

图2 1982年3月4日00点(GMT)到5日18点间隔6小时观测到的锋面位置,引自 Steinacker(1987)

冷东北风(bora)就分别与这两种受地形影响的冷空气流动有关。阿尔卑斯山脉歪曲了通过它的锋面流场、厚度场,可能对在其背风面的气旋生成有重要意义。

高空涡度平流在一般气旋发展中是重要的,作为斜压不稳定的一种成分,阿尔卑斯背风气旋生成期间对流层上层的位涡平流也引起人们的广泛注意。Bleck 和 Mattocks (1984)^[6]分析了 ALPEX SOP 阶段(3月/4月,1982)的七个背风气旋个例,发现分析的背风气旋生成都与阿尔卑斯山脉上空对流层上层高位涡的平流有很好的对应关系。他们还给出的一套准地转关系描绘气旋生成期间高层位涡平流和地面温度平流的垂直耦合。主要包括等熵坐标的准地转位涡方程

$$\left[A \nabla^2 + \frac{\partial B}{\partial \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \right] M_s = -V \cdot \nabla Q$$

和求解方程的地面下边界条件

$$\left[M_s - \theta \frac{\partial}{\partial \theta} M_s \right] = - \left(\theta \frac{\partial M}{\partial \theta} \right) (V \cdot \nabla \theta)_{\text{ground}}$$

式中 M 是 Montgomery 位势, Q 是准地

转位涡,其余符号取通常含义。从方程组可知,在不考虑摩擦和非绝热作用情况下,高空位涡平流和沿地面的位温平流造成三维质量场(包括地面气压)的变化。通常用斜压不稳定理论来解释一般气旋的生成时并没有考虑地形。虽然背风气旋的生成与地形有紧密的关系,普遍接受的观点还是把它考虑为地形对一般斜压发展过程的修正。这一概念与基本气流过山引生准定常背风波(Lee Wave)扰动等机制不同,却与背风气旋生成前冷锋伴随高空槽移向山脉的天气学形势,以及背风气旋几乎总是作为次生气旋而要求母体气旋性扰动与山脉作用的气旋生成特点相一致。换句话说,“斜压性决定了何时有气旋生成,而地形将决定或影响着气旋生成的地点”。从影响气旋生成的主要过程来看,虽然高空急流和强烈的地形阻挡等非地转过程使得准地转条件未必严格满足,定性来看,低层温度平流和由于山脉造成的温度平流变化、高层位涡平流仍然是背风气旋生成中被考虑的重要过程。从地形作用来看,不同个例中已经存在的斜压状态可以不同,相应条件下地

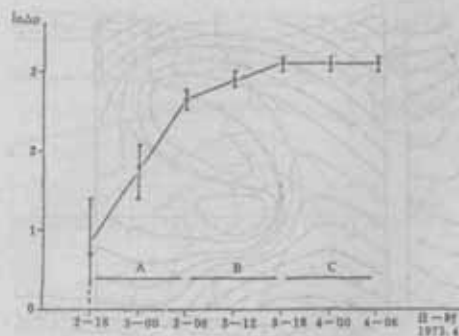


图3 气旋中心强度变化(取自然对数)的时间剖面图

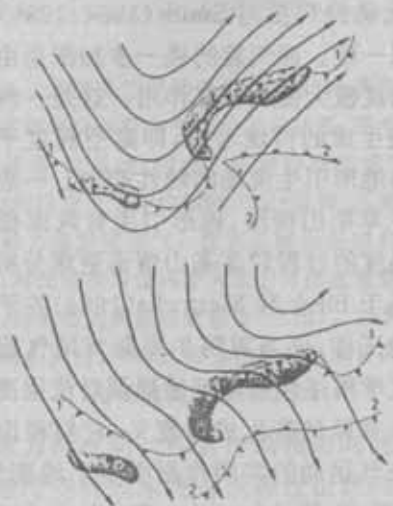


图4 高空流场示意图,上图“Vorderseiten”型,下图“Überstromungs”型,阴影区为阿尔卑斯和比利牛斯山脉

形的影响也可能不尽相同。

观测到的背风气旋生成表现出许多与一般气旋发展不同的特点。Buzzi 和 Tibaldi (1978)^[7]以及 McGinley (1982)^[8]的基础性个例研究揭示出阿尔卑斯背风气旋生成过程的阶段性。图3取自 Buzzi 和 Tibaldi 的分析。当冷锋在低层受地形阻挡、而后越过山脉时,出现快速发展的“激发”阶段,其 e 倍折迭时间约 6 小时,这一过程具有中尺度特征,地形作用也十分明显,其后是缓慢增长的“斜压发展”阶段,它具有与经典线性斜压不稳定理论

