

2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用

姚秀萍^{1, 2, 3} 于玉斌²

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国气象局培训中心, 北京 100081

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料和卫星云图, 分析了 2003 年梅雨期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生、发展和维持的作用, 得到以下结论: 梅雨期中高纬度环流的演变和调整与暴雨过程密切相关, 亚洲北部阻塞高压的建立和维持, 使得 500 hPa 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, 当它南下或下降到达江淮流域以北或上空时, 与北上的暖湿气流交汇, 使得暴雨产生和发展。中低层 30°N 以北的正环流的下沉支是干冷空气的输送“载体”; 江淮流域以北的对流层中低层的北风对淮河流域对流层的形成和发展起着重要作用, 同样, 高层北风所产生的高空辐散叠置于低层辐合区之上, 有利于江淮流域暴雨的发生发展。而且, 干冷空气的侵入有利于干层的形成和维持, 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。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。卫星云图上分析发现, 干冷空气的侵入轨迹为一条明显的暗区, 干冷空气南下侵入到黄河以南后, 分为两支, 其中一支“干侵入 2”从西南方向侵入, 与冷锋云系相互作用, 对暴雨的发生和发展起着关键的作用, 这与 Browning 等强调的“干侵入”不尽相同。

关键词 江淮流域 暴雨 干冷空气侵入 干侵入作用

文章编号 1006-9895(2005)06-0973-13

中图分类号 P458

文献标识码 A

Activity of Dry Cold Air and Its Impacts on Meiyu Rain During 2003 Meiyu Period

YAO Xiu-Ping^{1, 2, 3} and YU Yu-Bin²

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081*

3 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract By employing the NCEP/NCAR reanalysis data and satellite cloud image, 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 2003 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 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 and thus enhance the torrential rain over the area. It is also revealed

收稿日期 2004-09-16, 2005-02-02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40205008

作者简介 姚秀萍, 女, 1967 年出生, 副教授, 目前主要从事暴雨等中尺度天气动力学的研究和教学。E-mail: yaoxp@mail.iap.ac.cn

that the northerly activities are in coherence with the torrential rain process, and the strong dry cold air accompanies the heavy torrential rain. Once the dry cold air originated from the mid-high latitudes and the mid-high level meets the moist warm air over the Changjiang River and the Huaihe River basins, the torrential rain develops. The descending air branch of the direct circulation to the north of 30° N is the main carrier of the dry cold air. The northerly in the mid-low level over the north of the Changjiang River and the Huaihe River basins plays an important role in the formation and the development of the convective layer, meanwhile, the northerly in the mid-high level also acts as a significant part in the enhancement of the divergence in the upper level. The convergence in the lower level and the divergence in the upper level are in favor of the development of the torrential rain. The results demonstrate that the dry cold air intrusion contributes to the formation and maintenance of the dry level, which enhances the convective instability during the development of the torrential rain process. 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. From the cloud image, it can be found that the dry cold air intrusion is an obvious dark zone and it separates into two branches while intruding into the south of the Yellow River, and one of them named as “the dry cold air intrusion 2” intrudes from southwest and interacts with the cold front cloud system, which plays a key role in the development of the torrential rain, however, it is not the same concept as the “dry intrusion” emphasized by Browning (reference).

Key words the Changjiang River and the Huaihe River basins, torrential rain, dry cold air intrusion, impact of dry cold air intrusion

1 引言

2003年7月,在江淮流域出现了自1954年以来最大的洪水,给江淮流域造成了重大的灾害,给人民生命财产构成了严重的威胁。

江淮流域暴雨的研究一直倍受我国气象专家的关注。对1991年和1998年江淮流域暴雨的研究已做了大量的工作,也得出了许多有意义的结论^[1, 2]。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^[3]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。近年来的研究也越来越发现干冷空气对暴雨所起的重要作用。于玉斌等^[4]总结了干侵入对天气系统发生发展的作用。吴国雄等^[5]的分析指出江淮流域暴雨过程湿位涡的重要性。寿绍文等^[6]的分析指出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。于玉斌等^[7]的分析指出冷空气对华北特大台风暴雨的增幅作用。高坤等^[8]也分析了1999年长江中下游梅雨锋低涡扰动的冷空气的来源及其对湿斜压锋区形成的作用。

在欧洲,气象学家认为干侵入是指从对流层顶附近下沉至低层的干空气。早在20世纪60年代,

Danielsen^[9]曾绘制干侵入气流的三维结构图。Browning等^[10~12]指出在温带气旋的生成和发展、爆发性气旋的快速发展、锋面降水结构分布以及演变特征等方面均与干侵入有密切的关系。Browning和Roberts^[13]的研究揭示了当干侵入接近地面冷锋时,能够产生不同类型的锋面。Spencer和Stensrud^[14]对干冷空气在暴雨发展中的作用进行的数值模拟表明,采用考虑干冷空气作用的滞后下曳气流对流参数化方案能够更好地模拟出暴雨过程,说明干冷空气在暴雨发展中所起的作用。

本文用基本资料(NCEP $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的日平均资料)和卫星云图,分析2003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。

2 梅雨期中高纬度环流的演变和调整及其暴雨过程

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^[15]。2003年夏季江淮流域降水也不例外。2003年江淮流域梅雨期从6月21日开始,最强降水期间出现在6月下旬到7月上旬。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。

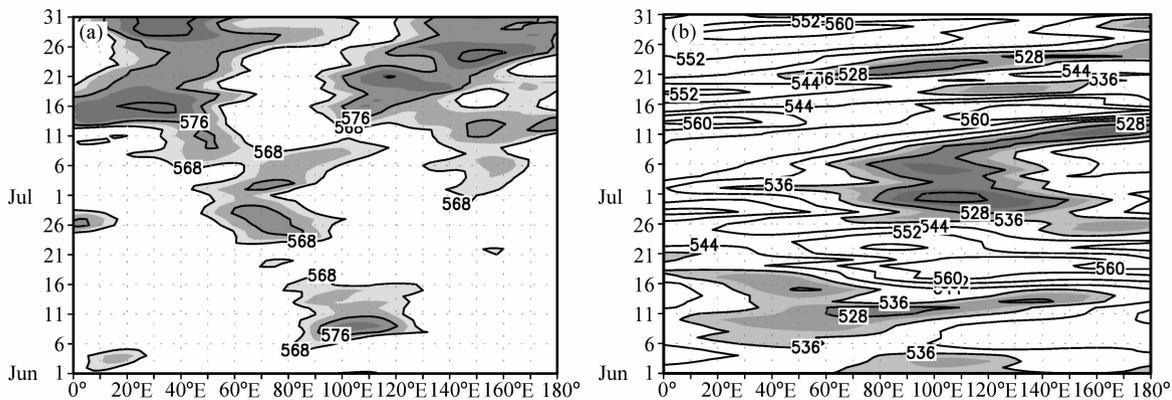


图1 2003年6~7月500 hPa高度场的纬向-时间演变(单位: dagpm): (a) 沿60°N; (b) 沿80°N
 Fig. 1 The longitude-time cross section for 500-hPa height from Jun to Jul 2003 along (a) 60°N and (b) 80°N (units: dagpm)

