

赤道带边界层结构的数值研究*

赵 鸣

(南京大学大气科学系, 南京, 210008)

摘 要

在气压随纬度的不同分布条件下,数值求解了二维赤道带大气边界层非线性运动方程组,得到了不同气压分布下赤道带边界层运动特征,显示了平流的重要作用。在赤道带存在低压槽或气压单调随纬度增加而减少的情况下,都得出在赤道附近某纬度有一相应于赤道辐合带(ITCZ)的垂直运动大值集中区域存在,克服了前人用临界纬度机制解释边界层大抽吸速度时略去重要的非线性项的处理上的困难。

关键词: 赤道带, 边界层, 数值研究。

1 引 言

大气边界层的观测和理论及数值研究在中纬度地区已日趋完善,现有的一套边界层成熟的理论模型主要适用于中高纬地区,该地区边界层运动主要处于气压梯度力、柯氏力和湍流摩擦力的三力平衡之下,但赤道低纬地区的边界层研究目前仍然很少,这一方面由于赤道带地区观测资料稀少,另一方面由于地转偏向力小,传统的三力平衡模式已不适用,即传统的边界层模型对赤道带失效,给理论研究也带来困难。以往的研究中, Mahrt^[1], Krishnamurti^[2,3]的数值研究证明了平流作用的重要性,特别是越赤道气流对赤道带边界层的重要性,但他们的模式的上边界没有与自由大气的风场联系起来。按一般处理,边界层方程的上边界条件应取自由大气无摩擦时的风,他们未这样做,因而削弱了边界层与自由大气间的作用。另一方面,他们都是设气压单调随纬度增加而减少,只反映了部分地区的实际状况,例如 Krishnamurti 这样做,是为了模拟东非的索马里急流,但这却不能代表处于南北半球信风交汇地带的赤道边界层,在这些地区,气压场应是邻近赤道某纬度,有低压槽存在,气压向南北两方向增加。Krishnamurti 在上述给定的气压场下,在 10°N 以北,在西南风与西北风之间模拟出了 ITCZ 的流动特征,虽然不能由此得出 ITCZ 的动力学成因,却说明了在一定气压场下边界层与 ITCZ 间有重要关系存在。然而这一结果与一般南北半球信风交汇处由西南和东北风间形成的 ITCZ 是不同的。Кривелевич^[4]的研究则设气压场是对赤道对称的,并不符合大多数实际情况,而且没有结合赤道带天气系统来研究。某些赤道带边界层的解析研究^[5]也因未计入重要的平流项而意义不大。

本研究目的有二:一是模拟不同气压随纬度分布情况下边界层的结构,特别是平流的

* 1992 年 7 月 17 日收到原稿,1992 年 11 月 14 日收到修改稿,本文系国家自然科学基金资助项目。

影响;二是研究赤道带边界层抽吸速度分布与气压分布的关系,并研究其与 ITCZ 的可能关系。临界纬度理论曾对赤道带某些纬度处得出大的边界层抽吸速度^[6],但该理论的一个主要缺点是略去了对低纬来说非常重要的平流项。前面已述,对赤道带来说,边界层运动处于四力平衡态,平流是很重要的,因而临界纬度理论的这一线性化处理是有问题的。本文结果将说明,在考虑平流的情况下,不论在赤道带出现低压槽或是如 Krishnamurti 那样压力随纬度增加而减少的情况,在某纬度能出现一个垂直速度大值的集中窄带,相应于 ITCZ。虽然如 Krishnamurti 一样,本文是在气压场给定时研究流场的,因而不能据此得出 ITCZ 的动力学成因,但说明了边界层与 ITCZ 间的重要关系。

2 模式

在赤道带大气运动的研究中常忽略东西方向(x 方向)的变化,即取 $\frac{\partial}{\partial x} = 0$,只研究二维问题^[1,4,5],我们亦如此处理,于是在赤道 β 平面中定常边界层运动方程可写成:

$$v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \beta y v + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta y u + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

y 轴指向北,坐标原点在赤道。在边界层上界,即自由大气,运动方程应是^[1]:

$$v \frac{\partial u}{\partial y} = \beta y v \quad (3)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta y u \quad (4)$$