更为一致的增长速度。图上 3 日 06 点到 18 点之间扰动增强的 e 倍折迭时间是 25—30 小时左右,其间气旋有天气尺度的发展。

阿尔卑斯背风气旋生成的另一个基本观测事实是有关的天气学分类。预报人员熟悉一种由大西洋东移的宽阔高空槽、或由西北急流引导到达阿尔卑斯山脉上空的短波引发背风气旋的分类 (Fett, 1981)。Pichler 和 Steinacker (1987)^[9]的分类同样注意了不同高空形势下的气旋生成,阿尔卑斯背风气旋被分为 Vorderseiten 和 Überstromungs 两类 (图4)。“V”型含义是“ahead of the upper-level trough”,地形上空是槽前西南气流;“Ü”型字面意义是“flow over”,阿尔卑斯山脉上空盛行西北气流。至于这些分类在背风气旋生成机制中的动力学意义,人们了解得还不多。Pichler 等 (1990) 曾将他们的分类与 McGinley 和 Zupanski (1991)^[10]定义的高低指数联系在一起,“V”型归于高指数,高层结构相对重要,而“Ü”型则为低指数,低层作用重要。不过有一类被归为低指数的背风气旋生成过程中高层过程被认为是非常重要的 (Mattocks 和 Bleck, 1986)^[11]。

3 背风气旋生成的理论

“成熟”的背风气旋生成理论包括 Smith (1984, 1986)^[12,13]、Pierrehumbert (1985)^[14]和 Speranza 等 (1985)^[15]的工作。正如上一节所强调的,理论上的共同点是考虑已经存在的斜压波或锋区与地形的相互作用。在 Smith 的“斜压背风波”理论中,当斜压带移近山脉时,斜压背风波形成,它与小尺度浮力背风波类似,但是尺度大得多,而且波的回复力是水平温度梯度。计算表明波动槽的形成在许多方面与观测到的背风气旋类似,与上述地形强迫定常波理论不同, Pierrehumbert 和 Speranza 等提出对 Eady 波的地形修正是背风气旋生成的主要机制。Pierrehumbert 的“障碍”理论运用两层准地转解析模式,为了保留山脉的阻挡效应,类似 Egger (1972)^[16]

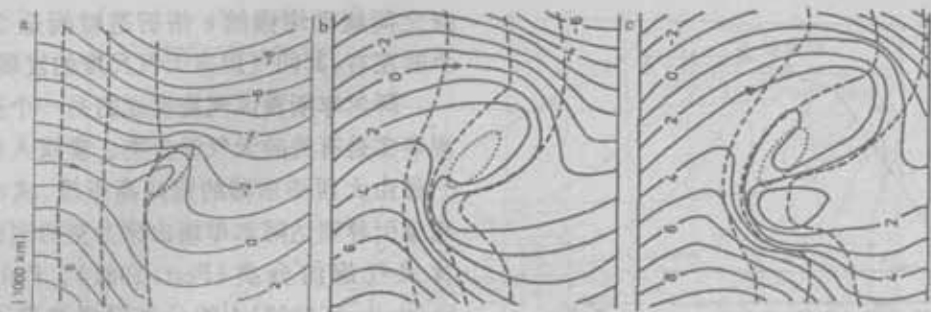


图5 $t=0$ 小时(a), 36小时(b)和 42小时(c)的地面准地转流函数, 点线标示
1800m 地形, 虚线为等位温线标志锋区位置

的做法, 将阿尔卑斯山修正为对流层下层的一堵墙。他得到了真实的流动分离和背风面切断低压, 但也发现, 从气压下降受到阻尼的意义上讲, 山脉实际上阻碍了斜压发展。这一现象最初是由 Tibaldi (1980) 的理想化数值试验, Mesinger 和 Strickler (1982) 的实际资料模拟进行有无山脉对比时揭示的。Speranza 等用“正文模”理论研究准地转条件下光滑“小扰动”山脉对斜压不稳定的影响, 由连续分层模式得到了沿穿过山脉方向的具有对流层高度的偶极子扰动。这一结果可以解释初始快速生成的背风面浅薄气旋在后一阶段发展成贯穿整个对流层的深厚气旋。总的来看, 上述理论在描述背风气旋生成特征方面取得了进展, 但 Egger (1988)^[13] 的验证研究表明, 它们还不能完全解释观测到的阿尔卑斯背风气旋生成。Tafferter 和 Egger (1990)^[14] 的模拟验证试验进一步支持这一观点, 因此“成熟”理论的普遍应用还存在问题。