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°N的500 hPa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月第二候阻高(图中阴影区)在贝加尔湖以北地区建立,至6月16日一直稳定少动,此时东半球为单阻型。6月23日,在乌拉尔山以东地区又有阻高重建,此时对应于西太平洋副热带高压的西伸和第一次大暴雨过程。尔后,阻高逐渐西移,至7月上旬开始东移,同时在鄂霍次克海附近阻高开始建立,东亚中高纬度出现稳定的双阻形势,在两阻高之间为低槽区,这一阶段对应着西太平洋副热带高压的西伸发展期,江淮流域经历了一次强而持久的降水过程。7月中旬开始,两阻高均向西移动,主体位于30°E和鄂霍次克海附近,在乌拉尔山附近为一深槽发展。

可见,江淮流域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或双阻型的建立和维持,即在乌拉尔山附近单阻的出现或在乌拉尔山以东和鄂霍次克海双阻的出现。

亚洲北部阻塞高压的建立和维持,使得500 hPa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的交换。尤其是6月20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500 hPa的环流形势(逐日的环流形势,图略)来看,6月21日,贝加尔湖以西(70°N, 85°E)的阻高在前期衰减之后重新建立,22~26日逐渐发展成为一典型的阻高,并逐渐南落,26日南落到了62°N附近,该期间500 hPa高度上的平均环流(图2a)为明显的“Ω”流型分布,阻高位于(66°N, 85°E)附近,阻高东部80°E~120°E范围内的贝加尔湖附近为横槽,在中纬度50°N附近的西风带被分流为南北两支,南支位于40°N附近,北支在阻高东部的横槽的引导下与南支西风在80°E以东汇合。在40°N的东亚上空存在明显的冷平流。21日开始江淮流域出现了第一场暴雨过程,2003年的梅雨期由此拉开了序幕。此后随着阻高的南落,降水区由北逐渐南推到长江一带(逐日降水分布图略)。

6月27日开始,中高纬度环流出现了大的调整,80°E附近的贝加尔湖以西的阻高逐渐向西移动至65°E(图2b),同时也南压到60°N,鄂霍次克海地区的高压脊发展,双阻形势建立。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。

在乌拉尔山附近的阻高于7月2日衰减为高压脊,在中心位于110°E附近强大的极涡控制下,中高纬度地区形成了明显的两脊一槽的分布形势,鄂霍次克海的高压发展强盛(图2c),北方的冷空气随着贝加尔湖以西阻高的减弱而减弱,此时,副高北抬,南方的暖湿气流势力加强,因此,雨带再次北抬到江淮流域。随着极涡以南槽线不断地向西北东

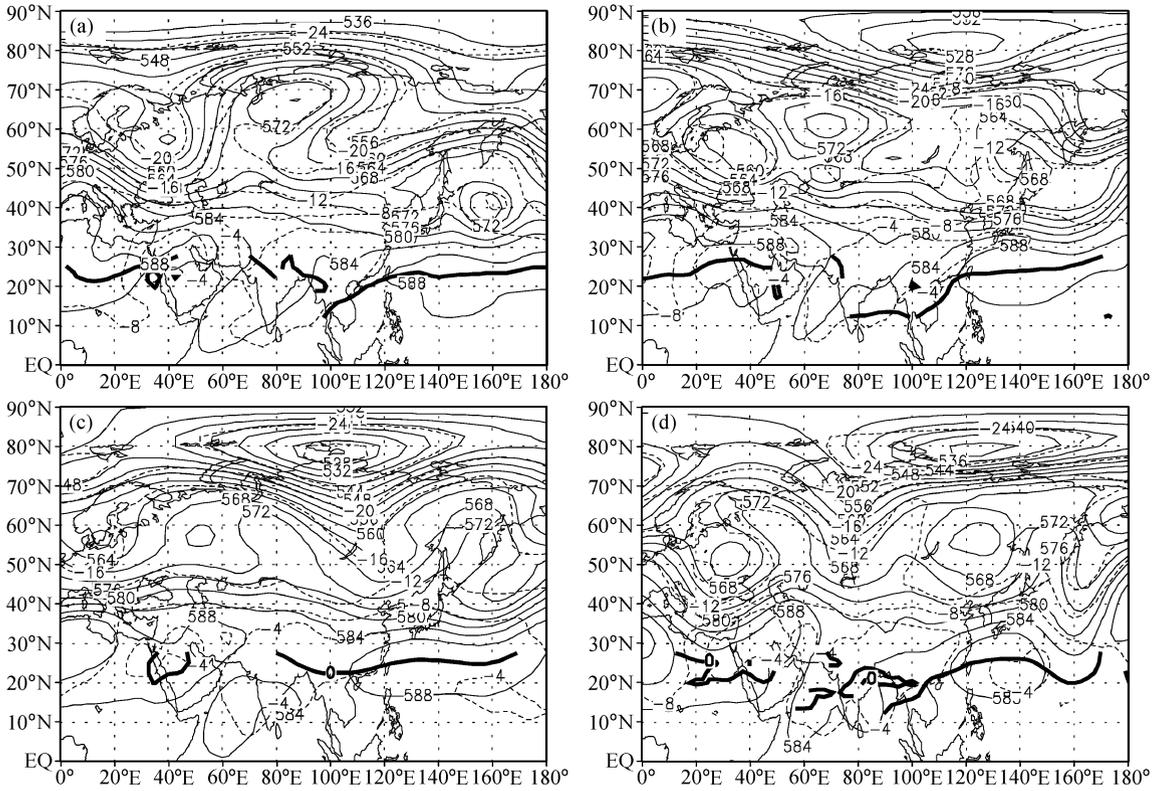


图 2 2003 年梅雨期暴雨过程平均的 500 hPa 高度场(细实线, 单位: dagpm)、温度场(虚线, 单位: °C)以及副热带高压脊线(粗实线)分布: (a) 6 月 22~26 日; (b) 6 月 27~29 日; (c) 7 月 2~6 日; (d) 7 月 8~11 日

Fig. 2 The pattern of averaged height (thin solid line, units: dagpm), temperature(dashed line, units: °C) and subtropical anticyclone ridge line (thick solid line) for the heavy rain during the Meiyu period of 2003; (a) 22-26 Jun; (b) 27-29 Jun; (c) 2-6 Jul; (d) 8-11 Jul