先研究自由大气中的运动。由式(3)可见, x 方向的运动与气压场无关,只决定于坐标 y 和 u 的边值:

$$u = u_0 + \frac{1}{2} \beta (y^2 - y_0^2) \quad (5)$$

u_0 为起始点 y_0 处 u 值,设气压场或气压梯度力是 y 的已知函数,将式(5)代入式(4),得:

$$v^2 = v_0^2 + \frac{1}{2} \beta u_0 y_0^2 - \frac{1}{4} \beta^2 y_0^4 - \beta u_0 y^2 + \frac{1}{4} \beta^2 y_0^2 y^2 + \frac{1}{4} \beta^2 y^4 - \frac{2}{\rho} (p - p_0) \quad (6)$$

v_0 为 y_0 处 v 值, u_0, v_0 作为边条件给定。为了体现越赤道气流的影响,我们(如 Mahrt^[1])把 y_0 取为 3°S 处。并且设 $u_0 < 0, v_0 > 0$,即赤道以南是东南风,相当于南半球的东南信风,这样由式(5),(6)确定的自由大气风场就是在给定气压场下由南半球吹来的东南信风沿 y 方向的变化。模式的北边界我们做了两种试验,一种取在 $10^\circ\text{N}, \Delta y = 0.5$ 纬距,即 $\Delta y = 55000\text{m}$,共 27 个网格点,另一种取在 $23^\circ\text{N}, \Delta y = 110000\text{m}$,格点数不变,原计划取到 10°N 止,但在某些气压场下, 10°N 以南还不足以描述某些边界层运动特征,因此将范围扩大了。

由式(5)可见,因 $u_0 < 0$,从南边界开始 u 先是小于零,以后逐渐变为大于零,即由东风分量变为西风分量。再由式(4)可见,不论气压梯度力正负与否,因赤道以北某 y 值以后 u 要大于零,因此式(4)右端第 2 项将随着 y 的增加负值愈来愈大,最后总会使得 $v \frac{\partial v}{\partial y} < 0$ 。

因为初始 $v_0 > 0$, 故 v 分量最后总会从某一个 y 值开始向北, 其正值逐渐变小, 以致在某一纬度减到零, 此时由式(4), u 分量将达到地转平衡, 即:

$$u = -\frac{1}{\beta y \rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (7)$$

如果在该处 $\frac{\partial p}{\partial y} > 0$, 即气压随纬度增加而增加, 则 $u < 0$, 即吹东风, 此时将在此处有大的东西风切变。如果该处 $\frac{\partial p}{\partial y} < 0$, 则变为纯西风, 而其南侧则是西南风。在达到地转平衡以后, 式(5), (6)不再成立, 认为再往北大气即处于地转平衡态。因此, 在式(6)应用的区域内, 因 $v_0 > 0$, 故 v 恒大于零, 即不会有北风出现, 这是自由大气风在设定的边值下的总特征。由式(5), (6)确定的自由大气风即取为边界层方程组(1), (2)的上界条件, 这种处理完全合乎现代边界层模式的处理方法。考虑到低纬边界层高度较高, 我们把式(1), (2)求解区域的上界 H 取为 2000m。为了对比, 我们也试验了 $H=1500\text{m}$ 情况。对于式(1), (2)中的 K , 我们将取 Krishnamurti^[2]的非线性形式, 这比取其为常数要合理得多:

$$K = \Lambda^2 \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} \right| \quad (8)$$

其中

$$\Lambda = 0.4(z + z_0) \left(1 - 0.92 \frac{z}{H} \right)^{1.45} \quad (9)$$

z_0 为下垫面粗糙度, 此处取 $z_0 = 10^{-4}\text{m}$ 代表低纬处主要下垫面的洋面。

连续方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

这样式(1), (2), (8)–(10)构成闭合方程组。上界条件前面已述, 下界条件取:

$$u = 0, \quad v = 0 \quad \text{当 } z = 0 \quad (11)$$

侧界条件取方程(1), (2)无平流项时的解。垂直格点如表 1。第 2 行为 $H=2000\text{m}$ 时用, 第 3 行为 $H=1500\text{m}$ 时用。

表 1 垂直网格

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$z(\text{m})$	0	10	20	50	100	200	500	1000	1500	2000
$z(\text{m})$	0	5	10	20	50	100	200	500	1000	1500

