

# 干冷空气活动对 2008 年梅雨降水的作用

张志刚 金荣花 牛若芸 孔 期 秦华锋

(国家气象中心, 北京 100081)

**提 要:** 利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了 2008 年梅汛期暴雨过程中干冷空气侵入对暴雨发生、发展和维持的作用。结果表明: 梅雨期中高纬度环流的演变和调整与暴雨过程密切相关, 亚洲北部阻塞高压(高压脊)的建立和维持, 使得 500hPa 高度上西风锋区南压, 导致干冷空气南下, 极涡活动的异常偏东和加强有助于冷空气向江淮流域输送, 有利于江淮流域暴雨的发展。在江淮流域梅雨期间, 干冷空气的活跃与暴雨过程相对应。干冷空气来源于中高纬度和中高层。干冷空气侵入有利于对流层中高层干层的形成和维持。而且, 干冷空气侵入是梅雨湿度锋形成和维持的一个重要动力和热力原因。在此研究基础上, 归纳出中期预报着眼点, 供实际业务预报参考使用。

**关键词:** 梅汛期 梅雨暴雨 干冷空气侵入 干侵入作用

## Activity of Dry Cold Air and Its Impacts on Meiyu During 2008 Meiyu Period

Zhang Zhigang Jin Ronghua Niu Ruoyun Kong Qi Qin Huafeng

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

**Abstract:** By employing the NCEP/NCAR reanalysis data, the characteristics of the dry cold air activity, the dry cold air intrusion and evolution, as well as its impacts on the torrential rain during the 2008 Meiyu period are diagnosed. It is shown that there exists a close relationship between the evolution of the circulation over the mid-high latitudes and the torrential rain process, and the establishment and maintenance of the blocking anticyclone (pressure ridge) over Northern Asia lead to the southward movement of the westerly frontal zone and the dry cold air. The abnormal eastward movement and the enhancement of the polar cyclone transfer the dry cold air to the Changjiang River and the Huaihe River Basins, thus enhance the torrential rain over that area. It is also revealed that the northerly activities are in

资助项目: 国家气象中心梅雨研究团队资助, 中国气象局新技术推广项目(200501808001)

收稿日期: 2008 年 12 月 31 日; 修定稿日期: 2009 年 3 月 6 日

coherence with the torrential rain process, the dry cold air comes from the mid-high latitudes and the mid-high level. The Changjiang River and the Huaihe River Basins locate in the low level air convergence area. The north wind plays an important role in the enhancement of the convergence in the lower level and the divergence in the upper level. The dry cold air intrusion contributes to the formation and maintenance of the dry level. The dry cold air intrusion is one of the important dynamical and thermal causes for the formation and maintenance of moist front during the Meiyu period. At last, the keys of mid-range forecast are summarized on the basis of these results.

**Key Words:** Meiyu season Meiyu torrential rain dry cold air intrusion impact of dry cold air intrusion

## 引 言

我国气象专家对江淮梅雨暴雨的研究由来已久,取得了很多研究成果<sup>[1-10]</sup>,近 10 年随着气象信息的日益丰富,对梅雨锋及其雨带以及梅雨锋上空间尺度为几百千米的中尺度对流系统的结构和机理的认识又有深入和发展<sup>[5]</sup>,尤其陶诗言等建立的梅雨锋暴雨天气学模型,是对梅雨锋暴雨天气学研究的创新性贡献,构成我国梅雨锋暴雨预报的天气学基础。该梅雨锋暴雨的天气学模型,强调了南海季风涌、西太平洋副热带高压、中高纬冷空气活动和青藏高原东坡中尺度扰动东移的 4 个多尺度天气系统的协同作用时,梅雨锋上出现强暴雨。从中期预报的重点来看,对于副高和低纬度季风活动的认识比较成熟,而且一直在业务中发挥指导作用。而“四大因子”中的高原正涡度和冷空气活动两个因子的有利环流背景以及冷空气对梅雨的贡献研究有待进一步认识。在暴雨过程的研究中,通常人们更强调暖湿气流的作用,对干冷空气的作用重视不够,尽管其作用早就被注意。陶诗言等<sup>[11]</sup>早就指出梅雨气旋的发生发展都与西北方移来的高空冷槽相联系,冷槽将冷空气一次次地带下,成为梅雨期间重要的成员。随着对暴雨研究的深入,干冷空气对暴雨的重要作用逐渐被人们所认识。于