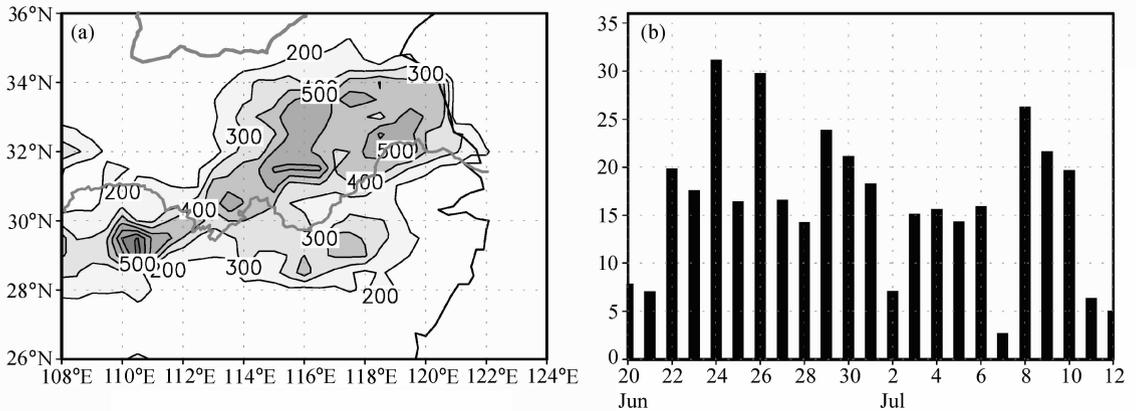


图 3 2003 年 6 月 22 日 0000 UTC~7 月 12 日 0000 UTC 雨量分布(单位: mm): (a) 累计雨量; (b) 江淮流域(28°N~34°N, 115°E~120°E)平均的逐日雨量演变

Fig. 3 The precipitation pattern during 22 Jun-12 Jul 2003 (units: mm): (a) Total precipitation; (b) daily precipitation averaged over the Changjiang River and Huaihe River basins (28°N-34°N, 115°E-120°E)

南方向呈逆时针方向倾斜, 由极涡向南的冷空气输送路径也呈逆时针方向变化, 使得 7 月 3~7 日雨带向东移且逐渐减弱。

中心位于 110°E 附近强大的极涡在 7 月 8 日开始出现东退, 11 日位于 160°E 附近, 从 8~11 日的平均环流场(图 2d)来看, 极涡中心处于 130°E 附

近,鄂霍次克海的高压坝建立,北支锋区再次南压,北方冷空气再次南下,江淮流域出现又一次的强降水过程。

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 6~7 月极涡的活动出现 3 次活跃过程(图 1b),分别在 6 月中旬、6 月下旬~7 月上旬以及 7 月中旬。尤其在 6 月下旬~7 月上旬极涡一直稳定在 100°E 附近,其主体控制着整个东亚地区的上空,极涡增强,中心高度值降到 524 dagpm。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。

所以在江淮流域以北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 4 次暴雨过程,图 3b 为 2003 年 6 月 20 日~7 月 12 日江淮流域(28°N~34°N, 115°E~120°E)平均的逐日雨量演变图。图 3a 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,江淮流域内的总降水量一般在 200 mm 以上,合肥及周边地区达到 400~600 mm,总降水量最大超过了 700 mm。

3 干冷空气的活动及其对暴雨过程的作用

3.1 干冷空气的活动特征及其与暴雨的关系

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。在本文中,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。

从梅雨期间经向风的纬度时间演变图(图 4a、b)上可以看出,6 月下旬~7 月上旬梅雨期间,江淮流域地区 30°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 hPa 高度上(图 4b)表现为 4 次北风南下明显加强过程[6 月 20~24 日、6 月 27~29 日、7 月 1~6 日和 7 月 8~10 日(见图中阴影区)]。南风中心基本上稳定在 25°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 hPa 高度上的南北风的演变(图 4a)也存在相似的特征。

对照高低层北风的演变特征(图 4a、b)还可以发现,在 4 次干冷空气的活动中存在差异。对于入梅的第一场暴雨过程而言,500 hPa(图 4a)和

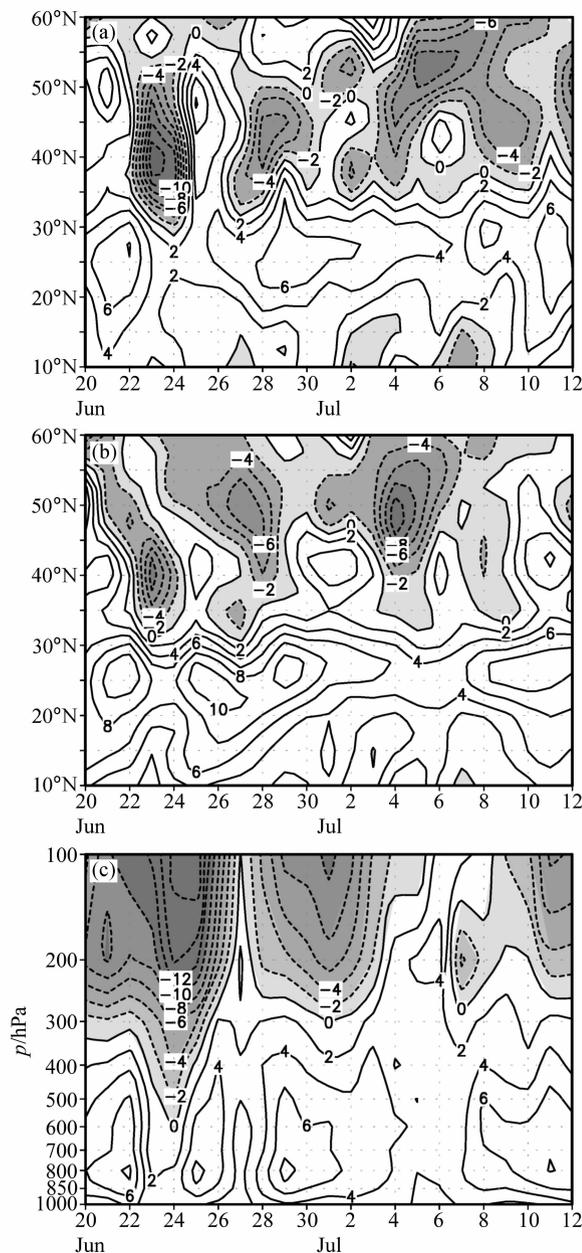


图 4 (a、b) 2003 年梅雨期间 110°E~120°E 范围内平均经向风的纬度-时间演变: (a) 500 hPa, (b) 850 hPa; (c) 2003 年梅雨期间(27°N~34°N, 110°E~120°E) 范围内平均经向风的时间-高度剖面。单位: m/s, 阴影区为北风

Fig. 4 (a, b) The latitude - time cross section for meridional wind averaged over 110°E - 120°E at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa during the Meiyu period of 2003; (c) the height - time cross section for meridional wind averaged over (27°N - 34°N, 110°E - 120°E) during the Meiyu period of 2003. Units: m/s, the shaded region shows northerly

850 hPa(图 4b)高度上北风的最大风速中心处于同一纬度上,并且北风风速随高度降低而逐渐减小;

