^4 \text{T}$ ，地表附近的地磁場強度約 $0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ 。

由於大多數磁性物質在500°C左右^①，即相當於地下20 km ~ 30 km深處，就會失去永久磁性，所以實際上地心不存在類似於磁棒的永久磁性體。因此，關於地球磁場的由來，可比擬於借助蒸汽動力或水動力推動電導體在磁場中旋轉發電原理，地球的內核流體易於運動，鐵又是良導體，於是由埃爾薩塞和布拉德提出，在地核中存在一部自激發電機，產生地球自己的磁場。其中的旋轉電導體也許是放射性元素衰變產生的熱促使液態的鐵的對流，有一個小的偶然出現的磁場與運動的流體鐵相互作用產生電流，產生地球自己的磁場，即啟動自激發電機（F·普雷斯等，1982）。也許，地球內核的流體鐵本是由重力分異助動的，它與固相鐵鎳內核之間存在相對旋轉運動而產生地球磁場。月球上 $30 \times 10^4 \text{A} \cdot \text{m}^2$ 的岩石曾被磁化，但自那之後便不再存在星球規模的磁場，這是由於月球的演化使其液態鐵核冷凝之故。

地球磁場的變化曾被記錄在幾百年間的地磁觀測之中。倫敦的羅盤磁鍼從1580年到

① 居裡溫度。鐵的居裡溫度769°C，鎳是358°C，鑽是1131°C。

1660年，磁偏角自11°NE轉到0°N，1820年又轉到24°NW，1970年再回到7°NW。這時的地磁北極位於加拿大北海岸以北距地理北極約1600 km處，地磁南極在羅斯海西部沿岸附近距地理南極約1600 km處，兩磁極不在地球兩端正好相對應的兩個點上，兩磁極的連線即磁軸並不通過地心。地球磁場總強度自1670年以來已降低約15%，如繼續下去，約4000 a後將減弱到零。據2000年2月號《物理吐界》報導，丹麥的科學家觀測發現，過去百年中，地磁北極向地理北極

方向移動已超過1000 km，過去十年中地磁場強度下降了1%左右，過去一年中地磁北極北移加速達20 km/a之多。它是否預示在今後幾千年地球磁場將發生南極與北極的大倒轉？因此，全球的地磁傾角等值線圖與等磁力線圖均需經常地修訂。局部地磁強度的差異，主要與強磁性體距地表的深度有關。它一方面可以用來尋找淺埋藏的強磁性體，如淺埋藏的鐵礦；另一方面也可能造成某些危害，如高速車輛穿越地磁異常區，切割磁力線，就會出現“耦合”（互感）現象，並導致駕車失控出車禍。

關於地磁極向的變化，早在1906年法國物理學家布倫赫斯(B. Brunhes)就曾發現有些岩石的磁化方向與地球現在的磁場方向相反，也就是說地球磁場曾整個兒倒轉過。澳大利亞的一位研究生，曾發現一處3萬年前土著居民的燒飯壁爐，他測了被烤焙過的石頭方位後又測石頭的磁方向，發現它與現代磁場方向是相反的。這是壁爐石塊經焙烤失去永久磁性後冷卻到低於居裡溫度又受當時地磁場作用而磁化的記錄，也稱熱剩餘磁化。沉積岩在碎屑微粒沉落時，受當時地球磁場控制，其磁性礦物呈定向排列，並保留在該沉積成岩之後的岩石中，也叫沉積剩餘磁性。利用熱剩餘磁化與沉積剩餘磁性，就可以重建地球歷史時期的古地球磁場，或確定原岩所在的古地理緯度以及原岩形成後是否發生轉動等。

地磁極漂移是測定不同時代岩層的剩餘地磁傾角和地磁偏角，確定不同時代的磁極位置，並追蹤它的時變路線(圖3-10)。圖中所示的是被測定古地磁要素的岩層所組成的大陸的相對運動，北美與歐洲兩條地磁極漂移路線的由分到合而重疊一致，實際上是它們分別移動到接近目前的所在位置，相對來說又與北美-歐洲之間的大西洋盆地的橫向擴張有關。

地磁場反向是指過去的地球磁場有時與今相當稱正向，有時與今相反稱反向。測定不同時代岩層的剩餘磁化方向，建立地球磁場正向與反向的時變順序，也叫“磁性地層”研究。圖3-11即為用磁性地層法確定的近5 x 10³ aBP地球磁場正向反向的變化，還插有多次延續2 x 10³ a~200 x 10³ a的地磁反轉事件。據科克斯(A. Cox)和曼金恩等(E. A. Mankinen and G. B. Dalrymple), 主要的地磁事件有加拉米洛事件(Jaramillo, (0.90 ~ 0.97) x 10⁶ BP)、奧爾都威事件(Olduvai, (1.67-1.90) x 10⁶ BP)、留尼旺事件(Reunion, (2.01 ~ 2.04) x 10⁶ BP, (2.12 ~ 2.14) x 10⁶ BP)、卡納事件(Kaena, (2.92-3.01) x 10⁶ BP)、馬莫斯事件(Mammoth, (3.05 ~ 3.15) x 10⁶ BP)等。地球磁場極向的轉變與地磁事件通常與岩層組之間的分界相吻合，代表地理環境的重大變化。

海底的磁帶記錄(圖3-12)是據第二次世界大戰期間使用的航空磁測以及後來的海洋磁測與海底磁化岩石的地磁測量資料編制的，許多地方的正磁異常條帶與負(即反向)磁異常條帶呈線狀延伸長達幾百上千公里之遠。在大洋中脊的兩側，正、負磁異常條帶呈對稱地相間排列。1963年，英國的瓦恩和馬修斯，與加拿大的莫利和拉羅徹爾差不多同時提出了震驚世界的解釋：海底的正、負地磁異常條帶即古地磁場正向期、反向期磁化海底岩石的條帶，是由於大洋中脊部位上湧冷凝的熔岩被當時的地磁場作用而磁化，然後差不多縱分為半移向兩側，其間又上湧新的熔岩，它在改變了磁場方向的地磁場作用下再磁化，如此繼續，於是出現了以洋中脊為對稱軸的磁帶記錄。磁帶記錄的寬度以及它遠離洋中脊的距離，代表著海底擴張的幅距。

