

北半球夏季中低纬地区的平均垂直环流 与大气中冷热源分布的关系*

叶笃正 杨广基

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文应用中央气象局出版的“北半球高空气候图集”中的风场资料,计算了 45°N 以南、北半球范围、7月份850 mb—100 mb各标准等压面层上的平均垂直运动。分析了不同区域经向和纬向垂直环流的特点,并将它与大气中冷热源进行对照。指出:夏季北半球低纬度平均是个Hadley环流,其北是个逆环流。形成这种环流形势的主要贡献地区在两个大洋上,这主要与低纬度大气是个热源、其北是个冷源的分布有关。另外,由纬向环流看到,夏季北半球中低纬主要上升运动区和下沉运动区各有两个,这两对上升气流区和下沉气流区构成了夏季北半球中低纬地区垂直环流的大形势。此外,本文还指出夏季青藏高原上空的上升气流向四周流出后所影响的地理区域。

一、引 言

大气环流中一个基本现象就是Hadley环流,它是南北向的垂直环流。它一直受到人们的重视和研究,一般都是研究它沿纬圈的平均情况。但不同地区它的强度差异很大,有的经度带强,有的经度带弱,有的甚至方向都反了过来。所以平均Hadley环流是少数几个经度带贡献的结果。那些经度带贡献最大,原因又如何,是值得讨论的。近十余年来人们还发现在东西方向上也存在强大的垂直环流。早在60年代的后期,Bjerknes^[1]就提出了由赤道太平洋海温差异而引起的东西向所谓的Walker垂直环流。70年代初,Krishnamurti^[2-3]又从夏季和冬季200 mb的速度位势场的分布指出,在冬季和夏季都存在着不同于Walker环流的东西环流。后来,叶笃正等^[4]从三度空间流场具体地绘出了夏季青藏高原到太平洋的东西环流圈。叶笃正等过去的分析仅限于亚洲和太平洋的副热带和热带地区,最近作者又补充了夏季 45°N 以南的北半球其余地区三度空间流场,从而可以讨论北半球 45°N 以南的垂直环流。

无论是Hadley环流或是东西环流都是直接环流,都是动能制造者,供应大气运动之用。由于它们都是直接环流,它们的生成原因必然和大气中冷热源的分布有关。因而研究北半球夏季副热带和热带的垂直环流,特别是着重不同区域的区别及其原因时,最好是结合同时大气中的冷热源分布。关于北半球大气中冷热源分布,过去朱抱真^[5]、Asakura^[6]和Kubota^[7]等人都有过计算,他们所用的方法虽不同,资料年代也不一样,但

* 本文于1980年2月28日收到,1980年5月13日收到修改稿。

所得的冷热源基本分布形势大致是相同的。因此，他们的结果基本可信。图 1 是 Kubota 计算的七月份能源的平均分布（单位为 ly/day ）。从图可以看出，从大西洋的副热带穿过极地到太平洋的副热带是大片的冷源，热带海洋是热源，但东太平洋的赤道带为一条狭窄的冷源，这个冷流可能与冷水上翻有关。图中有四个比较强的热源中心，一个在青藏高原及其邻近地区，一个在我国东部沿海到日本列岛一带，一个在菲律宾附近的洋面上，第四个在大西洋的热带海洋，其余的细节这里就不提了。

本文的目的就是想结合图 1 讨论七月北半球 $45^{\circ}N$ 以南的垂直环流结构及其成因。文中所用的资料和计算方法仍与文献 [4] 相同。经纬向垂直环流是根据经纬度格点上垂直运动和 wind 资料平均值做成的。为了作图方便和便于分析起见，又根据图中水平距离和垂直距离的比例，把垂直速度值扩大适当倍数。

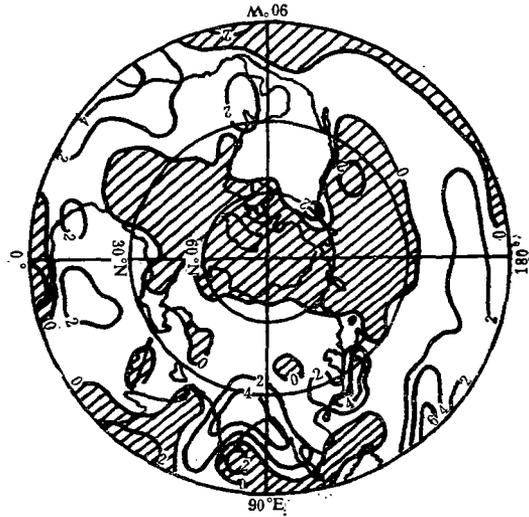


图 1 大气中 7 月能源的半球分布 (EST+EF)

