

青藏高原与落基山背风气旋的 对比分析(一)

——天气结构

盛 华 陶诗言

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文分别选用了东亚(EA)和北美(NA)的背风气旋进行对比分析。分析了两者的天气形势、动力和热力结构的差异。由于青藏高原和落基山地形对气流的不同影响,北美水汽从墨西哥湾向北输送,东亚水汽从南海向东北输送,因而,NA的对流不稳定区成南北带状分布;而EA的则成东西带状分布。EA的初生时,正压不稳定作用是主要的;在发展中,起主导作用的是斜压不稳定。

一、引 论

山脉和高原对大气运动的影响历来是气象学家所注意的问题。近年来人们为了更好地作出强对流天气的短期预报和长期天气气候反常的预报,山脉和高原对大气环流和天气气候的影响重新又引起气象学家们的重视,人们进行了各种专门性的观测试验,如季风试验和阿尔卑斯试验,这些试验大大促进了我们对山脉、高原的热力和动力作用的深入了解。由于山脉和高原对大气运动影响的复杂性,这个问题还远没有解决。

北半球最大的两座山系是落基山和青藏高原,它们的形状和高度有很大的差别。落基山略高于850 hPa,青藏高原接近500 hPa。落基山南北长度占55个纬度,东西宽度为20个经度;青藏高原呈椭圆形状,南北占15个纬度,高于1500米的高度东西为50个经度。落基山的西边是太平洋,而青藏高原的西边是大陆。它们不仅对大气环流的影响不同,而且对天气系统的影响也不相同。北美的背风气旋生成在落基山东侧,而东亚,距青藏高原1000多公里才有江淮气旋生成。北美的背风气旋东移发展很快,一般到五大湖区域就可锢囚,强度比较强;而江淮气旋要移到海上才发展,一般要移过日本才加深较快。在北美多龙卷、冰雹等强对流天气,青藏高原内的对流活动多于落基山,而中国大陆的强对流系统没有美国危害性大,中国多暴雨^[1]。另外美国中西部常出现干线,青藏高原的下游,对流层低层常出现东西向的横切变以及梅雨锋。气象学家为了探索这些差异的原因,做了很多研究,但仍然对很多事实没有得到令人满意的解释。

1986年5月19日收到,10月21日收到修改稿。

本文分别选择了一个北美和东亚的背风气旋进行诊断分析,北美的个例选用 1979 年 3 月 22—24 日(以下简称 NA),东亚的个例选用 1979 年 5 月 12—14 日(以下简称 EA)。NA 的计算区域为 $112.5^{\circ}-67.5^{\circ}\text{W}$, $22.5^{\circ}-60^{\circ}\text{N}$; EA 的计算区域为 $105^{\circ}-150^{\circ}\text{E}$, $15.0^{\circ}-52.5^{\circ}\text{N}$ 。格距为 1.875×1.875 经纬度,两个个例都是 25×21 网格点,垂直方向选用 12 层,顶层为 50 hPa。对比分析了青藏高原和落基山背风气旋的天气形势、动力和热力结构的差异,比较了两者水汽输送方式和对流不稳定区的分布,进行了组合正压/斜压不稳定诊断。

二、气旋发生发展的天气形势

1979 年 5 月 11 日 12 时 (GMT), 东亚 500 hPa 环流形势基本上为两槽一脊型,巴湖槽前有两个短波槽成阶梯形,这次 EA 的发生就是河套短波诱发下形成的。12 日 00 时,500 hPa 河套槽已移到西安至昆明一线,与此对应,低层 700、850 hPa 形成了切变和低涡。一个显著的特点是,华南一带出现了较强西南风,一般风速大于 16 m/s ,暖平流很强,地面图上华南倒槽已经形成,这些都是江淮气旋生成前的征兆。