对于 $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$, 我们研究两种情况。一种是研究在赤道带发生南北信风交汇的情况, 此时在赤道带存在低压槽, 故设气压从南边界开始向北减至北半球某纬度后改为向北增, 即在某纬度出现低压带。观测事实指出 ITCZ 常伴有这样的气压系统, 此时将会出现西南风与东北风之间的辐合。西南风我们已解释过如何从式(4), (5)得出, 而东北风则主要是由于当气压随纬度增而增时, 由式(7) $u < 0$, 边界层中出现三力平衡产生穿越等压线指向低压的气流, 即东北风, 这也可看成是副高南侧的东北信风。另一种 $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$ 的取值是考虑 Krishnamurti^[2]对东非索马里急流研究时的情况, 该情况下气压单调由南向北减, 我们亦

将研究此情况下的边界层结构和垂直速度场。我们发现上述两种气压分布下均可形成强的辐合带和上升区,相应于两种不同类型的 ITCZ。

不计斜压性,这在低纬通常满足。方程积分步骤如下:先求出方程(1),(2)中当平流项为零时的解,即解如下方程:

$$\beta y v + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta y u + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

上界条件仍用(5),(6),这时得到的解设为 u_1, v_1 。它们显然为 y, z 的函数。其解法如下:先设 K 为某一常值,分别对各水平格点求解方程(12),(13),再由式(8)求 K ,再解方程(12),(13),直至收敛。不同 y 处方程(12),(13)是分别解出的,各 y 处的解之间并无关系。这样求出 u_1, v_1 后,以其为初值求下列非定常边界层方程的解:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \beta y v + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial u}{\partial z} \quad (14)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \beta y u + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial v}{\partial z} \quad (15)$$

即方程(1),(2)再加时间变化项。(14),(15)是二维方程组,边界条件前面已述。在侧、上、下界条件均固定时,非定常方程积分若干时步后将得到定常解,即方程组(1),(2)的解。其中 w 由连续方程(10)求出。积分时对扩散项取隐式方案, u, v, w 定义于表1的网格点上, K 定义于两个网格点之间处。时间步长取 5min,再采取适当的平滑措施,积分 1000 步即可得定常解,以方程(14)为例,其差分方案如下:

$$\begin{aligned} \frac{u_{i,j}^m - u_{i,j}^{m-1}}{\Delta t} + v_{i,j}^m \frac{u_{i+1,j}^{m-1} - u_{i-1,j}^{m-1}}{2\Delta y} + w_{i,j}^{m-1} \frac{u_{i,j+1}^{m-1} - u_{i,j-1}^{m-1}}{z_{j+1} - z_{j-1}} = \beta y v_{i,j}^m \\ + 2 \left(K_j \frac{u_{i,j+1}^m - u_{i,j}^m}{z_{j+1} - z_j} - K_{j-1} \frac{u_{i,j}^m - u_{i,j-1}^m}{z_j - z_{j-1}} \right) / (z_{j+1} - z_{j-1}) \end{aligned} \quad (16)$$

下标 i 表示 y 方向格点, j 表示铅直向格点,上标表示时步。这样得到的解即是我们寻求的解,它与不计平流的解 u_1, v_1 差别甚大。

3 边界层风的纬向分布和垂直速度

先分析气压由南向北减至 4°N , $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, 4°N 以北变为随 y 增加而增加, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 10^{-4} \text{ms}^{-2}$ 的情况,这些值都是赤道带典型值。这种气压分布是南北半球信风交汇的形式。设 $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$, 此时边界层上界处风矢随 y 的分布如图 1a。在 4.5°N 以南为东南风,以北转为西南,向北则西风分量渐增,至 8°N 为地转平衡。当 $H = 2000 \text{m}$, $\Delta y = 55000 \text{m}$ 时边界层 100m 高处风矢随纬度分布如图 2a。可见 100m 处风向与上界处风向差不大,这是由于地转偏向力很小所致。100m 处风也是在 4.5°N 由东南转为西南。再向北 100m 处风与上界风速之差变大,而在 $6-7^\circ\text{N}$ 之间变为东北风,此处,也就是在地转平衡处以南一两个纬距处产生强的辐合,相应于 ITCZ。此时低压区在 4°N ,故与观测的在 ITCZ 附近为低压区的结论是一致的^[7]。此辐合带的位置也与观测的 ITCZ 相当