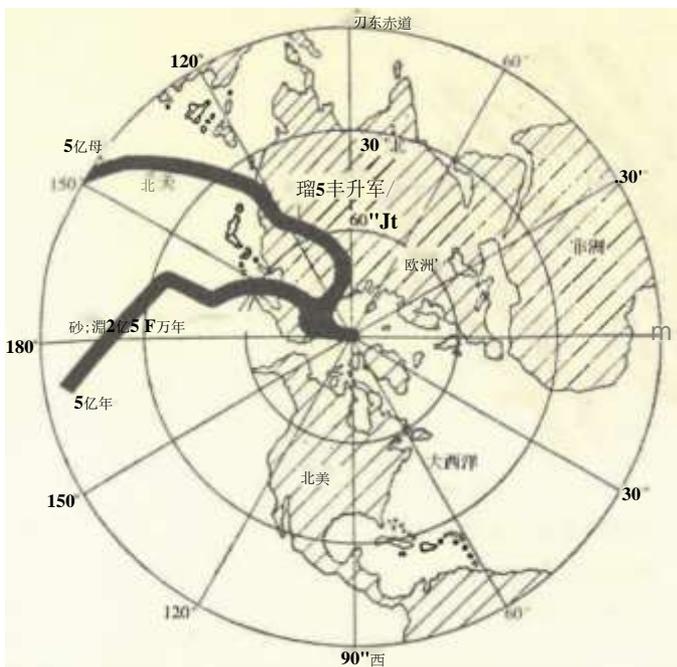
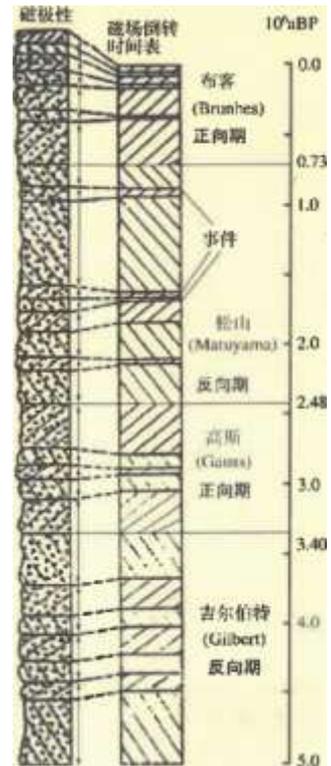


圖3-10根據北美和歐洲古地磁資料繪製的
5億年來的地磁極的漂移



EZZJ 正常磁場(normal polarity)
CS3 磁場反向(reversed polarity)

圖 3 - 11 由熔岩流磁極性建立的 5 x 10⁵ a 以來地球磁場極性的變化概要圖

和速度,並可製作海底岩石年齡的等時線。

關於地球磁場發生倒轉的原因,概如地球磁性的由來,它可能與液態外核包裹的內核同地幔圈及岩石圈之間的相對運動有關。最近有二則報導,有利於解釋地球磁場的倒轉變化。一則是美國地球物理學家運用層面X射線照相成圖技術,在地殼與地核之間開50 000個“窗”,測P波通過的速度和時間,查明6 100 km深處的地核表面,有高差3.2 km~9.6 km的凹槽和隆起,延伸幾千上萬公里遠。另一則是中國和英國的科學家,測得通過內核傳到阿拉斯加地震接收儀的地震波,在30多年間發生的變化,判斷地球內核的轉動速度比地球本身快,300 a~400 a就會比地球多轉一圈。

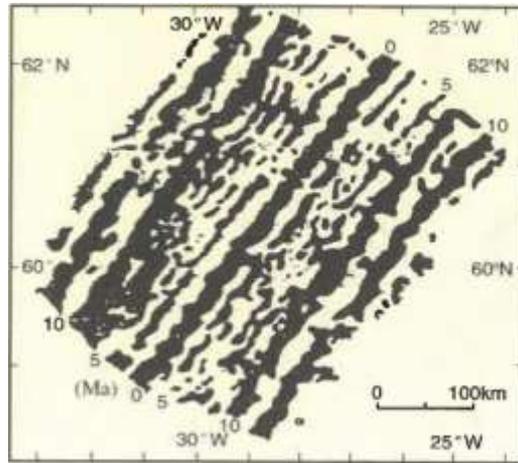


圖3-12冰島西南方大西洋中脊兩側的海底地磁條帶
(A-N-斯特拉勒等,1984)

£關鍵字*

地球物理地震圈層結構重力均衡運動地熱地幔對流地球磁場地球圈層運動

思考題

- 1.多種地球物理方法探測地球內部物質與物質運動的特點。然而這些地球物理的方法和技術又是如何創造出來的呢，對它的測量資料的解釋可信嗎？
- 2.能演示地球內部不同圈層之間存在相對轉動嗎？能藉以解釋外核的液化嗎？

第四章地球的自轉運動

信蠶嘗■爻

地球自轉使地球獲得生機。地球自轉速度的快慢變化又使地球表層環境發生重大變化。偏轉力的作用是使地球上的運動物體的運動方向發生變化。

自轉是地球自身的周日旋轉運動。地球繞地軸自轉，但地軸仍然是抽象的軸，地軸與地球表面（確切地說應是海平面）相交的兩點為極點，地軸的中點為地心，通過地心且與地軸相垂直的平面稱赤道面，赤道面與地球表面相交的大圓為赤道。南極點、北極點與赤道三者成為在地球表面劃分地理座標經度與緯度的依據。

