

南亞季風的檢討

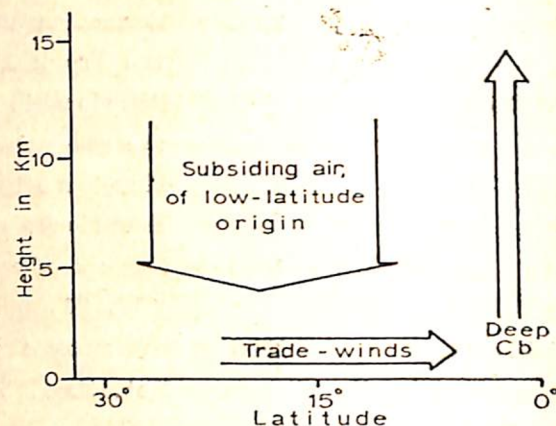
容國治譯

近南亞海上地面風交替週期，及鄰近陸地上與季風有關的降雨發生，長時間以來已使自然科學家們迷惑與困於解釋。因為季風一定會發生，所以，第一，南亞季風毫無疑問是給人最深刻印象的季節現象。第二、直接影響那地方很多人民的生計。雖然任憑至少三百年以前許多傑出的學者已經注意到，但迄未有對南亞季節天氣特徵令人滿意的解釋。的確，直到大約二十年以前，確實的熱帶大氣高空氣象學研究是不可能的，因為缺少高層空氣的資料，必須大部分基於地面資料的利用，而資料利用又常隨有種種的限制。然而，高層空氣探測範圍的改善，及人造衛星照片的有效用，在熱帶大氣層中已加強了科學的趣味，使季風探索獲得裨益。於是，南亞季風的現代知識，有了適當的檢討。季風從較舊的到現在著名的各種論述，分析與解釋以來，在其他地方已經有過很多的檢討（例如 Pédelaborde 1958, Chang 1967），近代各種發展頗受大多注目在這個論說中。

古典熱學說

古典的熱概念，首先由Edmund Halley在他的1686年著名論文，貿易風及季風的物理原因上面提出，比喻亞洲夏季季風為一種巨大的海風。不管事實上如何明顯不足已經被注意到許久，但仍然被廣泛承認。例如，許久以前在1921年，Sir George Simpson (1921) 參考印度次大陸，指出夏季季風侵襲前，五月的溫度較七月的為高，當全部次大陸為季風所籠罩時，次大陸的最熱部分，整個夏季大都無雲無雨。

十九世紀後半，企圖用巨大的陸風以解釋十月及三月之間吹的地面風，包括西伯利亞反氣旋，而將這概念擴張。卓越的美國海軍軍官，水道學家Matthew Fontain Maury，堅持接近南亞海洋冬季東北風的意見，認為是純粹貿易風（參閱Maury 1860），與正常的哈德里型（Hadley-type）環流作用的見解相一致（參閱圖一）。至本世紀現在為止承認的見解，似乎在印度區域的東北風，是由於範圍廣大的西伯利亞反氣旋向外旋的風所造成。的確，許多現代的教科書，表示出這種見解仍是一種



圖一、哈德里（Hadley-type）低緯度環流簡易圖解。

可以接受的解釋。

對於這種解釋基本的異論，通常被忽視了。例如西伯利亞反氣旋非常寒冷與穩定的空氣，如何穿越南亞重重的山嶽，特別是喜馬拉雅山脈？而且，在一個地方裡海平面等壓線圖上，確存在的一個反氣旋，在海平面一公里高以上不會出現，迄今還是問題（參閱Walker 1967, Giles 1970）。

穿越赤道氣流

自從Halley時代以來，已廣佈有一種意見就是在低對流層中夏季季風氣流，發生在冬半球的貿易風帶，並且因受地球的轉動影響偏斜後，流入夏半球中適當的熱低壓中。

新近出版的書刊報章鼓勵了這個意見。例如氣象局（英國）出版的Meteorology for Mariners，為英國航海家們所重視，視為標準的著作，權威的論述：「...東南貿易風穿越赤道變成西南季風」。加之，這作者與許多海員的談話，指出他們的直接經驗去助證這個意見。