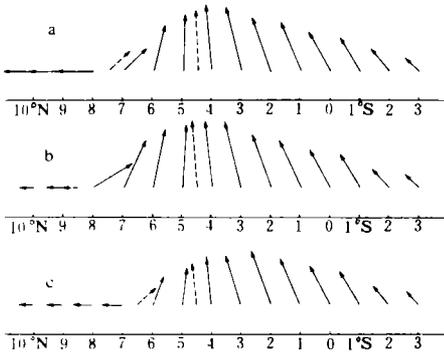


图1 边界层上界风矢的纬度分布
($u_0 = -2\text{ms}^{-1}, v_0 = 2\text{ms}^{-1}$)

- a. 低压槽在 4°N , $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \begin{cases} -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi < 4^\circ\text{N} \\ 10^{-4} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi > 4^\circ\text{N} \end{cases}$
- b. 低压槽在 4°N , $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \begin{cases} -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi < 4^\circ\text{N} \\ 5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi > 4^\circ\text{N} \end{cases}$
- c. 低压槽在 2°N , $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \begin{cases} -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi < 4^\circ\text{N} \\ 5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, & \text{当 } \varphi > 4^\circ\text{N} \end{cases}$

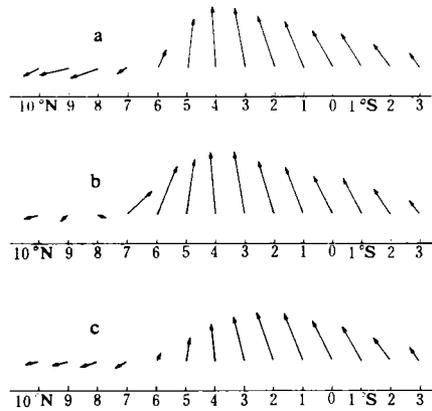


图2 100m 处风矢随纬度分布
(图2的a,b,c分别相应于图1的a,b,c)

接近^[8],当然这还与 u_0, v_0 有关,以后将讨论不同 u_0, v_0 的影响。

若 4°N 以北梯度值变小为 $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$,则上界风如图 1b,显然 4°N 以南不受影响,而以北则由于压力梯度变小,使南风分量向北减少的速度变慢,变为地转平衡的纬度亦向北推至 9°N ,100m 处风见图 2b,与图 2a 比,此时辐合带亦向北推了一个纬度。

若气压低槽区位于 2°N ,即更南,槽以南及以北的气压梯度仍同图 1b,图 2b,则显见,上界风的南风分量向北减得更快,地转平衡在更南的纬度处才达到,辐合带亦比图 2b 偏南一个纬距,见图 1c,图 2c.若低槽位于 6°N ,即偏北,则所有变化型式均偏北,辐合带亦偏北(图略),但辐合带位置总与低压槽位置有一偏差。辐合带的位置虽然有变,但与实际的 ITCZ 位置仍是很相近的。

计算的边界层顶垂直速度见图 3,它相应于图 1 的气压分布,可见 w 在某一狭纬度带变得很大,有一明显峰值, w 最大的位置与前述辐合带位置完全一致。图 3a 的低压槽以北气压梯度较大,相应的 w 最大值也比其他两种情况大。从图 3b,c 的比较可见,若低压槽位置偏北,则南北风分量之间的辐合及 w 也愈大。从图 2 可见,若低压槽区愈北,则西南风向北的衰减愈慢,造成与北风分量之间的大辐合。从图 3 见, w 值达几个 cms^{-1} ,相当大。Holton^[6]的临界纬度理论虽然得到了大值 w 的存在,但他略去了不应略去的平流作用,我们在平流存在情况下获得了在窄纬度带内大值 w 存在的结果,因而克服了他的困难。后面在讲气压单调随纬度增而降时也有此结论。可以看到除辐合带外,其他纬度的 w 要小许多,甚至为负。

若取 $\Delta y = 110000\text{m}$ 的结果,则各种情况下的风场特征,辐合带位置,垂直速度分布都基本与 $\Delta y = 55000\text{m}$ 的一致,只是算出的 w 值要小些,但量级相同。