5 月 12 日 12 时,地面图上,在江西境内形成了 1005 hPa 的闭合低压,此时,500 hPa 槽东移到北京至汉口一线。次日,又东移到朝鲜加深发展,形成一个 560 位势什米的低涡,地面气旋移到东海,强度仍然不很强。14 日 12 时,500 hPa 低涡东移到海参威,强度加深到 552 位势什米,槽后冷平流明显;此时,地面气旋达到成熟阶段,中心气压为 996 hPa; 850 hPa 上,从日本到长江口的锋区十分明显。

在北美背风气旋生成前,1979 年 3 月 21 日 12 时 (GMT), 500 hPa 图上,北美大陆为暖脊,东太平洋上为阻塞高压,北美西海岸为低槽区。22 日 12 时,北美西海岸的高空槽东移,500 hPa 图上,落基山上空出现一条宽广的冷槽,有一 552 位势什米的低涡位于科罗拉多附近,它是一个切断低压;地面图上,科罗拉多附近形成一背风气旋,强度较弱。次日,500 hPa 的低槽东移,并强烈发展,低涡加深了 8 位势什米;地面气旋发展很快,中心气压低于 996 hPa,位于美国中部平原。24 日 12 时,500 hPa 系统减弱,此时,地面气旋移到美国五大湖区域,强度继续加强,中心气压低于 889 hPa,气旋达到成熟阶段。

在 NA 与 EA 发展过程中,两者的天气形势是不同的。EA 的发展是由一个浅槽逐步发展成一个较深的槽,前期冷平流不明显;而 NA 的发展则是一个经向度很大的长波槽从美洲西海岸移过落基山进入北美大陆,高空冷平流很强,EA 的地面气旋发展缓慢,移速较快;而 NA 的高空是切断低压,地面气旋发展很快,移速较慢。

三、垂直结构的差异

对于 EA、NA 的各个发展阶段,通过气旋中心作了各物理量(涡度、垂直速度、纬向温度偏差、相当位温)的剖面图,对比分析两者动力、热力参数垂直结构的差异。

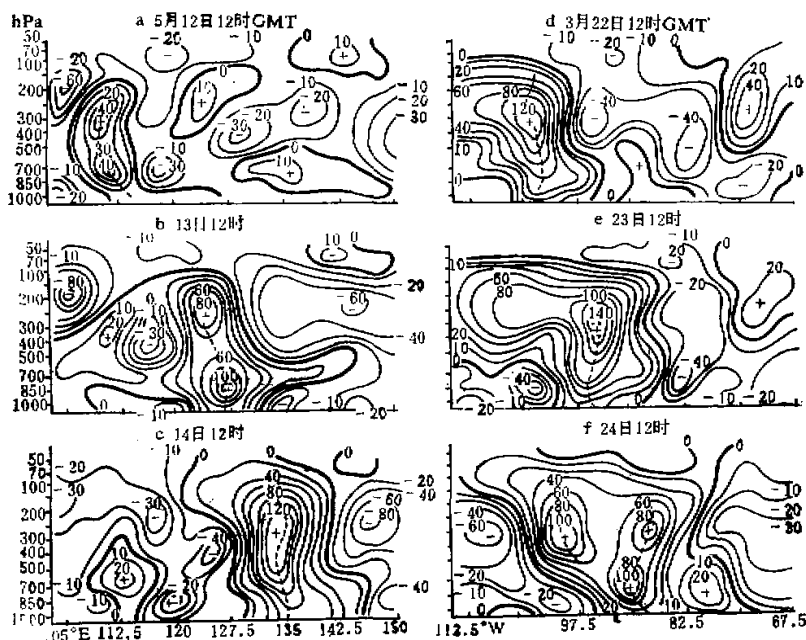


图 1 涡度剖面图

左侧为 EA, 右侧为 NA, 单位: $10^{-4}/s$, 虚线是槽轴

1. 涡度

在 EA、NA 初生时,地面图上的气旋强度差不多,两者都只有一根 1005 hPa 的闭合等压线,但高空涡度差别很大(图 1a 与 1d),NA 的高空涡度是 EA 的三倍。对于 EA,高空涡度与地面气旋强度几乎同时达到最强;而 NA,高空最强的涡度出现在 23 日 12 时,此时,地面气旋强度未达到最强,当地面气旋成熟时,高空涡度反而减弱。两者另一个显著差异是,NA 尽管系统东移,但槽轴的后面,在高空仍然保留着较大的涡度区,这与落基山地形有关,而 EA 没有这种现象。在数值试验中也得到同样的结果,在东亚,高空槽一次东移很清楚,而北美高空系统东移时,在落基山背风坡仍保留一槽线。

