

氣象教室—風的實驗和空氣的運動

陳啓川

國立臺灣師範大學地球科學系學生

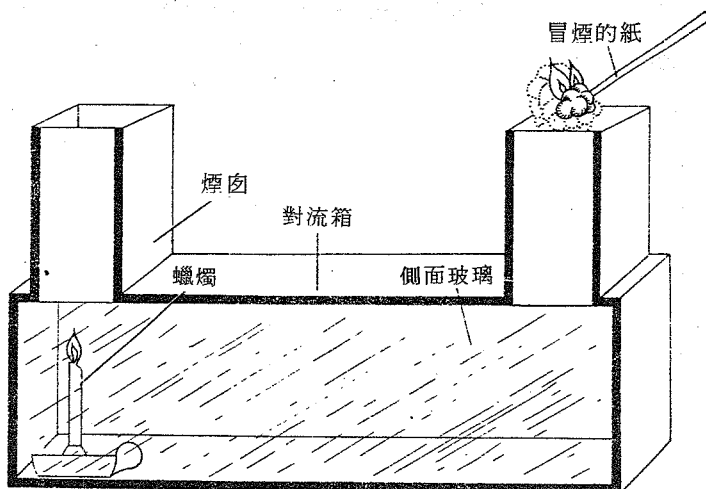
一、引言

本文利用對流箱的實驗引起學生學習的動機，並導出溫度、壓力與對流的關係，再利用此所得關係與科氏效應解釋地球的主風系與一些有趣的風的現象，以風的觀測結果，附上習題以爲教學之評量。

二、實驗室經驗

平流

1. 準備蠟燭並築起如圖一的玻璃煙囪盒，點燃蠟燭，並關上可滑動的側面玻璃。



圖一

(1) 解釋何以即使蠟燭在一個關閉的盒子內，仍能繼續燃燒？

答：

(2) 把手放在煙囪上方大約 15 公分處，你有什麼異樣的感覺？

答：

2. 持一張已點燃的紙片於一煙囪口正上方 5～10 秒，重覆這一動作於另一煙囪口。

(3) 煙沿什麼路徑運動呢？

答：

(4) 在對流箱圖上（圖一），用箭頭方式描繪出煙的路徑。

3. 吹熄蠟燭，將蠟燭置於箱子的另一端，重覆步驟 1.與 2.。

(5) 現在煙的運動路徑如何呢？

答：

(6) 假如沒有蠟燭在燃燒，你認為對流箱內的空氣將沿什麼路徑流動呢？

答：

（你可以不點蠟燭重覆上述實驗來檢視你的答案。）

三、運動的空氣

氣塊平行地表運動者稱為風，而氣塊流向或流離地球表面則稱為氣流（air current）；風和氣流都很重要，因為他們從大氣的一部分傳送大量的熱與濕氣到大氣的另一部分。

對許多都市居民而言，汙染的空氣是個永遠存在的威脅，而風帶走受汙染的空氣，並帶來新鮮乾淨的空氣。假使空氣停止運動，則二氧化碳和其他有害的氣體將會在地表附近累積，而人類的生存將受到嚴重的威脅。幸好由於大氣中水汽、溫度和壓力的差異，使空氣不斷地運動。我們將要研究地表上近似水平的空氣運動的成因。

四、風的成因

我們都知道當太陽對地球輻射時，地球的某些部分會較其他部分吸收較多的熱，因為地球受熱不均等，所以由地球接受熱能的大氣亦產生受熱的不均等，結果就導致氣體密度的差異，這些氣體密度的差異就產生大氣壓力的差異，而風與氣流的主要成因，即

是這些大氣壓力差異。

1. 對流胞：像前面所提到實驗室的簡單實驗，就能把地球受熱不均勻如何導致大氣的運動表示出來。

空氣進出對流箱的循環是對流氣流的一例；對流氣流的另一個例子，是門窗緊閉的屋內的空氣循環，在屋內空氣隨循環路徑而流動，受熱的氣體由暖氣機上升，沿天花板流到屋子的另一端，冷卻而下降到地板，再沿地板流回暖氣機，而再次加熱，如此循環不已。這種藉對流氣流而產生的循環運動，稱為對流胞。