对于 6 月 27~29 日的暴雨过程,从 500 hPa 到 850 hPa 北风的最大风速中心向北倾斜,风速也逐渐减小;对于 7 月 1~6 日的暴雨过程,从 500 hPa 到 850 hPa 最大北风风速中心略向南倾,但风速增大。总之,对于梅雨期间的不同暴雨过程,干冷空气的活动表现出一定的差异,较为复杂。从中高层到低层北风最大风速中心有向北倾、垂直(如 6 月 20~24 日的暴雨过程)和南倾三种情形,其风速大小随高度的变化有减弱和增强两种情形。不过,梅雨期间干冷空气的侵入均可以来自对流层不同的高度,从高纬南下与暖湿气流汇合于江淮流域上空。

江淮流域暴雨过程的冷空气除了来源于中高纬度外,来源于对流层高层的干冷空气也不可忽视。从(27°N~34°N, 110°E~120°E)上空经向风的时空剖面(图 4c)可以看出,对流层中低层为南风所控制,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尤为明显。

所以,江淮流域暴雨过程的冷空气活跃的特征

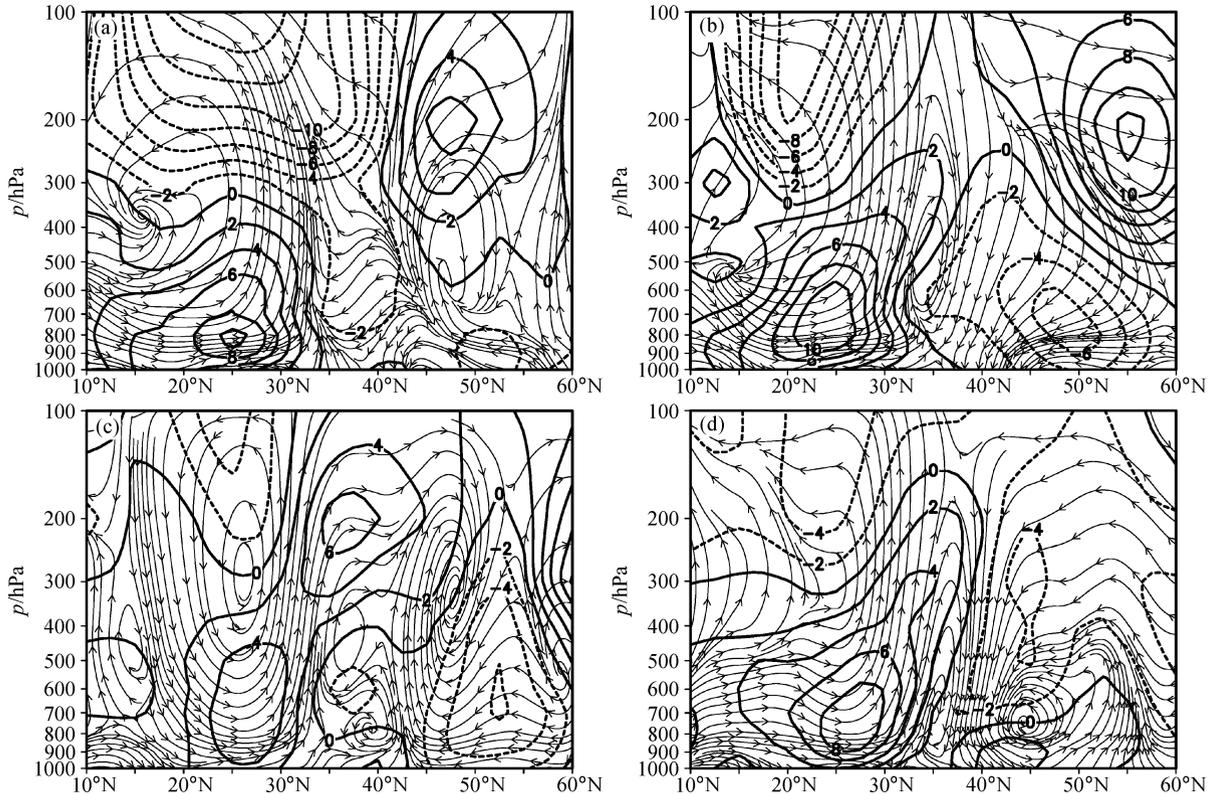


图 5 沿 115°E 的经向环流和经向风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的经向垂直剖面平均图: (a) 6 月 22~26 日; (b) 6 月 27~29 日; (c) 7 月 2~7 日; (d) 7 月 8~11 日。粗虚线为北风,粗实线为南风

Fig. 5 The meridional vertical cross section for the meridional circulation and the meridional wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 115°E: (a) 22-26 Jun; (b) 27-29 Jun; (c) 2-6 Jul; (d) 8-11 Jul. The dashed line show northerly, and the thick solid line shows southerly

表现各异,除了来自中高纬度的干冷空气南下外,在中高层也存在干冷空气的下降。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,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。

3.2 与干冷空气侵入相伴的三维流场结构

为了进一步分析干冷空气侵入的动力机制,沿 115°E 作经向流场的剖面图(图 5)。对于入梅后第一场暴雨过程(图 5a),江淮流域地区为一支很强的上升气流所控制,该上升气流主要来自中心位于 15°N 附近的热力间接环流(或称反环流)的上升支,在其北侧 48°N 附近的 500 hPa 高度上有一热力直接环流(或称正环流),该正环流的下沉支在 700 hPa 高度附近与其北侧南下的偏北气流汇合后向南并且上升,到 40°N 处 400 hPa 以下整层下沉向南

运动,与来自 30°N 以南的暖湿气流相遇于江淮流域,在此形成很强的辐合上升运动,有利于暴雨的发展加强。

对于6月27~29日的暴雨过程(图5b),位于500 hPa高度上的正环流携带高层的干冷空气下沉到700 hPa后与南下的偏北气流合并继续向南到达江淮流域,与北上的暖湿气流汇合。总之,江淮流域地区位于 30°N 以北的正环流和以南的反环流的上升支中,有利于江淮流域暴雨过程的产生和发展。

7月2~7日暴雨过程(图5c),在 25°N 附近反环流中心升高到300 hPa附近,该反环流从低纬携带暖湿气流北上进入江淮流域,与之对峙的正环流的下沉支携带干冷空气从中高层下沉和从中高纬南下,到700 hPa高度与南下的偏北气流汇合继续南下进入江淮流域。此时,江淮流域处于冷暖气流的交汇处,低层辐合产生上升运动,有利于降水的发生和发展。

7月8~11日暴雨过程中(图5d), 30°N 以北的正环流中心位于650 hPa上,其北 45°N 处的低层还有一个反环流中心, 30°N 以南的偏南风从低纬低层携带水汽北上到 30°N 附近, 30°N 以北的正环流与其北侧的反环流的下沉支从高纬下沉携带着干冷空气进入到 30°N 附近,冷暖气流交汇于江淮流域,暴雨得以产生和发展。

同样,从 117.5°E 和 120°E 的经向环流场也揭示了类似的结果(图略)。

总之,从2003年梅雨期暴雨过程的经向环流分析表明,江淮流域总是位于低层的辐合区中,辐合的气流源于由 30°N 以南反环流携带的北上暖湿气流和其北侧由正环流的下沉支携带的下传南下的干冷空气。这两支性质迥异的气流在江淮流域汇合,产生上升运动,有利于暴雨的形成和发展。

