

边界层特征参数对旋转减弱的影响^{*}

赵 鸣

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘 要 根据作者提出的含边界层层结特征参数如层结稳定度、粗糙度等的 Ekman 抽吸速度公式, 研究了稳定度、粗糙度、斜压性等参数对旋转减弱的影响。计算实例表明, 稳定度影响旋转减弱最强, 典型的不稳定情况旋转减弱进行的速度比稳定时大一个量级; 粗糙度的影响主要表现为层结不稳定时, 陆上要比海上快 2 倍以上。斜压性在不稳定时也有影响, 此外风速也是影响旋转减弱的主要因子。本文结论有助于边界层与自由大气间相互作用的认知, 并能给出某些气压系统维持与衰减的可能解释。

关键词: 旋转减弱; 稳定度; 粗糙度; 斜压性

1 引言

旋转减弱是由于大气边界层的 Ekman 抽吸作用产生的使气压系统趋于衰减的现象。经典的动力学理论不考虑边界层的内部结构, 用经典的 Ekman 模型求出的抽吸速度来研究旋转减弱, 这样做只能对旋转减弱进行的速度作粗略的概量估计。旋转减弱进行的速度将因边界层不同的动力和热力结构而异。文献[1]中, 作者根据地面湍流应力 τ 与边界层特征参数的关系推求了一个含边界层特征参数如稳定度、粗糙度等的 w 公式。此方法最终得到了 w 与稳定度参数 $S = \frac{g}{T} \frac{\Delta\theta}{fG}$ (其中 $\Delta\theta$ 为边界层顶底间位温差), z_0 , 斜压参数, 地转涡度, 地转风速 G 以及 S , z_0 的水平梯度之间的关系解析表达式。本文将用这一结果来研究不同边界层特征参数对旋转减弱的影响, 使旋转减弱的研究更深入一步。

2 正压时的旋转减弱

文献[1]在 z_0 的相对变化不是很大的陆上或海上在正压情况下求出了

$$\begin{aligned} w = \sum_{i=1}^7 w_i = & (c_g^2 \cos\alpha G \nabla \times G + c_g^2 \cos\alpha \sigma \nabla G \times G + c_g^2 \sin\alpha \psi \nabla G \cdot Gk \\ & + c_g^2 \cos\alpha G \varphi \nabla z_0 \times G + c_g^2 \sin\alpha G \gamma \nabla z_0 \cdot Gk + c_g^2 \cos\alpha G \lambda \frac{\mu}{S} \nabla S \times G \\ & + c_g^2 \sin\alpha G \xi \frac{\mu}{S} \nabla S \cdot Gk), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $c_g = u_* / G$ 为地转拖曳系数, u_* 为摩擦速度, α 为地面湍应力矢与地转风矢的交角亦即地面风矢与地转风矢的交角, k 为垂直单位矢。其他各量定义式见文献[1]。 α 、 u_* 和 μ 为边界层内参数, 它们可由外参数 $Ro = G / fz_0$, $S = [g / T][\Delta\theta / fG]$ 求出, $\Delta\theta$ 为边界层上下界位温差。因此, 在由气象模式或观测寻得 Ro 和 S 后, 即可求各内参数。知道地转风、 S 、 z_0 及它们的水平分布, 即可求 w 。

按文献[2], 由 w 引起的自由大气的地转涡度变化可写成

$$\frac{\partial \zeta_g}{\partial t} = - \frac{\beta}{1 + \beta \frac{h}{f}} w, \quad (2)$$

其中 $\beta = [f + \zeta_g] / H$ 可视为不随时间变化, 仅为坐标的函数, h 为边界层厚度, 设为 1000 m, H 为大气标高, 设为 10^4 m, 将 (1) 式代入 (2) 式, 将 ζ_g 用气压场表示, (1) 中的 G 亦用气压场表示, 即可研究气压场由于旋转减弱作用引起的变化。本文将用一个简单的个例来研究, 在此例中将尽量使问题简化。

考虑的气压系统是气旋, 并使初始气压分布对半径而言为线性。这与实况差别并不大。这样地转风 G 将不随半径而变, 因而 S 亦如此。在旋转减弱过程中, 计算证明 G , 因而 S 随半径的变化仍然不大, 因此我们对此特例将对不同半径处取相同的 S 。