地理經線是起止於極點又垂直於赤道的子午線。以通過英國倫敦附近格林威治（Greenwich）皇家天文臺（建於1675年）的經線為起始經線（本初子午線），並作為經度零度線，向東與向西均分 $0 \sim 180^\circ$ ，於是地球表面所有經線都是真南北方向，弧長 180° 在赤道，相鄰兩整數度經線之間的時間距離為最大，達 111.32 km ，向兩極方向收斂直至為零。地理緯線為垂直地軸而與赤道面相平行的面與地球表面相交的小圓。所有的緯線都代表真正的東、西方向，互相平行，且都與經線直交，同一緯線上的每個點具有相同的緯度（圖4-1）。因此，地球上的每個點，都可以測算出它的經度和緯度，在緯線上測它與本初子午線之間的弧度即經度，在經線上測它與赤道之間的弧度即緯度。與此同時，有了一個點的經度與緯度，就可以準確無誤地在地球上找到這個點。不過，由於經線向極點收斂，而且地球是個旋轉橢球體，所以地球表面不同地點之間的等緯度實際距離與等經度實際長度是不一致的（表4-1）

表4-1地球上經度與緯度的長度

緯度（°）	在經線上緯度1°的長度（km）	在緯線上經度1°的長度（km）
0	110.57	111.32
15	110.64	107.55
30	110.85	96.49
45	111.13	78.85
60	111.42	55.80
75	111.62	28.90
90	111.70	00.00

地球自轉的方向自西向東與地球公轉方向一致，造成地球表面的晝、夜更替並自東向西推移。地球上同一地點連續兩次通過地心與日心的連線（正午或午夜）所需的時間叫做1個太陽日，全年平均1個太陽日為 24 h 。但是，由於地球在公轉軌道上日日前移，所以1個太陽日地球

自轉了 360°。寫還由於地球自轉軸的傾斜決定了赤道平面與黃道面相交，造成地球公轉一圈，地球上的太陽直射點在南、北歸線之間往返一次，地球上出現了春、夏、秋、冬四季之分。春分點與秋分點相當於地球公轉到赤道面與黃道面相交於公轉軌跡的位置上。

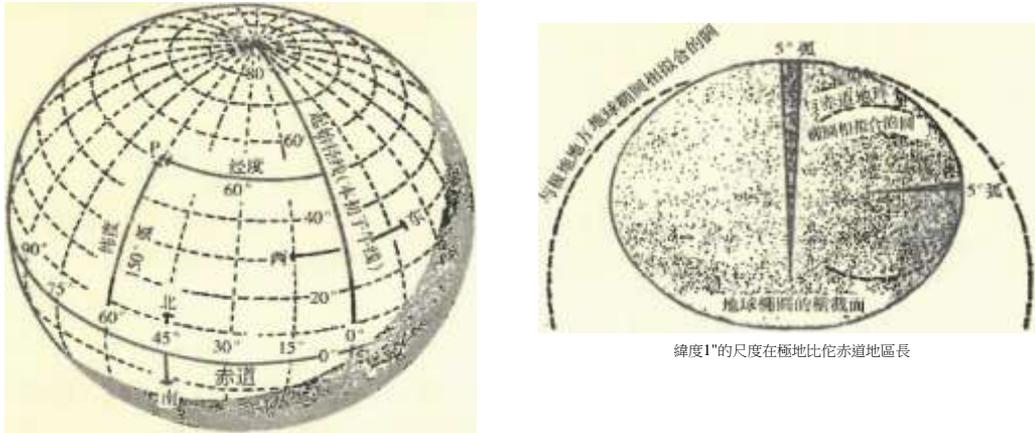


圖4-1經度與緯度是分別沿緯線與經線測出的弧度

地球自轉一周即地球表面的物質在緯線上轉了一圈。由於不同緯線上的經度間距不一 (表4-1)，所以不同緯度的自轉線速度也有很大差別。緯度 0°，即赤道上的自轉線速度為 465.1m/s、10。為 458.0m/s、3G。為 402.8m/s、60°為 232.6m/s、80°為 80.8m/s、90°為 0.0m/s。

地球自轉的地理環境效應，除了上述多個方面以外，其他比較突出的有：一是由日、月引力在旋轉的地球表面產生潮汐運動，有海（洋水）潮與固體潮，潮波向西推進。二是地球上的運動物體受到偏轉力（寇里奧利力，簡稱科氏力）的作用而發生運動方向的偏移。偏轉力來自於高處的自轉線速度大於低處，低緯的線速度大於高緯，從而給移動物質附加慣性力的作用而使該運動物的運動方向發生偏轉，在北半球必向運動方向的右側偏轉，在南半球必向運動方向的左側偏轉，偏轉力表示為：

$$F_c = 2 \cdot v \cdot \omega \cdot \sin \theta$$

式中， v 為運動物體的運動速度， ω 為地球自轉角速度， θ 為運動物體所在地理緯度。偏轉力使氣流、洋流、水流和其他運動物體都發生運動方向的自然偏轉。三是產生極廣泛的周日性韻律，包括光、熱、大氣和水的溫度與運動等等的周日變化，生物的周日性節律等，如植物於白天貯藏能量，有的動物夜間覓食等。

地球自轉速率變化的直接效應是地球表面的日長發生變化，自轉快了即日長縮短，日長增加即自轉慢了。據古生物化石年生長紋的偵查，如五六億年前的珊瑚化石每年有400多條日紋，現在的珊瑚每年只有365條日紋，估算3億7千萬年前每年約400d，7千萬年前每年約375d (表4-2)，表明幾億年來的地球自轉速度變化的總趨勢是放慢的，可能還存在放慢速度不勻的現象。據17世紀以來的觀測，平均日長大約每世紀增加一二毫秒，即地球自轉仍在減慢，雖然其間有過多次短時間的加快。