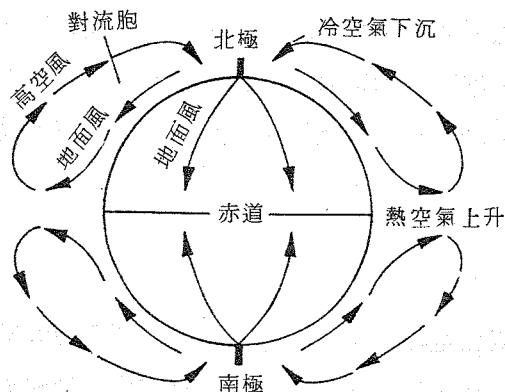
在對流胞的較暖部分，氣體受熱膨脹（氣體分子逃離），而同體積的暖空氣較冷空氣含較少的氣體分子，所以密度也較小，所以這地區形成一個區域低壓。同理，於對流胞較冷部分，因空氣受擠壓（壓縮），使得同體積的冷空氣較暖空氣含有較多的氣體分子且密度較大，而形成區域高壓。而氣體總是由高壓流向低壓。

2. 地球的對流胞：假如地球不旋轉，則地球上將有兩個對流胞，一個涵蓋北半球，另一個則涵蓋南半球。

在赤道地球吸收的熱能溫暖了在其上方的空氣，暖空氣的密度較小，並導致暖空氣的氣壓降低，促使赤道變成低壓區。

暖空氣塊上升到對流層頂時，便分成兩股氣流，一股流向北極，一股流向南極。當這兩大氣塊在對流層的較高處流動時，熱量便逐漸消失且變得較密集，當這些受冷的空氣到達極地，便流向地上來。在北半球冷氣塊向南流向赤道，並沿途逐漸由地表吸收熱量，當氣體到達赤道將再次上升。同理，南半球亦會有相似的巡環過程。

因此，在地球不轉動的前提下，地面風總是由極地吹向赤道，而高空風則總是由赤道吹向兩極（如圖二）。然而因地球的轉動，如此簡單的風的系統將不會存在，風將偏



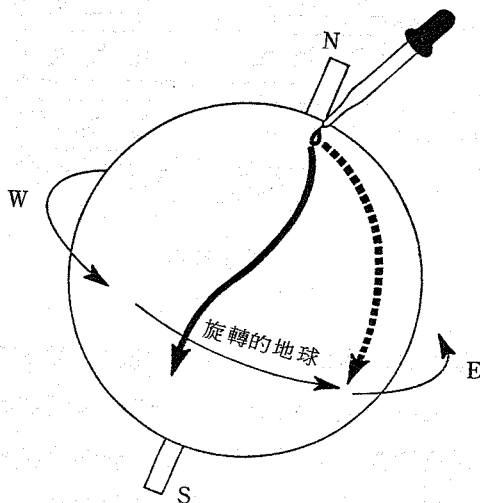
圖二 不轉動地球上的空氣運動

離他們的南、北向路徑，而我們所描述的對流胞也變得更複雜。

風如何偏向？有個實驗將告訴你，風如何因地球的自轉而偏向。你需要一個裝架好的地球儀，如此你能旋轉此球從事實驗，假使你沒有地球儀，可以用一個大橡皮球，一個小碟子和幾個大理石球來取代，將碟子倒放，將大理石球放在碟子上，再將橡皮球置於大理石球上。橡皮球的重量將大理石向外推，反過來說大理石球支持橡皮球，並使其能自由旋轉。

當地球儀為固定時，由球頂滴落的水滴將沿球面直接滴落（如圖三虛線所示）。水滴滑落的路徑與當地球不旋轉時北半球的地面風路徑相似。當逆時針緩緩轉動球時，再次滴水於球頂，觀察水所留下的路跡，將發現此路跡曲線與球的旋轉反向（如圖三實線所示）。