可见,中低层 30°N 以北的正环流的下沉支是干冷空气的输送“载体”。

3.3 干冷空气侵入与对流的形成和发展

江淮流域梅雨期降水区中存在冷暖气流之间的相互作用,这种作用有利于垂直方向深厚对流层的形成和发展,有助于暴雨的发展。

从整个梅雨期间沿 115°E 平均的经向风的垂直分布(图略)来看,在江淮流域存在南北风从低层到中层明显交汇,低层南北风中心位于800 hPa附

近,到了高层南北风的位置进行了调换,北侧为北风,南侧为南风,出现南北风的辐散,辐散区偏离低层辐合区向北5个纬度左右。

对于入梅的第一场暴雨过程(图5a),低层800 hPa附近的 25°N 附近有一南风中心,随着高度的增加,南风逐渐减弱,北风逐渐加强,形成高层强劲的北风中心,北风向低层伸长与位于 55°N 处的低层北风中心打通,形成了从低层到高层贯通的北风区。400 hPa以下南北风的分界线在 34°N 附近,且南风风速的等值线在 30°N 附近呈垂直向上分布,所以在江淮流域中,不但存在南北风风向的辐合,而且还存在偏南风的风速的辐合。江淮流域南北风的辐合可以达到400 hPa高度上,这种深厚的辐合区的存在,使得上升气流加强,对降水的发展十分有利。同样,在300 hPa以上的高层,降水区以北5个纬距处存在明显的高空辐散,有利于中低层辐合区的维持和发展。

6月27~29日经向风的垂直分布(图5b)具有类似的特征,低层南北风中心在800 hPa对峙,400 hPa以下存在明显的深厚辐合区,400 hPa以上,在江淮流域的高层也出现南北风辐散的情形,所以低层的辐合、高层的辐散也有利于降水。

从7月2~7日经向风的垂直分布(图5c)可以看出, 30°N 附近从低层到高层有一上下贯通的南风区,其轴线随高度向北倾斜,在南风区南北两侧的高层和低层分别为一北风区。深厚辐合区到达500 hPa高度上。

在7月8~11日经向风的垂直分布图(图5d)上,江淮流域300 hPa以下存在着明显的深厚辐合区,辐合区的轴线向北倾斜,但是高层没有辐散气流的配置。

在 117.5°E 和 120°E 的经向风的垂直分布图(图略)上也可揭示出同样的结果。

总之,在梅雨期间,江淮流域一带低层以南为偏南风所控制,以北为偏北风所主宰,其高层的南北风配置恰好相反,在中低层存在深厚的南北风风向和风速辐合区,其高层叠加着辐散区。所以,有利于江淮流域暴雨的发生发展。因此,在暴雨过程中,北风起着加强中低层辐合和中高层辐散的重要作用。而北风主要是源于江淮流域以北的对流层中低层、江淮流域以南的中高层。

3.4 干冷空气侵入对暴雨过程的热力作用

江淮流域梅雨期干冷空气的侵入对暴雨的产生发展起着重要的动力作用,除此之外,它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,本文暂且以温度露点差大于等于 6°C 的空气定义为干空气或未饱和的湿空气。梅雨期间江淮流域上空湿度场的垂直分布的演变情况从图 6a 中可以揭示出。同时,从前面的分析可知,干空气源于高层或高纬,所以称之为干冷空气。

从图 6a 可以看出,在梅雨强降水期间有 4 次干冷空气的活跃过程,这 4 次干冷空气的活跃正好对应着暴雨过程,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 22°C ,在垂直分布上呈上下对称的柱型结构,最干的层次在 600 hPa 高度上,以后的 3 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 $650\sim 450$ hPa 之间,干冷空气的强度与暴雨过程密切相关;在 350 hPa 以上和 900 hPa 以下均存在饱和状态的湿层,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。

图 6b 的假相当位温的时空演变图也同样说明了类似的事实。

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 6c)也能够看出对流层中层温度露点差最大,超过 6°C ,而对流层高层和低层温度露点差均小于等于 6°C 。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。

显然,暴雨过程中在对流层中层存在一层深厚的干层,但是,不同的暴雨过程干层的厚度和强度都存在差别。这从温度露点差的垂直廓线上可以进一步说明这一点。图 6d、e 分别为 6 月 24 日和 7 月 4 日的情形,从垂直廓线上可以看出,干层明显存在于对流层中层的 $850\sim 400$ hPa 之间,为单峰结构,干层上下方均为饱和的湿层,前者干层较强,最大温度露点差达到 24°C ,后者才 9°C ,前者最干层位于 600 hPa,后者位于 500 hPa。

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?从入梅后第一场暴雨过程酝酿、产生、发展、维持和减弱整个过程的温度露点差的垂直演变情况(图略)来加以说明。总的来说,垂直方向上的温度露点差的变化非常迅速。在暴雨酝酿阶段,700 hPa 的温度露点差为 17°C ;到暴雨临近时,温度露点差迅速下降到 3°C ,空气达到准饱和;暴雨出现时,在 $800\sim 400$ hPa 之间形成一个干层,温度露点差最大出现在 500 hPa,达到 19°C ,干层上方为湿层;随着暴雨的发展,干层厚度向上下扩展,温度露点差最大值达到 24°C ,其所在层次降低到 600 hPa;暴雨减弱时,干层厚度收缩,温度露点差最大值减小。

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,下层的对流不稳定层提供大量的对流不稳定能量,上层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,因而有利于暴雨天气的发生发展。

干冷空气的侵入能够引发干层的形成和维持,起着降温和降湿的双重作用,同时,干层的存在加强了暴雨过程的对流性不稳定性,对暴雨的加强和发展作用不可低估。

以上分析均表明了干冷空气侵入对暴雨过程所产生的有利的热力效应。

3.5 干冷空气侵入与梅雨锋区

从梅雨期间 $100^{\circ}\text{E}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 范围内平均的假相当位温的时间演变图(图 7)上可以看出,在梅雨期间,在对流层低层、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(图中的阴影区)。暖湿气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。

3.6 干冷空气侵入强度各异的原因

从以上的分析表明,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。

干侵入是指从对流层顶附近下沉至低层的干空气。图 8a 为 Danielsen^[9]所绘制的干侵入气流的三维结构, 图中揭示了干空气自对流层顶折叠附近呈

扇状下沉至地面冷锋后的轨迹, “干侵入”可指图中的整个干气流。它在卫星云图(红外云图和水汽图像)中表现为“干裂缝”(干裂缝是指处于极锋云带和云头之间的相对少云区)或暗区(图 8a、b)。

