

地面感热对青藏高原低涡流场 结构及发展的作用*

李国平 赵邦杰

(成都信息工程学院, 成都 610041)

杨锦青

(广东省新会市气象局, 广东新会 529100)

P4 A

摘要 考虑热带气旋类青藏高原低涡为受加热和摩擦强迫并满足热成风平衡的轴对称涡旋系统, 通过求解线性化的柱坐标系中涡旋模式的初值问题, 分析了地面感热对高原低涡流场结构及发展的影响, 给出了高原低涡眼壁内、外侧水平流场和垂直流场的结构特征, 讨论了低涡发展与其水平尺度、垂直厚度、所处纬度以及热量总体输送系数和加热强度的关系。结果表明: 地面感热对低涡的生成及发展具有重要作用, 但这种作用是否有利于低涡的发展与低涡中心和感热加热中心的配置有关。

关键词: 青藏高原; 低涡; 地面感热; 流场结构

1 引言

本文所指的青藏高原低涡(简称高原低涡)是指发生在高原主体的低涡, 主要活动在 500 hPa 等压面上, 平均水平尺度为 400~500 km, 多数为暖性结构, 生命周期 1~3 天, 它不但是青藏高原雨季中主要的降水系统之一, 而且在一定条件下东移出高原后往往引发我国东部(特别是四川盆地)一次大范围的暴雨、雷暴等灾害性天气。由于高原下垫面特性和周围环境场的综合效应, 使高原低涡(特别是暖性低涡)的性质以及发生规律更类似于热带气旋而不同于温带气旋^[1,2], 这种现象在低涡发展初期更为明显。而热带气旋类低涡(Tropical Cyclone-Like Vortices, 简称 TCLV; 也有人称为 Tropical-Cyclone-Type Systems)是指一类与热带气旋相似的一类低压系统, 它具有与热带气旋相似的眼结构、暖心结构以及地面风场最强等结构特征和发展机制, 多在热带或副热带等不同纬度的洋面上生成、发展, 例如某些极涡和地中海气旋^[3]。

自从 1979 年夏季我国进行第一次青藏高原气象科学试验(QXPMEEX)以来, 国内外不少学者对青藏高原天气系统开展了大量的研究, 加深了人们对青藏高原系统以及高原作用的认识。但以往对青藏高原低涡的研究多侧重于天气学分析、能量诊断和数值模拟试验, 在为数不多的动力学研究中, 基本上采用涡度倾向方程、对称不稳定、热成

2000-10-23 收到, 2001-06-11 收到再改稿

* 四川省跨世纪杰出青年学科带头人培养基金、四川省科技厅应用基础研究项目“四川低涡型暴雨非线性预报方法的研究”共同资助

风适应理论或非线性波动分析方法等^[4~7], 而较少将青藏高原低涡与热带气旋类低涡作对比研究。另外, 地面感热是否有利于高原低涡的发展尚存在不同看法^[6~10], 并且对高原低涡三维流场细微结构的了解也很不够。

本文尝试以一种新的研究思路, 即借鉴研究热带气旋类低涡的方法, 分析了地面感热对高原低涡流场结构及发展的作用, 并给出高原低涡流场的三维图像和概念性发展模式。

2 低涡的物理模型及分析方法

2.1 物理模型

考虑所研究的高原低涡为受加热和摩擦强迫且满足热成风平衡的轴对称涡旋系统, 取柱坐标系的原点位于涡旋中心, 则低涡的动力学方程组为

$$\left(f + \frac{2v}{r}\right) \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{g}{\theta_0} \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu + \frac{u}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial r} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = Q, \quad (3)$$

$$(\rho u, \rho w) = \left(-\frac{\partial \psi}{\partial z}, \frac{1}{r} \frac{\partial(rv\psi)}{\partial r}\right). \quad (4)$$

其中, r 为半径, z 为高度, t 为时间, u 、 v 、 w 分别为径向风速、切向风速和垂直风速, θ 为位温, θ_0 为常数 (下标 0 表示边界层顶的值, 下同), f 为 Coriolis 参数, g 为重力加速度, Q 为非绝热加热率。(1) 式为静力学平衡条件下不考虑径向加速度时的梯度风平衡关系, (4) 式表示在径向垂直剖面 ($r-z$ 面) 上流场满足无辐散条件下可引入流函数 ψ 表示流场。