地表空氣的運動方式亦是如此，圖三繪出沿旋轉地球表面運動的風的簡化路徑，當地球由西向東轉，北半球的風將不再沿南北路徑吹拂，而是偏西的曲線，南半球則反向。



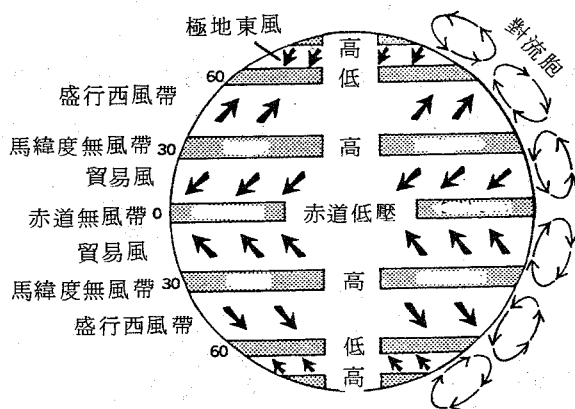
圖三 風的偏轉的證明

3. 科氏效應：地球旋轉對風的風向的影響稱為科氏效應（Coriolis effect）。因法國數學家科里奧斯首先研究而名之。

科氏效應對風的歪曲可用向右偏離原來的路徑（北半球）一言代之，如向南的運動將偏向西南，向東的運動將偏向東南，而偏弧因速度之大小與緯度不同而不同。南半球則為偏左。

五、世界主要風系

由於地球各地溫度、壓力的差異及地球的自轉，使得在南北半球各有三個對流胞（如圖四），一個位於赤道到緯度大約三十度，一個由三十度到大約六十度，另一個則從緯度六十度到極地。而這三個對流胞所對應的地面風系分別為(1)貿易風系（trade winds），(2)西風帶（westerlies），(3)極地東風帶（polar easterlies）三大風系。形成這些不同風系主要取決於在赤道無風帶（doldrums）及馬緯度無風帶（horse latitudes）的壓力形態。



圖四 主要風系

1. 赤道無風帶：在赤道附近的區域，因受熱的氣體直接上升進入高空而少有水平運動，故稱之為赤道無風帶，同時因暖空氣上升，也使得本區成為一低壓帶。

2. 馬緯度無風帶：當赤道的受熱氣體上升到較高層的大氣過程中，即緩慢的冷卻，而在數公里高處便分兩股氣流，一股向南流，另一股則向北。討論北流氣流，則氣體因向北流而繼續冷卻，又因地球自轉，使得空氣偏向東方運動，在大約北緯三十度處，氣體因冷卻而使其密度增大到足以下沉到地面，當氣體下沉，溫度又上升了一些，下降氣流所形成的高壓區，稱為馬緯度帶，因為下沉氣流為垂直降落，故本區內的風相當小。而馬緯度的得名，乃因在帆船時代航行的船隻，都在本區內行駛數星期，由歐洲運往美洲馬匹經常會為節省飲水，而被拋入海中。

3. 貿易東風及盛行西風：下降到馬緯度的氣體將會分為兩部分，一部分流向赤道，另部分流向極，而兩部分均是由高壓區（馬緯度）流向在馬緯度南及北的區域高壓。向

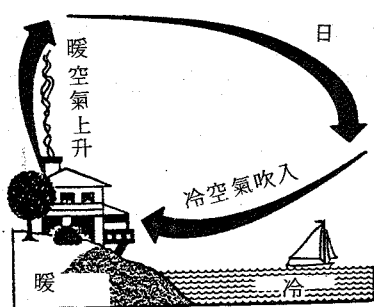
南吹向赤道的風稱為貿易風，在北半球科氏效應使風看起來是由東北吹來，故又稱東北貿易風。由馬緯度向北吹的風稱為盛行西風，乃是在北半球這些向北吹的風因受科氏效應影響而偏為西南風。在南半球則分別為東南貿易風及盛行西風（西北風）。

4. 極地東風：由極地流出的緻密且冷的空氣所形成的風帶稱為極地東風帶，這些風組成大約由北緯六十度到兩極的對流胞的一部分。在北半球極地東風流向西南且在北加拿大區與盛行西風相會，而這界限將會（隨季節）而向南或向北偏移，這些運動對美國的天氣有相當重要的影響。