然而，近代理論上與觀測上的研究，提出貿易風穿越赤道變為季風的古典概念不適當。Verploegh (1960) 清楚的指出，遠在1893年以前，由Wilhelm Meinertzhagen費力的審查幾百船舶觀測報告後，得到一個結論（參閱Flohn 1953），就是東南貿易風轉變成西風，發生在赤道以南大部印度洋上。而且，Pisharoty (1965) 從一次在1963年國際印度

洋探險（International Indian Ocean Expedition，簡稱IIOE）期間所搜集的觀察證據審查中，指出七月裡一日間，越過印度半島西海岸輸入印度半島的水蒸汽總計，是從南印度洋，阿剌伯海經度上穿越赤道輸入量的二或三倍。由於旋轉的理由，他也發現穿越赤道的概念不能予以支持，斷定發生在北半球六公里以上的空氣，大部分都是向東流，穿越印度半島。這個結論已被後來的研究予以支持。

Findlater (1969) 的著作激發了些近代的興趣，因為他證實了對流最低層中，在夏季存在一種低層噴射氣流組織型式的持久高速氣流，風速可達到每秒50公尺。特有的在西印度洋附近上空大約600到2500公尺高度之間。在那個季節中，高速氣流是大氣環流的主要部分，並且包含發生在南半球的空氣。氣流在一個狹窄的經度範圍（33°—55°E之間）穿越赤道，且有些觀測報告證明氣流從那裡流過，穿越阿剌伯海到印度的西海岸及更遠處。有趣的是Findlater曾經用模型實驗證明，穿越赤道氣流的力及印度西部的降雨之間關係相符。所以他提出穿越赤道氣流的速率變化，像控制或者調節降雨上的影響是很重要的。

因此顯示出，印度洋極西部北方的夏季期間中在低層，及赤道印度洋的大部在對流高層，雖然有重大的氣團交替，整個印度洋貿易風穿越赤道的古典概念，必須予以根本的修正。在其他的季風環流中，研究Findlater所描述的型式之低層氣流存在，將會是很有趣味的事。

氣團學說

極鋒學說，在天氣學中是主要進步的分野，對那些尋求熱帶環流解釋的人是有吸引力的。這是指望及巧妙的試圖用赤道海洋與其他氣團之間相互影響轉變，證明季風現象為正當。但是極鋒學說到目前為止，對季風的理解與出現，所有的貢獻微小，價值有限。雖然季風的敘述以氣團與鋒為基礎，但還是有些幫助與益處（參閱Pédelaborde 1958）。

高空東風

觀測報告顯示出，南亞的西南季風上面，在高對流層中存在有強烈的東風氣流，在季風活動期間之時比較強，非活動期間之時弱。

從冬季高空西風氣流轉換為夏季高空東風氣流

是非常突然的，與印度西海岸降雨相一致。當然，這相一致已經引起爭論，在那些相信印度西海岸稱之為「突發」（burst）的季風雨，是高空西風氣流結論的崩潰，與那些相信相反理由，高空氣流的逆轉，是雨突發原因的人們之間，高空東風氣流的作用上，迄今還沒有成定論。

Raman與Ramanathan (1964) 客觀研究指出，一種良好的關係存在於高空東風氣流中最大風速，與沿印度西海岸降雨前一日之間，及表示從降雨釋出的潛熱，對高空氣流的動能有重大的貢獻。可是他們不能證明西海岸雨永遠與高空風速的增加有關。事實上，研究工作者們並未能找到任何雨與高空風之間相關聯的關係。Ananthakrishnan及Ramakrishnan (1969) 特別同意Raman與Ramanathan的意見，大氣接收自凝結潛熱供給的大量能量，但尋不出在西海岸發生的雨，與高空東風激勵之間的重大關係。