(引自 Isao Kubota 1969 年的工作)

二、北半球夏季的平均经向垂直环流

由图 2 可以看出， $15^{\circ}N$ 以南为上升气流，这股上升气流在 $10^{\circ}N$ 以南的 300 mb 以上

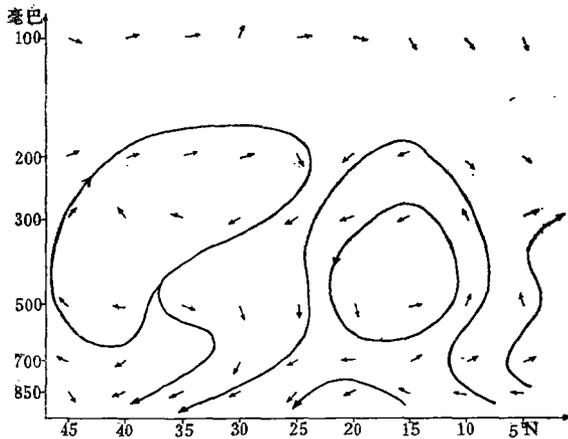


图 2 七月北半球 $45^{\circ}N$ 以南地区的平均经向垂直环流 (垂直距离扩大了 200 倍)

分别向南北流去，向南的一支流入南半球，向北的一支在北半球的副热带下沉，形成北半球夏季平均的 Hadley 环流。但它的闭合圈没有到达地面，下界在 700 mb 附近，上界在 200 mb 以上。 $45^{\circ}N$ 到 $30^{\circ}N$ 之间为一逆环流。在 850 mb，自 $5^{\circ}N$ 到 $40^{\circ}N$ 都是南风。这和 Vuorela 和 Tuominen^[8] 的结果是一样的。这样一个北半球经向环流的平均状态是怎样组成的？那个经度带的经向环流对组成平均 Hadley 环流贡献最大？原因如何？我们分区来讨论这个问题。

我们知道南亚是著名的季风区，这里强大的季风环流也是正环流，但在副热带上升，下沉区在赤道以南^[4]，与图 2 的 Hadley 环流方向正好相反，它的范围大约西迄 $60^{\circ}E$ 东至 $130^{\circ}E$ (图略)。在北美大陆 (图 3) 上空， $20^{\circ}N$ 以北的 200 mb 上皆为偏北

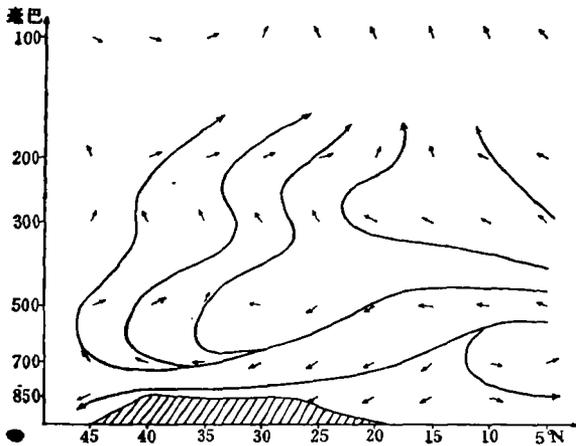


图3 七月 120°W—80°W 地区平均经向垂直环流图
(垂直距离扩大了200倍)

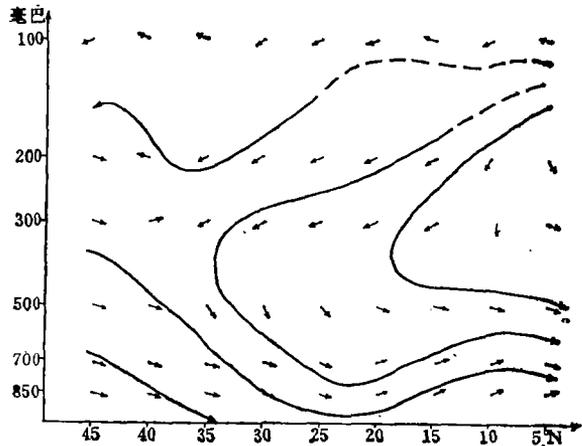


图4 七月 10°W—40°E 地区平均经向垂直环流图
(垂直距离扩大了200倍)