Schar (1990)^[15] 的准地转背风气旋生成工作是最近的一个进展。图 5 给出他在标准试验中得到的地面准地转流函数, 图中虚线为等位温线, 粗略标示了斜压带中心和边界的位置。开始, 斜压带的变形伴随着流动的分流、绕山脉的反气旋性加速和山脉上的气旋性减速。然而, 当浅的闭合气旋环流在背风面形成, 可观测到绕过山脉西侧的低层冷空气流动有类似急流的结构。这一低压系统将在

局地迅速加深。Schar 结果中的背风面初始浅薄扰动的尺度与 Smith (1984, 1986) 的理论结果一致。而气旋的进一步加深是由于和高层涡度极大值的相互作用。这是一种对背风气旋生成的传统考虑, 即高空涡度平流与准地转地形引生流场的线性迭加。一般认为在阿尔卑斯山情形, 地形引生背风面低层气旋性涡度的过程较落基山情形更难分析。

基于 Bleck 和 Mattocks (1984) 关于高层位涡的工作, 许多对阿尔卑斯背风气旋生成的天气学描述性解释开始强调对流层高层过程引发背风气旋生成的意义, 它们和山脉阻挡冷空气运动的共同作用引生了地面气旋。这主要包括 Mattocks 和 Bleck (1986)、Tafferter (1990)^[16] 的工作。在 Mattocks 和 Bleck 的概念模型中, 高空位涡平流的作用通过高空急流强调出来, 这时高空急流与受地形阻挡锋区的相互作用被认为是阿尔卑斯背风气旋生成的主要机制。传播着的高空急流伴随着强烈的非地转运动, 急流左前方有质量辐散, 而强迫的低层辐合和上升运动作为次级环流又导致空气柱冷却和其上气压下降, 反过来降低了超地转程度。通常水平冷空气平流减弱了在急流左前方通过绝热膨胀来冷却气柱的上升运动, 因此如果山脉阻挡了冷空气的流入, 垂直抽吸作用将比平底条件下强烈。进一步考虑, 若山脉在多个方向上对冷空气平流屏蔽, 即冷空气到达背风面需明显绕道, 可以期望引起低层辐合和抬升的地

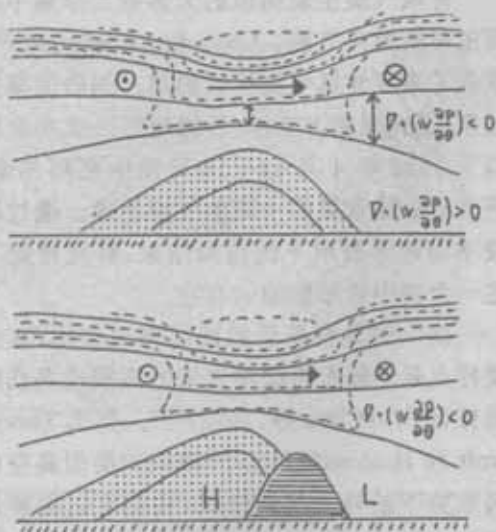


图6 低层冷空气和高层位涡向阿尔卑斯地区爆发导致背风气旋生成示意图。图中实线是等位温线，标志了低层冷空气堆(点区)和冷空气上空位涡极大值(虚线)区域的高静力稳定度空气。假定系统由左向右移动，对流层高层位涡极大值前有质量通量辐散，而低层为质量通量辐合(上图)。当系统遇到山脉时，H和L标志山脉迎风和背风面高低地面气压(下图)

转适应力将在同一位置持续相当时间，其结果将是冷空气还未绕过或掠过山脉时，在背风面强烈的低层涡旋加速和上升暖空气中有明显的潜热释放。Tafferner的工作则强调了越过山脉上空的位涡极大值前的质量通量辐散结构，由于同时流向那一区域的冷空气补偿气流受山脉阻挡，从而导致背风面气压下降(图6)。在发展的第一阶段，低层气旋性环流在气压下降区域产生；随后的斜压发展则是常见的高空涡度极大值通过山脉后与低层背风面气旋性环流相互作用的过程。早在20年代，V. Ficker(1920)就曾用类似的主次气压波观点解释阿尔卑斯背风气旋生成。