在低涡顶部, 设流动是封闭的, 则 $\psi(r, z_T) = 0$ 。低涡下面的大气边界层相对于低涡为一浅层, 并设低涡在下边界处于定常状态。利用动量总体输送系数 (即无量纲拖曳系数) C_D 和水平风速 $U = (u_0^2 + v_0^2)^{1/2}$ 可将下边界的垂直速度参数化^[11] 为 $w_0 = C_D U$, 由此可确定出低涡流场的上、下边界条件分别为

$$\psi(r, z_T) = 0, \quad (5)$$

$$\psi_0 = \frac{\rho}{\xi_0} C_D U v_0. \quad (6)$$

2.2 分析方法

设处于发展阶段初期的低涡是一个平衡的、小振幅的弱涡, 相对于静止的基本状态而言, 该涡旋可看作是一小扰动, 可用微扰法将 2.1 节得到的低涡动力学方程组和边界条件线性化。设 $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$, $\theta = \bar{\theta} + \theta'$, $\psi = \bar{\psi} + \psi'$; 并设系统的基本状态开始时处于静止, 则有 $\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = \bar{\psi} = 0$, $\bar{\xi} = f$, $\bar{\theta} = \theta_0 = \text{常数}$ 。另外, 由于大气边界层厚度比低涡厚度约小一个量级, 因此可认为边界层紧贴地面, 则低涡的下

边界可近似取在地面 ($z=0$)。相应地, 下标 0 就表示地面的值。同时, 在地面引入线性拖曳系数^[11], 即 $k=C_D U$, 可得受加热和摩擦强迫的高原低涡的线性化方程组和边界条件为

$$f \frac{\partial v'}{\partial z} = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta'}{\partial r}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} + f u' = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} = Q', \quad (9)$$

$$(\rho u', \rho w') = \left(-\frac{\partial \psi'}{\partial z}, \frac{\partial(r\psi')}{r \partial r} \right), \quad (10)$$

$$\psi'(r, z_T) = 0, \quad (11)$$

$$\psi'(r, 0) = \frac{\rho k}{f} v'_0. \quad (12)$$

3 地面感热加热对高原低涡流场结构及发展的作用

由于青藏高原低涡是在特殊的热力和地形条件下生成的一类中间尺度或次天气尺度系统, 并且诊断分析、动力学研究和数值试验都表明: 高原上的非绝热加热对低涡的形成和发展有重要作用, 并且一般认为低涡生成初期, 地面感热输送起主要作用, 而凝结潜热释放在低涡发展阶段有重要贡献^[1,8~10]。由于本文采用的是线性模式, 故重点考虑高原地面感热对低涡结构及发展的作用, 高原的地形摩擦作用只作为边界条件加以考虑。这样的处理也基于以下的天气分析事实: 高原低涡主要在高原地区生消, 且多消失于地形的下坡处, 而与一般低压在下坡方生成和加强完全不同, 可见高原低涡是高原地区特别是高原地面加热作用下的产物^[8]。

3.1 低涡的流函数解

地面感热通量的总体计算公式为

$$F_H = \rho c_p C_H U (T_s - T_0), \quad (13)$$

其中, c_p 为空气的定压比热, C_H 为地面热量的总体输送系数, ρ 为空气密度, T_s 为地面温度, T_0 为地面气温。由此可得单位质量空气的感热加热率

$$Q'_1 = -\beta_1 \frac{\partial F_H}{\rho \partial z} = -\frac{\beta_1}{\rho} \frac{0 - F_H}{z_T - 0} = \frac{\beta_1 c_p C_H U (T_s - T_0)}{z_T}. \quad (14)$$

其中 β_1 是为了更好地反映加热的水平分布状况而引入的地面感热加热的效率参数 ($0 < \beta_1 < 1$)^[11]。在涡眼区, β_1 较大 (接近 1); 在涡眼以外区域, β_1 较小 ($\beta_1 < 1$), 且越往外 β_1 越小, 即 $\partial \beta_1 / \partial r < 0$ 。(14) 式线性化后代入 (9) 式并联立 (7)、(8)、(10) 式有

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial z^2} = \frac{\rho g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{f^2 \bar{\theta}_{z_T}} \frac{\partial(\beta_1 U')}{\partial r}. \quad (15)$$