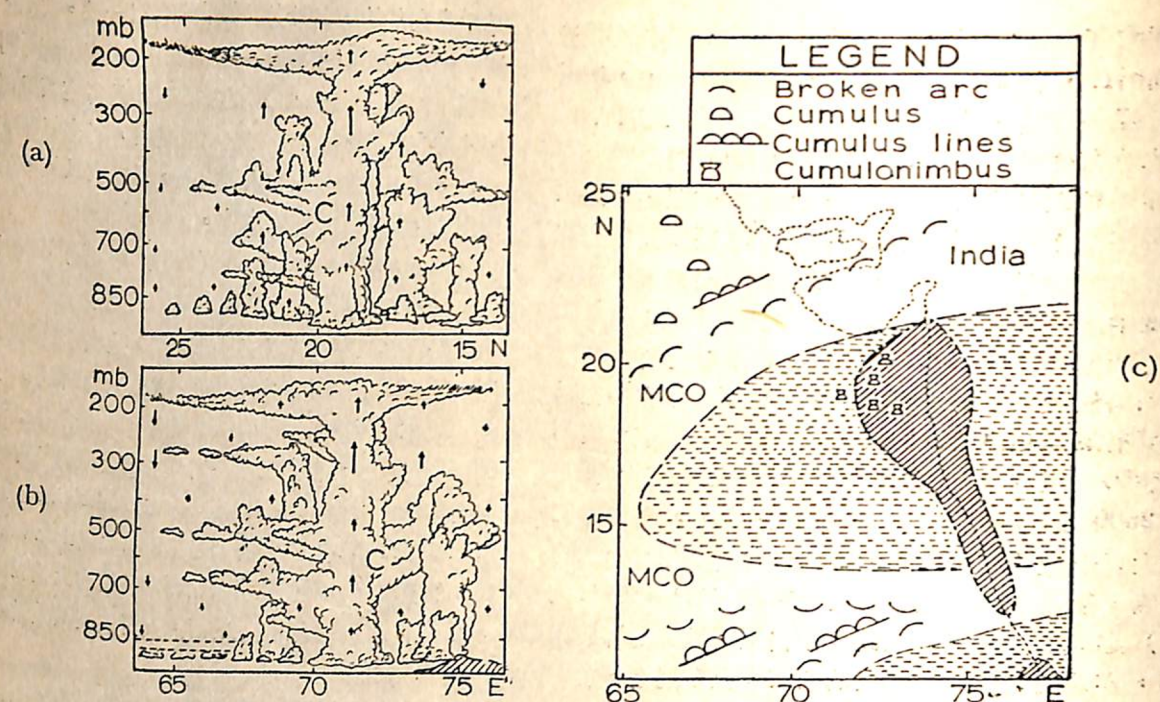
本文作者的意見，高空東風氣流的激勵，與其說與現在已知道有關聯的天氣系統及它的雨雲有關，不如說雨雲的本身。在印度西海岸多數的雨降自雨層雲，而積雨雲射入高對流層，需要從釋放的潛熱取得能量。強烈的積雨雲活動，僅佔這些天氣系統的某一部分（參閱圖二）。

觀測報告指出，北非洲西部，衣索匹亞及澳大利亞北部，在季風時期，對流高層氣流同樣逆轉，從西風到東風兼帶有雨，每日天氣及氣候學圖二者上，季風區域的東風比中間區域強（圖三及圖四）。顯著不同的，太平洋上空對流高層氣流，全年均表現出連續的波及渦旋的特性，在季風區域中，逆轉的空高東風氣流，顯出是對流層重新組織的主要部分。不過，阿薩姆及緬甸的雨，比印度西海岸的雨開始較早，就是高空氣流逆轉以前。對這明顯的矛盾問題，沒有令人滿意的解答曾經提出過。