与Schär的工作不同，上述概念模型不仅强调了移近的高空槽在发展阶段的作用，而且还强调高层过程在引发最初气旋性环流发展中的意义。实际上，他们更注意“阿尔卑

斯背风气旋生成是一个强烈的非线性过程，要求高低层系统迭加以形成允许扰动发展的有利环境”。受这些工作的启发，Zupanski和McGinley(1989)、McGinley和Zupanski(1990)对低层和高层的初始温度场进行平滑来研究对流层低层和高层结构对背风气旋发展的相对重要性问题。六个ALPEX SOP个例的模拟试验得到一些结果，诸如气旋越强对高层过程越为敏感，高层影响在气旋发展的初始阶段更为重要等。Tafferner和Egger(1992)^[21]在“教皇锋(papal front)”个例(1987.5.3)的等熵坐标模拟中使用了类似技术。结果表明，尽管存在着低层阻挡，强的高空平滑还是导致次生气旋的发展完全消失。这是一个典型的短波槽向南迅速发展的个例，有无山脉试验都有次生气旋生成。

4 数值模拟与东亚背风气旋生成

利用原始方程模式研究背风气旋生成开始于Egger(1972)的工作，首次成功地复制出阿尔卑斯背风气旋生成有两条主要原因，一是斜压不稳定平均流中已经存在的发展低压与地形的相互作用产生次生气旋；二是理想化试验中地形“阻挡”技术的应用正确地表示了山脉对低层平流的阻挡以及随后的温度场变形。这些考虑和模拟的成功直接深化了人们对背风气旋生成机制的了解，至今仍有意义。更多的理想化试验有Trevisan(1976)、Tibaldi等(1980)、Tosi等(1983)以及Mattocks和Bleck(1986)等。继Bleck(1977)首例实际资料背风气旋数值模拟之后的工作有Mesinger和Strickler(1982)、Dell'Osso和Tibaldi(1982)、McGinley和Goerss(1987)、Mesinger等(1988)和Tafferner(1990)等。在模式结构方面，使用过的模式各有特点，其中许多方面是在背风气旋生成的模拟研究中逐步完善起来的，例如背风气旋的数值模拟被用来检验包络地形的作用(Wallace等，1983；Dell'Osso和Tibaldi，1982)，阶梯地形的方法则源自Egger的早期阻挡技术(Mesinger，

背风气旋生成模拟的大多数工作集中在阿尔卑斯背风气旋。Chen 和 Lazic(1990)^[21] 报告了东亚背风气旋生成的第一例数值模拟结果,模式采用 η 坐标(阶梯地形),成功地模拟了 1988 年 4 月 14—16 日发生在阿尔泰山-萨彦岭山脉背风面一侧的气旋生成。通过比较不同地形表示下的模拟结果,研究肯定了这一个例中地形影响的存在。

这个例具有显著的高层强迫作用,其主要特点是伴随有短波槽发展的高层位涡切断形势(图 7)(Chen 等,1992)^[22]。类比 Thorncroft 和 Hoskins(1990)^[24] 模拟的类似高空位涡形势下的锋面气旋生成,我们可以同样地解释观测到的这例背风气旋生成,即高空气旋性位涡极大值移到低层锋区之上引起气旋发展(Hoskins 等,1985)^[25]。进一步的模拟证实了这一分析^[26],有无阿尔泰山-萨彦岭都预报出高空位涡切断的特征和地面气旋的形成,地形的影响主要为“修正”,表现为改变地面低压的位置、强度及气旋的深厚程度等。但另一个个例(1986 年 3 月 3—5 日)结果表现出相当的不同,首先高空形势存在着明显差异,1988 年 4 月个例对应来自西北路径的短波槽向南迅速发展,位涡的南侵受槽后急流的影响,同时高压气流引导西伯利亚冷空气向蒙古西部山脉地区爆发,高低层系统之间存在强烈的耦合,而 1986 年 3 月个例是自新疆东移的宽广的高空槽形势,围绕高位涡空气的急流带连续且强度较弱,对流层低层的温压场形势是对应成熟气旋的纬向波动。有无阿尔泰山-萨彦岭试验揭示了这次背风气旋生成的“地形引生”性质(图 8),采用包络地形代替平均地形得到更强的气旋发展。可以认为这是一个低层强迫起主要作用的过程,在高空弱涡度平流形势下生成的气旋也限于低层。这里选择的两个个例表示了影响阿尔泰山-萨彦岭山脉地区的不同高空槽系统,不难看出,这一分类与阿尔卑斯情形有相似之处。而从天气过程来看,按地面形势的特点,也可以归类为所谓“槽前相对低压区形成