由于初生的低涡系统其强度主要受切向速度支配^[11], 可设 $U' = v'_0$, 则 (15) 式变为

$$\frac{\partial^2 \psi'}{\partial z^2} = \frac{\rho g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{f^2 \bar{\theta}_{z_T}} \left(\beta_1 \frac{\partial v'_0}{\partial r} + v'_0 \frac{\partial \beta_1}{\partial r} \right). \quad (16)$$

(16) 式对 z 积分两次并利用边界条件可求得地面感热强迫下低涡的流函数解

$$\psi' = \frac{\rho g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{f^2 \bar{\theta}_{z_T}} \left(\frac{z^2}{2} - \frac{z z_T}{2} \right) \left(\beta_1 \frac{\partial v'_0}{\partial r} + v'_0 \frac{\partial \beta_1}{\partial r} \right) + \frac{\rho k v'_0}{f} \left(1 - \frac{z}{z_T} \right). \quad (17)$$

3.1.1 低涡的水平流场

(17) 式代入 (10) 式可得感热加热下低涡的水平流场

$$u' = - \frac{g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{f^2 \bar{\theta}_{z_T}} \left(z - \frac{z_T}{2} \right) \left(\beta_1 \frac{\partial v'_0}{\partial r} + v'_0 \frac{\partial \beta_1}{\partial r} \right) + \frac{k v'_0}{f z_T}. \quad (18)$$

对于低涡, $v'_0 > 0$, 则在其眼壁内区域 ($\partial v'_0 / \partial r > 0$, $\partial \beta_1 / \partial r < 0$), 在 $(\beta_1 \partial v'_0 / \partial r + v'_0 \partial \beta_1 / \partial r) > 0$ 即假定切向风场水平分布不均匀作用大于加热效率分布不均匀作用的条件下, 径向流场随高度的变化为: 当 $z < z_T / 2$ 时, $u' > 0$, 即水平流场整体由涡心向外流出, 产生“热扩散效应”, 但高度越高, “热扩散效应”越弱; 当 $z = z_T / 2$ 时, $u' = 0$, 无径向水平流出或流入; 当 $z > z_T / 2$ 时, $u' < 0$, 即水平流场整体向涡心流入, 产生“热辐合效应”, 且高度越高, “热辐合效应”越强。由此可见 $z = z_T / 2$ 处为一水平无辐散层, 其上为辐合层, 其下为辐散层。同时可将 $z = z_T / 2$ 视为动力变性高度, 在此高度上眼壁内气流由低层的流出式气流转变为高层的流入式气流。而对于眼壁外区域 ($\partial v'_0 / \partial r < 0$, $\partial \beta_1 / \partial r < 0$), 由于 $(\beta_1 \partial v'_0 / \partial r + v'_0 \partial \beta_1 / \partial r) < 0$, 可得与上述眼壁内区域相反的结论。

在近地层 ($z \approx 0$), 可进一步分析低涡的径向流场结构。由 (18) 式得

$$u'_0 = \frac{g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{2 f^2 \bar{\theta}} \left(\beta_1 \frac{\partial v'_0}{\partial r} + v'_0 \frac{\partial \beta_1}{\partial r} \right) + \frac{k v'_0}{f z_T}. \quad (19)$$

对于眼壁内区域 ($u'_0 > 0$), 即在近地层产生“热扩散效应”, 若不计其他因子的影响, 地面径向风速 u'_0 与地气温差 $\Delta T (= T_s - T_0)$ 存在正比关系。当地面感热向上输送 ($\Delta T > 0$, 即地面加热大气) 时, 地气温差越大, 地面的“热扩散效应”越强, 越有利于高原低涡水平流场的发展; 地面径向风速 u'_0 与地面热量总体输送系数 C_H 有类似的正比关系。而对于眼壁外区域, 结论与上述眼壁内区域的相反。由于高原低涡的涡眼区域比眼壁外区域小得多, 因此高原低涡的水平流场总体上表现为低涡的下半部 (包括边界层) 为辐合层, 上半部为辐散层, 这与文献[2,8]的结论基本上是一致的。