玉斌等<sup>[12]</sup>总结了干侵入对天气系统发生发展的作用。吴国雄<sup>[13]</sup>等分析指出江淮流域暴雨过程湿位涡的重要性。寿绍文等<sup>[14]</sup>分析指出 1991 年的江淮梅雨暴雨过程是具有高湿位涡值的高层冷空气沿等熵面向南下降而加强的。姚秀萍等<sup>[15]</sup>分析了 2003 年干冷空气对梅雨降水的作用。

本文用 NCEP 2.5×2.5 的日平均资料,分析 2008 年梅雨期干冷空气活动的特征、暴雨过程中干冷空气侵入和演变的特征以及干冷空气侵入对暴雨发展和维持的作用。进一步总结归纳江淮梅雨中期预报着眼点,旨在深化对极端降水事件的大气演变过程的理解,提高预报技术水平。

## 1 梅雨期中高纬度环流的演变特征和暴雨过程

大尺度环流形势是暴雨发生发展的背景,尤其对于我国江淮流域的梅雨降水。典型梅雨天气形势的存在对暴雨的维持和发展极为有利<sup>[11]</sup>。2008 年夏季江淮流域降水也不例外。2008 年江淮流域梅雨期从 6 月 7 日开始,23 日出梅。在此期间除了西太平洋副热带高压出现异常之外,中高纬度地区的环流也出现了异常和调整,由此导致了异常的冷空气活动。

携带干冷空气南下的中高纬度系统主要

有阻塞高压(以下简称阻高)和极涡。它们在梅雨期的演变特征也反映了冷空气的活动特征以及与江淮流域暴雨过程的关系。根据中高纬度阻塞高压的分布,以沿 $60^{\circ}\text{N}$ 的500hPa高度场的纬向时间演变图来表征阻高的演变特征(图1a)。从图1a可以看出,6月7—10日,贝加尔湖附近为稳定的高压脊,此时对应与西太平洋副热带高压的西伸和第一场暴雨过程。6月12日, $55^{\circ}\text{N}$ 附近的高压脊东移发展,在雅库茨克地区附近加强为阻塞高压,单阻形势建立,13—14日阻塞高压最强,江淮流域经历了第二次暴雨过程。6月15日在乌拉尔山以东地区有阻高建立,尔后,阻高缓慢东移,同时雅库茨克地区附近的阻高稳定少动,东亚中高纬度出现稳定的双阻形势,在两阻高之间为宽广的低槽区,这一阶段对应着西太平洋副热带高压的又一次西

伸发展期,江淮流域经历了一次强而持久的降水过程。19日开始,两阻高均有加强的趋势,在两阻高之间的低槽明显加深,江淮流域出现了持续性的大暴雨。23日后,乌拉尔山阻高减弱东移,雅库茨克地区附近阻高向西移至贝加尔湖附近,阻挡了冷空气向江淮流域输送,降水减弱,梅雨结束。

可见,江淮梅雨期间中高纬度所对应的环流特征表现为欧亚上空单阻(高压脊)或双阻型的建立和维持,也就是在贝加尔湖附近高压脊的出现,雅库茨克地区附近单阻的出现以及乌拉尔山和雅库茨克地区双阻的出现。

亚洲北部阻塞高压(高压脊)的建立和维持,使得500hPa高度上西风锋区南压,导致冷空气南下,造成中纬度地区频繁的物质和能量交换。尤其是6月16日以后,阻塞高压活动加强,阻塞高压的异常活动通过大气动量和热量的一次次向南频散造成江淮流域的持续性暴雨过程。

以下分析江淮流域降水过程中高纬度的环流演变和调整特征。从500hPa的环流形势(图略)来看,6月7日前,贝加尔湖以西的高压脊缓慢东移,7—10日稳定在贝加尔湖附近(图2a),欧亚中高纬度环流形式为两槽一脊型,雅库茨克地区有高空冷涡发展,我国东北至江淮流域为一深槽,在 $40^{\circ}\text{N}$ 的东亚上空存在明显的冷平流。冷空气从贝加尔湖以东沿雅库茨克冷涡后部南下,到达江淮流域。7日开始江淮流域出现了第一场暴雨过程,2008年的梅雨期由此拉开了序幕。此后随着高压脊的南落,降水区由北逐渐南推到长江一带(图略)。

6月12日开始,中高纬度环流出现了大的调整, $100^{\circ}\text{E}$ 附近的贝加尔湖的阻高逐渐向东移至鄂霍次克海地区,并且发展为阻塞高压,单阻形势建立,与此同时,黑海、里海地区以北的高压脊发展,欧亚中高纬度环流形