Browning 等^[10、11]的研究表明, 在气旋的发展

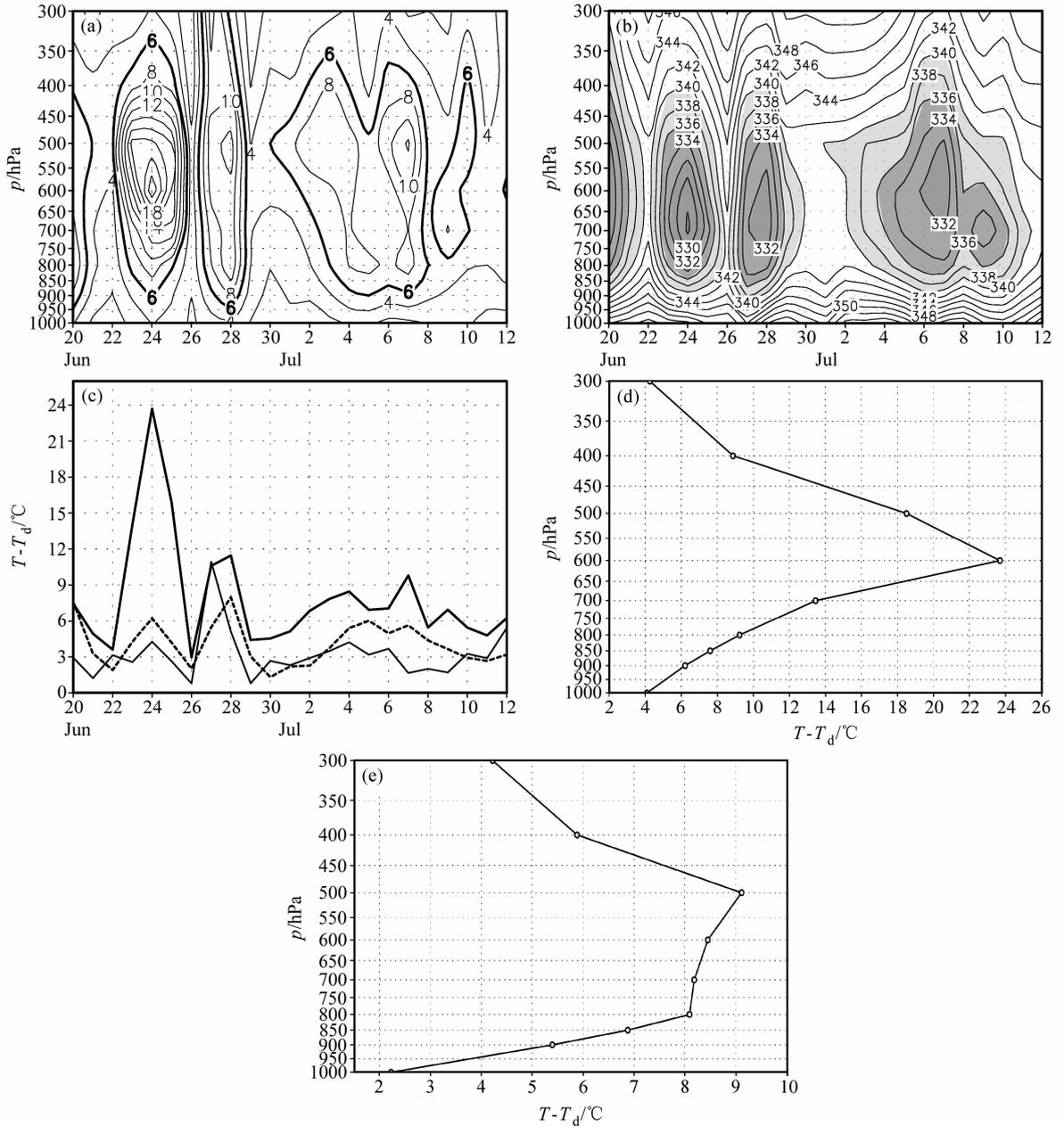


图 6 (a、b)(28°N~35°N, 110°E~120°E)范围内平均的温度露点差(a, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和假相当位温 θ_{se} (b, 单位: K)的时空演变; (c) 温度露点差的时间演变曲线(粗实线: 600 hPa, 细实线: 900 hPa, 虚线: 300 hPa); (d、e) 2003 年 6 月 24 日(d)及 7 月 4 日(e)温度露点差的垂直分布廓线

Fig. 6 (a, b) The spatial-temporal cross section of (a) the difference between temperature and dew-point ($T - T_d$, units: $^{\circ}\text{C}$) and (b) θ_{se} (units: K) averaged over ($28^{\circ}\text{N} - 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{E}$); (c) $T - T_d$ in the different levels of the troposphere (thick solid line: 600 hPa, thin solid line: 900 hPa, dashed line: 300 hPa); (d, e) the vertical distribution of $T - T_d$ on (d) 24 Jun and (e) 4 Jul 2003

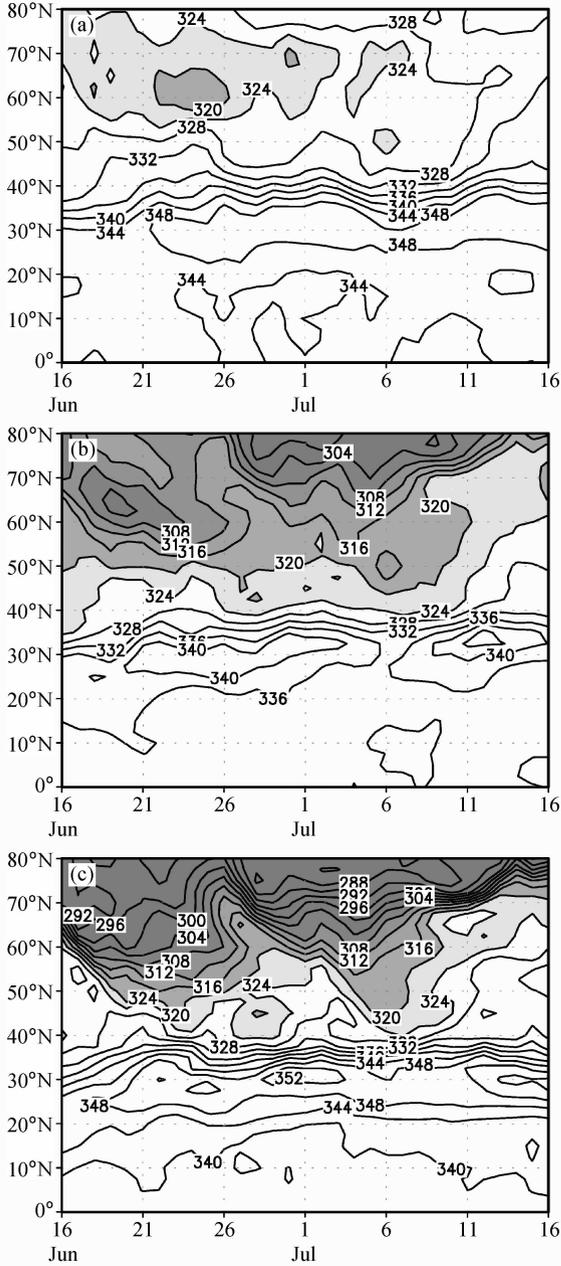
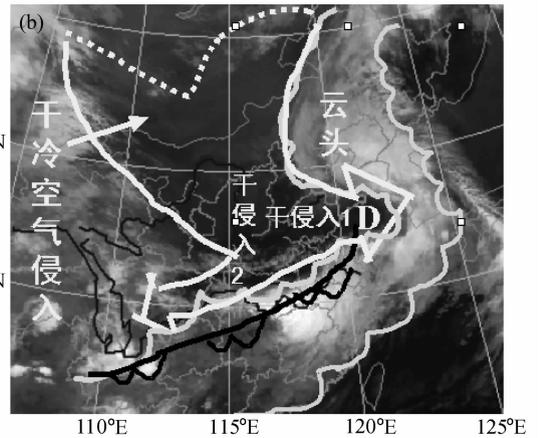
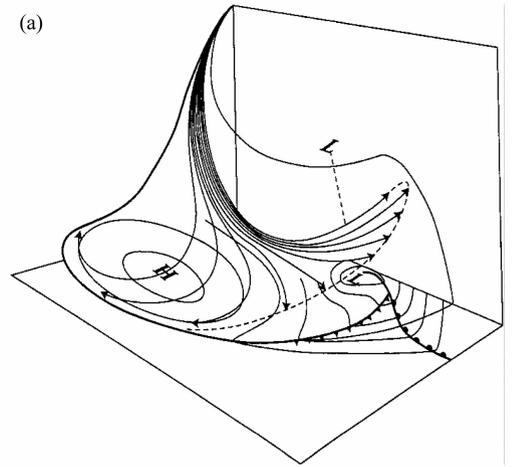