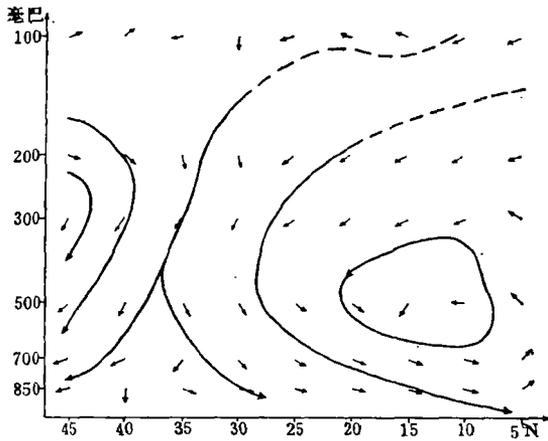


图5 七月 165°E—135°W 地区平均经向垂直环流
(垂直距离扩大了200倍)

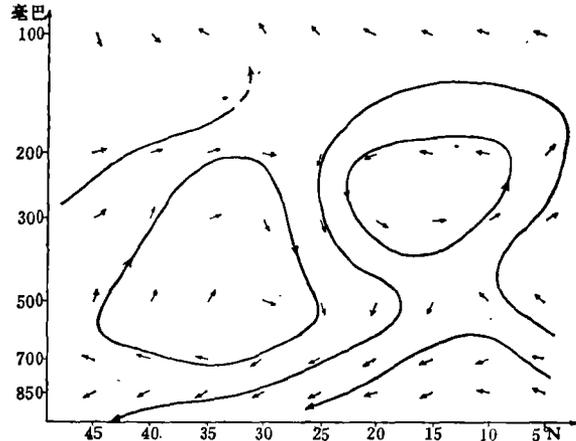


图6 七月 70°W—20°W 地区平均经向垂直环流
(垂直距离扩大了200倍)

风, 300 mb 以下基本上都是偏南风, 只是 700 mb 以下的 10°N 以南为偏北风。500 mb 以上以上升气流为主。所以在北美大陆上的平均经圈环流也不同于经典的 Hadley 环流。

在北非大陆上空 (图 4), 500 mb 以下吹北风, 以上吹南风, 上下层的水平风向和经典的 Hadley 环流类似, 但北非大陆上基本上都是下沉气流, 故在北非大陆上没有形成闭合的环流圈。

从以上描述看, 三个地区的平均经向环流都不和图 2 所给出北半球的平均环流相似。这三个地区基本上都是大陆, 因此形成图 2 所示的低纬 Hadley 环流和自副热带以北为逆环流的平均经向环流主要原因在于两大洋。图 5 是引自 [4] 中的中、东太平洋上七月平均经向环流。可以看出, 这是一张比较经典形状的经圈环流, 低纬度是一个完整的 Hadley 环流, 副热带是逆环流。