表4-2幾億年來地球上每年天數的變化
(任振球,1990)

化石类别	地质时代	绝对年龄(x 10 ^a)	每年天数(d)	波动范围(d)
珊瑚	现代	0	360	
	晚石炭世	300	385	380-390
	早石炭世	320	398	
	中泥盆世	370	398	385 ~ 405
	中志留世	420	400	
	晚奥陶世	440	412	
瓣鳃类	现代	0	359	353 ~ 366
	晚白垩世	70	375	371~ 379
	中三叠世	220	372	365 ~ 375
	晚石炭世	290	383	380-389
	早石炭世	340	398	397 399
	中泥盆世	360	406	

地球自轉速率的變化會引起全球海、氣系統的物質運動發生變化，還會使岩石板塊的運動發生調整。李四光在1973年提出全球性緯向構造帶的發育以及部分旋扭構造的形成，與地球自轉速度的變化有關。另外，部分地區的地震較多地發生在地球自轉速度加快時期。20世紀內發生的幾次火山爆發，尤其是低緯地區火山爆發，又多發生在地球自轉速度減慢的時段內。有的學者專題討論地球自轉速率變化與海面變化、湖面變化、海流湖流的變化以及大氣環流、氣團運動變化的關係等。地球自轉及自轉速率變化給地球環境帶來了勃勃生機。

地球除自轉運動之外，還有地極移動、章動以及暫態的顫動等。

(1)地極移動

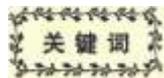
地極移動是指地球自轉軸的暫態擺動，極點移動的範圍一般不超過12.2 m。已知最明顯的極移是錢德勒(Chandler)擺動，在極點附近，地球自轉的轉動極做反時針方向的圓周運動，特徵週期為1.174 a(14個月)。一般認為它是由非剛體地球的自由擺動(週期為305 d)加上阻尼作用引起的。它與朔望月及近地月的公共週期1.27 a比較接近，因此錢德勒擺動可能與潮汐變化有關。為期12個月的地極的反時針方向擺動，是由氣團的季節性移動引起的。張煥志認為地極在地理位置上的29.8a週期的移動，可能是由地球的內核振動引起的。

(2)章動

章動是地球自轉軸空間指向的一種短週期晃動。它疊加在歲差之上，使地軸在天球上“畫”的小圓附加了小的波浪式擺動。章動的主週期是18.61 a，地軸空間指向每年偏18"(任振球,1990)。引起地軸章動的主要原因是月球軌道面位置的變化。

(3)暫態顫動

地球的暫態顫動可能是由大地震、強烈的火山爆發、較大隕石的撞擊等事件而產生的。1960年5月21日智利大地震被比喻為“就像是有人用一個大錘猛擊地球”，在全球範圍內發生過顫動。1883年8月27日印尼喀拉托火山噴發，把一座近1000 m高的火山島炸成一個寬8 km、深240 m的海底盆地，火山灰柱高27 km，這次大噴發使我們大氣層的每個部分都在震顫，大氣衝擊波每36h環繞地球一周，速度為11200km/h。

**关键词**

自轉經度緯度潮汐運動科氏力自轉速率的變化

**思考題**

1. 試舉3~5例，說明地球自轉及自轉速率的變化對你周圍環境的影響。
2. 海潮潮波向西推進受陸地阻擋，長此以來曾使地球自轉速率趨於放慢嗎？
3. 地球自轉速度變化會使周圍環境發生哪些變化？

第五章地球的起源與演化

囂舊予 地球演化是開放系統中的自生過程,向有序方向發展。地球的圈層結構和地畫蠶邱球表層是向有序方向發展的有序結構。

關於行星的起源,多數科學家曾相信,它本是由原始的、緩慢旋轉的氣體雲,受某種未確定的燃烘而凝聚形成的多個球狀體。但有的科學家猜想,也許是太陽和另一顆恒星很近地相擦而過,拉出一些氣體物質,爾後又在太陽旁凝縮成一些小“星子”,之後再成長為行星的。我們則比較相信地球是由宇宙物質增積而形成的。地球的自轉使地球體成為美妙的球形體並獲得勃勃生機。

關於地球的演化,普雷斯和錫弗爾(1982)曾做過如下描述:

(1) 初始階段是均一化的凝聚作用。根據已知的隕石年齡(約 4.5×10^9 a)、月球年齡(約 4.6×10^9 a)和地球上最古老岩石的年齡(約 4.0×10^9 a)估計,約 $5.0 \times 10^8 \sim 4.7 \times 10^8$ BP開始了獲得微星體及微星體增積的行星集聚過程。那時期可能是一種無分選的凝聚,主要是矽化合物、鐵與鎂的氧化物和少量多種天然元素。不過,本書作者認為還應考慮不定向的微星體集聚使早期行星獲得了自身的旋轉運動,旋轉運動又有利於加快增積集聚過程。

(2) 增溫過程。首先是投落的微星體所具有的運動能量在集聚中轉化為熱能,雖然其大部分以熱輻射形式又散失到宇宙空間,但有相當部分被保留在生長中的行星上。它一方面被後來增集的微星體層掩埋,另一方面則不斷地增加吸納後來投落的微星體所帶入的能量,特別是摩擦產生熱量和壓縮增溫效應。據普雷斯等大多數地球物理學家認為,增積和壓縮作用會使新形成的行星內部平均溫度增達1000 K。接著是放射性元素的自發衰變釋放熱量,並由於導熱散失率低而積累。雖然放射性熱的生成十分緩慢,但要考慮多少億年的積累,還是有可能引起新形成的地球的內部增熱,並進入新的演化過程。