图 7 2003 年梅雨期间 100°E ~ 130°E 范围内平均的假相当位温(单位: K)的纬度-时间演变: (a) 300 hPa; (b) 500 hPa; (c) 900 hPa
Fig. 7 The latitude - time cross section for θ_{se} averaged over 100°E - 130°E at (a) 300 hPa, (b) 500 hPa and (c) 900 hPa (units: K)

过程中,干冷空气的侵入是在冷锋后从高层向下侵入,和湿上升气流在气旋中心附近产生相互缠绕。但是对于梅雨锋降水而言,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,所以,干冷空气的侵入模式与欧洲



云头 Cloud head 干冷空气侵入 Dry cold air intrusion
干侵入1 Dry intrusion 1 干侵入2 Dry intrusion 2

图 8 干侵入气流的三维示意图(a)以及 2003 年 6 月 22 日 2100 UTC 的红外云图(b)

Fig. 8 (a) Three-dimensional sketch map of the dry intrusion flow, arrows are trajectories of air originating from a small region near the tropopause (extracted from reference [9]); (b) the infrared satellite image at 2100 UTC 22 Jun 2003

气旋发展模式并非完全一致,这从图 8b 中可以进一步说明。

图 8b 为红外云图,图中的暗区或暗带表示干冷空气的侵入,表明在入梅后第一场暴雨期间,在黄淮流域存在一个黄淮气旋,它在发展过程中缓慢东移,在云图上可以看出它的气旋云系结构,在云头的下方为气旋中心所在,在气旋中心的西南方向为一冷锋云系,江淮流域的暴雨过程就是在此冷锋云系上产生和发展起来的,从这点来看,入梅后的第一场暴雨过程并非典型的梅雨锋降水过程。除了黄淮气旋锋面云系外,在黄淮气旋的西北方向,存在一条明显的暗区,就是干冷空气的侵入轨迹,干

冷空气南下侵入到黄河以南后, 分为两支, 其中向东北方向的一分支“干侵入 1”侵入到黄淮气旋云头中, 与云头相互缠绕, 给黄淮气旋输送动量和能量, 以保证黄淮气旋的维持和发展。这正是 Browning 等^[10, 12]强调的“干侵入”。而另一支“干侵入 2”则在地转偏向力的作用下向西南方向侵入, 与冷锋云系相互作用, 对暴雨的发生和发展起着关键的作用, 实际上本文的分析一直是在关注“干侵入 2”。同时, 在水汽图像上也存在同样的特征(图略)。

因为黄淮气旋云系的存在, 所以干冷空气的侵入也显得较强一些。下面从假相当位温的垂直剖面结构来说明。

从假相当位温的垂直剖面(图 9)可以看出, 对于江淮流域梅雨期的暴雨过程, 在 30°N 附近从高层有一假相当位温“漏斗状”插入到低层, 从低层有一假相当位温“反漏斗状”上凸, 344 K 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 θ_{sc} 的高值中心, 为高能区所在。在 600 hPa 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^[5], 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, 除了在 30°N 北侧存在一锋区外, 在其北侧的 48°N 附近还存在一条锋区, 该冷锋锋区不断给江淮流域补充干冷空气。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 48°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, 从而造成江淮流域入梅后的第一场暴雨过程。

总之, 此次暴雨过程中, 江淮流域上空为较强的湿度锋, 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。

从图 9 还可知, 在对流层高层为对流稳定层(对流性稳定度 $N_m > 0$), 在中层为中性层结(对流性稳定度 $N_m \approx 0$), 在低层为对流不稳定层结(对流性稳定度 $N_m < 0$), 根据吴国雄等^[5]湿位涡守恒的原理, 湿位涡可以表示为