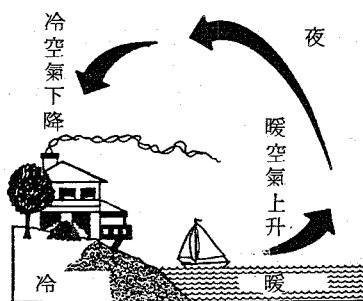
六、局部溫度變化所產生的風

1. 海風：如果你家在海邊或大湖的旁邊，你對由水邊吹過來的風或許很熟悉，這些風是因為陸地和鄰近的水體受熱不相等而產生。我們知道陸地受熱溫度會比水受熱上升的快（比熱問題），所以在海濱上方的空氣會比水面上方的空氣熱，所以在海濱形成區域低壓，空氣上升，而在水面為較冷且重的空氣所形成的區域高壓，在這些狀況下，海面上的冷空氣將流向陸地，取代海濱上暖且輕的空氣，如此冷空氣吹向陸地便是海風（如圖五 - 1）。海風吹拂的時間大約由早上十點到日落，而影響範圍大約深入內陸十五公里。在大湖周遭的湖風則發生於夏季，影響範圍大約三公里。

2. 陸風：在夜間陸地比海面冷得快，陸上的空氣較海面上的空氣冷且重，空氣由陸地流向海洋，稱為陸風（如圖五 - 2），陸風與日間所吹的海風反向且比海風小得多。



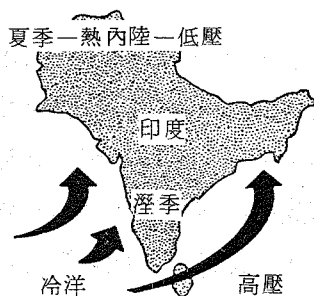
圖五-1 海風



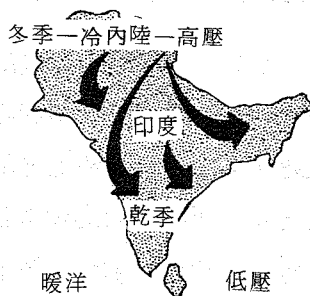
圖五-2 陸風

七、季風(monsoons)

印度著名的季風基本上是海陸風，不過其尺度非常大，夏季印度內陸較鄰近的印度洋熱許多，印度內陸成爲一低壓區，而印度洋則成爲一高壓區，冷、重的空氣由海洋流向溫暖的陸地所產生的穩定風，稱爲夏季季風（如圖六-1），因爲空氣攜帶相當多的水汽，帶來豪雨，故夏季季風期又稱爲濕季。在冬季，印度內陸較其鄰近地區冷，所以產生區域高壓，同時印度洋的水溫暖了洋上的空氣，使其較陸地上的空氣溫暖，而形成區域低壓，乾、冷的空氣由內陸吹向海洋，爲印度帶來長期的乾冷天氣，故稱冬季季風期或乾季（如圖六-2）。



圖六-1 夏季季風



圖六-2 冬季季風

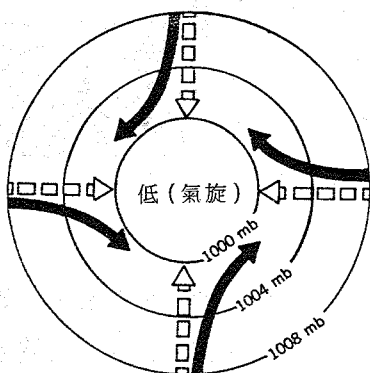
山風與谷風 在有山、谷時特徵的地區，太陽對山坡的加熱比對谷的加熱快很多，山坡上的空氣變得比山谷內的空氣溫暖，於是產生對流胞，山坡上受熱的空氣升入大氣且冷、重的空氣由谷底流上山坡來填補，這由谷底吹上山的風，稱爲谷風。在夜間，山坡上空氣因爲高度較高，所含的塵粒及水汽較少，所以較容易將日間吸收的熱量輻射出去，而冷得比山谷的空氣快，也變重較山谷空氣重。所以冷且重的空氣由山坡流向谷底，稱爲山風。