上述是取 $H = 2000\text{m}$ 的情况,当 $H = 1500\text{m}$,则上述各种特征也完全相同,只因 H 变

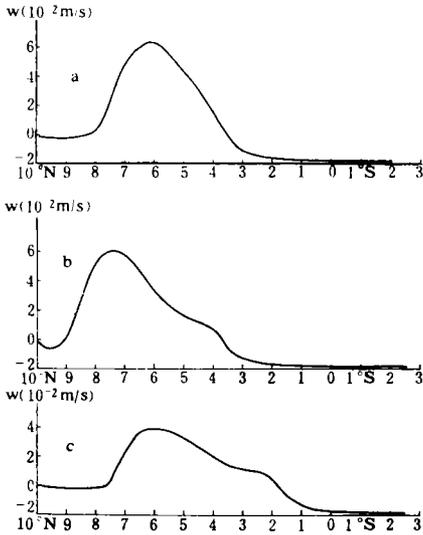


图3 边界层顶垂直速度的纬度分布
(相应的气压分布为图 1a—c)

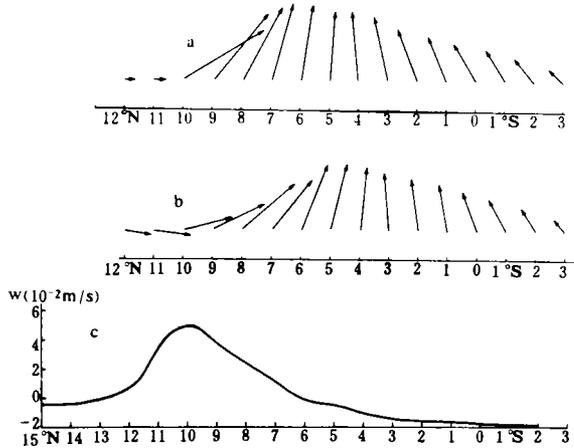


图4 气压梯度 $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$

时的风场

($u_0 = -2 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$; a. 边界层上界处风矢;
b. 100m 处风矢; c. 边界层顶垂直速度)

小,求 w 的积分区间变小,当然求出的 w 值也要小些,但量级同样是相同的。例如在图 1a 相应的气压场,最大边界层顶 w 约 4.6cms^{-1} ,但在 $H=2000\text{m}$ 时,其值约 6.3cms^{-1} 。

既然不同 H 并不影响所有运动特征,我们在研究不同边值 u_0, v_0 影响时,将用 $H=1500\text{m}$ 的结果。现在取 $u_0 = -4 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$,气压分布同图 1a,则在相同 H 及气压场下,新 u_0, v_0 的结果显示边界层风由西南向东北风的转换比原 u_0, v_0 的结果向北移了一个纬距,即辐合带位置在 $7-8^\circ\text{N}$;而 $u_0 = 0 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$ 时辐合带则较原来 $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$ 的位置略偏南,即在 6°N , w 量级也相同。此结果亦可获简单解释,当 $|u_0|$ 变大,则东风分量转变为西风分量的纬度亦将偏北,于是一切系统偏北, $|u_0|$ 减少则反之。可见边值不同,会产生风系的南北位移,但这种移动都不大,辐合带位置总在几个纬度处,这与观测显示的 ITCZ 位置是基本一致的。

现在再考查气压单调随纬度增高而减小的情况,这时同样能出现强的辐合带,但这是西南与西北风之间的辐合带,在达地转平衡时,吹西风,边界层摩擦产生的西北风与南面的西南风之间产生强辐合,位置比前述辐合带偏北,我们将在 $3^\circ\text{S}-23^\circ\text{N}$ 间用 $\Delta y = 11000\text{m}$ 的计算结果进行分析。设 $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -5 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}, H = 2000\text{m}, u_0 = -2 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$,边界层上界处的风及 100m 处风分别见图 4a, b。从边界层风可见随着 y 的增加,西南风逐渐为西北风所取代,与气压槽型时的西南风为东北风所取代是完全不同的,于是在此气压场下,在西南风与西北风之间产生强辐合,而相应于文献[2]中讲的 ITCZ,其性质与前一类型是不同的。在图 4 相应的边值下,地转平衡在 11°N ,辐合带及最大 w 位于 10°N 。图 4c 是相应的边界层顶 w 的纬度分布。当 $u_0 = -4 \text{ms}^{-1}, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$ 时,地转平衡北移 1 纬距, w 最大亦相应北移 1 纬距至 11°N ;若 $u_0 = 0, v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$ 时,则南移 1 纬距,理由前

面已述。可见边值不同,会影响辐合带位置,但敏感性不大,因而上面讲的位置是有代表性的。文献[2]得到的 ITCZ 位置在 13°N , 已与我们的结果接近,若取 $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$ 在 5°N 以北为 $-2 \times 10^{-4} \text{ms}^{-2}$, $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$, 则我们得出的 ITCZ 位置也在 13°N , 因此此压力梯度已和文献[2]用的接近了。总之,此类型的 ITCZ 位置比前一类型的偏北。

4 边界层风廓线与力平衡

三力平衡边界层风矢随高度在北半球右旋,南半球左旋,加上平流后的四力平衡则完全不同,以图 1a 的气压场为例,取 $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$, 则积分区域在 $3^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{N}$ 时的结果显示在 9°N 以南风随高度分布均为左旋, 9°N 处才显示典型的三力平衡边界层,而地转平衡在 8°N 处已达到。这说明即使上界已处于地转平衡,平流等于零,但边界层内部平流仍在起作用,要更北一些才能体现三力平衡。图 5a, b 分别是图 1a 所示气压场下在 5°N 和 9°N 处的风螺旋,可见两处左右旋不同的特点。如果将气压场中低压槽南移及北移,则相应的左右旋分界区亦作相应移动,这与前面讲的整个风系的移动是一致的。造成在北半球左旋的原因是:一方面平流作用大,改变了三力平衡特征,产生了特殊的“平流边界层”^[3],另一方面作为边界层上界处的风也不是地转平衡下的风,即式(5),(6)被用为上界条件,即使边界层方程中不计平流,由于上边界是非地转的,因此得到的边界层风也不具备典型的中纬边界层风的螺旋形状。对压力随 y 增加单调减小的情况,上述左右旋各种特征也完全适用,不赘述。

从图 5 可见,风螺旋的一个特点是风速上下差不大,与传统的三力平衡边界层有很大差别,这是平流的影响。我们曾作了试验,使边界层方程中不计平流项(包括水平及垂直),其余不变,结果边界层上下间风速差就变大了。

下面具体分析一下赤道带边界层中力的平衡情况。图 6 是与图 1a 相应的气压场中当 $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$ 时在 $\varphi = 5^{\circ}\text{N}$ 及 9°N 处,高度 100m 处力平衡图。 5°N 处左旋,是平流作用大的地区, 9°N 处风右旋,平流作用小。从图可见, 5°N 处平流很大,平流惯性力矢 A 最大, 9°N 处 A 就小得多,但仍不等于零,不过它已不影响边界层内的右旋。至于上界风的非地转影响在图中是看不出的。另外摩擦力 F 在赤道带普遍较小是由于风垂直切变小所致,其理由前

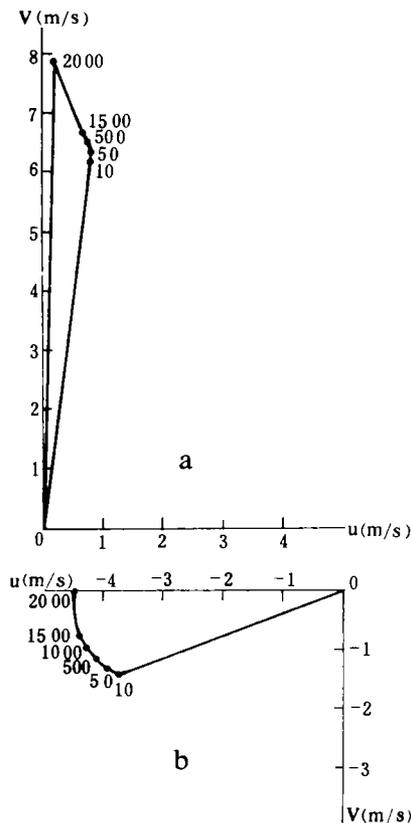


图 5 风矢端迹图

(气压场相应于图 1a 中值, a 为 5°N , b 为 9°N , $u_0 = -2 \text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2 \text{ms}^{-1}$, 曲线上数字为高度(m))