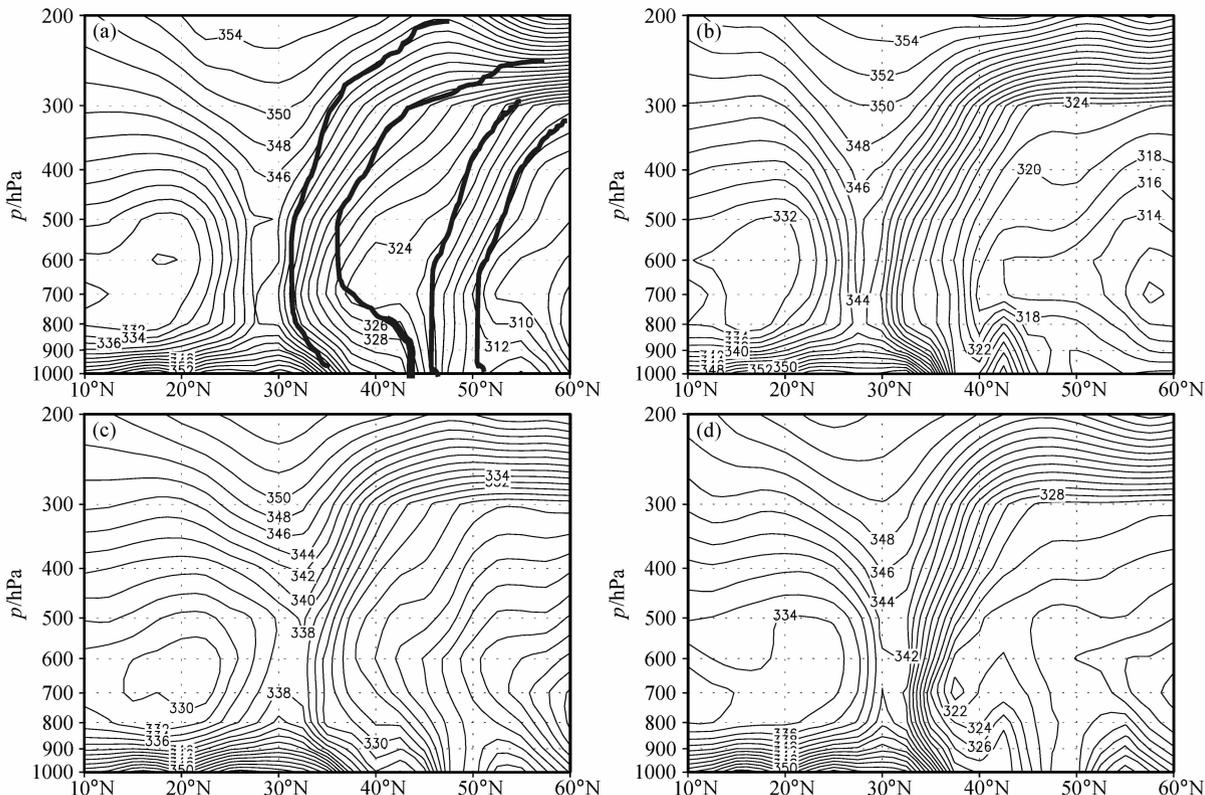


图 9 沿 115°E 假相当位温经向垂直剖面平均图(单位: K), 其他同图 5

Fig. 9 Same as Fig. 5, but for θ_{sc} (units: K) along 115°E

$$P_m = \frac{\theta_0}{g^2} \zeta_{\theta} N_m = \text{constant},$$

其中,

$$N_m = -\frac{\rho g^2}{\theta_0} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial p}$$

为对流稳定度。

如果 N_m 减小, 要保持 P_m 不变, 必须有绝对涡度增长。即当气块从对流稳定性较高的环境, 向对流稳定性较低的环境移动时, 其绝对涡度增加。因此, 在江淮流域上空, 当干冷空气沿着等熵面下滑时, 经过稳定性逐渐减弱的环境大气, N_m 的减小将导致绝对涡度的增大, 所以有利于这一地区对流的发展。

4 结论

通过分析 2003 年梅雨期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。可以得到以下结论:

(1) 2003 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, 亚洲北部阻塞高压的建立和维持, 使得 500 hPa 高度上西风锋区南压, 导致冷空气南下; 江淮流域暴雨过程所对应的中高纬度的环流特征表现为欧亚上空单阻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以及江淮流域暴雨的发展。

(2) 2003 年梅雨期存在 4 次北风活跃阶段, 每次北风活跃对应于一次暴雨过程, 在干冷空气逐渐加强的过程中暴雨发展加强。江淮流域暴雨过程中的干冷空气除了从中高纬度南下外, 还存在从中高层的下降, 它们均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。中低层 30°N 以北的正环流的下沉支是干冷空气输送的“载体”。

(3) 2003 年梅雨期间, 江淮流域以北的对流层中低层的北风对淮河流域对流的形成和发展起着重要作用, 同样, 高层的北风对高空辐散区的发展起着重要作用。低层的辐合和高层的辐散有利于江淮流域暴雨的发生发展。

(4) 干冷空气的侵入能够引发干层的形成和维持, 起着降温 and 降湿的双重作用, 同时, 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。

(5) 从卫星云图上的分析发现, 干冷空气的侵入轨迹为一条明显的暗区, 干冷空气南下侵入到黄河以南后, 分为两支, 其中一支“干侵入 2”向西南方向侵入, 与冷锋云系相互作用, 对暴雨的发生和发展起着关键的作用。这与 Browning 等^[10,12] 强调的“干侵入”不尽相同。

参考文献 (References)

- [1] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 47~68
Ding Yihui. *Research on Durative Heavy Rain over the Changjiang River and Huaihe River Basins in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 47~68
- [2] 《1998 年长江、嫩江流域特大暴雨的成因及预报应用研究》编委会. 1998 年长江、嫩江流域特大暴雨的成因及预报应用研究. 北京: 气象出版社, 2001. 103~150
The Editorial Committee on Researches on Causes and Forecasting Application of Heavy Rain over the Changjiang River and Nenjiang River Basins in 1998. *Researches on Causes and Forecasting Application of Heavy Rain over the Changjiang River and Nenjiang River Basins in 1998* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 103~150
- [3] 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 中国的梅雨. 东亚季风和中国暴雨——庆祝陶诗言院士八十华诞文集. 北京: 气象出版社, 1998. 3~48
Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. *Meiyu over China, East Asian Monsoon and Heavy Rain in China——Celebration of the 80th Birthday of Academician Tao Shiyan* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998. 3~48
- [4] 于玉斌, 姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展. 气象学报, 2003, 61(6): 669~778
Yu Yubin, Yao Xiuping. *Reviews on the dry intrusion and its application. Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, 61(6): 669~778
- [5] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓箐. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53(4): 387~405
Wu Guoxiong, Cai Yaping, Tang Xiaojing. *Moist potential vorticity and slantwise vorticity development. Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, 53(4): 387~405
- [6] 寿绍文, 李耀辉, 范可. 暴雨中尺度气旋发展的诊断分析. 气象学报, 2001, 59(6): 560~568
Shou Shaowen, Li Yaohui, Fan Ke. *Diagnostic analyses of development of mesoscale cyclone during Torrential rain. Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, 59(6): 560~568
- [7] 于玉斌, 姚秀萍. 对华北一次特大暴雨过程的位涡诊断分析. 高原气象, 2000, 19(1): 111~120
Yu Yubin, Yao Xiuping. *The diagnosis analysis of potential*

- vorticity for a typhoon severe rainstorm in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2000, **19**(1): 111~120
- [8] 高坤, 徐亚梅. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究. *大气科学*, 2001, **25**(6): 740~756
- Gao Kun, Xu Yamei, A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22~30 June 1999. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(6): 740~756
- [9] Danielsen E F. Project Springfield Report. Defense Atomic Support Agency, Washington D. C. 20301, DASA 1517 (NTIS # AD - 607980), 1964, 99pp
- [10] Browning K A, Golding B W, Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1995, **121**(523): 465~493
- [11] Browning K A, Roberts N M, Variation of frontal and precipitation structure along a cold front. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**(536): 1845~1872
- [12] Browning K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development. *Meteor. Appl.*, 1997, **4**(4): 317~324
- [13] Browning K A, Roberts N M. Structure of a frontal cyclone. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1994, **120**(520): 1535~1557
- [14] Spencer P L, Stensrud D J. Simulating flash flood events: Importance of the subgrid representation of convection. *Mon. Wea. Rev.* 1998, **126**(11): 2884~2192
- [15] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyan. *Heavy Rain in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp