

青藏高原和落基山对气旋的动力影响*

盛 华 陶诗言

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文利用北京气象中心的业务预报模式(B模式),采用全风速调整方案,进行了绕流、爬坡等各种数值试验,研究青藏高原和落基山对气旋的动力影响。结果表明,气流绕青藏高原而行,产生的散度场与东亚的气旋生成区和路径匹配;在青藏高原主体下游,高层辐合,抑制了我国大陆东部的气旋发展。在北美,落基山对大气的动力影响以爬坡为主,由于气流在迎风坡上升,空气绝热冷却,在背风面大规模下沉增温,对流层低层形成暖脊,这对背风锋生和背风气旋的发生发展有着直接的影响,另外爬坡作用也是美国中西部干线形成的主要原因。

一、引 言

高原和山脉对大气的动力作用,历来是国内外气象学家感兴趣的问题,这种动力作用可分以下几种情况:1)自然爬坡,2)纯粹绕流,3)纯粹爬坡。廖洞贤^[1]等人曾对我国西北三省地形对天气的作用做过调查,认为青藏高原对大气的动力作用主要是绕流。兰州高原大气所钱永甫等^[1]曾研究过绕流、爬坡对大气环流的影响。但他们未能深入研究绕流、爬坡对气旋发生发展的动力影响。至于落基山脉的动力作用,至今还没有人定量地分析过爬坡与绕流两种作用的差异。

世界上,落基山脉和阿尔卑斯山的背风气旋的生成最明显,其次是青藏高原和安第斯山的背风面。各地背风气旋生成的特征和原因是不完全相同的。落基山脉的背风气旋可根据经典的理论来解释,地面气旋生成与对流层上部的流散气流有关,背风气旋将发生在高空辐散引起的低空涡旋伸长与在背风面向下运动的气流引起的伸长相重迭的地方。阿尔卑斯山脉的背风气旋,它的生长机制主要是由山脉对低层冷空气的阻挡作用而引起的。而青藏高原背风气旋绝大部分生成在东海岸,在那里不存在下坡运动,不能用气柱到下坡处垂直伸长来说明它的成因,这种气旋的生成应该有其它的机制。

本文利用北京气象中心业务预报模式(B模式)进行数值试验,该模式是半球预报模

* 本文于1986年12月10日收到,1987年3月5日收到修改稿。

1) 行星大气地形效应的研究 油印本。

式,垂直坐标是 $\sigma-p$ 混合坐标,垂直方向分五层,水平格距为 381 km。采用了自然爬绕、绕流、爬坡等方案,试图了解青藏高原对东亚气旋以及落基山对北美气旋的动力影响。同时,本文还做了地形的敏感性试验。利用纬向平均的初值进行积分,分析了各经度上的质量通量和动量输送。所有这些试验,除特殊说明外,都是用的干模式,未加进大小尺度降水、感热和蒸发,关于非绝热加热对背风气旋的影响,将在另一篇文章中讨论。

二、方案的设计

本文设计了一种全风速的调整方案,此方案把气流完全调整到地形梯度的方向(爬坡),或者完全调整到地形梯度的切变方向(绕流)。此方案区别于钱永甫¹⁾等人采用的分量调整方案,它保证了动能守恒。能量守恒是模式计算稳定的保证,但本方案的缺点是夸大了爬坡和绕流的作用。

1. 绕流方案

水平风速的绕流应满足如下两个方程:

$$\mathbf{V}_r \cdot \nabla z_s = 0 \quad (1)$$

$$|\mathbf{V}_r| = |\mathbf{V}_s| \quad (2)$$

式中 \mathbf{V}_s 为近地面的风矢, \mathbf{V}_r 是绕流的风矢,联立①②两式,可得 u_r 和 v_r 应满足的方程:

$$u_r = -v_r \left(\frac{\partial z_s}{\partial y} / \frac{\partial z_s}{\partial x} \right) \quad (3)$$

$$v_r = \sqrt{(u_s^2 + v_s^2)} / \left[1 + \left(\frac{\partial z_s}{\partial y} / \frac{\partial z_s}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (4)$$

其中 z_s 为地形高度。

2. 爬坡方案

水平风的爬坡气流应满足如下两个方程:

$$\mathbf{V}_p \times \nabla z_s = 0 \quad (5)$$

$$|\mathbf{V}_p| = |\mathbf{V}_s| \quad (6)$$

\mathbf{V}_p 是爬坡风矢,联立(5)、(6)两式,可得爬坡风分量应满足的方程:

$$u_p = v_p \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} / \frac{\partial z_s}{\partial y} \right) \quad (7)$$

$$v_p = \sqrt{(u_s^2 + v_s^2)} / \left[1 + \left(\frac{\partial z_s}{\partial x} / \frac{\partial z_s}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (8)$$

在试验中,对于地形梯度大于或等于 10^{-2} 的诸格点,每一时间步长都人为地调整一次风。如果格点的地形高度 z_s 大于 800 m,但小于 3000 m,只对模式的第五层进行调整,如果格点的地形高度大于 300 m,对模式的第四、五层调整。