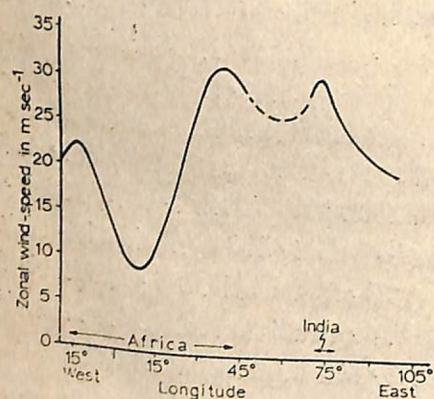
西藏的作用

在南亞季風過程中，高聳的西藏高原之作用，曾經有過不少爭論。早先的研究者們考慮過，高原對大氣運動是一種機械的障壁，但新近已經把注意力集中在高原的熱作用上。

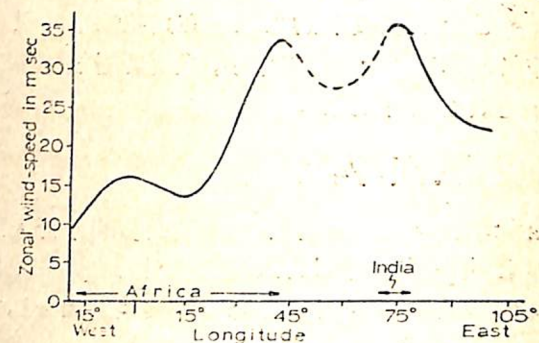
Flohn (1950) 首先提出假設，就是西藏高原在夏季，可能成為一個高空熱源。他主張，高原在夏季可能接收超大量的太陽輻射，於是在高原上空形成一個熱力促成的反氣旋（thermally-driven



圖二、根據Miller與Keshavamurty (1967) 圖解48圖，指示印度西海岸與季風雨組織結合之雲及垂直運動分佈狀況。(a) 圖經線軸為 72°E 及(b)圖緯線軸為 18.8°N ，實箭頭表垂直速度；箭頭最長者為 40cm/秒 ，最短者為 5cm/秒 ，C指氣旋環流中心位置。(c) 圖指示雲與天氣之概括平面圖，(a)與(b)圖為混合模型，繪斜陰影線區域範圍之雨量每日 4cm 以上，積雨雲符號指示垂直發展最大之地方；繪水平陰影線區域表裂至密之中及高雲，斷弧表裂至密低雲及疏高雲之範圍，MCO指「大部分遮蓋」。



圖三、沿緯度 12°N 附近1966年7月28日 0000 GMT 150mb風帶。



圖四、沿緯度 12°N 附近7月150mb平均風帶。圖三及圖四中，非洲東部及印度間之部分不確定，因無資料。

anticyclone)。夏季期間，在西藏上空發現有上對流層反氣旋 (upper-tropospheric anticyclone)，與在印度觀測到的高空東風共同存在，並且這個反氣旋的形成出現，與印度西部雨季開始有密切關係。因此 Flohn 推論，在夏季高原的加熱，可能是季風雨開始及持續主要的大氣作用。

很多研究工作者對 Flohn 的假設，曾經提供理

論上的及觀測上的支持，但仍有許多抱着懷疑的人。有兩種主要的評論：第一、不可忽視全部投落在高原的太陽輻射，部分被消耗在雪的融解，地面水的蒸發及水蒸汽散發的潛熱上。第二、當季風最初吹來時，上對流層的反氣旋正好在西藏高原的南方。

不管這些評論，Flohn 依然相信喜馬拉雅山脈

與西藏高原，阿薩姆與上緬甸，在上對流層反氣旋形成，及高空東風組合上，必定居於一種重要的地位。從有關地區人造衛星照片，及可利用的觀測報告嚴密檢查，證明了他的見解是正確的 (Flohn 1968)，並且顯示在印度次大陸的東北部，大量潛熱在對流激烈的積雨雲塔被釋出，接着降雨。

然而，假如在南亞季風環流裡，西藏高原是主要機械或者熱的影響，那麼所預期是合理的，就是其他季風地區大氣環流重新組織大氣層的發生 (澳洲北部、北非洲西部及依索匹亞) 被引起是不同的，因為沒有任何地方存在一個如此高與廣大的高原。

印度西北部熱低壓

阿拉伯海地面西南風，與印度次大陸西北部熱低壓相伴一直是被承認的，但在南亞季風發生中，這個低壓的正確作用有很多爭論。無可置疑，地區上太陽高度變化 (與對應高溫) 低壓就是一個回答，但它的強度，持續與持久是驚人的。撒哈拉熱低壓不及印度西北部熱低壓的強烈甚多，雖然兩地方的地面溫度相同。此外，雖有相當的低層混合進入地區，印度次大陸西北部雨很微小。確實矛盾的事，就是當向南離開不遠降雨時，低壓仍然是晴空無雲及強烈。