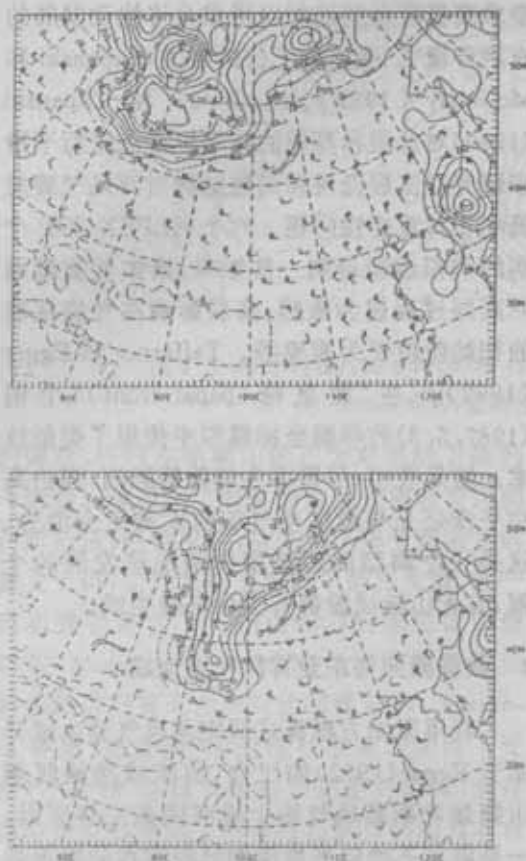


图 7 1988 年 4 月 14 日(上图)15 日(下图) 12 点(GMT)307.5K 等面上位涡(实线,等值线间隔 1PVU)和急流(虚线, $> 40\text{ms}^{-1}$, 间隔 10ms^{-1})分析,点划线表明等值面接地

1984; Mesinger 等,1988); McGinley 发展了一个能够用于模式初始化的成功恢复山脉机械作用的诊断变分技术(McGinley, 1984; McGinley 和 Goerss, 1987);而 Bleck 等嫡坐标模式的发展更是与背风气旋的模拟密不可分(Bleck, 1984; Tafferger, 1990)。对于上述特点的具体内容,读者可参阅相应的文献。总之,数值模式十年来在背风气旋模拟方面取得的成绩是比较突出的,通过对地形作用的正确表示大多数数值模式已经能够成功地模拟背风气旋生成,这对改进业务数值预报水平、加强背风气旋生成机制的研究都有重要意义。

主要参考文献

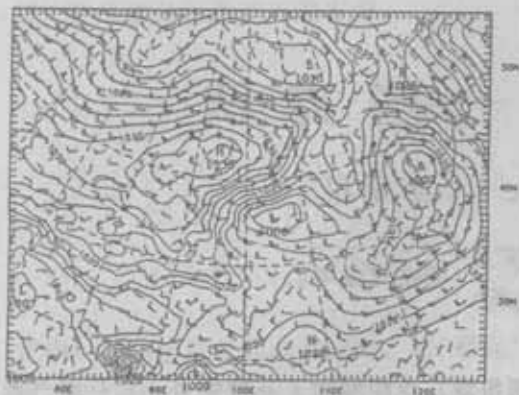


图8 对应1986年3月4日1200(GMT)的海平面气压场24小时预报(等压线间隔2.5hPa),上图阿尔泰-萨彦岭山脉,取包括地形,下图山脉最高高度取550m

的气旋”和“暖区新生气旋”。我们提出东亚背风气旋生成的“地形修正”(Orographically modified)和“地形引生”(Orographically induced)的动力学分类,目的在于强调它们的生成机制在已经存在的大尺度背景和相应情形下地形作用等方面的差别。此外,诸如春季下垫面的热力作用等也是需要深入研究的。

5 小结

本文概括总结了背风气旋生成研究近十年来的主要工作。背风气旋生成的关键是山脉对斜压不稳定的修正,但具体机制可能是复杂和多样的。这些同样是在东亚背风气旋生成的研究中需要注意和考虑的问题。