本文使用 1979 年 5 月 11 日 12 时(GMT)FGGE 的资料作为初始场,按表 1 各种方

1) 说明同 130 页脚注 1)。

案进行试验,以此考察青藏高原对其主体下游气旋发生发展的影响。使用1979年3月21日12时(GMT)FGGE的资料作为初始场,同样按表1方案进行试验,以此考察落基山对北美大陆气旋的影响。

3. 纬向平均的初始场

为了解青藏高原与落基山脉对气流的动力作用,本文用1979年3月21日12时的资料,经过纬向平均后作为初始场,积分72h,计算不同经度上的质量通量和涡动动量输送,分析地形对初始场地面气压的扰动以及对700hPa风场的扰动,这样可避免初始场的

表1 试验方案

	东 亚	北 美
自然爬绕	CRT	CRR
绕流	RT1 RT2*	RR
爬坡	CT	CR
没有地形	NOT	NOR

的代表性问题,以此研究青藏高原和落基山脉对气流的不同作用。

$$M = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \rho u d\phi$$

$$I = u'v'$$

$$u' = u - [u], v' = v - [v]$$

M 是某一纬度带上经向质量通量, ϕ_1, ϕ_2 是纬度, $[]$ 表示对整个纬圈的平均, I 是涡动动量输送。

* 加进大小尺度降水

三、青藏高原对气旋发生发展影响的数值试验

1. 自然爬绕(CRT)

在初始场上(1979年5月11日12时),青藏高原主体下游,在我国西南地区是低压槽区,这个低压槽向东北伸展,经过36h积分,在长江下游可以分析出一根1005hPa的闭合等压线,这个低压形成后不断向东北洋面上移动,在48h预报图上(图2a),它已移到东海上,低压中心为1004hPa,与实况大体一致(图1a),虽然此方案未加进非绝热物理过程,但在青藏高原主体下游长江口附近仍生成了气旋,这说明高原动力作用和大尺度背景场是同样重要的。

预报的500hPa高度场与厚度场上(图3a),在30°N附近可以看到厚度线密集区,但高度线和厚度线几乎平行,这表明江淮气旋发生时,斜压不显著。由此可见,Maabe^[2]对我国东海岸气旋成因解释与天气事实不太符合。由于青藏高原的阻挡,冷空气偏北东移,东亚冷空气向南侵袭不象北美那样强,所以我国东海岸的斜压性不显著,江淮气旋一般生成在准静止锋上。

2. 绕流

1) 没有降水的绕流(RT1)

采用没有降水的绕流方案(RT1),积分24h,在我国西南地区生成一个低涡,中心位于四川省九龙附近,在高原的东北边缘出现小高压,华南倒槽形势已经形成。以前,西南

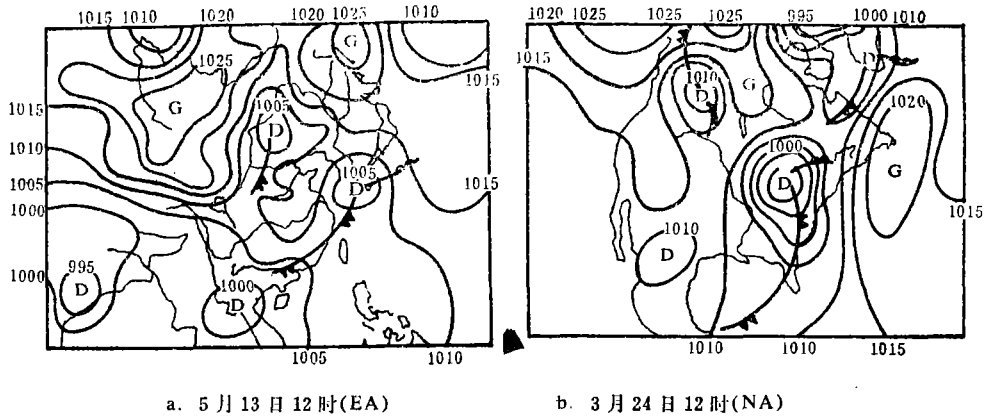


图 1 地面实况图

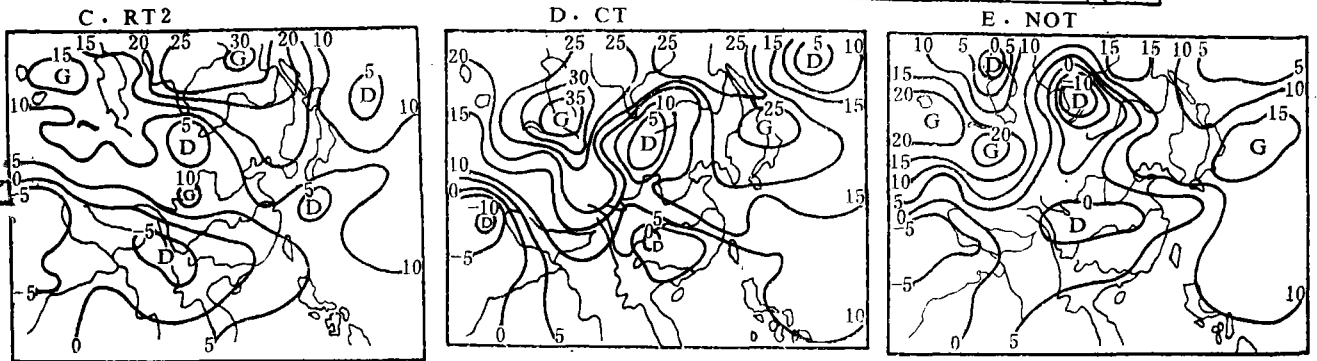
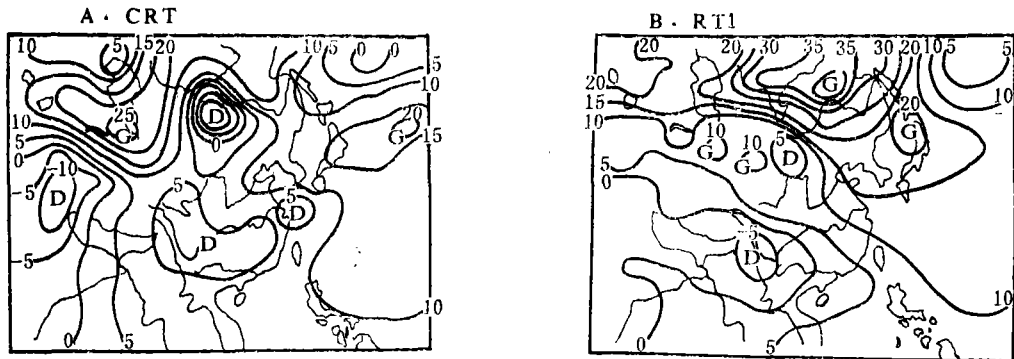


图 2 东亚各方案试验结果(48 h预报的海平面图,已减去 1000)

涡一般认为是侧边界摩擦形成的,试验表明绕流是西南涡形成的原因之一。在48 h的预报图上(图2 b)西南涡和青藏高原东北边缘的小高压等系统位置不变,但西南涡强度偏强,蒙古低涡减弱,贝加尔湖北面的高压向东南扩张到朝鲜,这可能是方案夸大了绕流作用的缘故。

700 hPa和500 hPa流场上(图4 a, b),在四川九龙附近为气旋环流,青藏高原的北侧为反气旋环流。在长江中下游形成了切变气流,这切变连接着日本附近的西风槽,东亚经

常出现这种环流形势。另外,在我国云南、贵州、湖南一带 700 hPa 风速大于 12 m/s, 东亚

低空急流明显地与绕流有关, 青藏高原地形对西南季风的绕流作用对低空急流的形成是十分重要的。

70 年代, 我国气象学家^[3]在研究卫星云图时, 发现在 500 hPa 图上, 低涡在高原中部(那曲)出现的机率最多, 但在云图上发现, 许多低涡云系可追踪到高原的西部, 由于高原西部无探空测站, 对此长期感到疑惑不解。现在看来, 绕流是它的形成原因之一。不仅高原周围的天气系统与绕流有关, 而且高原主体上的系统也与绕流有关。

东亚 300 hPa 辐散区(图 5 b)基本上呈分叉形式, 从蒙古和我国西南向长江口汇合, 然后向东北洋面上伸展, 较大的辐散区在蒙古、我国西南以及长江口附近。850 hPa 散度场(图 5 a)上, 从我国西南经长江中下游到日本为辐合区, 与 300 hPa 辐散区对应, 散度场的这种分叉分布与东亚气旋生成区和路径是一致的。在对流层高层, 由于青藏高原泰勒柱作用, 高空气流在青藏高原的东侧汇合, 抑制了气旋在我国大陆上强烈发展。

2) 有降水的绕流(RT 2)

在绕流方案中加进大小尺度降水, 积分 18 h 就在长江口附近生成一低涡, 24 h 预报图上, 该低压中心降到 1003 hPa, 有了潜热释放, 低压出现的时间提前, 强度加强, 同时加快了系统的相速, 48 h 预报图(图 2 c)更接近实况。降水量和垂直运动场表明, 从长江下游经东海到日本东部洋面成带状分布, 这是因为气流经青藏高原绕流作用, 从长江下

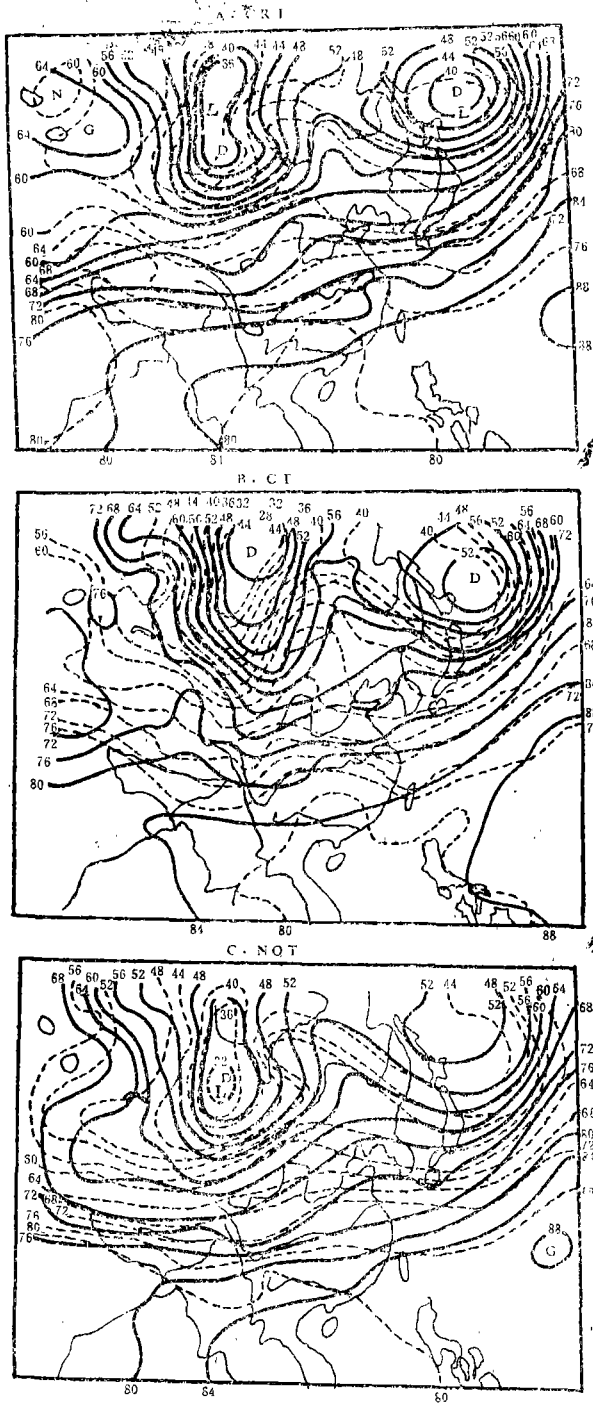


图 3 三种方案 48 h 预报的东亚 500 hPa 高度场和厚度场 (实线为高度线, 虚线为厚度线, 单位: dagpm, 已减去 500)

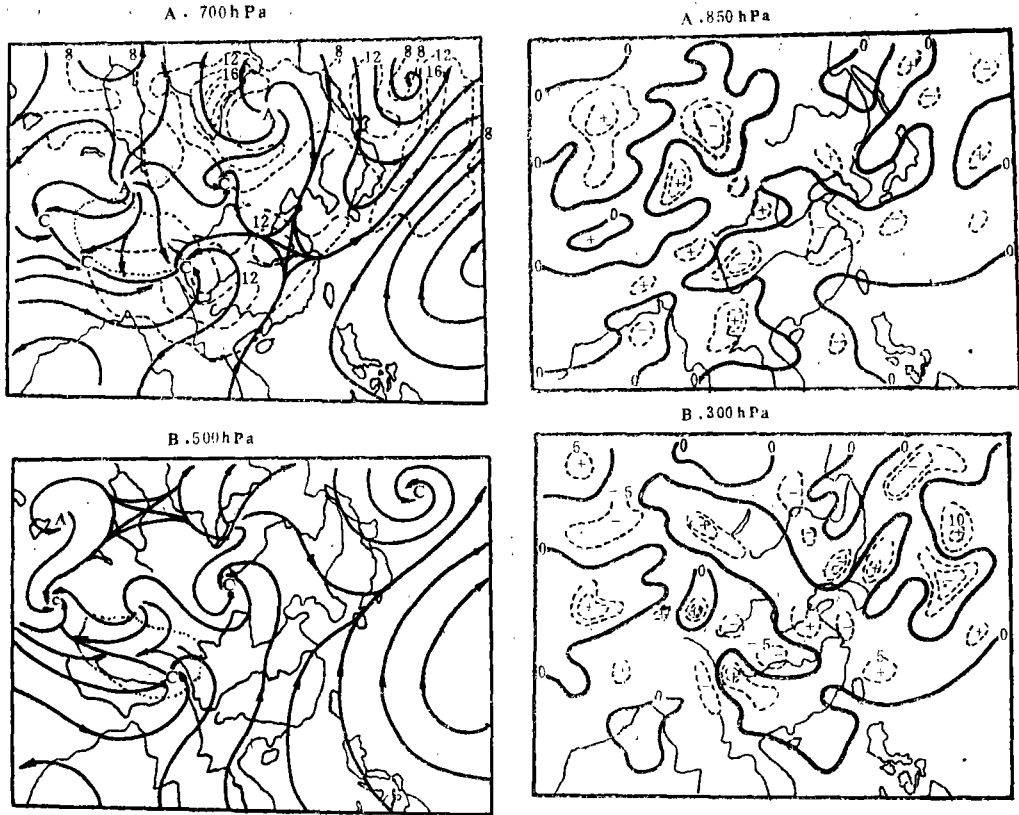


图 4 绕流(RT 1)预报的流场 (a 中的虚线是等风速线)

图 5 绕流(RT)预报的散度场(单位, $10^{-6}/s, 24 h$)

游到日本为辐合上升, 凝结降水释放潜热促进低压的发生发展, 但在后期, 低压的强度和位置与实况有差异, 这说明还有其它物理过程在起作用, 如海洋上感热和水汽影响。概括以上分析可见, 其一, 绕流是东亚大气环流一大特征; 其二, 潜热反馈对江淮气旋的发生发展起着促进作用。

3. 爬坡试验(CT)

从爬坡试验得到的地面图(图 2 d)可见, 低压出现在长江中游, 中心气压为 1000 hPa, 积分 72 h 后, 低压控制了我国整个东部平原。东亚的气压形势, 东西向呈低压高压相间, 一般东亚不会出现此种气压形势。

850 hPa 温度场表明, 在青藏高原下游, 即在我国东部平原上形成一条南北向的暖脊, 这是气流在青藏高原的背风坡形成大规模下沉增温所致。当然实际情况没有这么显著的暖脊出现。在 500 hPa 上(图 3 b), 这种下沉增温仍然明显, 由于温度槽脊的加深, 等厚度线与等高线交角变大, 天气实践表明在青藏高原下游不会出现这么强的斜压性。爬坡得到的散度场在 $100^{\circ}E$ 附近呈南北走向, 而不是呈分叉东西带状分布。

4. 没有地形的试验(NOT)

没有地形时,低压的范围大、强度强,它基本上停滞在我国东部大陆上(图 2 e)。没有地形时,原在新疆的冷空气经过青藏高原直接向东南移动(图 3 c),同时 5 00 hPa 振幅加大,温度槽落后高度槽,斜压性加大,在我国大陆上形成了较强的气旋。

北美的气压系统一般东西向呈高压、低压相间东移的型式,或南北向气压差呈南高北低;在欧洲由于极锋较强,气压场的配置同北美一样。西伯利亚冷高压总是一个接一个地自北向东南移动。江淮气旋初生时,气压系统呈北高南低,华南一带呈倒槽。地形的敏感性试验以及爬、绕试验表明,这些差异是大地形对大气不同动力作用所造成的。

四、落基山脉对气旋发生发展动力影响的数值试验

1. 自然爬坡试验(CRR)

北美初始场上(图略),落基山东侧为南北向倒槽区,原在科罗拉多附近的低压,48 h 预报后,东移发展很快,几乎控制了美国大陆,强度很强,中心气压为 992 hPa,以后,低压位置少动,范围继续扩大,积分 72 h(图 6 a),低压的强度和范围与实况较接近。

在 500 hPa 高度场和厚度场上(图略),等高线和厚度线交角较大。由于北美大陆西部

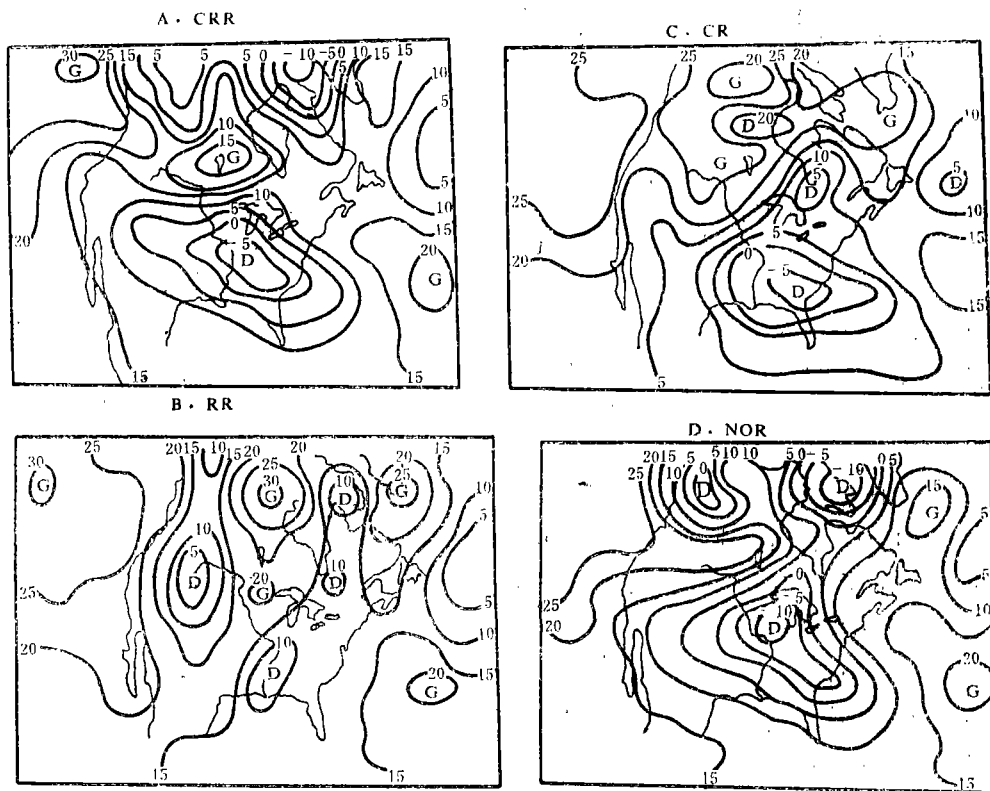


图 6 北美各方案试验结果(72 h 积分的海平面图, 单位: hPa, 已减去 1000)

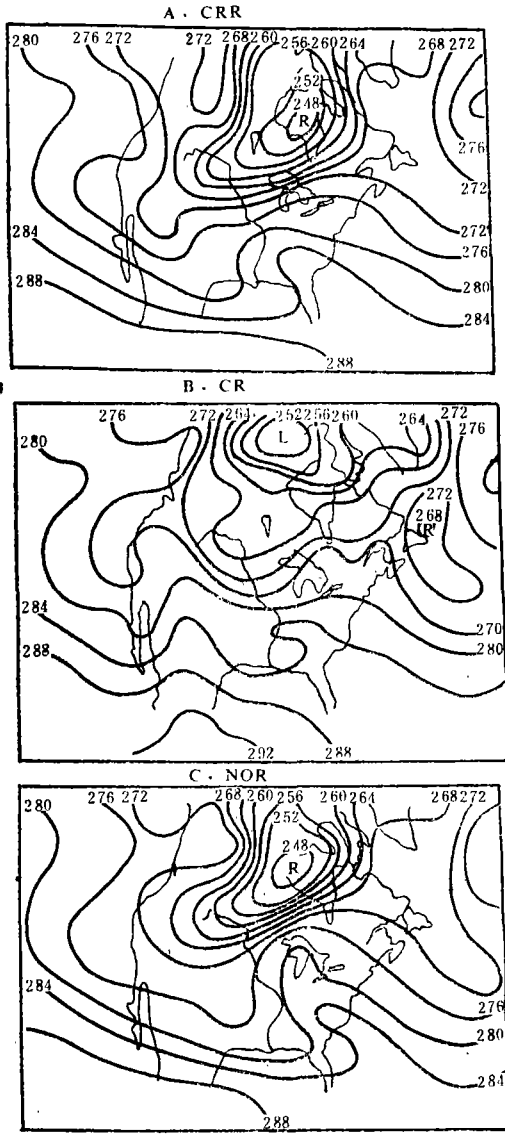


图 7 850 hPa 温度场(K, 72 h)

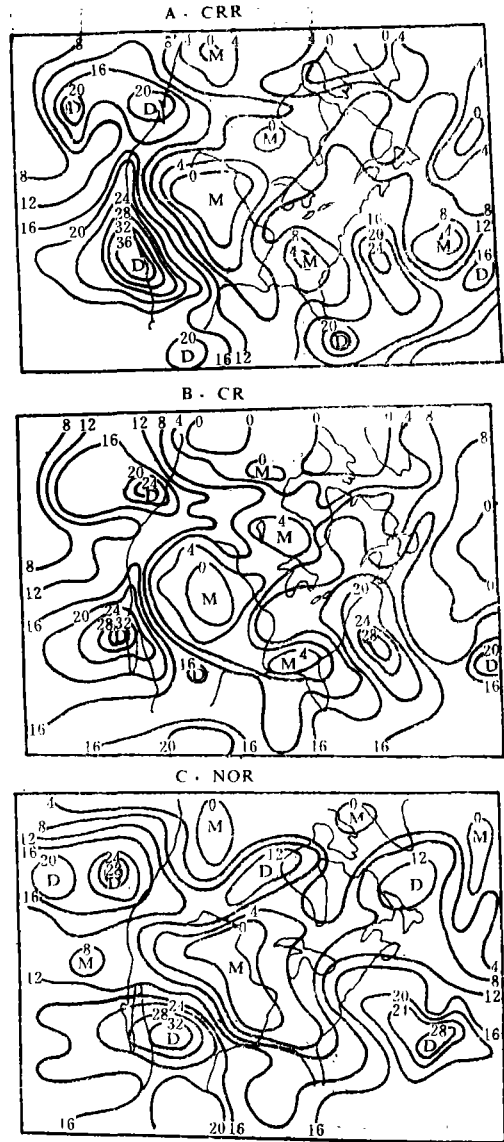


图 8 700hPa T-Td(°C, 24h, M-湿, D-干)

太平洋上是阻塞高压,西部的低槽和切断低压移动缓慢,低压三天只移动十多个经度。由于落基山的高度较低,加之山脉呈南北走向,容易造成冷空气南侵,斜压性加强,造成北美大陆气旋强烈发展。

2. 绕流试验(RR)

采用绕流方案试验,积分 24 h,落基山东麓的低压不是向东南移动发展,而是向北伸展,积分 72 h 后(图 6 b),科罗拉多和阿尔伯塔分别为低压。统计事实表明,科罗拉多

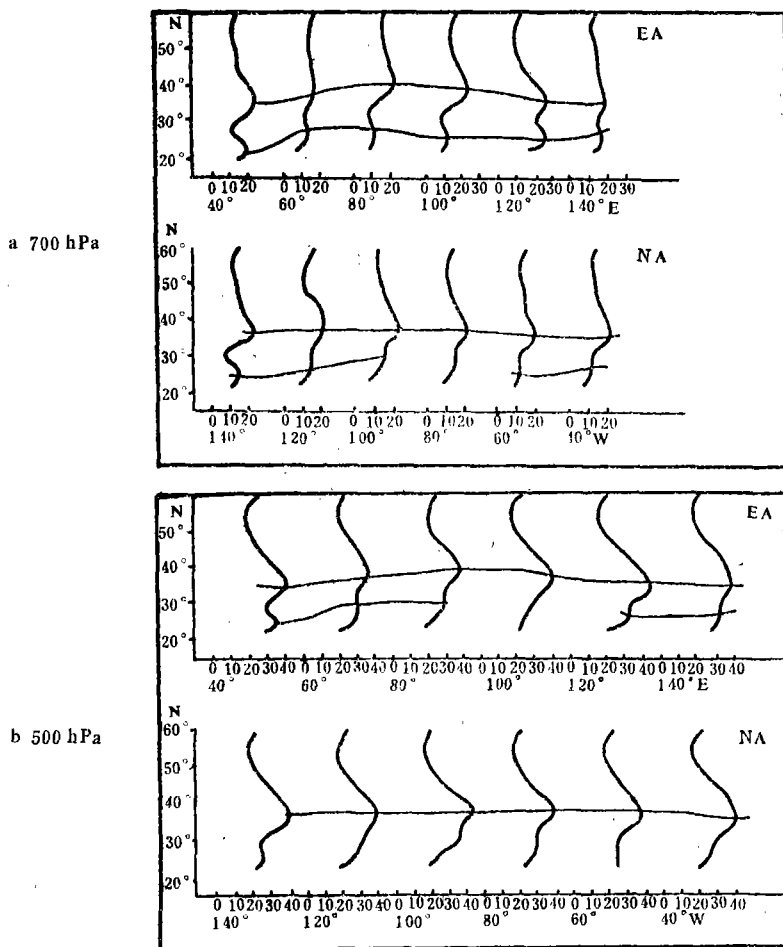


图9 各经度上的质量通量(单位: $10^6 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

和阿尔塔是气旋生成的高频区,一般认为这是西风急流遇到陡坡地形造成的。这些地区的气旋部分地与绕流有关。

3. 爬坡试验(CR)

采用爬坡方案所得到的海平面气压场(图6c)与实况(图1b)基本一致,这说明北美气流以爬坡为主。CRR与CR方案所得的700 hPa垂直运动场大体一致,上升运动区与下沉运动区成南北走向,在北美大陆西海岸为上升运动区,落基山东侧为下沉区,大陆中部又是较强的上升运动区。

爬坡作用对背风锋生与背风气旋有直接影响。CR所得到的温度场(图7b)上,在落基山的背风坡有一条明显的暖脊,而CRR的温度脊(图7a)成西北-东南走向,舌尖在科罗拉多附近。显然,温度脊是落基山背风坡大规模下沉运动造成的。在对流层锋生时出现的垂直运动场上,其中暖的一边空气相对冷的一边空气来说是下沉,结果两边出现不同的绝热增温和动量向下输送,有助于温度梯度的加大和涡度场的加强。这暖温脊覆盖的地区是美国强对流天气经常发生的地区。

北美的天气现象与东亚的一个显著差别是,北美多强对流天气,东亚多暴雨。美国的强对流天气除与暖盖有关外,它还与美国中西部的干线密切相关。西风气流从平坦的洋面吹到北美大陆,遇到南北伸展的落基山脉,爬坡上升使得空气变得干冷,而落基山东侧,低层从墨西哥湾向北输送暖湿空气。由图 8 a, b 可见,CR 和 CRR 两者的 700 hPa 温度露点差分布非常一致。

4. 没有地形的试验(NOR)

对照图 6 a 与图 6 d, 没有地形时,地面气旋要强些,另一个差别是,有地形时系统偏南。没有地形时,温度脊(图 7 c)整个东移到美国东部,而不像 CRR 的那样,温度脊呈西北-东南走向,另外美国中西部的干线(图 8 c)开始变形。

综上所述,在北美,落基山脉对大气动力影响以爬坡为主。由于气流爬坡,在山脉迎风坡抬升,空气变得干冷,而在背风坡下沉增温,落基山东侧形成暖湿脊,它对背风面的锋生和气旋发生发展起着十分重要的作用。同样,爬坡作用也是美国中西部干线形成的重要原因之一。

五、初值为纬向平均气流的数值试验

前面是用不同时刻的初始场来讨论青藏高原和落基山脉对背风气旋的动力作用。下面用纬向平均气流作为初始场进行试验,这样就克服了初始场的代表性问题。同样用 B 模式采用自然爬绕方案积分 72 h, 考察各经度上的质量通量的变化,同时还讨论东亚和北美的动量输送、气压场和风场的差异。

1. 质量通量和动量输送

青藏高原对 700 hPa 气流的分支作用很明显(图 9 a), 在 80°E 附近,北支急流达最北

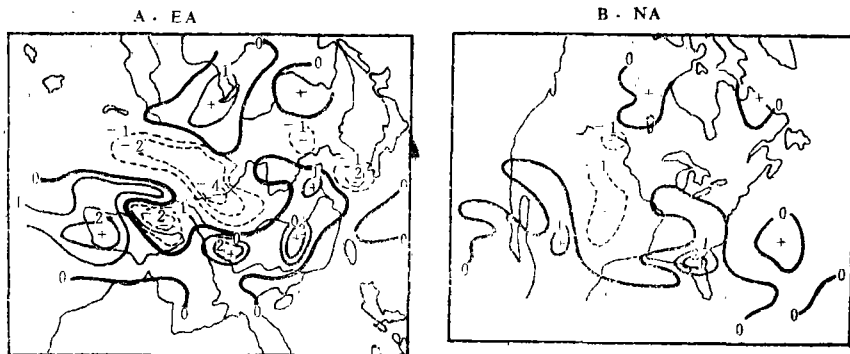


图 10 动量输送 $u'v'$ (m^2/s^2 , 700hPa)

纬度,大约在 40°N,南支急流从 80°E 开始向南移动,在 120°E,两支急流加速汇合。在北美,700 hPa 上的最大质量通量基本上在同一纬度,大约 37.5°N。500 hPa 质量通量图上(图 9 b),两者的差异更明显。在北美,各经度上始终是一支急流,大约 37.5°N;而在东

亚,急流分支很清楚,与 700 hPa 情况一样,大约在 80°E 附近,北支急流达 40°N ,在 120°E 附近,南北两支急流汇合加速,这与实际情况是一致的。

根据公式(10)计算了东亚和北美的动量输送(图 10)。在东亚,由于西风气流遇到青藏高原,风速减慢,加之气流绕青藏高原向南,在青藏高原的西南侧, $u'v'$ 大于零。南支气流绕过青藏高原后,到我国西南、华南一带加速,由于绕流作用,风向转为南风,从我国西南到长江口, $u'v'$ 大于零,根据 starr 的动量输送理论,动量有经向辐合,扰动衰减,基本气流加强,不利于气旋在我国东部大陆发展。在北美,数值很小,没有气流加速和扰动衰减作用。

2. 气压场和风场

由于 B 模式是短期预报模式,本试验只作了 72 h 积分。在北美,地面图上,气压扰动都位于落基山的背风坡,位置少动。在东亚,扰动开始发生在长江下游,随着积分时间的延长,扰动向东北移动。北美,气流爬坡,在落基山背风坡产生扰动,位置少动;而在东亚,气流绕流辐合产生扰动,扰动是移动性的。

纬向平均气流,经过 72 h 积分,在我国西南出现涡旋环流,从长江口到我国西南形成一条横切变,同时高原主体上也出现风向切变,这是气流绕青藏高原造成的;北美则没有风向切变线。

六、结 论

我们设计了一种全风速的调整方案,进行了绕流、爬坡等试验。结果表明,由于气流绕青藏高原而行,在对流层低层辐合带成分叉的形式,高层辐散带与之对应,交叉点在长江口附近,所以该处是东亚气旋生成频率较高的区域,这种分叉的散度带与东亚的气旋生成区和路径一致。在高层,青藏高原主体下游产生辐合,抑制了气旋的强烈发展,所以我国大陆上不像北美和欧洲大陆有强气旋生成。

气旋绕流在我国西南易生成涡旋,在长江中下游生成倒槽,同时西南风加大,这些都是江淮气旋生成的背景场。绕流作用使北部常常生成小高压,其南面是东西向的横切变。另外,在高原有低涡,这说明绕流作用不仅影响高原周围的天气系统,而且高原主体上的天气系统也与之有关。

在北美,落基山对大气的动力影响以爬坡为主。由于气流在迎风坡上升,空气绝热冷却干燥,在落基山背风坡大规模下沉增温,对流层低层形成暖脊,这对背风锋生和背风气旋的发生发展有直接的影响。另外爬坡作用也是美国中西部干线形成的重要原因之一,而美国强对流天气与这干线及暖盖有着密切的关系。

用纬向平均气流作为初始场,计算出的质量通量,清楚地表明气流受青藏高原阻挡分支,到 120°E 附近气流汇合加速,在北美则没有这些现象。动量输送表明青藏高原下游,从我国西南到长江口有经向动量辐合,所以基本气流在 120°E 有加速现象,这不利于气旋在我国大陆东部发展,在 700 hPa 风场上,从长江口到我国西南形成一条横切变。

参 考 文 献

- [1] 廖洞贤、王超，关于西北三省地形对天气作用的调查，气象科技资料，天气分析、预报附刊，34-48，1977年5月。
- [2] Manabe, S., and T. B. Terpstra, The effects of mountains on the general circulation of atmosphere as identified by numerical experiment, *J. Atm. Sci.*, 31, 1, 3-42. 1974.
- [3] 叶笃正、高由禧，青藏高原气象学，科学出版社，1979。

DYNAMIC EFFECT OF QINGHAI-XIZANG AND ROCKY MOUNTAINS ON THE LEE CYCLONES

Sheng Hua Tao Shiyān

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

Using the operational prediction model (B Model) of Beijing Meteorological Center, we do some of numerical experiments of crossing and rounding mountains in all velocity adjustment scheme. We study dynamic effect of Qinghai-Xizang Plateau and Rocky Mountains on the lee cyclones. The results show that due to air flow round Qinghai-Xizang Plateau, divergence is distributed in the shape of confluence which match cyclogenesis area and cyclonic track in the east Asia. In the downstream of Qinghai-Xizang Plateau, convergence of high level of troposphere restrains cyclone development in the east of China continent. In the Northern America, air flow primarily crosses over Rocky Mountains. Air is adiabatically cooled when it flows upward in the west flank of Rocky Mountains, while air is warmed when it flows downward in the lee side of Rocky Mountains. The fact is important for the lee cyclogenesis and the lee frontogenesis of Rocky Mountains. Air flow crossing over Rocky Mountains is also main cause for forming dryline in the mid-west of United States.