(3) 內部熔融分異過程。旋轉的地球,內部因增溫而熔融。鐵是一種高豐度元素,而且比地球上其他普通元素較重一些。旋轉中的地球,促進內部熔融的鐵向地心方向的滲聚,並擠動原處在中心位置的其他物質,產生內部物質的對換和分層。鐵向地心方向滲聚,又釋放巨大的重力能,再轉變為熱能並積累起來,會使地球內部增溫到2000 K以上(圖5-1),並引起大部分物質熔融。地球內部大部分熔融,更有利於重力分異物質的翻轉對流:熱膨脹的與本來就較輕的物質上浮,重的與散熱的物質下沉並壓縮,最終造成地表層冷卻成為地殼,內部則按壓力與溫度關係構成圈層。上述的地球內部的重力分異與物質的翻轉對流,自然還包含著所謂的化學分帶,各種元素與化合物受其熔點、化學親合力、密度、遷移速度等因素的控制,而在特定的地帶內集貯。如金、鉍等重元素,對氧和矽幾乎沒有化學親合力,沉向地核;如鎂-鐵矽酸鹽,不

太容易熔融，而且比長石還重些，則貯存在地幔層中；如鈾、釷等強烈地趨於形成氧化物和矽酸鹽，便上浮到地殼層中聚集。分異的結果是使地球內部產生相對穩定的密度圈層結構，並使放射性產熱物質集中到外層來，其後的放射性產熱較易向地表傳導

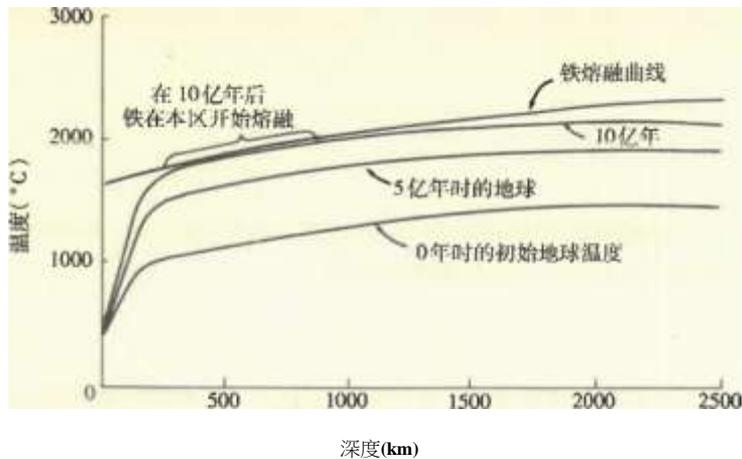


圖5-1最初+多億年地球內部的溫度
(F·普雷斯等,1982)

(4)大洋與大氣圈的形成。大洋水是地球內部加熱和分異作用的產物。當熔岩到達地表時，大部分水就呈熱的蒸汽雲逸散出來。即使按現代的火山活動速率估計，在過去的進程中，確有足夠的時間由上升熔岩帶出足夠多的水蒸氣，成為充滿大洋所需要的水。一般認為地球大氣也主要來自地球的分異脫氣作用。據熔岩的化學成分和現代火山釋放出的氣體來看，地球上的原始大氣主要成分應是水汽、氫、氯化氫、一氧化碳、二氧化碳和氮，很少氧氣。有部分水汽經陽光作用會分解成氫和氧，但又會同甲烷、一氧化碳等相結合成水和二氧化碳，還會同部分金屬物質結合成氧化物，如三氧化二鐵。

(5)生命的誕生和進化序列。近代發現星際空間中有氨、甲烷、甲酸、甲醛以及隕石中有氨基酸，這對研究地球和宇宙其他地方生命的起源具有深刻的意義，說明簡單的有機化合物——生命的構成單元的形成，是銀河系演變的“正常”產物。在地球上已發現了 32×10^6 BP 的微球粒狀和纖維狀碳質有機物。大約 20×10^6 BP，結構良好的藻類在地球上繁盛， 10×10^6 BP 則相繼出現了好幾千種動物（生命大爆炸）， 6×10^6 BP 以來又相繼出現孢子

植物——~~藻類~~植物——~~動物~~動物——

——人類

類。含葉綠素的植物通過光合作用能把二氧化碳和水轉變成碳水化合物並放出氧，以至光合作用產生的氧，超過生命呼吸消耗的需要而逐漸在大氣中積累起來，大約在 6×10^6 BP 大氣中的氧含量便增加到相當接近於現代的水準，從而為大量生命的繁衍發展創造了條件。同時，生物的進化越來越成為地球表層地理環境的重要組成部分，既受外在環境的控制和驅使，又影響外在環境的發展和變化，因此，生物的進化成為全球地理環境發展變化的最生動活潑、最富有說服力的記錄，並藉以建立了幾億年以來的生物-地層年表(表5-1)。

表5-1 生物-地層年表簡表
(夏邦棟等,1992)

		紀		動物界	植物界	帳那 礎 造运 动	
显	新生代	第四纪	2.0			喜 马 雅 拉 运 动	
		第三纪			物		
生	中生代	白垩纪	65	爬行动物时代 W 现恐骨	恐 雄 乳 动 吕 碌 龙 繁 恐 骨 脱 骨 鱼	物 代	被 子 出 现 帛 物 繁 盛
		侏罗纪	14.4				
宙	古生代	二叠纪	211J	时代	J	雾 油 盛 如	
		石炭纪	24				
隐	古生代	泥盆纪	ZK80	鱼类		加 东	
		奥陶纪	360				
生	古生代	寒武纪	408				
		奥陶纪	438	刊出盛	出类极盛		
宙	元古代	量纪	590				
		□	800				
	太古代						

關鍵字

增積增溫過程分異圈層結構的形成脫氣作用氧氣生物進化

\$思考題

1. 簡述地球演化是自生過程, 並向有序方向發展。
2. 回憶前幾章的內容, 請闡明地球有水圈、大氣圈, 而有些星體沒有水圈、大氣圈的原因。
3. 地球表層生命日益繁多, 這使大氣中的氧含量發生大變化嗎?