- 1 Chen, S. -J., Y. -H. Kuo, P. -Z. Zhang and Q. -F. Bai, Synoptic climatology of cyclogenesis over East Asia, 1958 - 1987, *Mon. Wea. Rev.*, 119(1991), 1407-1418.
- 2 Mesinger, F. and R. T. Pierrehumbert, Alpine lee cyclogenesis, Numerical simulation and theory, *Scientific Results of the Alpine Experiment, Vol. 1, GARP-Publ. Ser. 27, 1986, 141-163.*
- 3 Buzzi, A., Observation and modelling of lee cyclogenesis, *Proc. 1986 ECMWF Semina on Observation, Theory and Modelling of Orographic Effects, Vol. 2, 1987, 221-251.*
- 4 Egger, J. and K. P. Hoinka, Fronts and orography, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 48(1992), 3-36.
- 5 Lanziger, A., H. Pichler and R. Steinacker, ALPEX-Atlas, Case Studies of ALPEX-SOP Cyclones in the Western Mediterranean, *Inst. Meteorology and Geophysics, Univ. Innsbruck, 1990.*
- 6 Bleck, R. and C. Mattocks, A preliminary analysis of the role of potential vorticity in Alpine lee cyclogenesis, *Contrib. Atmos. Phys.*, 57(1984), 357-368.
- 7 Buzzi, A. and S. Tibaldi, Cyclogenesis in the lee of the Alps, A case study, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 104(1978), 271-287.
- 8 McGinley, S. A., A diagnosis of Alpine lee cyclogenesis, *Mon. Wea. Rev.*, 110(1982), 1271-1287.
- 9 Pichler, H. and R. Steinacker, On the synoptics and dynamics of orographically induced cyclones in the Mediterranean, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 36(1987), 108-117.
- 10 McGinley, J. A. and M. Zupanski, Numerical analysis of the influence of jets, fronts and mountains on Alpine lee cyclogenesis, More cases from the ALPEX SOP, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 43(1990), 7-20.
- 11 Mattocks, C. and R. Bleck, Jet streak dynamics and geostrophic adjustment processes during the initial states of lee cyclogenesis, *Mon. Wea. Rev.*, 114(1986), 2033-2056.
- 12 Smith, R. B., A theory of lee cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 41(1984), 1159-1168.
- 13 Smith, R. B., Further development of a theory of lee cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 43(1986), 1582-1602.
- 14 Pierrehumbert, R. T., A theoretical model of orographically modified cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 42(1985), 1244-1258.

- 15 Speranza, A., A. Buzzi, A. Trevisan and P. Malguzzi, A theory of deep cyclogenesis in the lee of the Alps. Part I. Modifications of baroclinic instability by localized topography, *J. Atmos. Sci.*, 42(1985), 1521-1535.
- 16 Egger, J., Numerical experiments on the cyclogenesis in the Gulf of Genoa, *Beitr. Phys. Atmos.*, 45(1972), 330-346.
- 17 Egger, J., Alpine lee cyclogenesis, Verification of theories, *J. Atmos. Sci.*, 45(1989), 2187-2203.
- 18 Tafferter, A. and J. Egger, Test of theories of lee cyclogenesis, ALPEX Cases, *J. Atmos. Sci.*, 47(1990), 2417-2428.
- 19 Schär, C., Quasi-geostrophic lee cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 47(1990), 3044-3066.
- 20 Tafferter, A., Lee cyclogenesis resulting from the combined outbreak of cold air and potential vorticity against the Alps, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 43(1990), 31-47.
- 21 Tafferter, A. and J. Egger, Modification of fronts by the Alps. Simulations of numerical experimentation, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 48(1992), 193-203.
- 22 Chen, S. -J. and L. Lasic, Numerical case study of the Altai-Sayan lee cyclogenesis, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 42(1990), 221-229.
- 23 Chen, S. -J., J. Egger and W. Han, Altai-Sayan lee cyclogenesis, A case study, *Contrib. Atmos. Phys.*, 65(1992), 13-22.
- 24 Thorncroft, C. D. and B. J. Hoskins, Frontal cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 47(1990), 2317-2336.
- 25 Hoskins, B. J., M. E. McIntyre and A. W. Robertson, On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, *Quart. J. R. Met. Soc.*, 111(1985), 877-946.
- 26 韩巍, 阿尔泰山-萨彦岭背风气旋的数值研究, 北京大学博士论文, 1992.