研究如下气旋中的初始压力分布:

$$P = P_R - K \frac{R - r}{R}, \quad (3)$$

P 为地面气压, R 为边界, 取 1000 km, $P_R = 1020$ hPa, $K = 10$ hPa。作为个例, 研究 Y 轴 (指向西, X 轴向北, 原点在中心) 上 $y < 0$ 一侧气压场变化, 此时 (1) 式中有 3 项为零。将 (1) 代入 (2) 式, 将涡度用气压场表示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) = & - \frac{\beta}{1 + \beta \frac{h}{f}} \left(\frac{1}{\rho_0 f^2} \right) c_g^2 \cos \alpha \left[\left(2 + \frac{p-2}{m} \right) \frac{\partial P}{\partial r} \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)^2 \left(\frac{1}{r} + \frac{2-p}{z_0 m} \frac{\partial z_0}{\partial r} + \frac{\lambda \mu}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

p 、 m 和 λ 的定义见文献[1], P 为地面气压, ρ_0 为空气密度, 其中 c_g 、 α 、 p 、 m 、 λ 和 μ 都是 r 和 t 的函数, 而 S 是 t 的函数, 比文献[2]更完整, 按文献[2]中方案求非线性方程 (4) 的数值解。

方程 (4) 的边界条件取 $r = 10^3$ km 处, P 不随时间变, 即

$$P = 1020 \text{ hPa}, \quad r = 10^3 \text{ km},$$

$r = 0$ 处, 同文献[2]用

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0, \quad r = 0.$$

如前述, 因方程 (4) 中各参数均与 t 有关, 因此每积分一步, 均需在各格点上求 Ro , 由 Ro 和 S 求上述各参数, 然后再积分。

积分时取 $\Delta r = 50 \text{ km}$, $\Delta t = 10 \text{ min}$, $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 取初始 $S = 300$ 及 -100 分别代表典型的稳定和不安定, 海上取 $z_0 = 10^{-4} \text{ m}$, 陆上取 $z_0 = 0.05 \text{ m}$. 先考虑 z_0 水平均匀, 再考虑当 z_0 随 r 改变的状况, 此时, 上述 z_0 值视为 $r = 10^3 \text{ km}$ 处值, 取 $\partial z_0 / \partial r = \pm 10^{-8}$, 海上取 $\partial z_0 / \partial r = \pm 10^{-10}$.

图 1 是 $r = 150 \text{ km}$ 处的地面气压场时间变化, 在稳定情况, 由于湍流弱, w 很小, 旋转减弱进行得极慢, $z_0 = 0.05 \text{ m}$ 及 10^{-4} m 的差别甚小, 但不稳定情况, 由于湍流强, w 大, 旋转减弱进行得快得多, 此时 z_0 影响亦明显, 陆上 4 天内 P 上升了 4 hPa, 海上则近 2 hPa, 即海陆差别在不稳定时要相差一倍以上. 与 $S = 300$ 时相比, 旋转减弱进行的速度要大一个量级. 除了稳定度及粗糙度外, 地转风速亦应是因子之一. 若初始 G 大, 旋转减弱加快.

从图 1 可见, S 影响最大, 其次 z_0 , $\partial z_0 / \partial r$ 影响则很小, 图中 $S = 5$ 的曲线代表近中性情况, 可见它介于稳定与不稳定之间.

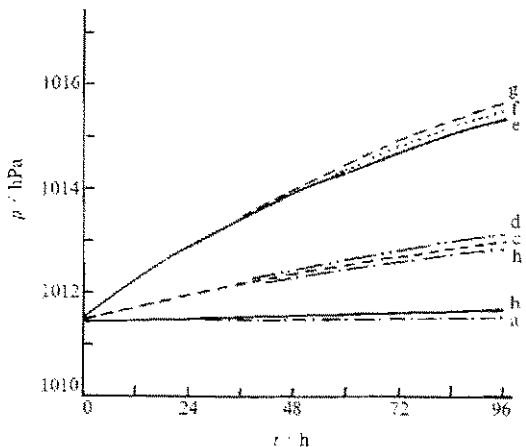


图 1 $r = 150 \text{ km}$ 处的地面气压场时间变化

- (a) $S = 300$, $z_0 = 10^{-4} \text{ m}$; (b) $S = 300$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$;
(c) $S = -100$, $z_0 = 10^{-4} \text{ m}$; (d) $S = -100$, $z_0 = 10^{-4} \text{ m}$, $\partial z_0 / \partial r = -10^{-10}$; (e) $S = -100$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$, $\partial z_0 / \partial r = 10^{-8}$; (f) $S = -100$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$, $\partial z_0 / \partial r = -10^{-8}$; (g) $S = -100$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$, $\partial z_0 / \partial r = -10^{-8}$; (h) $S = 5$, $z_0 = 0.05 \text{ m}$