由此我们可以解释为什么北美气旋在大陆上迅速发展的原因。当一次高空槽东移时,由于落基山地形影响,往往在 $95^{\circ}W$ 附近高空槽达到最强,再往东移时,高空槽减弱,此时气旋达到成熟阶段。而在东亚,很少有强的高空槽从西面移入我国,它们移入青藏高原后振幅减弱,从高原下坡时槽仍然比较浅,高空槽入海后到了东亚大槽的平均位置才加深,致使江淮气旋只有到了日本才加深发展得较快。

2. 垂直速度

垂直速度的结构(图略),两者差别较大。对于 EA,上升运动与槽轴配合,而对于

NA 的情况,槽轴的前后各有一个上升运动区。NA 的涡度垂直结构表明有两个中心,根据准地转 ω 方程,涡度平流随高度增加引起上升运动,可以解释 NA 的两个上升运动区,槽轴前的上升运动,暖平流也有些作用。

3. 纬向温度偏差

EA 发展前期,整层偏暖(图 2),低层偏暖 $1-2^{\circ}\text{C}$,高层偏暖 6°C ,当 EA 刚入海时,850—400 hPa 为暖性结构,这是因为海洋上感热和水汽输送作用使得降水释放潜热加大。气旋成熟时,700 hPa 以下,温度结构是不对称的,前半部偏暖,后半部偏冷,高层为暖性。EA 入海后,斜压性加大,气旋成熟时具有温带锋面气旋的特征。