Ramage (1966) 研究整個強烈的夏季熱低壓組織，是從索馬利亞穿越阿拉伯東南向印度西北伸展，及結論：「沙漠地區熱低壓發展正常的方向應是太陽的天頂軌跡」及「由於釋出的潛熱在季風雨組織中向東及南，原來沉降的空氣舉升及加熱，使熱低壓在整個夏季都得到維持及加強」。這個結論曾被 Desai (1967) 有力的駁斥過，他提出氣團解釋來說明全部印度季風現象。但是，有些研究工作者們曾用定量的模型實驗為 Ramage 的研究工作提供了支持，就是印度西北部及鄰近的巴基斯坦，在夏季有下降運動。這個巨大的熱低壓 Ramage (1970) 擴大了他的解釋，說從東到西至 70°E ，空氣在上對流層下聚集下沉，保持着晴朗的天空狀況。又，他提出較大的誘發雨 (rain-induced) 下降，及冷氣平流較佳的保護，可以滿意的說明印度西北部熱低壓生存，此撒哈拉熱低壓較深。

Walker (1970) 參照溫帶低壓過程提出，當位能轉變為動能之際，空氣加速度的結果，是氣壓梯度可能加強，槽線可能加深。或許印度西北部熱

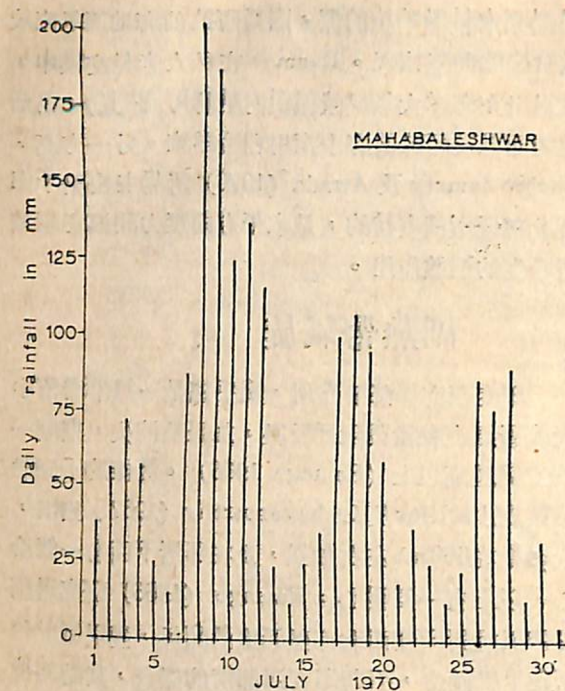
低壓原本較撒哈拉的深，因為阿拉伯海地面氣流較撒哈拉地面氣流強。Ramage 在私人意見交換中，曾提出在海洋大氣反饋循環內結構可能變動，包括這地面風及阿拉伯海中索馬利冷洋流。另一方面，Keshavamurty 及 Awada (1970) 認為主要給予印度北部低壓槽支持的，是水平方向壓力間相對摩擦而發生的消散作用。

副熱帶氣旋

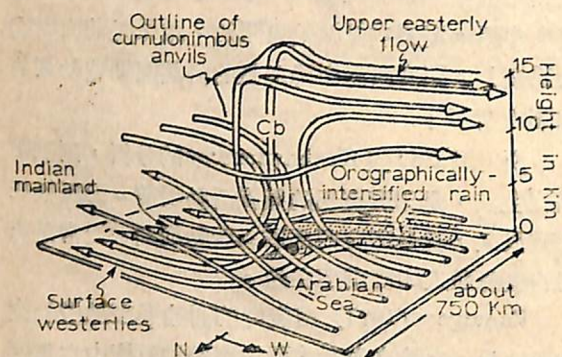
印度西海岸降雨作用，幾乎總是一個半滯留中對流層氣旋在孟買附近發展，加強及消失，期間一到三個星期以上 (Ramage 1966)。這樣的「副熱帶氣旋」Miller及Keshavamurthy (1967) 指出，大多數在 600mb 左右加強，及在那層下面有一個冷心，以上有一個暖心。Ramage (1966) 研究過副熱帶氣旋對印度西北部熱低壓的關係，發現副熱帶氣旋生成發生，引起印度西部雨的爆發，其時阿拉伯海東北部出現深厚的潮濕空氣層。他撰述「這種『爆發』依次是熱低壓上空下沉增加，熱低壓變強並且它的環流加入低層的季風環流。當潮濕空氣供給斷絕，副熱帶氣旋填塞，熱低壓變弱，及季風雨發生中斷。潮濕空氣供給再開始，結果是前面所述的重複」。印度西海岸降雨量的自然週期波動圖解如圖五所示。