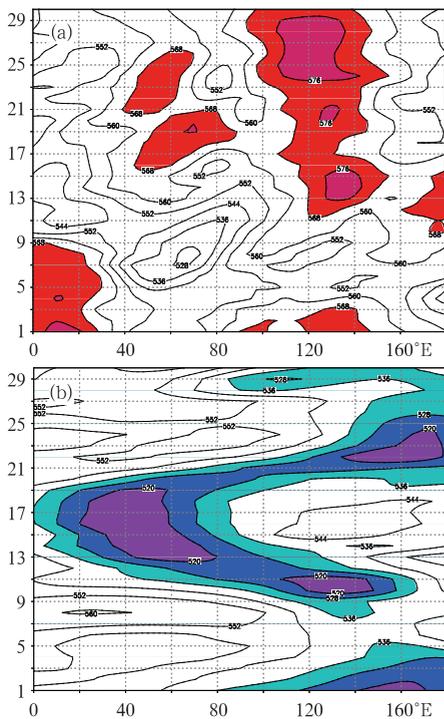


图1 2008年6月500hPa高度场的纬向-时间演变(单位:dgpm)  
(a)沿 $60^{\circ}\text{N}$ ; (b)沿 $80^{\circ}\text{N}$

式为两脊一槽型(图 2b)。中纬度 40°N 附近的东亚地区有强的锋区和冷平流存在。此间,处于中高纬度环流的调整阶段,冷空气的活动也异常活跃。

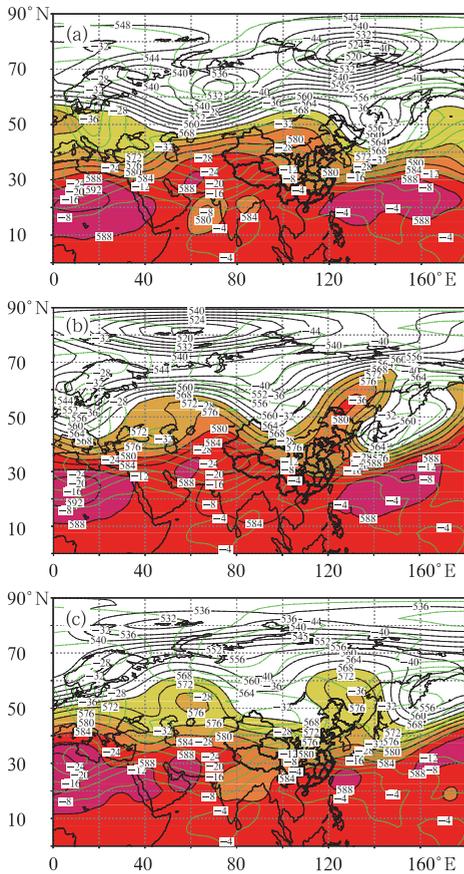


图 2 2003 年梅雨期暴雨过程平均的 500hPa 高度场(细实线,单位:dgpm)、温度场(虚线,单位:°C)分布  
(a) 6 月 7—10 日;(b) 6 月 13—14 日;(c) 6 月 16—23 日

6 月 16 日开始,稳定的双阻形势建立,东面的阻高位于雅库茨克地区,西面阻高位于乌拉尔山附近,也就是典型梅雨的标准形势。中纬度地区西风环流平直,频繁的短波活动为江淮地区提供冷空气条件,锋区压在江淮流域及其以北地区(图 2c)。此时,南面副高较前期有所北抬,尽管副高面积减小,副高脊线已经到 25°N 附近,南方的暖湿气流

势力加强,因此雨带再一次北抬到江淮流域。

极涡作为极地地区的低压系统,对冷空气的贡献也很重要,东半球 6 月极涡的活动出现 2 次活跃过程(图 1b)。第一次活动在 6 月 7—11 日,极涡稳定在 130°E 附近,其主体控制着整个东亚地区的上空,中心高度值降到 520dgpm。第二次在 6 月 19—23 日,极涡在东退的过程中经过东亚地区,中心强度也达到了 520dgpm。由此可见,极涡活动的异常偏东和加强有助于冷空气向江淮流域的输送,造成江淮流域的暴雨过程。

因此在东亚地区中高纬度系统的影响下,与其相对应,江淮流域地区梅雨强降水期间出现了 3 次暴雨过程。图 3a 为 2008 年 6

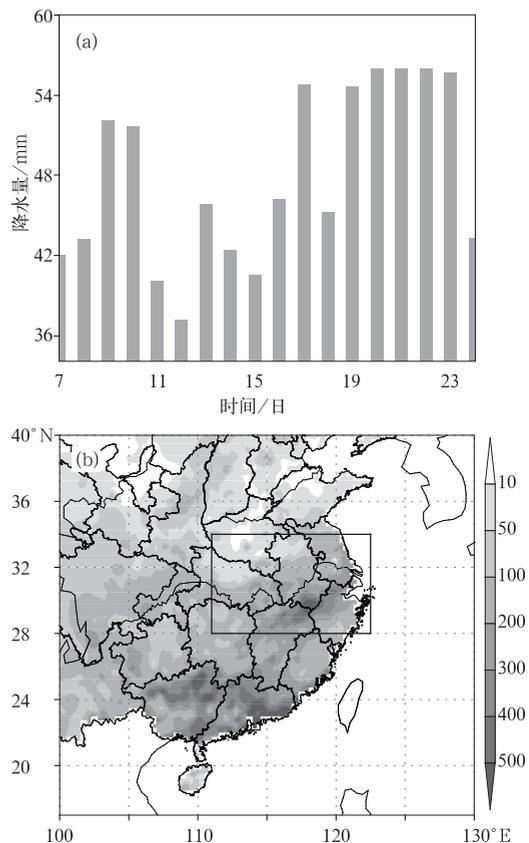


图 3 2003 年 6 月 7 日 00 时至 24 日 00 时(世界时)雨量分布(单位:mm)  
(a)江淮流域(28~34°N,115~120°E)平均的逐日雨量演变;(b)累计雨量

月7—23日江淮流域( $28 \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $115 \sim 120^{\circ} \text{E}$ )平均的逐日雨量演变图。图3b所示为该期间累计降水量的分布,从图上可以看出,主要雨带呈东西分布,位于江西北部、浙江北部以及江苏和安徽两省长江以南地区,总降雨量有 $200 \sim 500 \text{mm}$ ,总降水量最大超过了 $550 \text{mm}$ 。

## 2 干冷空气的活动特征以及对暴雨的作用

### 2.1 干冷空气的活动特征以及与暴雨的关系

暴雨的产生和发展除了与暖湿气流息息相关外,还与南下的干冷空气密不可分。根据文献[15],干冷空气用北风来表示,北风的强弱可以表征干冷空气的活动强弱。

由梅雨期间经向风的纬度时间演变图(图4a、b)上可以看出,2008年6月梅雨期间,江淮流域地区 $30^{\circ} \text{N}$ 以北存在明显的偏北风的活动,其以南暖湿气流活跃。在 $850 \text{hPa}$ 高度上表现为3次北风南下明显加强过程(6月7—10日、6月13—14日、6月19—23日)。南风中心基本上稳定在 $25^{\circ} \text{N}$ 附近,每次北风的南下配合着南风的加强北上,有利于南下的北风与较强的暖湿气流在江淮流域相遇,对应于一次暴雨过程。 $500 \text{hPa}$ 高度上的南北风的演变也存在相似的特征。

江淮梅雨暴雨过程的冷空气不仅来源于中高纬度,而且也来源于对流层高层。从( $27 \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $110 \sim 120^{\circ} \text{E}$ )上空经向风的时空剖面(图4c)可以看出,对流层中低层主要为南风所控制,在其上方北风活跃,每次北风活跃对应于一次暴雨过程,对于入梅的第一场暴雨过程和第三场暴雨过程尤为明显。