图 6 为大西洋上空的平均经向环流。这张图和北半球的平均图 2 是很相似的, 在

25°N 到 45°N 有一个逆环流圈, 低纬度带有一个 Hadley 环流, 但它在 500 mb 以上。700 mb 以下自赤道到 45°N 是偏南风。

从以上的分区描述可以看出, 夏季低纬度 Hadley 环流和中纬度逆环流形成的主要贡献地区在两个大洋上。其原因可以从图 1 看出。图 1 示出在夏季两个大洋的大气冷热源分布很相似, 北半球主要冷源从极地伸向两个大洋, 在大西洋达到 15°N 左右, 在太平洋达 25°N 左右。两大洋上, 冷源之南皆为热源。这种形式的冷热源分布很有利于经典的 Hadley 环流的发展。太平洋上的冷源面积比大西洋上大得多, 强度也大。因而太平洋上的 Hadley 环流比大西洋上的强度也大, 也更典型。北半球的大陆基本上都为热源, 尤其是副热带更是如此。而在这些热源之南的低纬度或多或少都有一部分冷源, 这种冷热源分布形势不利于经典型式(低纬上升, 副热带下沉)的 Hadley 环流的存在。亚洲大陆、北美大陆和北非大陆三者虽然都是热源, 但这三个地区上空的垂直运动却很不相同。在亚洲, 自副热带一直到赤道区自低空直到对流层上层都是上升运动; 在北美的 45°N 以南约自 500 mb 以上皆为上升运动; 而在北非大陆, 基本上都是下沉运动, 仅在 20°N 以南的 700 mb 以下为上升运动。亚洲和北美的上升运动是容易理解的, 因为这里是热源。Charney^[9]曾提出由于某种原因(如过渡放牧)北非某些地区大面积地增加了地面反射率, 造成辐射冷源, 辐射冷源引起下沉运动, 造成干旱。如果 Charney 的结果是正确的, 则北非下沉运动和这里的反照率过大有关。这样, 则北非的大气热源是和下沉运动绝热加热的结果有关。这里的下沉运动除因辐射冷却外, 可能还有其他原因。从下面讨论的纬圈上垂直环流(图 7—8)看, 在 30°N 以南, 北非大陆的下沉气流源于亚洲季风区的上升气流。因此北非上空的下沉运动可能动力作用更为重要。

从以上的讨论看, 夏季北半球副热带以南的平均 Hadley 环流是各地区不同形式经向环流组成的结果。比较各地区的平均经圈环流和冷热源分布, 可以看出, 除北非大陆的平均经圈环流有其动力原因外, 其他地区的平均经圈环流都是直接环流。

同样可以看出夏季北半球 Hadley 环流以北的平均逆环流也是各地区不同形式经圈环流组成的结果。它和 Hadley 环流相似, 也是在两个大洋上比较典型。

三、北半球夏季平均纬向环流

关于低纬度夏季的纬向垂直环流, Krishnamurti 等^[2]曾根据 200 mb 的平均夏季风场推论出一个理想的東西向的垂直环流(0°—30°N 的平均)。在它的平均图中有两个主要的上升区, 一个在北美西海岸的墨西哥高压区, 另一个在亚洲的季风区。与之相对应的两个主要下沉区在北非和太平洋洋中槽区。当然大西洋的洋中槽也是下沉区, 它和北非的下沉合成了一片。这样两两相邻的下沉和上升区在北半球低纬共组成四个東西向的闭合垂直环流圈。图 7 是 7 月 5°N—15°N 東西向的平均垂直环流。在这张图中可以看出约自 40°E 到 120°E 存在着东边上升西边下沉的的东西闭合环流圈。这相当于 Krishnamurti 等的自东亚季风区到北非的环流圈, 但小得多。在大西洋洋中槽的经度带内的下沉运动是不明显的, 这可能是这里的洋中槽伸不到 15°N 以南。中太平洋的对流层上半部是下沉运动, 但这支下沉气流并没有和它西边的上升气流组成一个東西向的垂直环流圈, 这不同于 Krishnamurti 等人所给出的那样。东太平洋的 500 mb 以上是大片的上升

区, 这个上升区和中太平洋 500 mb 以上的下沉气流在对流层上部组成一个东西向的闭合垂直环流。这个环流圈在 Krishnamurti 等人的理想图中也是存在的, 在他们的图中这个环流圈延伸到整个对流层。而实际上, 只出现在对流层上部。至于 Krishnamurti 等人的另两个东西环流圈在 5° — 15° N 的实际图中并不存在。

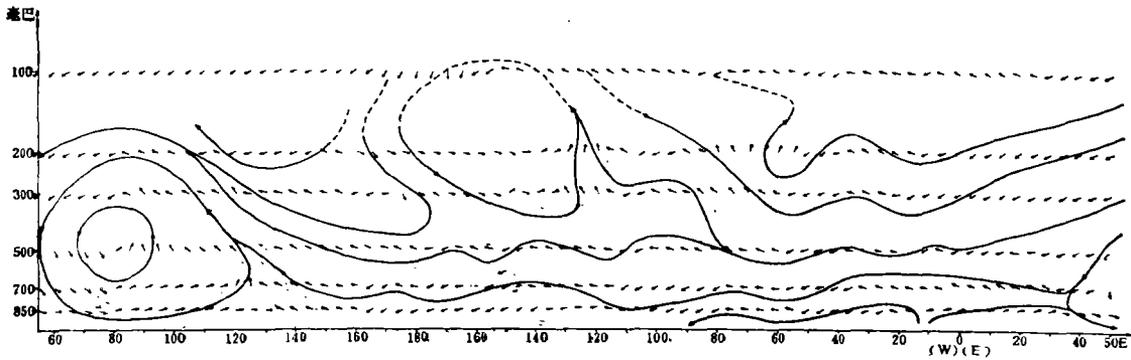


图 7 七月 5° — 15° N 地区平均垂直东西向环流
(垂直距离扩大了 500 倍)