八、演化風系

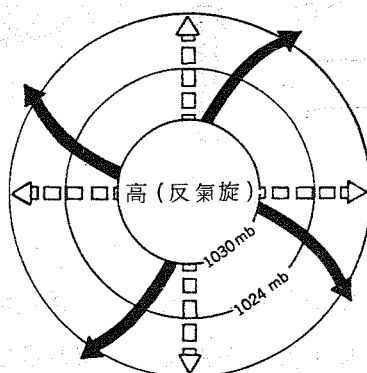
半徑爲數百或數千公里的高壓和低壓氣團（我們稱之爲高壓系統和低壓系統），在地球表面上緩慢的移動，這些氣團的位置與形狀會持續的變化。低壓氣團又稱爲氣旋（cyclones），而高壓氣團則被稱爲反氣旋（anticyclones）。以下分述。

1. 氣旋：在低壓系統中，中心氣壓最低且外緣氣壓最高，於是高壓的氣體流向氣團

的低壓中心，若地球不自轉，則風如圖七的斷箭頭般，直的吹向中心。在北半球，地球的自轉使得低壓系統中的風，以逆時鐘方式旋向中心，如圖七的實箭頭，因風以逆時鐘方式吹，所以低壓系統被稱為氣旋。



圖七 氣旋內風的偏轉



圖八 反氣旋內風的偏轉

2. 反氣旋：在高壓系統中，氣團中心氣壓最高，而外緣最低。在高壓系統中心的空氣會流向外緣，在北半球地球的自轉，將使氣體依順時鐘方向螺旋流出，如圖八所示。

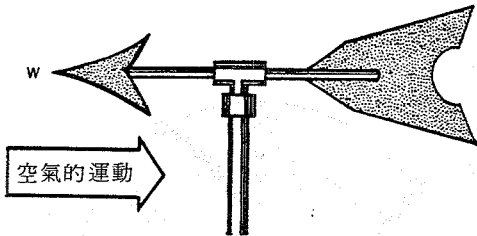
氣旋與反氣旋的運動會對所經過地區的天氣有重要的影響，一般而言，氣旋帶來暴風雨的天氣，而反氣旋則帶來晴朗的好天氣。

九、風向和風速測量

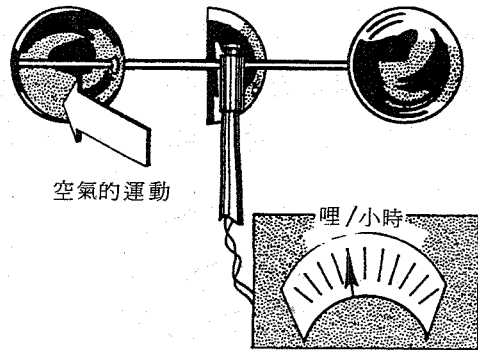
1. 風向：最常被用來測量風向的儀器是風標 (wind vane)，風標常可見於教堂的塔頂和其他高的建築物的頂端，而其組為一有大尾巴的箭形物，裝置方式很容易轉動；起風時，風推擊大尾巴的表面，直到箭頭的尖端對著風的來向方止（如圖九）。可利用電力將風標的轉動傳輸到室內的顯示器或計錄器，使測者不用在嚴寒的天氣外出觀測。

2. 風速：風速是用風速儀 (anemometer) 來測量，風速儀是由三個或更多以細臂接於同一轉軸的小杯子組成（如圖十），杯子的內面可捕捉住風力，而其曲線型外表則可很容易在空氣中移動，風力推杯的內側使轉軸轉，風吹的愈快，轉軸就轉得愈快。轉軸的速度可由連接的尺標盤表現出來，或由記錄器記錄下來。