第六章地球表層系統

地球表層系統是開放系統, 向有序方向發展, 是自然地理學研究的主要內容。

“地球表層”概念最早是由德國地理學家李希霍芬與俄國科學家提出來的, 指的是與人類有直接關係的那部分地球環境。雖然他們當初僅把岩石圈的外殼稱為地球表層, 後來才把它的範圍擴大到包括地面的上、下層, 但他們曾認為地球表層是地理學研究的核心, 並認為地理學的任務就在於集中研究地球表層相互聯繫的各種現象, 特別是研究人與地球以及生物現象之間的聯繫。

生物圈是指地球上生命活動的部分, 它的範圍與地球表層空間很相近。但地理學家認為, 生物圈該與大氣圈、水圈、岩石圈一樣, 只是地球表面的一個圈層, 不僅各圈層的物质組成與物质運動各有特色, 而且各圈層相互交錯又互相緊密滲透, 所以, 地球表層的空間範圍應比狹義的生物圈更寬展一些。20世紀80年代提出的“地球表層”, 上界劃在大氣同溫層的底部或對流層的上限(極地上空約8 km, 赤道上空約17 km, 平均約為地面往上10km), 下界定在陸地表面往下約5 km~6 km的岩石圈層中, 海洋往下平均4 km左右, 該範圍往上的部分與比其更深的部分則是“地球表層的環境”(錢學森, 1989)。

但是, “陸地往下5 km~6 km, 海洋往下約4 km”的界定概念仍然比較模糊。有些大平原與大盆地的地面往下5 km~6 km, 尚在新生代形成的尚未完全固結成岩的沉積層厚度以內, 人類已開始在這個深度以下尋找並開發能源。再如青藏高原, 一般地面高程就在4 km~5 km以上, 部分地點在7 km~8.8 km以上, 那麼“地面往下5 km~6 km”深度, 實際上還懸在海平面以上, 甚至懸在許多平原地面以上。此外, 已有最深的鑽探已達12km。考慮到“地球表層”的完整性和系統性, 我們建議把它的下界定為地殼層的下界。

6.1 地球表層系統是開放系統

地球表層系統的特徵, 從天體演化尺度來看則具有穩定性。狀態之一是太陽輻射到達地球的能量相當穩定。狀態之二是地球在太陽系中的軌道運動相當穩定。不僅地球軌道參數的變化非常規則, 可以精確測算, 而且地球與其他星體之間的引力作用似也已調整到了相當完美的程度。狀態之三是地球各圈層的空間結構、成分、品質、能量收支、物質運動方式與運動規律等, 也都處於相對穩定和近似於平衡狀態, 使地球上所特有的大氣、溫度、水、土壤、地表環境等在一定時期內保持相對穩定少變, 為人類和生物的生存與發展提供了良好的基本條件。地球各圈層都具有各自的相對獨立的運動方式和運動規律, 各圈層某些時空尺度的變化, 可根據內

部的因數與條件給予較好的近似，外界因數通過各圈層內部的條件和運動規律而起作用。因此，地球表層系統似已處在與外界有穩定的能量交換而物質交換可以忽略的狀態。也許，正是由於以上的傳統認識，才使諾貝爾獎金獲得者普利高津在他的較早期著作中曾提出“地球近似地是一個封閉系統”（錢學森,1989）。

其實，普利高津在後來的著作《探索複雜性》（1986）中，已多次談到“氣候體系的巨大複雜性”，“如果不求助於建立在不可逆性概念基礎上的耗散系統”，“氣候的歷史等簡直就無法理解”，“表明氣候系統保持在遠離熱力學平衡態的位置上”。錢學森（1989）則明確地指出，地球表層是一個非常複雜的開放系統，地球表層系統與地球表層的環境有物質和能量的交換。地球表層系統是一個開放系統，主要表現在以下幾個方面。第一，地球表層依賴太陽源源不斷地提供的能量（負熵流），不斷抵消地球表層的熵的增加和降低系統的總熵，才能形成和維持大氣圈、水圈、生物圈的豐富多彩的自組織的有序結構。大氣運動、海洋水體運動和生命過程得以存在和維持，主要依靠太陽輻射能量的補充。理論計算表明，如果一旦失去太陽輻射，地球大氣本身的能量僅能維持一個星期左右。洋流的動力主要來自大氣環流底層的盛行風和熱、鹽對流，其能源可看做直接、間接地來自太陽輻射。地球上一切生命過程的存在更是離不開太陽的光和熱。第二，地球還接受來自太陽的帶電粒子流的影響。太陽耀斑正對著地球噴發，射向地球的帶電粒子洪流引起地球上的磁暴。1972年8月，一系列的大耀斑曾引起一次相當大的持續時間長的同溫層臭氧的耗損。2000年7月14日太陽噴出的帶電粒子流，以1000 km/s移向地球，使地球低緯度和高緯度的宇宙射線輻射強度分別增加11%和40%。此外，太陽還偶爾放射高能離子電子流，這些粒子進入磁層與地磁場尾端相耦合形成極蓋，並穿透到電離層面，產生的強電離作用可使無線電訊號中斷。為此，阿西摩夫（1979）曾預言：“如果是這樣的話，太陽風的強弱變化就可能變成天氣預報科學武庫中的又一件武器。”據周樹榮研究，1991年7月中國江淮大洪水就與同年5月開始的4個強耀斑活動有關。第三，衛星測量射到地球來的太陽輻射常數，說是“常數”，實際上也是有變化的。太陽常數變化對地球氣候變化起“起搏”的作用。第四，南半球與北半球的冬半年與夏半年的太陽高度角的變化，造成太陽輻射能量收支不平衡，緯度60°地帶夏半年的輻射量為冬半年的4.4倍，這直接影響到中高緯地帶之間的能量輸送與平衡關係。第五，地球表層系統還不斷地獲得來自地球深部的物質與能量的補充，如地熱流、地核地幔物流、能量流的傳遞、岩漿活動等，而且它們也是因時因地而多變化的。第六，長期天氣過程和氣候變化的非絕熱性，地殼運動的不均勻性，大地水準面的變形等，一般地說也多為遠離平衡態的現象。第七，在地球表層系統，當熵流達到相當數量時，可以使體系的總熵減少成為遠離平衡態。古氣候研究已證實，太陽輻射能量及其積累值的微量變化，通過地球表層系統內的回饋機制與“放大效應”，曾使全球氣候與地理環境發生巨大變化。

6.2 地球表層系統的演化

地球表層物質是早期地球演化的產物。原始地球表層物質按顆粒集合體形態分為固態、液態和氣體，三態物質的密度有很大的差異，固態為 $2.6\text{g/cm}^3\sim 3.0\text{g/cm}^3$ ，液態為 1.03g/cm^3 ，氣態為 0.00129g/cm^3 左右，於是在地球引力作用下它們分別彙聚為岩石圈、水圈和氣圈，水與氣的流動特性充填了岩石圈層中的顆粒孔隙和表面的窪地。這時期的地球表層的基

本特徵是：①受到地球的吸引，地球表層物質按密度分出層次，下重上輕相對比較穩定；②繼續獲得來自地球內部的物質與能量，如地熱、岩漿侵入，中深源地震釋放能量等，但在強度與量值方

面已大為削弱；③仍有少量宇宙物質進入地球表層，並且，太陽輻射的能量輸入，在地球表層占主導地位；④地球表層有物質與能量的輸出，如有部分物質在地殼層底部相變或直接插入地幔層，另有部分氣體與熱輻射輸向平流層直至逸入星際空間等。

當負熵流達到相當數量時，使地球表層總熵級少成為遠離平衡態，從而出現有序的結構和穩定的功能，成為具有耗散結構的開放系統。特創是由於地殼層由放射性衰變而增熱，太陽輻射被地表吸收並轉化為熱能，因此在地球表層中出現不穩定能量結構，而有利於不可逆過程所引起的爛的產生。地球表層的演化過程中的第一次飛躍是原始大氣圈及其水圈的形成，第二次飛躍就是原始生命的出現及其大量繁衍，並改變了大氣圈的組成。之後的地球表層的演化，景才瑞等曾認為人類的誕生是第三次飛躍，人類能夠通過社會生產的方式增強在地球表層利用太陽能量，延長太陽能在地球表層中的流通轉換的時間。

目前，已在澳大利亞中部大片發現 670×10^6 BP的古冰川作用堆積形成的岩石，並發現了同期彙集冰溶水的湖泊沉積（季候泥），特點是具條帶狀花紋，夏季冰溶水量大，紋泥層厚，冬季冰溶水量少，紋泥層薄，厚層與薄層互層，每隔11層成一組，還具有145個、290個薄層的週期韻律。重要的是紋泥的11a.145a.290a週期與太陽黑子週期非常接近。它能說明，早在 670×10^6 BP，氣候對太陽變化的反應已非常靈敏，而且與近、現代的太陽變化週期沒有多大差別。當時，大氣圈中的氧氣含量大約增加到了目前水準的7%左右，以後又很快增加到接近目前大氣中氧氣含量水準。

生物圈的形成對地球表層的演化有極為重要的貢獻。生物圈是一個獲取—貯存—又輸送能量的巨大的新陳代謝裝置。地球表層化學元素的1/3以上都參與生物迴圈。矽、碳、鐵、錳、硫的富集都是生物成因的，可能還有石油。稀有元素遠遠高出原有的宇宙豐度也是生物造成的。每天由植物返回大氣中的各種有機揮發物（有的含金屬）有上千噸之多。生物系統，從微生物到靈長類是有機物質的“島嶼”，它們不斷地降低熵值並向更高的種屬演化。為了產生高級種屬，有機物必須在一定的時間內保持穩定，必須有能力在不可預知的環境變化中保存自己，還必須為了自身利益去改造環境。生物圈的儲能體總的來說是向更有序的方向演化，即減少混亂，而以周圍環境混亂加劇來補償。這也顯示了生物圈與地球表層系統相互作用的最基本的非線性性質，即新陳代謝過程必須適應自己造成的變化。

土壤是岩石、大氣、水和生物共同作用的產物，其中的生物是促進土壤發育的最活躍的因素，通過生物的迴圈，把大量的太陽能消耗于成土過程，包括礦物的分解和次生礦物的形成，有機質的分解與合成，膠體的凝聚，溶液的保蓄等等。土壤還參與許多物質與元素在地球表層系統中的迴圈和部分元素的富集。土壤系統是地球表層系統的多個支系統之一，也是個開放的支系統，它不僅有降低熵值促進有序的作用，而且生物圈的功能也是依賴土壤基礎而得以發揮的。

所以，地球表層系統愈來愈遠離平衡態，形成有序結構，具體表現為順序演化出岩石圈地殼—大氣與大氣圈—水與水圈—生物與生物圈—土壤與土壤（圈）層，其中還有水、氣、地、生共同作用下的地貌發育。