图 8 是 7 月 20° N— 30° N 的平均纬向垂直环流, 这张图上有一个主要的上升区, 在亚洲季风区。从这个区上升的气流在对流层上部向东西两个方向流去。向东流的气流在太平洋的中部和东部下沉到对流层下部转为偏东风, 形成东亚大陆和太平洋之间的巨大东西环流圈^[4]。自季风区上升向西流去的气流到伊朗以至北非大陆以东下沉到对流层下部。这股强大的下沉气流在 10° E 附近的对流层下部分为东西两支, 向东的一支转回季风区, 这样亚洲季风区和它以西的北非大陆之间又形成了一个东西环流。以亚洲季风区为上升区的东西两个巨大的东西环流圈和 Krishnamurti 等所给出的这一带纬向垂直环流结构是完全相同的。

图 8 里在美洲西岸的墨西哥高压区附近有一个次要的上升运动区, 这个上升区主要在对流层的中上部, 自 500 mb 以下则为下沉气流。这个高层的上升气流在 200 mb 以上分别向东西两边流去, 向东去的气流在北美以东下沉, 在 300 mb 以下变成偏东风, 这样在美洲东岸向东到大西洋西部之间的对流层上部有一个闭合的东西环流圈。Krishnamurti 等的理想夏季热带纬向垂直环流图中在这一带也有一个东西环流圈, 但他们的环流圈充满了整个对流层, 而实际的只限于对流层上部。至于 Krishnamurti 等人给出的墨西哥高压区以西的东西环流则在 20° N— 30° N 实际平均图中并不存在。

配合夏季北半球大气冷热源分布 (图 1) 来看, 东亚季风区的强大上升运动是容易理解的, 因为这里是一个强大的热源区。它的西面北非是个净辐射冷却区, 再由于某些热力动力因素共同作用, 使这里盛行下沉气流, 它们之间就形成了一个东西环流圈。季风区以东的太平洋之中 (20° — 30° N), 按 Kubota^[7] 的计算, 仍是个热源, 但强度较弱。而按朱抱真^[5] 的计算, 太平洋上 500 mb 以下大气冷源的范围要比 Kubota 的结果大得多, 竟南达 20° N, 不管他们二人的计算谁更接近事实, 季风区和太平洋之间的巨大东西环流圈是可以理解的。图 8 中第二个比较大的上升运动区是墨西哥高压区附近的对流层上部, 其下部对流层则是下沉运动。这种分布形式的垂直运动可能是这样造成的: 从

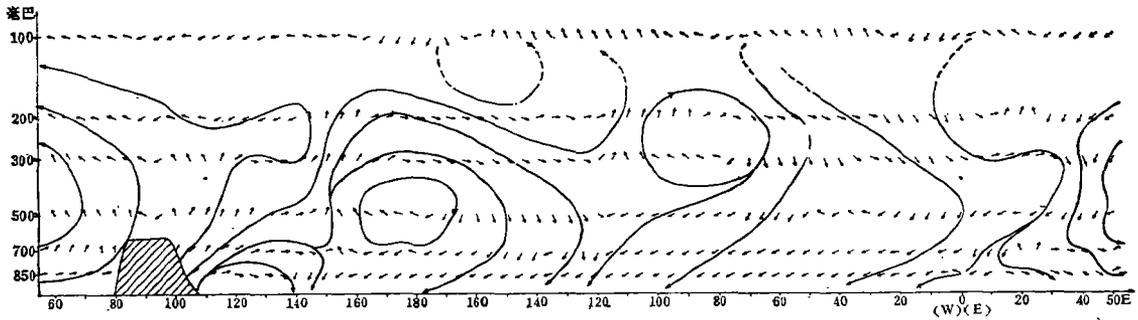


图 8 七月 20°N — 30°N 地区平均东西向垂直环流图
(垂直距离扩大了 500 倍)

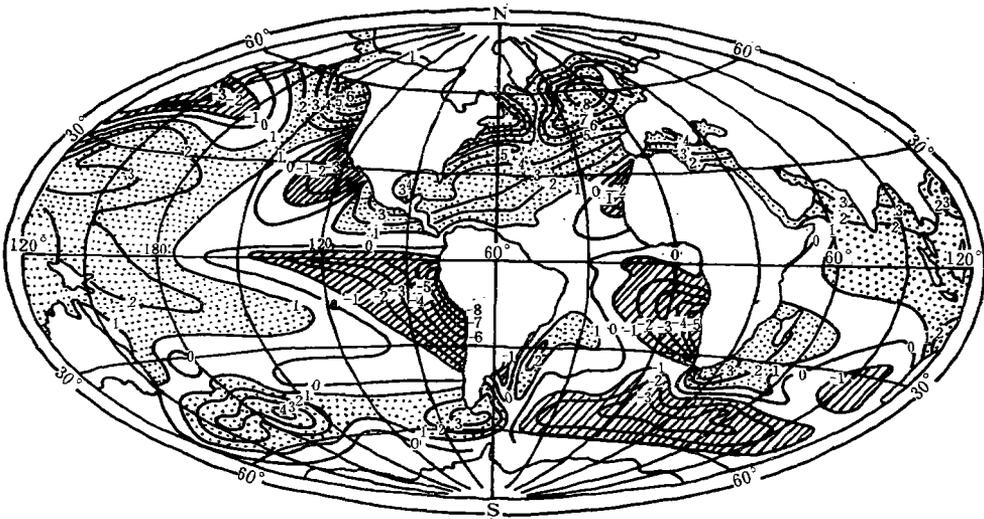


图 9 用纬圈距平表示的海洋表面温度图
(根据 Dietrich 和 Kalle 1957 年的工作)
(点区: 异常暖, 斜线区: 异常冷, 空白区: 正常)

图 1 看, 这里整层大气柱是热源, 但这一带的海洋表面温度的纬圈距平是个强大的负值区(图 9), 所以这一带的对流层上部是上升运动, 而其下部为下沉运动。

Krishnamurti 等仅从 200 mb 风场得到的散度推测, 就得出了上下一致的上升运动。由此还推测墨西哥高压以东和以西的两个东西环流圈, 而实际上 20°N — 30°N 平均图上西边的不一定存在, 东边也只在对流层上部有一个小环流圈。不过 5°N — 15°N 的平均纬向环流中(图 7), 在墨西哥高压区以西的对流层上半部存在一个东西环流圈。所以 30°N 到赤道的平均则在墨西哥高压区以东和以西在对流层上半部各存在一个东西环流圈, 但没有延伸到对流层中部或下部。

再往北, 我们绘制了 35°N — 45°N 的平均纬向环流(图 10), 达到了西风带, 其中不再有东西环流圈, 只是波动。一般在山的迎风区整个对流层皆为波谷, 但在对流层中上部的波峰则在大陆东岸以外, 在对流层的下部有沿地形爬越的趋势。

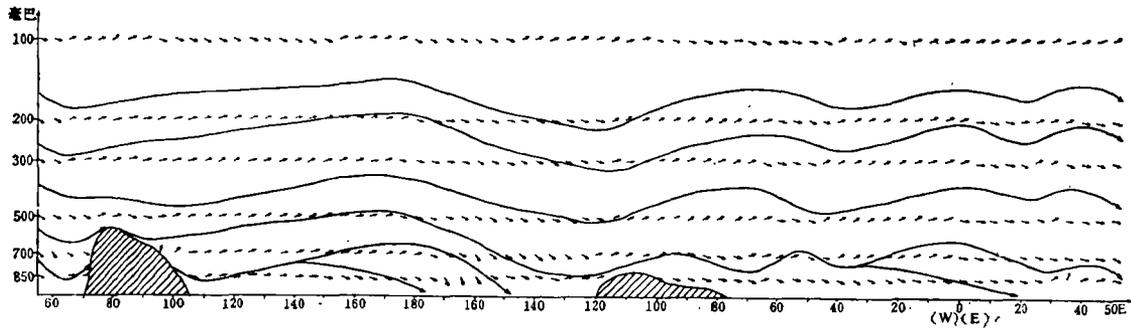


图 10 七月 35° — 45° N 地区平均东西向垂直环流
(垂直距离扩大了 500 倍)

四、总 结

从以上的分析,我们可以看出东亚季风区是夏季北半球中低纬度主要的上升气流区。这是可以理解的,因为这里是个强大的热源。从这里上升的空气到对流层上部分向四周流去,向东在太平洋中部以东下沉。向西的气流在伊朗附近开始下沉,直到北非大陆以东。北非大陆上的热源可能是这种下沉运动造成的。向南可以流过赤道;向北则在青藏高原北侧下沉^[4]。其次在北美西海岸外的东太平洋也是个上升气流区,但这个上升气流区仅限于对流层上半部,它的对流层下半部则是下沉运动。夏季北半球副热带以北主要的下沉运动区有两个,一个是沙特阿拉伯往西经过北非大陆以至大西洋,另一个在中太平洋。这两对上升气流和下沉气流就形成了夏季北半球低纬度带垂直环流的大形势。就 30° N 以南的经向平均来说,自东亚季风区以东和以西各有一个充满整个对流层的东西环流圈,这与 Krishnamurti 等人从 200 mb 风场推测出的情况基本上相合。自北美西海岸外的上升区以东和以西也各有一个东西环流圈,但它们只存在于对流层上部。就 5° — 15° N 和 20° — 30° N 的两带看,则后一带中东西环流圈发展的更好。

夏季沿纬圈平均的经圈环流,在低纬度是个 Hadley 环流其北是个逆环流。对形成这种环流形势的主要贡献地区在两个大洋上,这里低纬度大气是个热源,其北是冷源,有利于 Hadley 环流的形成。在亚非大陆和北美大陆上空的平均经向环流都不是这种南为 Hadley 北为逆环流的形势,这因为在这些大陆上,大气冷热源分布形势不利于此。

参 考 文 献

- [1] Bjerknes, T., Atmospheric teleconnection from the equatorial Pacific, *M. W. R.*, **97**, No. 3, 1969.
- [2] Krishnamurti, Tropical East—West circulation during the Northern Summer, *J. A. S.*, **28**, No. 5—8, 1342—1347, 1971.
- [3] Krishnamurti, Tropical East—West circulation during Northern winter, *J. A. S.*, **30**, No. 5, 780—787, 1973.
- [4] 叶笃正等, 夏季东亚和太平洋地区上空的平均垂直环流, *大气科学*, **3**, No. 1, 1—11, 1979.
- [5] 朱抱真等, 北半球热源、热汇的年变和大气环流的年变, *动力气象论文集* (1961), 科学出版社, 38—64.
- [6] Asakura, T. et al, On the normal distribution of heat sources and sinks in the lower troposphere over the Northern Hemisphere, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **42**,

- №4, 209—244, 1964.
- [7] Isao Kubota, Seasonal variation of energy sources in the earth surface layer and in the atmosphere over the Northern Hemisphere, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 48 №1, 30—46, 1970.
- [8] Vuorela, L. A., and I. Tuominen, on the mean zonal and meridional circulations and the flux of moisture in the Northern Hemisphere during the summer season, *Pure Appl. Geophys*, 57, 167—180, 1964.
- [9] Charney, Dynamics of deserts and drought in the sahel, *quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, №428, 193—202, 1975.

THE AVERAGE SUMMER VERTICAL CIRCULATION TO THE SOUTH OF 45°N OF NORTHERN HEMISPHERE AND ITS RELATION TO THE DISTRIBUTION OF HEAT SOURCES AND SINKS IN THE ATMOSPHERE

Ye Du-zheng (Yeh Tu-cheng) and Yang Guang-ji
(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

By using the data of the wind field of the upper climatic maps of northern hemisphere published by Central Meteorological Bureau, the average summer vertical motion at the various standard layers to the south of 45°N has been calculated. The characteristics of the mean meridional and zonal circulation in various regions were analyzed and compared with the distribution of heat sources and sinks in the atmosphere. It is shown that the main contributions to the formation of the mean Hadley and Ferrel circulation come from Pacific and Atlantic Oceans. This may be attributed to the fact that over the two oceans there are heat sources in low latitudes and sinks to its north. It is also shown that there are two main ascending regions and two main descending regions to the south of 30°N. From these, the general features of the zonal vertical circulation are described.

Finally, in this paper, the influence of ascending currents over Tsinghai-Tibetan plateau on the remote regions to the east, west, south and north of plateau is also discussed.