已述,这也是平流边界层特点之一。

5 结 语

本文在两种不同类型的气压场分布下,用含平流的大气运动方程的解作为上界条件,求出了赤道带二维大气边界层运动方程的数值解,得到合理的风场。分析结果表明,当存在从南半球来的越赤道气流时,不论在近赤道存在一个低压槽区或是气压单调随纬度增加而减小,都会在某低纬度出现一个强辐合带,边界层的强辐合产生了大的边界层顶垂直速度,求出的辐合位置与实测的 ITCZ 很相近。说明了 ITCZ 与边界层作用之间有很大关系,为研究 ITCZ 的成因提供有益的资料。

由于赤道带平流作用很大,使边界层内风廓线与中纬度三力平衡决定的风廓线根本不同。在本文论述的气压场及边界条件下,在地转平衡以南的纬度风矢反时针旋转,即使上界风已地转平衡,边界层内还要再往北一些才会出现风矢的顺转。力平衡的分析也证实了平流的重大作用。正是由于低纬运动的非地转性质,低纬大气边界层的动力学应在有别于中纬度的一套理论体系上建立起来,并极待开展研究。本文假设变数不随 x 变化,与实际状况多少有偏差存在。如果考虑到这些偏差,则本文结果的一些细节可能会有变化,但主要流动特征应是成立的。前人对赤道带边界层的处理,或者上界条件取得与本文有别,或者气压场取得不一般化,或者湍流交换系数取得太简单,本文在这些方面都作了较全面的考虑,结果应该还是比较周全的。由于赤道带的观测资料缺乏,如何把观测与理论结合起来进行分析,并进一步改进理论,应是今后的方向。

参考文献

- [1] Mahrt M. A numerical study of the influence of advective acceleration in an idealized low latitude PBL. *J Atmos Sci*, 1972, 29: 1477—1484.
- [2] Krishnamurti T N, Wong V. A PBL model for the Somali jet. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 1895—1907.
- [3] Krishnamurti T N et al. A three dimensional PBL model for the Somali jet. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 894—908.
- [4] Кривелевич Л. М., Лайтман Д. Л. Модель экваториального пограничного слоя океана. *Изв ФАО*, 1975, 11: 1301—1308.
- [5] Добрыщман Е. М. Динамика экваториальной атмосферы. *Гидрометеопиздат*(1980). 吕克利等译,赤道大气动力学,北京:气象出版社,1987,267.
- [6] Holton J R. On the boundary layer dynamics and the ITCZ. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 275—280.
- [7] 喻世华,陆胜元. 热带天气学概论. 北京:气象出版社,1986,102.
- [8] Krishnamurti T N. *Tropical Meteorology*. WMO, 1979, 柳崇健等译,热带气象学. 北京:气象出版社,1987,97.

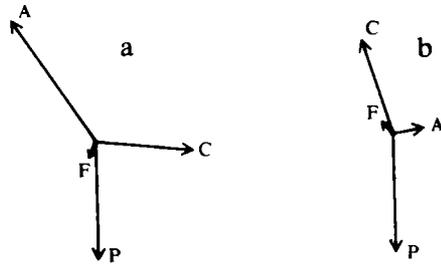


图 6 力平衡图

(气压场相应于图 1a 中值, $u_0 = -2\text{ms}^{-1}$, $v_0 = 2\text{ms}^{-1}$, 高度 100m 处。a. $\varphi = 5^\circ\text{N}$, b. $\varphi = 9^\circ\text{N}$, P 为气压梯度力, C 为柯氏力, F 为摩擦力, A 为平流惯性力)

A NUMERICAL STUDY OF THE PBL STRUCTURE OVER EQUATORIAL ZONE

Zhao Ming

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 210008)

Abstract

In this paper, the nonlinear motion equation for the PBL over equatorial zone is solved numerically with different distributions of the pressure with latitude and the motion characteristics of the PBL over the equatorial zone are obtained. The results show the important role played by advection and the solution indicates that corresponding to ITCZ, near the equator there exists a concentrated zone where the vertical velocity at the top of the PBL is great both when there is a low pressure zone near the equator and the pressure decreases with the increase of latitude monotonically. This overcomes the difficulty of the critical latitude mechanism which neglects the large nonlinear advective terms.

Key words: Equatorial zone. PBL. Numerical study.