6.3 地球表層系統中的介面與分支系統

地球表層按物態特徵分化成幾個圈層，即岩石與岩石圈地殼、大氣與大氣圈對流層、水與水圈、生命—有機質與生物圈和土壤層。各圈層之間均有清晰的介面，差別在於因生物向其他

圈層的浸潤滲透，生物圈是以生物的密集分佈為標誌的，實際上它的外介面是十分模糊的，而土壤層是不連續的，所以所述的圈層介面在地球表層中的分佈不是平行延伸的，同一介面的上、下圈層既在時間方面又在空間方面均不是固定不變的。如果某地的大片森林毀滅了，該地的圈層結構自下而上就會由岩石圈地殼-土壤層-生物圈層-大氣層四層型變為岩石圈地殼-土壤層-大氣層三層型，進而再變為岩石圈地殼-大氣層二層型；圈層之間的介面也由三介面變為二介面、單介面；該地的地球表層結構就由三界四元型變為二界三元型、單界二元型，也就是說，在圈層結構型式方面倒退到了幾億年以前的狀態了。

各圈層之間的介面，既是阻止不同圈層之間進行物質與能量交換的中介面，又是不同圈層之間進行物質與能量交換所必須逾越的分介面，而且是物質與能量轉換並在相鄰圈層發揮作用的基面。物質與能量逾越介面包含著極為複雜的物理過程、化學過程和生命過程，有物態物相的變化，能量的轉換，有單向的物質流與能量流，也有雙向的物質流與能量流，還有直接逾越與穿層逾越之別。單位面積的物質逾越或能量逾越稱為通量。關於介面和通量的研究，正如O. L. Sucks等學者所述，問題本身至今還帶有一定程度的推測和一定程度的風險。但是，如果我們若不趕快著手在一個更加正規的基礎上去瞭解各圈層之間的聯繫和回饋，那也很有風險。回答任何一個新的科學探索領域中的問題，永遠不會是保險無誤的，但推遲研究決不會帶來答案。

大氣-海洋之間的介面，占全球表面積的70.8%。由於對流層大氣與海洋水體的密度均比較小，而且互相之間的密度比差絕對值也比較小，又都具有易於流動的特點，所以大氣與海洋之間能在任意方向逾越介面進行物質與能量的交換。海洋水面坦蕩開闊，對於太陽輻射反照率低（約20%，但對低角度入射光線反照率很高），大部分太陽輻射能穿透水面並使很厚的水層得到增溫。海洋水體還有比熱大與通過渦動混合向較深層傳熱的特點。海洋向大氣輸送水汽、海鹽氣溶膠和熱輻射。通過海洋表面蒸發的水汽通量約 $434 \times 10^{15} \text{ kg/a}$ 。水汽蒸發也稱潛熱輸送，使表層海洋水冷卻並發生下沉和上下水層的對流。大氣向海洋輸送降水、來自陸地和宇宙空間的塵粒，還有氧氣、二氧化碳等，並把空氣流動能直接傳遞給海洋水層。全年大氣降水直接補充海洋水量約 $398 \times 10^{15} \text{ kg}$ 。C₆ 主要在中高緯度地帶從大氣進入海洋。海洋是化石燃料燃燒釋放C₆的最大儲庫，它吸收燃燒釋放的C₆（相當於 $6 \times 10^{15} \text{ t}$ 的碳）的1/2左

右。大氣-海洋之間的氧氣交換，主要是通過微小動植物和細菌來完成的，而如鹵甲烷（ CH_3I 、 CH_3Br 、 CH_3Cl ）、 dms （硫酸二甲酯）等微量氣體是通過海洋的散發作用進入大氣層的。有些物質從海洋進入大氣的過程既十分複雜又非常有趣，它們是由於海水飛沫的形成和氣體的氣泡破裂而進行的。

大氣-陸地之間的介面，要比大氣-海洋之間的介面複雜得多。在接受同樣強度的日照下，陸地比海洋水層的增溫與冷卻均要快得多，因為土壤和岩石導熱率低、比熱小，熱量只能聚集在淺表層。同時，陸地物質密度大，可動性也比水、氣小得多。從陸地進入大氣的主要物質有塊狀岩屑、沙塵微粒、水汽和各種氣體、生物碎屑和有機質等，還有反射輻射、長波輻射以及地面劇烈振動能量的釋放等。陸生的大氣氣溶膠和粉塵物質，多是各種地球物理、地球化學和生物過程的產物，如生物甲基化作用、生物燃燒、火山作用和低溫地殼放氣作用等，它們往往比地殼成分更富有多種相對易揮發的金屬元素，如Hg、Pb、Sn、Cd、Zn、Ag、As、Sb、Se、Te等。信風攜帶撒哈拉沙漠的微粒進入大西洋、加勒比海、美洲，西風攜帶中亞的粉塵微粒進入太平洋，北風流把中國西北沙漠黃土區的粉塵帶到臺灣和赤道太平洋地區等。平流層中的微粒來自火山噴發（和噴氣飛機），並且是硫化物氣體氣相反應的生成物。1980年北美聖海倫斯火山噴發與

1982年墨西哥埃爾奇瓊火山噴發，大量的灰塵使1982年當年太陽光減弱25%~30%，二次散射後總的損失降低到5%以下，最後引起全球溫度降低約0.3℃~0.5℃，還使平流層溫度上升0.8℃。城市的廢氣和微粒可以導致大氣煙霧及酸雨等。

地貌發育本質上是陸地—大氣、陸地—水體之間物質與能量交換產生的物質運動。地貌形態乃是地貌發育階段性的標誌，它不構成單獨的圈層。當然，也可以把廣義地殼之表層稱為地貌層。

因此，可以根據地球表層系統中的介面把地球表層系統劃分出以下幾個支系統，即岩石圈地殼支系統、水圈水層支系統、大氣圈對流層支系統、生物圈生態支系統、土壤層土壤發育支系統和地貌發育支系統。每個支系統也都是開放系統，並可以從某個支系統的研究來探討地球表層系統和地球系統。

关键词

地球表層系統開放系統物質流能量流回饋機制地理環境

思考題

1. 如何闡述地球表層系統是開放系統？
2. 地球表層系統中主要介面的性質特徵有哪些？