3.1.2 低涡的垂直流场

将流函数解 (17) 式代入 (10) 式可得垂直速度解, 特别在近地层有

$$w'_0 = \frac{k}{f} \left(\frac{\partial v'_0}{\partial r} + \frac{v'_0}{r} \right). \quad (20)$$

对于眼壁内区域 ($\partial v'_0 / \partial r > 0$), $w'_0 > 0$, 即在近地层有下沉运动, 这与前面分析的水平流场的特征是对应的。若不计其他因子的影响, 地面垂直风速 w'_0 与径向半径 r 成反比, 即越靠近涡心, 下沉越强。而对于眼壁外区域 ($\partial v'_0 / \partial r < 0$), 当 $(\partial v'_0 / \partial r + v'_0 / r) < 0$ 时, 可有上升运动 ($w'_0 < 0$), 且越靠近眼壁, 上升运动越强。因此在近地层, 低涡四周是一个上升环, 而涡心为下沉运动 (在卫星云图上表现为无云区, 即存在类似于台风的眼结构), 这种垂直运动的水平分布在高原低涡的天气诊断分析中已被证实^[2,8]。

综合上述低涡水平流场和垂直流场的分析结果, 可归纳出如图 1 所示的低涡流场结构。

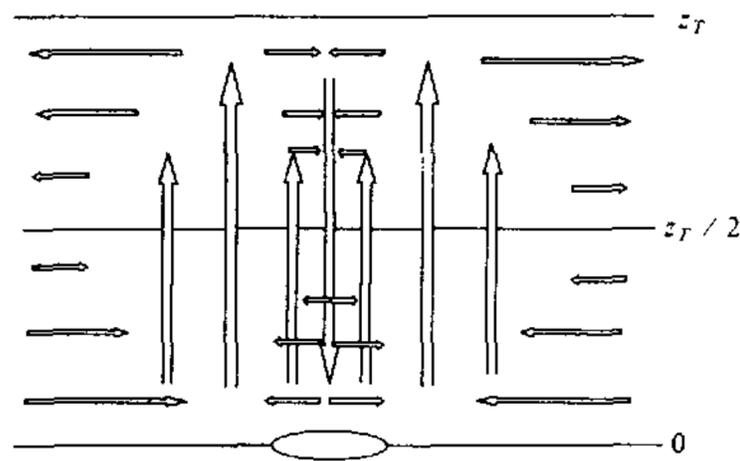


图 1 高原低涡流场垂直剖面结构示意图

另外, 高原低涡的地面垂直速度与纬度成反比, 即纬度越低, 高原低涡在地面的垂直速度越大。因此在其他条件相同的情况下, 低纬更有利于产生强度较强的涡旋。

3.1.3 对低涡发展的作用

在地面, 由 (8) 式并利用 (19) 式可得

$$\frac{\partial v'_0}{\partial t} = - \frac{g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{2f\bar{\theta}} \left(\beta_1 \frac{\partial v'_0}{\partial r} + v'_0 \frac{\partial \beta_1}{\partial r} \right) - \frac{k v'_0}{z_T}. \quad (21)$$

若低涡发展, 要求 $\partial v'_0 / \partial t > 0$ 。以下要讨论的问题是: 在低涡的切向风速达到最大值的区域 (即涡旋眼壁), 低涡不稳定发展的条件。在低涡眼壁, $\partial v'_0 / \partial r = 0$, 可用求解初值问题的方法将 (21) 式对时间积分一次, 求得地面切向风速

$$v'_0 = C_1 \exp \left[- \frac{g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{2f\bar{\theta}} \frac{\partial \beta_1}{\partial r} - \frac{k}{z_T} \right] t. \quad (22)$$

其中, C_1 为积分常数。引入低涡的不稳定增长率 σ , 使 $v'_0 = C_1 e^{\sigma t}$, 则有

$$\sigma = - \frac{g c_p C_H (\bar{T}_s - \bar{T}_0)}{2 f \bar{\theta}} \frac{\partial \beta_1}{\partial r} - \frac{k}{z_T} \quad (23)$$