所有Miller與Keshavamurthy的分析，副熱帶氣旋生成，是印度東部的氣旋活動居前。已經被注意到很久，就是印度西部季風活動期間，通常是氣旋的騷動進入印度東部在先。

Ramage (1971) 曾廣泛的討論過副熱帶氣旋天氣特徵，本論文作者曾經被副熱帶氣旋中空氣運動 (由Ramage 教授及他的共同研究者們，使用II OE 資料分析顯示，以及由作者自己的正常天氣資料檢查) 及Browning與Ludlam (1962) 的積雨雲模型二者之間非常相似的情形影響；這種相似的情形，在圖六中 (圖二畫面中央) 可以表明。當然，這種相似的情形可能是一種偶合，但這種相似是不合理的，所以很快的便予以摒棄。高空東風與低層西風二者明顯；當季風活動期間，孟買南方顯現出陰暗的天空，從經驗上得知，豐沛的雨量來自積雨雲；由分區顯示，印度西部西高止山脈西麓變強烈的山地降雨；及在 16°N 附近高止山背風面特殊的半不毛地區 (參閱Chang 1967) 是與鄰近的降雨豐沛地區下傾流線相一致。



圖五、Mahabaleshwar (17.9°N, 73.7°E, 海拔1382M) 每日0300GMT紀錄之日總雨量，指出雨系之週期性。



圖六、Ewing與Ludlam (1962) 劇烈風暴模型證明其氣流與副熱帶氣旋中之氣流相似。

在原位置副熱帶氣旋為什麼會發展，加強及填塞等問題，顯然的對於印度西北部的沙漠，像印度西部的山嶽與熱低壓一樣的使人迷惑，迄今還沒有定論。類似副熱帶氣旋擾動致雨的情形，也發生在 10°N 及 15°N 之間北非洲西部季風區，但不同於印度致雨的情形，它們是不穩定的，並且非洲的擾動是隨伴幾乎晴空無雲的地面低氣壓，沿着 20°N 附近的熱槽向西移動（再參閱Ramage 1971）；這些低氣壓進行不會超過北非洲西海岸的範圍。此外，Ramage 提到（私人意見交換）澳洲北部環流，根

據他已經收到的記述，非常類似副熱帶氣旋。

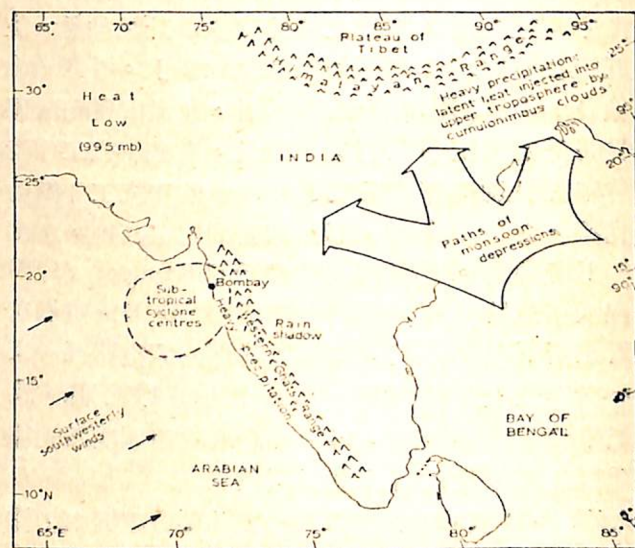
季風低壓

印度中部、東北部及緬甸北部，主要的夏季降雨作用是「季風低壓」(monsoon depression)，季風低壓是一種活動力中等，暖心氣旋的擾動。這些低壓類似弱的熱帶風暴，及在對流最低層中有極良好的發展；雖然這樣的氣旋在孟加拉灣北部初夏及秋季發生得很頻繁，但有些確實發展成為強烈氣旋。季風低壓在孟加拉灣北方約 15°N 處形成，然後非常緩慢的向西北西進行，隨伴有大雨。然而，有些接着向更北，或者甚至向東北行進入阿薩姆。如此，孟加拉灣昆連的陸地夏季季風擾動，根本與印度西部那些不同。在相同的季風組織中，由它們的近以及明顯的關係看來，這或者會令人覺得奇怪的。

孟加拉季風低壓曾經有過很多解釋提出：像氣團觀念，緬甸的山嶽地形效應，理論的擾動及動力的模型等。在目前相信，雖然沒有鋒面或強烈氣團顯著的不同存在，季風低壓的結構，是與副熱帶氣旋相似；相信在孟加拉灣北方高空東風中，季風擾動是在高空輻散與擾動的影響下形成。

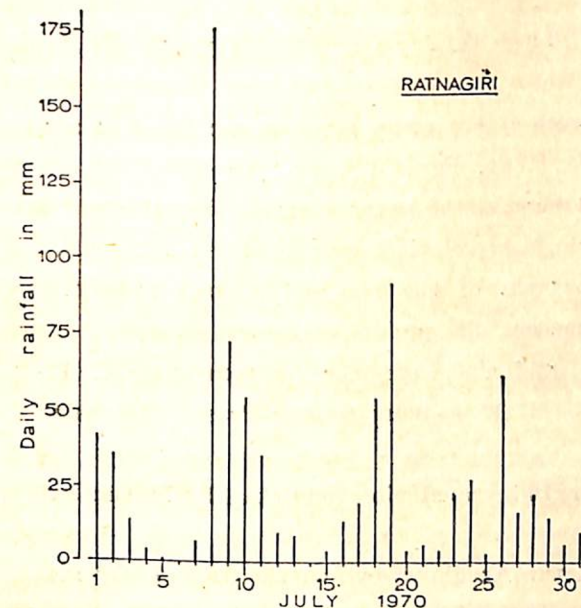
瞻望

圖七為影響南亞夏季天氣的主要地形概要圖。顯然，季風並不像過去他們曾經考慮過的那樣單純，所有一般論述指出的山嶽舉升作用固然是必



圖七、主要天氣影響簡圖。

須的，不過不再能滿意的解釋季風雨。在季風月份期間，給人深刻印象的連續傾盆大雨的記載並不正確，印度次大陸有些部分終年乾旱，另外部分降雨量一日之間變動非常大，甚至在最多雨的地區，季風暫息之際，可能有無雨的日子（參閱圖八）。



圖八、Ratnagiri (17.0°N, 73.3°E) 每日0300 GMT紀錄之日總雨量，指出在盛夏雨季期間發生之無雨日。

曾經被作過的許多分析，曾經被闡述過的許多季風環流觀點，以及為了研究大氣活動狀態，曾經被提出來證明過的許多理論，然則顯然的對季風物

理的瞭解不夠緊密，許多季風問題迄今仍然還沒有適當的定論。特別的，關鍵仍然是在物理的條件中，必須得到滿意的解釋。

希望將來製造出大氣的數值模式，對問題能產生答案。到目前為止，用數值方法重作過的，只有大氣環流顯著的特徵而已。但是，即使如此，數值模式現在只足夠推進到描寫地球的主要季風，及支持西藏與喜馬拉雅山脈，在南亞的季風中扮演一個重要的角色。最終目標是整個大氣環流的精詳公式因為只有到那時候，才能很有把握地預測，直接或間接與很多人民有密切關係的，奇異的季風。