3. 氣象氣球：風速僅能測地面風速，對於高空的氣象則需使用氣球，釋放充滿氦氣的氣球並使用望遠鏡追蹤氣球在空氣中的路徑，由望遠鏡的角度及方向即可測出風速，



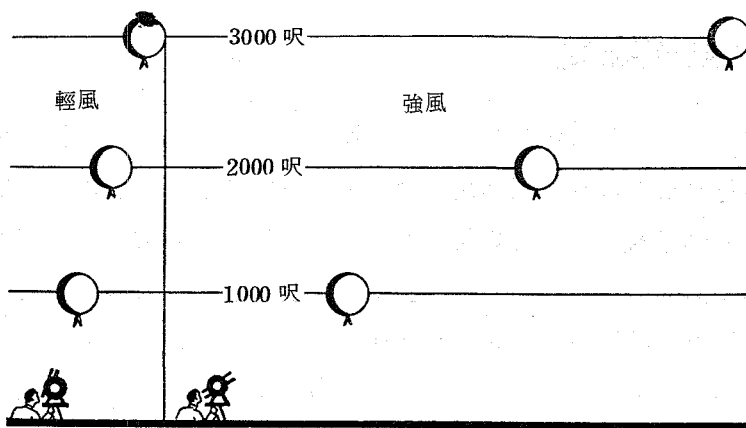
圖九 風標



圖十 風速儀

如圖十一所示，當風小的時候，望遠鏡的仰角較大，而風大的時候仰角較小。氣球測量相當準確且不貴，然而在大距離及多雲時肉眼無法看見，則需使用雷達代替望遠鏡追蹤氣球。

現在大部分都使用載有儀器的氣球做探測，這些儀器可測高層大氣的溫度、壓力及溫度，全部儀器所成的包裹物稱為無線電探空儀或雷送（radia-sonde），雷送有一小發射器將所測得的資料傳回地上。利用地面無線電測站追蹤無線探空儀，以決定高空風速者，稱為無線電測風探空儀或雷文送（rawinsonde）。



圖十一 氣象觀測氣球

評量習題

一、單選題：

- () 1. 由於冷且重的空氣對暖且輕的空氣的連續的取代作用，所產生的大氣運動稱為(a)旋渦 (b)偏流 (c)對流胞 (d)赤道無風帶。
- () 2. 假如地球不旋轉，南半球的高空風應為(a)東風 (b)西風 (c)南風 (d)北風。
- () 3. 北半球的貿易風，不吹向正北的原因是(a)重力 (b)科氏效應 (c)磁力 (d)向心力。
- () 4. 海風通常約在何時開始吹？
(a)早上八點 (b)早上十點 (c)正午 (d)下午三點。
- () 5. 下沉的空氣塊溫度上升，是因為它正在(a)膨脹 (b)喪失水分 (c)壓縮 (d)凝結。
- () 6. 地球的_____是低壓系統中，空氣反時鐘方向運動的重要因子。
(a)演化 (b)轉動 (c)地軸的傾斜 (d)赤道較兩極凸出。

二、是非修正題（答對錯並修正錯的地方）

- 1. 因為地球自轉的緣故，北半球的南風將被偏轉為向北。
- 2. 下沉的氣塊在北緯 30 度和南緯 60 度產生兩個無風帶。
- 3. 馬緯度無風帶為高壓區。
- 4. 海風通常開始於日出，且結束於快日落的時候。
- 5. 高壓通常伴隨晴朗、乾燥的好天氣。

三、思考問題

- 1. 假如在一個緩慢旋轉的地球儀頂上滴下一滴水，這滴水的軌跡曲線是偏向一個方向（右偏），當水珠到達地球儀的頂點與底點的中途時，將會往相反的方向偏轉（左偏），解釋何以水滴在地球儀上會有兩個不同的偏轉路徑？
- 2. 說明許多世界上的大沙漠都是位於高山區的背風面，這個事實的原因。

習題解答

一、單選題：

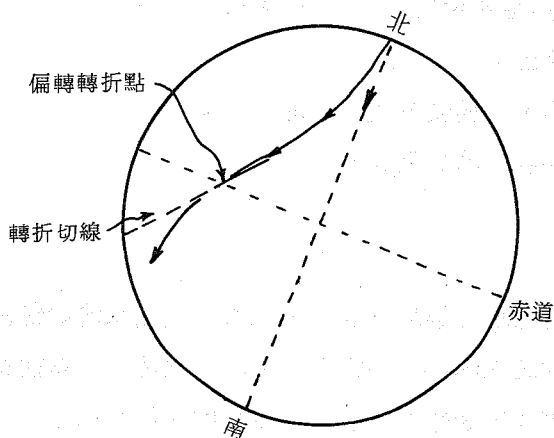
- 1.(c) 2.(d) (注意是在南半球) 3.(b) 4.(b) 5.(c) 6.(b)