3 斜压时的旋转减弱

现考虑斜压情况. 求 w 公式仍是 (1), 但用阻力定律由外参数求 c_g , α 等参数的方法与正压时不同. 相似函数 $A(\mu)$ 和 $B(\mu)$ 将用斜压时的结果^[3], 我们仍用前节中的个例, 此时 Ro 将对地面地转风定义. 为简单计, 考虑最简单的情况, 即等温线与等压线平行, 为同心圆. 此时 $\partial \theta / \partial x = 0$, $\partial \theta / \partial y$ 指定. 当求解方程 (4) 时, S 应是 r 的函数, 并应计入 $\partial S / \partial r$ 的影响. 作为个例, 考虑 $\partial \Delta \theta / \partial r = \pm 4 \times 10^{-6} \text{ K/m}$.

图 1 在两种 z_0 情况下, 当在 $r = 1000 \text{ km}$ 处 S 取值 300 和 -100 , $\partial z_0 / \partial r = 0$ 及上述 $\partial \Delta \theta / \partial r$ 下的 $r = 150 \text{ km}$ 处气压由于旋转减弱的变化的计算结果表明, 斜压性的影响与稳定度相比, 仍是次要的. 不稳定时, 差别才能显示出, 此差别一般相当于正压时值的 10%~50%. 我们见到在热成风平行地转风时, 旋转减弱进行比正压及热成风反平行于地转风时快, 这与 w 在前者情况下较大是一致的.

4 结语

旋转减弱是边界层与自由大气相互作用的一个重要方面, 对气压系统的生演变有重要影响. 应用旋转减弱概念研究大尺度动力学近年来也取得了一些进展^[4], 说明了进

一步深入研究旋转减弱的必要。经典的动力气象学只能在最简单的 Ekman 模式基础上定性讨论旋转减弱的性质,而近年来边界层动力学研究的发展可以得到各种特征参数对 Ekman 抽吸的影响,因而可用来研究其对旋转减弱的影响。实际大气中总存在稳定与不稳定,下垫面也总存在粗糙与光滑的差别,因此本文结果有一定的实际意义。实际大气中,冬季大陆冷高压可以维持一个相当长的时间,而冷高压的边界层总维持一个强地面逆温,即层结稳定,因而其旋转减弱过程肯定很慢,因而可以想象这也是冷高压容易维持的一个原因。

参 考 文 献

- 1 赵鸣,边界层特征参数对边界层顶垂直速度的影响,大气科学,1994,18(4),413~422.
- 2 赵鸣,边界层抽吸引起的旋转减弱,大气科学,1989,13(3),343~351.
- 3 Йорданов, Д.Л., Об универсальных функциях в законе сопоставления бароклинного ппс, 610, 1976, 12, 769~771.
- 4 Ma Y., Preliminary study on vertical velocity caused by katabatic wind in Antarctica and its influence on atmospheric circulation, *Adv. Atmos. Sci.*, 1992, 9, 247~250.

Effects of the Planetary Boundary Layer Characteristic Parameters on Spin-Down

Zhao Ming

(Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract Based on the Ekman pumping formula which contains the PBL characteristic parameters such as stratification parameter, roughness, the effects of stratification parameters, roughness, baroclinic parameters etc on the spin-down process are studied. The computations show that the effect of stratification parameter is most important, the rate of spin-down process in a typically unstable condition is one order of magnitude larger than that in a typically stable condition. The effect of roughness mainly appears in unstable stratification, the rate of spin-down over land is about two times larger than that over sea. The baroclinity also affects the spin-down slightly in unstable condition. The wind speed is also an important factor. The conclusion of this paper can increase the knowledge of the interaction between the PBL and free atmosphere, and may give some probable explanation of the maintenance and decay of some pressure system.

Key words: spin-down; stratification; roughness; baroclinity