雖然如此，回想起 Lorenz (1967) 曾經說過這樣很有價值的話：

「假如我們終於再尋找出（由數值方法）大氣環流中有關的細節，所獲得的，有什麼其他的會比完成一種挑戰性的工作更令人滿意的呢？數學的解式（方程式）並不能增加物理的見識，環流的整體作用非常複雜，各種物理的現象都有重大關聯，諸如地球的地形以及水態，從事數學解式的檢查，也沒有比從事實際大氣的直接觀察明顯。」

再者，觀察所顯示，必須用觀念去說明他們。因此，對於季風問題的解答，似乎只有由地理學家，預報員，物理學家及數學家們，協同合作才能獲得。

（譯自Royal Meteorological Society出版Weather 1972年5月號Vol.27 No.5 178—189頁）

本文參考資料

- | | | |
|------------------------------|------|--|
| Ananthakrishnan, R. | 1969 | Fluctuations in the upper-tropospheric easterlies over India during the southwest monsoon season. Inst. Trop. Met., India Met. Dept. Poona, Sci. Rep. No.102 |
| and Ramakrishnan, A.R. | | |
| Ewing, K.A. and Ludlam, F.H. | 1962 | Airflow in convective storms. Quart. J.R. Met. Soc., 88, pp. 117-135 |
| Chang, J.-H. | 1967 | The Indian Summer Monsoon. Geog. Rev. 57, pp. 373-396 |
| Desai, B.N. | 1967 | The summer atmospheric circulation over the Arabian Sea. J. Atmos. Sci., 24, PP. 216-220 |
| Findlater, J. | 1969 | A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. Quart. J. R. Met. Soc., 95, PP. 362-380 |
| Flohn, H. | 1950 | Studien zur allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre. Ber. Deutsch. Wett., U.S. Zone, No. 18 |

- 1953 Wilhelm Meinardus und die Revision unserer Vorstellung von der atmosphärischen Zirkulation. Zeit. Met., 7, PP. 97-108
- 1968 *Contributions to a meteorology of the Tibetan Highlands*; Colorado State Univ., Ft. Collins, Atmos. Sci. Pap.No. 130, 120 pp.
- Giles, B.D. 1970 Extremely high atmospheric pressures. Weather, 25, pp. 19-24
- Keshavamurthy, R.N. 1970 On the maintenance of the mean monsoon trough over northern India. Mon. Wea. Rev., 98, pp. 315-320
- and Awada, S. T.
- Lorenz, E.N. 1967 The nature and theory of the general circulation of the atmosphere. World Meteorological Organisation, 161 pp.
- Maury, M.F. 1860 The physical geography of the sea and its meteorology. Sampson Low, London, 485 pp.
- Miller, F. R. and 1967 Structure of an Arabian Sea summer monsoon system. II-OE Met. Mon. No. 1, East-West Center Press, Honolulu, 94pp.
- Keshavamurthy, R.N.
- Pédelaborde, P. 1958 The Monsoon. English translation published by Methuen, 1963, 196 pp.
- Pisharoty, P.R. 1965 Evaporation from the Arabian Sea and the Indian SW monsoon. Proc. WMO/UNESCO Symp. Met. Res. II/OE, Bombay, 22-26 July, 1965, pp. 43-54
- Ramage, C. S. 1966 The summer atmospheric circulation over the Arabian Sea. J. Atmos. Sci., 23, pp. 144-150
- 1970 Heat-lows. Proc. Symp. Trop. Met., Honolulu, June 1970 I VII-1 to 7
- 1971 Monsoon Meteorology. Academic Press, 296 pp.
- Raman, C.R.V. and 1964 Interaction between lower and upper tropical tropospheres. Nature, 204, pp. 31-35
- Ramanathan, Y.
- Simpson, G.C. 1921 The south-west monsoon. Quart. J. R. Met. Soc., 47, pp. 151-172
- Verploegh, G. 1960 On the annual variation of climatic elements of the Indian Ocean. Kon. Ned. Met. Inst., Med. en Verh., No. 77, 64 pp. + 22 charts
- Walker, J. M. 1967 Subterranean isobars. Weather, 22, pp. 296-297
- 1970 After Bjerknes. Ibid., 25, pp. 175-179