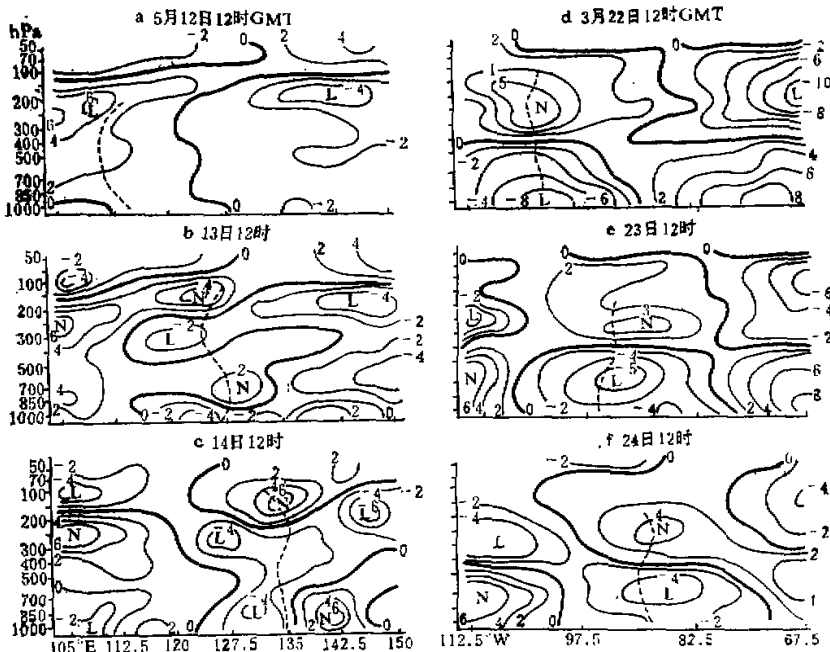


图 2 纬向温度偏差

左侧为 EA,右侧为 NA,单位: $^{\circ}\text{C}$,虚线为槽轴

NA 的热力结构比较简单(图 2),500 hPa 以下是冷性结构,500 hPa 以上是暖性,NA 是切断低压,温度结构是对称的,它是冷性涡旋。

4. 相当位温

为了比较锋面结构的差异,在气旋中心左侧 4 个经度处作 θ_{se} 的垂直剖面图(图略)。对于 EA,5 月 12 日 12 时,在 30°N 附近有 θ_{se} 密集区,对流不稳定区在 20°N 附近;气旋入海后,由于海洋上感热和水汽蒸发作用增强了温度和湿度的对比, θ_{se} 越来越密集,坡度变陡。锋面前大约 10 个纬度都是对流不稳定区,低层暖湿层十分明显,东亚的锋面结

构与典型的极锋结构不相同。对于 NA, 3 月 22 日 12 时, 锋面大约在 37.5°N , 锋前低层 850—700 hPa 有明显的暖湿层, 锋面比较陡, 锋前的对流不稳定区比较狭窄, 以后两次, 锋面移到 22.5°N 附近, 坡度很陡。

四、水汽输送和对流不稳定区分布

1. 水汽输送

我们计算了水汽通量散量 $\nabla \cdot q\vec{V}$ 和水汽通量, 前者从 1000 hPa 积分到 700 hPa, 它的大小表示低层水汽辐合的大小, 后者可以表征水汽输送通量, 也可表征水汽的来源。

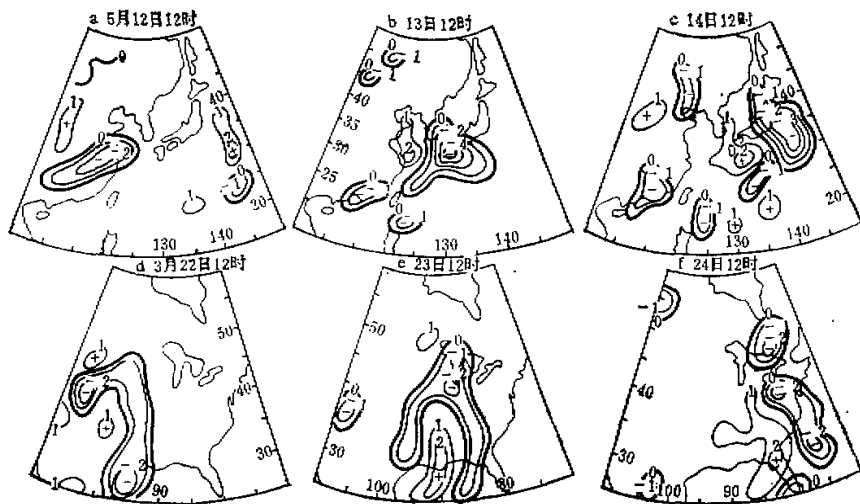


图3 水汽辐合 $\left(\frac{1}{g} \int_{1000}^{700} \nabla \cdot \vec{V} q dp\right)$

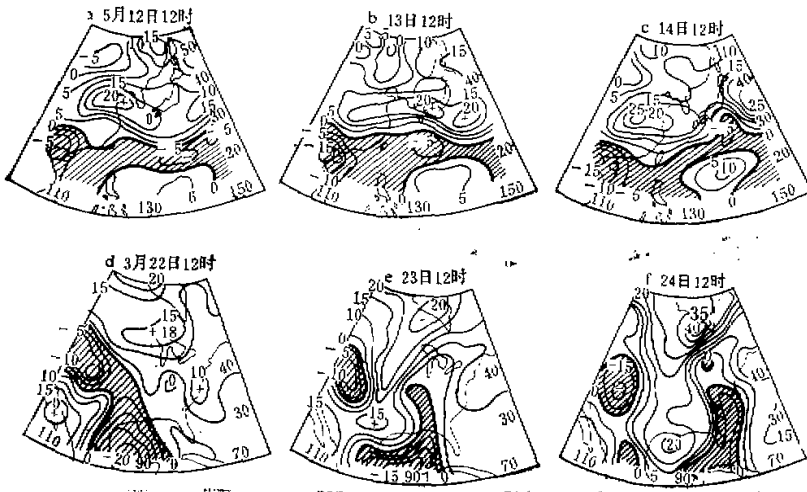
上面为 EA, 下面为 NA, 单位: mm/h

对于 EA (图 3 a. b. c), 水汽辐合与系统配合得很好, 气旋移到海洋上后, 水汽辐合增大, 最大值为 4 毫米/小时。而 NA 的水汽辐合分布 (图 3 d. e. f), 基本上呈南北分布, 且随系统东移, NA 的水汽辐合量只是 EA 的一半, 最大值只有 2 毫米/小时。

由水汽通量图可见 (图略), EA 的水汽来源于南海, 西南气流输送水汽, 数值较大, 最大值为 $285 \text{ 克} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1} \cdot \text{百帕}^{-1}$ 。而 NA 的水汽来源于墨西哥湾, 南风使水汽向北输送, 西风气流不是水汽通道, 这是因为水汽含量大部分作为地形雨降落在落基山脉西坡^[2]。NA 的最大水汽通量为 $141 \text{ 克} \cdot \text{秒}^{-1} \cdot \text{厘米}^{-1} \cdot \text{百帕}^{-1}$, 只是 EA 的一半。

2. 对流不稳定区分布

为了表征大气的不稳定度, 我们计算了两个物理量, 一是相当位温差 ($\Delta\theta_{se}$), 二是理查逊数 (R_i)。

图4 $\Delta\theta_e$ 分布 (500hPa—850hPa)上面为 EA, 下面为 NA, 单位: $^{\circ}\text{C}$, 斜线区为负值区A) $\Delta\theta_e$ 的分布

对于气旋发展的各阶段, 计算了 $\Delta\theta_e$ (500hPa—850hPa) 的分布, 负值区为对流不稳定区。EA 的对流不稳定区成东西带状分布(图 4 a.b.c), 在地面气旋附近, 零线向北推进, 14 日 12 时, 零线向北伸到 35°N 附近, 最大负值为 -8°C 。

NA 的对流不稳定区成南北带状分布(图 4 d.e.f), 负值区从墨西哥湾沿落基山东侧向西伸到俄克拉何马地区, 该地区是美国局地强风暴发生频率最多的地区。从墨西哥湾向北移动的热带海洋气团受落基山脉之阻不能向西扩展, 在落基山以东几百公里范围内, 低空急流把大量高值 θ_e 空气向北输送, 同时, 由于西面高空槽东移, 在这个地区容易产生和释放位势不稳定。

随着地面气旋东移发展, 南北带状的负值区也随之东移, 零值线一直伸到 40°N 附近, 东西向宽度狭窄。但在科罗拉多州附近, 三个时次始终残留着一个不稳定区, 这是落基山脉影响的结果。NA 的最大负值达 -21°C , 强度比 EA 的大一倍多, 最大负值区出现在落基山的背风坡, 而 EA 的最大负值区出现在海洋上。

B) 理查逊数 (Ri)

理查逊数原来是表征湍流发展的特征量, 近年来这个特征量已用来判别对流系统的发展。对于 EA, $Ri \leq 5$ 的区域与地面气旋系统配合得很好, 它能表征出锋面气旋的某种特征, 当气旋移到海上, 出现小范围 $Ri \leq 1$ 的区域。对于 NA, $Ri \leq 5$ 的区域分布呈南北走向, 随着地面气旋东移发展, $Ri \leq 5$ 的区域也跟随东移, 在强对流盛行的俄克拉何马地区, 始终为 $Ri \leq 5$ 的区域。另外, NA 三个时次都出现 $Ri \leq 1$ 的区域, 此区域范围远大于 EA 的。

五、组合正压/斜压不稳定诊断

位涡度的经向梯度变号, 就表明满足正压/斜压不稳定的必要条件^[1], 即:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial y} = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial \bar{u}}{\partial P} \right)$$

令

$$QM = QM1 + QM2$$

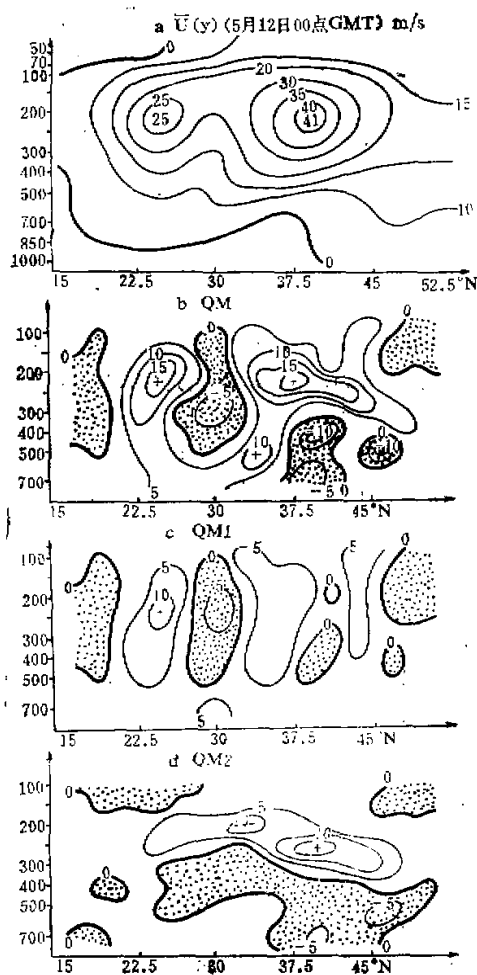


图5 EA (5月12日12时)的位涡梯度
(单位: $10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

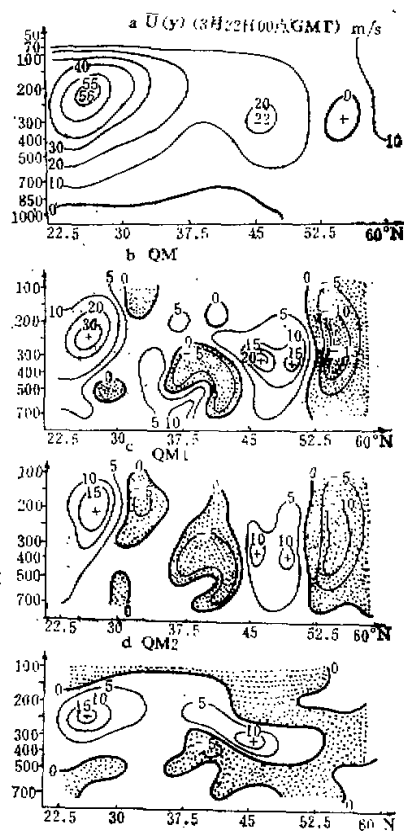


图6 NA (3月22日00时)的位涡梯度
(单位: $10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

$$QM1 = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2}$$

$$QM2 = -\frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial P^2} - f_0 \frac{\partial \bar{u}}{\partial P} \frac{\partial}{\partial P} (\sigma^{-1})$$

$QM1$ 发生变号,表示满足正压不稳定的必要条件。 $QM2$ 是依赖于基本气流的垂直切变,它表示斜压作用。本文利用 FGGE 的资料,纬向宽度取为 20.625 个经距,对地面气旋生成前以及发展各阶段进行了诊断分析。

图 5 是 EA 生成前 12 小时的诊断结果,在 30°N 附近,从 100—500 hPa, QM 为负值(图 5b),负值区的左侧 QM 变号的纬度正是 EA 生成的纬度。在 200 hPa 上青藏高原的东侧(图 5a),有两支急流,南支急流在 25°N 附近,北支急流在 40°N 附近。在南支急流的北侧出现绝对涡度的极值(图 5c),绝对涡度梯度变号的纬度大约在 28°N ,这正是 EA 生成的纬度。而 $QM2$ 的变号纬度在 23°N 和 35°N 附近,可见在 EA 初生时,正压不稳定是主要的。我国预报员早就注意到这样的事实,当南支槽过境时,西南风加大,容易生成江淮气旋。

对 EA 生成后的几个时次作了同样的计算(图略),当气旋移到日本时(14 日 00 时),两支急流在 32°N 附近汇合,在 35°N 附近是 $QM1$ 变号的纬度,层次在 700—100 hPa。在 500 hPa 以下, 37.5°N 附近 $QM2$ 也发生变号,说明 EA 发展后期,是正压、斜压不稳定共同的作用。

NA 生成前(3 月 22 日 00 时),在 37.5°N 附近,300—700 hPa 满足正压/斜压不稳定条件。此时,北美的西风急流位于 25°N 附近(图 6a),在 37.5°N 附近, $QM1$ 与 $QM2$ 都发生了变号,这说明 NA 的初生是正压、斜压不稳定共同作用的结果,扰动能量既来自基本气流动能,也来自有效位能的释放。在 NA 向东北移动发展过程中, $QM1$ 的负值区南北宽度变宽,它与气旋位置对应不好; $QM2$ 发生变号的纬度始终对应着气旋所在的纬度,说明斜压不稳定对 NA 的发生发展起着重要的作用。

六、结 论

从天气学分析我们知道,NA 的发生发展是由于高空阻塞形势崩溃引起的,当北美西海岸高空槽东移到 100°W 附近,由于地形槽迭加,高空槽的涡度达到最大,再往东移高空涡旋减小,地面气旋继续加强,所以北美气旋生成后,东移发展很快,移到美国五大湖区域达到成熟阶段。EA 是高空小槽发展引起的,东亚气旋初生时,高空涡度较小,系统东移时,地面与高空涡度同时增加,低对流层斜压性小,以后增强,低层有暖平流,它类似于 Petterssen (1971)^[9] 总结的 B 类气旋。

NA 的冷平流较强,它是冷性涡旋,热力结构是对称的,500 hPa 以下为冷性,其上为暖性。EA 发展前期,冷平流不明显,移入海后,由于海洋作用增强了斜压性,在气旋成熟时,热力结构是不对称的,低层是半暖半冷,具有温带锋面气旋的特征。

东亚水汽从南海向东北输送,而北美水汽从墨西哥湾向北输送。EA 的水汽辐合量比 NA 的大一倍。EA 的对流不稳定区成东西带状分布,地面气旋移入海后,对流不稳

定加强。NA 的不稳定区是南北分布的,负 $\Delta\theta_{se}$ 值比 EA 大一倍,由于落基山地形的影响,最大负值出现在美国俄克拉何马地区。

组合正压/斜压不稳定诊断表明,EA 初生时,正压不稳定作用是主要的,气旋发展后期是正压、斜压不稳定两者共同的作用。对于 NA,在气旋初生阶段,正压、斜压不稳定两者都有作用,但在气旋发展过程中,起主导作用的是斜压不稳定。

由于资料的限制,本文只选取个例进行对比分析,这难免带有局限性,为此,青藏高原和落基山背风气旋的差异值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Tao S.Y. and Ding Y. H., 1981, Observation evidence of the influence of the Qinghai Xizang Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 62, P. 23-30.
- [2] E. 伯尔门, C. W. 牛顿, 1978, 大气环流系统, 科学出版社.
- [3] 丁一汇, 1984, 现代天气学诊断, 大气物理所.
- [4] Krishnamurti, T.N. 1975, Study of a monsoon depression (1) synoptic structure, *J. Meteor. Soc. Japan*, P. 227-239.
- [5] Petterssen, S., 1971, On the development of extratropical storms, *Quart. Jour. Royal. Met. Soc.*, Vol. 97, P. 457-482.
- [6] 叶笃正、高由禧, 1979, 青藏高原气象学, 科学出版社.