二、是非修正題：

1. × 南風在北半球偏轉為西南風。
2. × 南緯 60 度 → 南緯 30 度。
3. ○
4. × 日出時地表尚未受熱到足以加熱其上方的空氣形成對流，通常海風起於大約早上 10 點至約日落止，故本題日出 → 大約早上 10 點。
5. ○

三、思考問題：

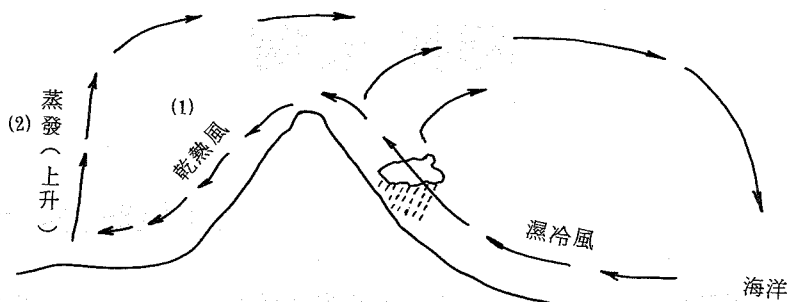
1. 因為地球自轉所產生的科氏效應，在北半球其效應為使物體向右偏離原運動方向的作用，在南半球則為向左偏離，在赤道科氏效應為 0（因科氏效應與緯度之正弦值成正比），而為南、北半球偏轉運動之轉折點，而偏轉路徑之略圖如圖十二。



圖十二 南、北半球反向偏轉圖示

2. 在高山背風面，一方面因為由海洋吹來的濕冷的風為高山所阻擋，大部分都無法越過，而越過山的風，因在爬山的過程中，將大部分所含的水汽凝結降雨，當風吹

下背風坡乾熱的下坡風，使得背風面更加炎熱。另一方面，太陽對所在地的加熱，及下坡風的增溫，更促進本地區的蒸發作用，並由所形成的區域低壓將水汽對流出去，形成沙漠是必然的現象，參考圖十三。

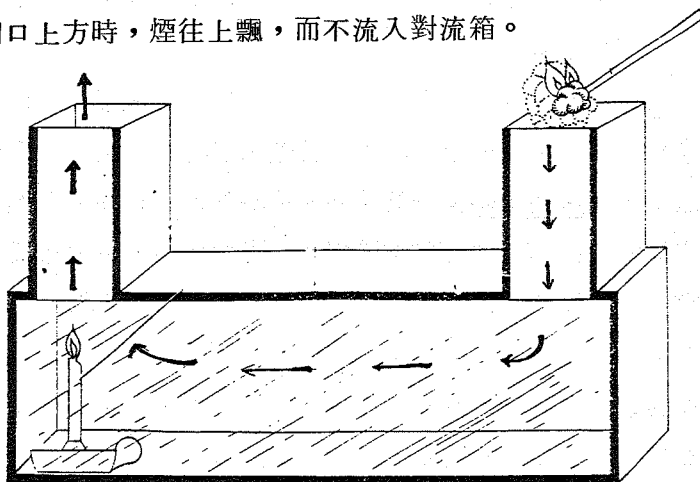


圖十三 大山背風面容易形成沙漠的原因

(1)無濕空氣補充增溫(2)蒸發對流

習題解答

- 1.廢氣由一煙囪口排出，新鮮空氣由另一煙囪口進入補充，故蠟燭能繼續燃燒。
- 2.有熱風由煙囪口內吹上來，手有溫暖的感覺。
- 3.煙幕由冒煙的紙片所在的煙囪口流入對流箱，並由燃燒蠟燭所在的煙囪口流出。冒煙紙片在蠟燭上方的煙囪口上方時，煙往上飄，而不流入對流箱。
- 4.如圖十四所示。



圖十四 煙在對流箱內的路徑

- 5.仍保持由另一煙囪口流入，由燃燒蠟燭所在煙囪口流出的原則。
- 6.沒有蠟燭在燃燒加熱某一部分氣體，對流箱內的空氣將不流動。

參考資料

Geffner, S.L. 1972: Earth Science. workbook, AMSCO School Publications, INC., 191~202。