当地面感热加热中心与低涡中心配置一致时, 由于 $\partial \beta_1 / \partial r < 0$, 不计其他因子的影响, 高原低涡的不稳定增长率与地气温差成正比。当地面感热向上输送 (即地面加热大气) 时, 地气温差越大, 越有利于低涡发展。 σ 与 C_H 也有类似的正比关系。另外, 低涡发展与地面感热加热的非均匀程度有关, 加热强度最大区对应低涡中心区域时, 越有利于低涡的发展。值得注意的是, 如果地面感热中心与低涡中心配置不一致, 例如 $\partial \beta_1 / \partial r > 0$ 时, 地面感热加热就会抑制低涡的发展。因此, 本文的这一结果将有助于理解为什么存在地面感热输送有利于或不利于高原低涡发展的两种对立的观点^[1,2,8~10]。

另外, 高原低涡系统的不稳定增长率与纬度成反比, 即纬度越低, 越有利于低涡发展。因此, 即使在同样的热力强迫下, 高原低涡也不会发展到热带气旋那样的强度。而感热加热下的地面摩擦作用不利于低涡的发展。

4 结束语

本文分析了地面感热对高原低涡流场结构及发展的影响, 给出了高原低涡眼壁内、外侧不同高度上的水平流场和垂直流场的结构特征, 讨论了低涡发展与其水平尺度、垂直厚度和所处纬度等因子的关系。结果表明: 高原地面感热对低涡的生成和发展有重要作用, 但这种作用是否有利于低涡的发展与低涡中心和感热加热中心的配置有关。但本文的定性讨论还不够全面 (如涡眼半径的变化、低涡发展过程中眼壁内外的差异), 分析结果也是初步的、概念性的, 对低涡流场图像的刻画和发展趋势的分析还需与高原天气观测的事实作进一步的对比以及用数值试验的结果加以验证。

参 考 文 献

- 1 叶笃正、高由禧等, 青藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1979, 122~126.
- 2 乔全明、张雅高, 青藏高原天气学, 北京: 气象出版社, 1994, 120~155.
- 3 Kevin, W. and I. G. Watterson, Tropical cyclone-like vortices (TCLV) in a limited area model—comparison with observed climatology, *J. Climate*, 1997, 10, 2240~2259.
- 4 李国平、万军、卢敬华, 暖性西南低涡生成的一种可能解, *应用气象学报*, 1991, 2, 91~99.
- 5 卢敬华、雷小途, 非绝热加热对孤立波的影响及其在大气中的应用, *气象学报*, 1995, 53, 539~549.
- 6 李国平、杨小怡, 热源强迫对非线性重力内波影响的初步分析, *大气科学*, 1998, 22, 791~797.
- 7 李国平、蒋静, 一类奇异孤波解及其在高原低涡结构分析中的应用, *气象学报*, 2000, 58, 447~456.
- 8 罗四维等, 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究, 北京: 气象出版社, 1992, 7~55.
- 9 Dell'osso, L. and Chen, S. J., Numerical experiments on the genesis of vortices over the Qinghai-Xizang Plateau, *Tellus*, 1986, 38A, 235~250.
- 10 Shen, R. J. et al., Some aspects of the effects of sensible heating on the development of summer weather system over the Qinghai-Xizang Plateau, *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43, 2241~2260.
- 11 Gray, S. L. and G. C. Craig, A simple theoretical model for the intensification of tropical cyclones and polar lows, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, 124, 919~947.

A Dynamical Study of the Role of Surface Sensible Heating in the Structure and Intensification of the Tibetan Plateau Vortices

Li Guoping and Zhao Bangjie

(*Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610041*)

Yang Jinqing

(*Meteorological Bureau of Xinhui City, Guangdong Province, Xinhui 529100*)

Abstract The vortices such as TCLV (Tropical Cyclone-Like Vortices) over the Tibetan Plateau are assumed to be axisymmetrical and thermal-wind balanced systems forced by diabatic heating and friction, and solved as an initial-value problem of linearized vortex equation set in cylindrical coordinates. The role of surface sensible heating in the structure and intensification of the Tibetan Plateau vortices is analyzed, the horizontal and vertical flow field of the vortex is drawn, and the relationship between growth of vortex and various parameters including horizontal and vertical scale of vortex, latitude of vortex source region, heat transfer coefficient and intensity of heating is discussed. The results show that the surface sensible heating plays an important role in the genesis and intensification of vortices; whether the role of surface sensible heating is beneficial to the development of vortex or not depends on the allocation of its flow field and heating field.

Key words: Tibetan Plateau; vortex; surface sensible heating; structure of flow field