因此,江淮流域暴雨过程的冷空气活跃的特征,表现形式既有来自中高纬度的干冷空气南下,也有来自于中高层干冷空气的下

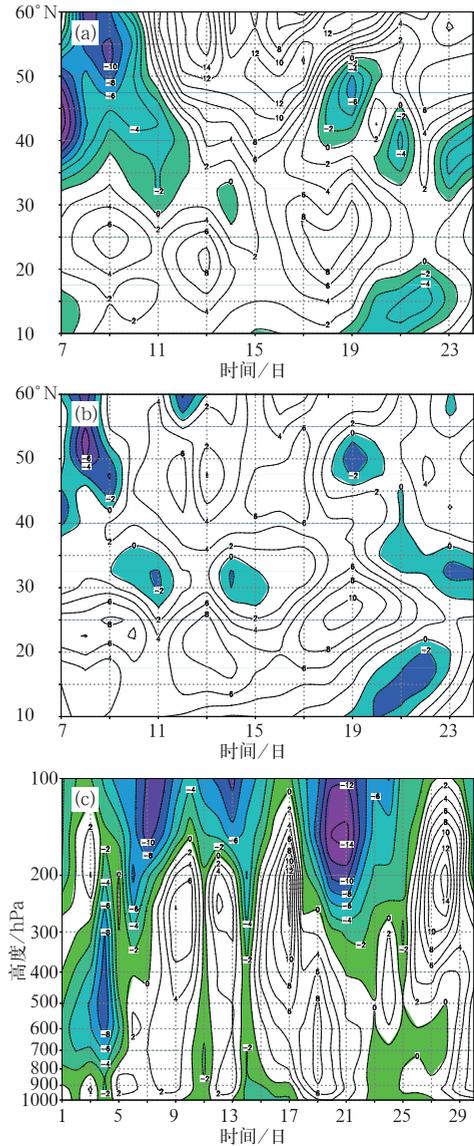


图4 2008年梅雨期间 $500 \text{hPa}$ (a)、 $850 \text{hPa}$ (b)  $110 \sim 120^{\circ} \text{E}$ 平均经向风的纬度-时间演变和 $27 \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $110 \sim 120^{\circ} \text{E}$ 平均经向风的时间-高度剖面(c) 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,阴影区为北风

降。不论方式如何,它们共同的作用均是携带着干冷空气到达江淮流域以北或上空,在此与北上的暖湿气流交汇,产生暴雨。因为此时的江淮流域处于夏季风控制之中,暖湿气流供应充分,并且能够北上到江淮流域地区,在该地区等待冷空气的来临,一旦有冷空气的下降或南下,就能够为暴雨的产生和发

展提供有利的条件<sup>[15]</sup>。

## 2.2 干冷空气侵入的热力作用

江淮流域梅雨期干冷空气的侵入不仅对暴雨的产生发展起着重要的动力作用,还能够调整湿度场的结构,产生热力效应。

考虑到当由温度露点差( $T-T_d$ )界定未饱和空气或干空气时,其阈值取法尚未取得共识,本文根据姚秀萍等<sup>[15]</sup>研究,以温度露点差大于等于  $6^{\circ}\text{C}$  的空气定义为干空气或未饱和的湿空气。由前面的分析可知,干空气源于高层或高纬,因此称之为干冷空气。

从图 5a 可以看出,在梅雨强降水期间有 3 次干冷空气的活跃过程,这 3 次干冷空气的活跃正好对应着 3 次暴雨过程,随着干冷空气活动的加强,暴雨增强;随着干冷空气活动的减弱,暴雨减弱或者间歇。其中入梅后的第一场暴雨过程的干冷空气活动异常活跃,其温度露点差到达  $20^{\circ}\text{C}$ ,在垂直分布上呈上下对称的柱型结构,最干的层次在 500hPa 高度上,以后的 2 次暴雨过程干冷空气的强度均不及此。但是,每次暴雨过程的最干层总是位于 500hPa,干冷空气的强度和持续时间与暴雨过程密切相关。所以,梅雨期间在中层所维持的较为深厚干层对暴雨的发生发展起着重要的作用<sup>[15]</sup>。

从江淮流域对流层不同高度上温度露点差的时间演变曲线(图 5b)也能够看出对流层中层温度露点差最大,超过  $6^{\circ}\text{C}$ ,而对流层低层温度露点差均小于等于  $6^{\circ}\text{C}$ ,对于 19—23 日连续性暴雨过程,对流层中层和高层的温度露点差都在  $6^{\circ}\text{C}$  以上,干层的厚度更加深厚。温度露点差的每个峰值的出现对应着暴雨的发展,随着干冷空气强度的增强,暴雨增幅。

既然干层与暴雨过程关系密切,那么,在暴雨过程中它的演变又是如何?从入梅后连续性暴雨过程(19—23 日)酝酿、产生、发展、

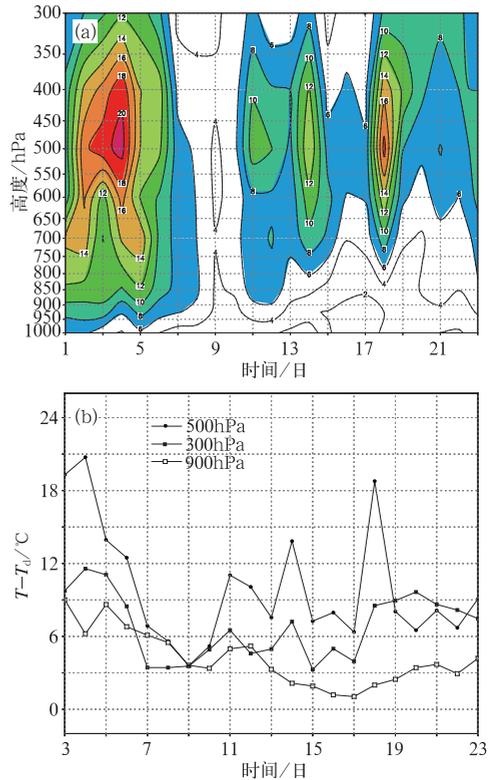


图 5 2008 年 6 月  $28^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均的温度露点差垂直剖面(a)及其时间演变曲线(b)

维持和减弱整个过程的温度露点差的垂直变化情况(图略)来加以说明。总的来说,垂直方向的温度露点差的变化非常迅速。在暴雨酝酿阶段,700hPa 的温度露点差为  $10^{\circ}\text{C}$ ;到暴雨临近时,温度露点差迅速下降到  $4^{\circ}\text{C}$ ,空气达到准饱和;暴雨出现时,在 650hPa 以上形成一个干层,温度露点差最大出现在 500hPa,达到  $20^{\circ}\text{C}$ ;随着暴雨的发展,干层厚度向上收缩,低层饱和层向上扩展,但 500hPa 及其以上层次的温度露点差依然大于  $8^{\circ}\text{C}$ 。暴雨减弱时,温度露点差最大值减小至  $6^{\circ}\text{C}$ 。

干层在暴雨过程中起着重要的作用。在干层最干层次的下方为深厚的对流不稳定层,其上方为对流稳定层,下方的对流不稳定层提供大量的对流不稳定能量,上方的对流稳定层使得不稳定能量得以聚积,由于垂直

方向这种层结的分布,有利于暴雨天气的发生发展<sup>[15]</sup>。

### 2.3 干冷空气侵入与梅雨锋区

在梅雨期间,对流层低层、中层和高层都维持着一假相当位温的密集带,这是梅雨锋区之所在。在锋区以南,为高温高湿的暖湿气流,在其以北为干冷空气(图6)。暖湿气

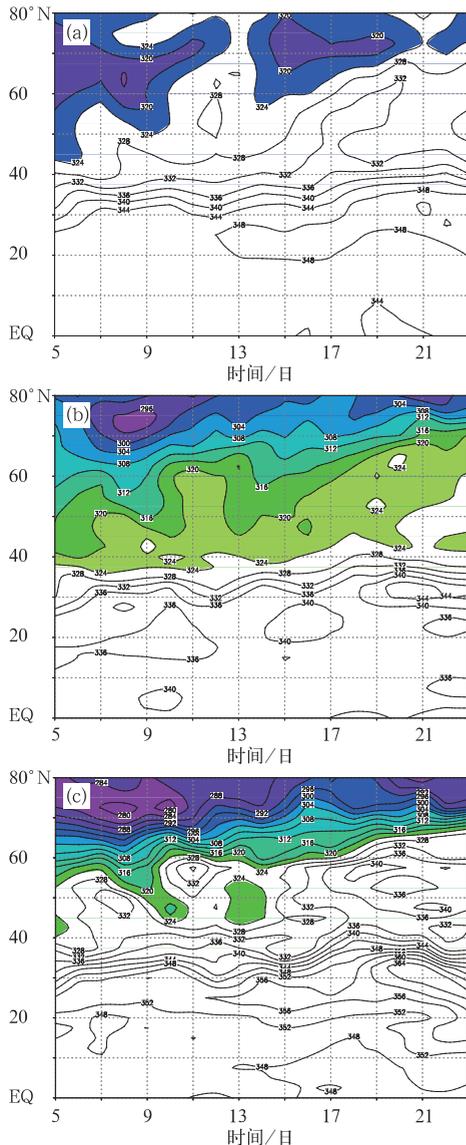


图6 2008年梅雨期间100~130°E范围内平均的假相当位温(单位:K)的纬度-时间演变  
(a)300hPa; (b)500hPa; (c)900hPa

流和干冷空气交汇于江淮流域,促使暴雨的产生和发展。暴雨过程的干冷空气在对流层各个层次上均为从高纬向南的推进过程,当推进到江淮流域时,产生一次暴雨过程。低层和中层的干冷空气的势力都较为强劲,而高层的干冷空气较弱。但是值得注意的是,入梅后的第一场暴雨过程在高纬干冷空气仍然维持着较强的势力。总之,干冷空气侵入对梅雨锋区的形成和发展起重要作用,与2003年梅雨期干冷空气侵入与梅雨锋区的关系基本一致<sup>[15]</sup>。

### 2.4 干冷空气侵入强弱差异的原因

由以上的分析可以看出,在江淮流域的梅雨期中,尽管干冷空气的侵入与暴雨过程有着较好的对应关系,但是干冷空气侵入的强度各异,其中入梅后的第一场暴雨过程中的干冷空气侵入最强,这与其所处的大气环流背景有关。姚秀萍等<sup>[15]</sup>研究表明由于梅雨锋降水的干冷空气的侵入除了与对流层中高层气流的下沉有关外,还与中高纬度气流的南下有关,干冷空气的侵入模式与欧洲气旋发展模式并非完全一致。本文从假相当位温的垂直剖面结构来说明。从图7可以看出,与2003年梅雨暴雨过程<sup>[15]</sup>相似,在30°N附近从高层有一“漏斗状”假相当位温插入到低层,从低层有一假相当位温“反漏斗状”上凸,340K的等假相当位温线上下贯通,干冷空气强盛。

江淮流域低层存在假相当位温的高值中心,为高能区所在。在600hPa高度上,30°N的南北两侧各自存在一个假相当位温的低值中心,从而形成在30°N附近从低层到高层假相当位温的密集带,假相当位温等值线在中低层呈陡立分布<sup>[14]</sup>,有利于此处对流的发展。但是,入梅后的第一场暴雨过程与其后的暴雨过程所不同的是(图7a),除了在30°N北侧存在一锋区外,在其北侧的50°N附近

还存在一条锋区,该冷锋锋区不断给江淮流域补充冷空气。沿 119°E 假相当位温经向垂直剖面平均图(图略)也表明同样的结构,所以在江淮流域一带从西到东 30°N 附近以北均为一锋区,其北 50°N 附近又有一冷锋锋区存在,该冷锋能够不断向南补充冷空气,从而造成江淮流域人梅后的第一场暴雨过程。而之后的两场暴雨 30°N 以北没有明显的冷空气补充。

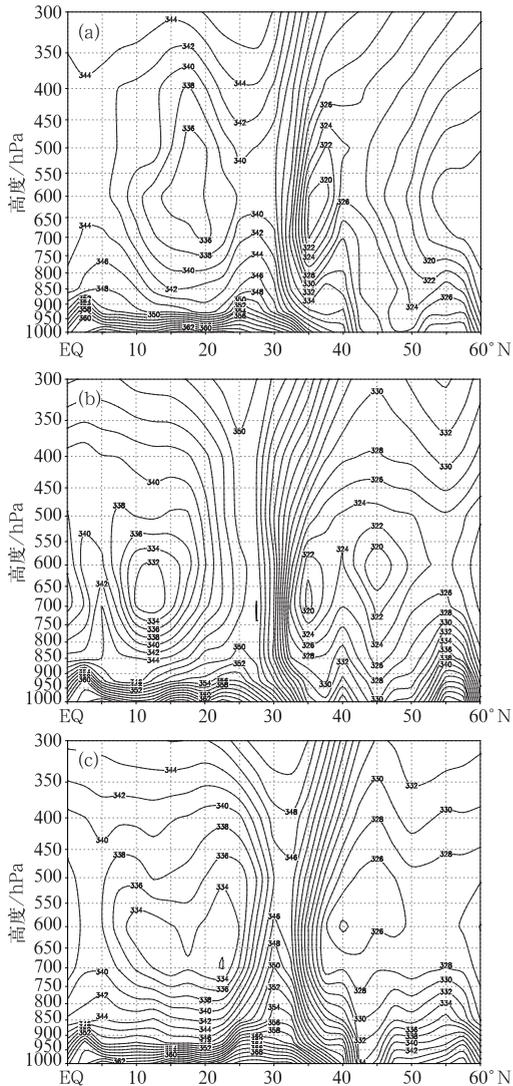


图 7 2008 年梅雨期间沿 115°E 假相当位温经向垂直剖面平均图(单位:K)

(a) 6 月 7—10 日; (b) 6 月 13—14 日; (c) 6 月 19—23 日

因此,梅雨暴雨过程中,江淮流域上空为较强的湿度锋区,该锋区结构特征对江淮流域暴雨起着重要作用。而江淮流域以北的干冷空气是湿度锋形成和维持的一个重要动力和热力原因。

### 3 中期预报着眼点

每年汛期,中央气象台中期预报服务的重点就是对主要雨带位置移动和强度的预报,因为历史上罕见的暴雨致洪灾害都发生在江淮梅雨期间,因此对江淮梅雨的预报服务更是中央气象台中期预报任务的重中之重。通过对 2008 年梅汛期干冷空气活动对梅雨降水作用的分析,结合预报实践经验,可以从中得出如下江淮梅雨暴雨预报的着眼点。

(1) 对于持续性强降水的预报必须抓住大尺度环流关键系统的演变,如阻塞高压(高压脊)以及副热带高压等的调整和演变,这是中期预报技术路线中的基本条件。

(2) 梅雨期,江淮流域处于夏季风的控制之中,暖湿气流供应充分并且能够北上到江淮流域地区,此时要密切关注高纬冷空气的南下和高层冷空气下降。

(3) 对于梅雨期持续性暴雨预报,对流层中层是否能维持深厚干层是关键条件之一。

### 4 结语

(1) 2008 年梅雨期中高纬度环流的演变和调整与雨带的移动密切相关;亚洲北部阻塞高压(高压脊)的建立和维持,使得 500hPa 高度上西风锋区南压,导致冷空气南下;江淮梅雨期间中高纬度所对应的的环流特征表现为欧亚上空单阻(高压脊)或双阻型的建立和维持;极涡活动的异常偏东和加强

有助于冷空气向江淮流域的输送,造成江淮流域的暴雨过程。

(2) 2008年梅雨期存在3次北风活跃阶段,每次北风活跃对应于一次暴雨过程。冷空气活跃的特征表现形式既有来自中高纬度的干冷空气南下,也有来自于中高层干冷空气的下降。

(3) 干冷空气的侵入能够引发干层的形成和维持,干层的存在加强了暴雨过程的对流性不稳定,对暴雨的加强和发展起重要作用。而且,干冷空气侵入是梅雨湿度锋形成和维持的一个重要的动力和热力原因。

(4) 第一场暴雨干冷空气比较强的原因:除了在 $30^{\circ}\text{N}$ 北侧存在一锋区外,在其北侧的 $50^{\circ}\text{N}$ 附近还存在一条锋区,该冷锋锋区不断给江淮流域补充冷空气。

#### 参考文献

- [1] 丁一汇. 1991年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社. 1993:69-106.
- [2] 陶诗言,倪允琪,赵思雄,等. 1998夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京:气象出版社,2001:12-31.
- [3] 周曾奎. 1991年异常梅雨和连续暴雨的环流特征[J]. 气象,1992,18(8):27-32.
- [4] 张欣,周曾奎,邓华军,等. 2000年江淮梅雨的分析  
和中期预报着眼点[J]. 气象,2001,30(7):30-34.
- [5] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报,2006,17(6):690-704.
- [6] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京,气象出版社,1999:49-50.
- [7] 李威,王启祎,王小玲. 北半球阻塞高压实时监测诊断业务系统[J]. 气象,2007,33(4):77-81.
- [8] 张庆云,陶诗言. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响[J]. 气象学报,1998,56(2):199-211.
- [9] 王亚非,宋永加. 1991年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析[J]. 气象学报,1998,58(2):212-223.
- [10] 金荣花,矫梅燕,徐晶,等. 2003年淮河多雨期西太平洋副高活动特征及其成因分析[J]. 热带气象学报,2006,22(1):60-66.
- [11] 陶诗言,赵煜佳,陈晓敏. 中国的梅雨. 东亚季风和  
中国暴雨—庆贺陶诗言院士八十华诞文集[M]. 北京:  
气象出版社,1998. 3-48.
- [12] 于玉斌,姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报,2003,61(6):669-778.
- [13] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓管. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-405.
- [14] 寿绍文,李耀辉,范可. 暴雨中尺度气旋发展的诊断分析[J]. 气象学报,2001,59(6):560-568.
- [15] 姚秀萍,于玉斌. 2003年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. 大气科学,2005,29(6):973-985.
- [16] 金荣花,陈涛,鲍媛媛,等. 2007年梅汛期异常降水的大尺度环流成因分析[J]. 气象,2008,34(4):79-85.