

刘会荣, 李崇银. 2010. 干侵入对济南“7.18”暴雨的作用 [J]. 大气科学, 34 (2): 374–386. Liu Huirong, Li Chongyin. 2010. Impacts of the dry intrusion on Ji'nan torrential rain occurring on 18 July 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 374–386.

干侵入对济南“7.18”暴雨的作用

刘会荣^{1, 2} 李崇银^{1, 3}

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2007 年 7 月 18 日发生在济南地区的短时大暴雨过程进行了详细的分析, 发现这次强降水过程是在高空槽和低空风切变的有利形势下产生的。济南附近最大干空气侵入出现在暴雨发生前 1~2 天, 干空气侵入有利于深厚干层的形成和维持, 而深厚干层的存在则有利于对流有效位能在中高层的产生、积聚和释放, 从而导致强的对流上升运动, 为暴雨的产生提供了条件。济南以北地区干空气侵入现象在暴雨过程中一直存在, 主要有两种表现形式: 对流层顶附近向下的干空气侵入和对流层低层由北向南的干空气侵入。济南外的干侵入一方面有利于低层产生辐合、高层产生辐散, 导致上升运动的发展, 另外一方面还对锋区的形成和移动具有重要作用。上述两方面表明干侵入在这次暴雨过程中起到了至关重要的作用。

关键词 高空槽 低空风切变 干空气侵入 对流有效位能

文章编号 1006-9895 (2010) 02-0374-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

Impacts of the Dry Intrusion on Ji'nan Torrential Rain Occurring on 18 July 2007

LIU Huirong^{1, 2} and LI Chongyin^{1, 3}

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 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*

Abstract By employing the NCEP/NCAR reanalysis data, the authors have analyzed the detailed characteristics of the Ji'nan torrential rain occurring on 18 July 2007, the results show both the upper-level trough and the low-level wind shear are helpful to the occurrence of the torrential rain event. The most severe dry air intrusion around Ji'nan occurs 1–2 days ahead of the torrential rain event, the dry air intrusion is advantageous to the formation and maintenance of the thick dry level. The thick dry level can lead to the generation, accumulation, and release of the Convective Available Potential Energy (CAPE), and then, it can cause the convective upward air motion which can provide an advantageous condition to the occurrence of the torrential rain. On the north of Ji'nan, the dry air intrusion phenomenon can be always observed during the torrential rain event, it has two modes: in the lower troposphere, the dry air from the mid-high latitudes can arrive in Ji'nan; in the upper troposphere, the dry air from the upper levels can be extended into the lower troposphere. The dry air intrusion beyond Ji'nan can cause the divergence in the

收稿日期 2009-01-16, 2009-08-25 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2006CB403600

作者简介 刘会荣, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 目前主要从事暴雨等中尺度天气动力学的研究。E-mail: lhr0410@163.com

lower troposphere and convergence in the upper troposphere, it can also influence the formation and moving of the front, and both the two aspects show that the dry air intrusion play an important role in the torrential rain event.

Key words upper-level trough, low-level wind shear, dry air intrusion, the Convective Available Potential Energy (CAPE)

1 引言

早在 20 世纪 60 年代, Browning and Harrold (1969) 就讨论了锋面低压中干冷空气入侵的蒸发效应。而后, Browning and Mason (1980) 的研究还发现, 在锋面系统中, 降水区域的前沿与地面暖锋之间的距离取决于降水由暖输送带进入位于冷输送带的干空气中时所引起的蒸发效应。

对干侵入的深入研究是在 20 世纪 90 年代以后, 干侵入被定义为来源于对流层顶附近的气流侵入到低层的现象, 这支气流具有高位势涡度和低湿球温度 (Browning and Golding, 1995; Browning, 1997)。大量的研究表明, 干侵入活动对降水具有明显的影响, Browning and Roberts (1996) 的研究指出, 暖输送带中气流被卷入正在发展的气旋性环流, 并与高层干冷空气相互作用可以产生不同的降水结构。James and Clark John (2003) 的研究则明确指出, 无论是中纬度还是热带地区, 干侵入在调节降水结构中都起到了非常重要的作用。Browning and Golding (1995) 的研究进一步指出, 虽然干空气的入侵使得宽广锋面降水受到抑制, 但是有利于强对流性降水的产生。

干冷空气入侵在暴雨过程中的作用也得到了众多国内学者的重视, 陶诗言 (1980) 的研究指出, 梅雨期间的暴雨过程通常是暖湿气流和干冷空气相互作用的结果。Zhao et al. (2007) 的研究指出, 华南北部槽后的冷空气向东南方移动对华南前汛期期间发生在香港地区的强降水事件具有重要影响。梁军等 (2008) 讨论了冷空气对辽东半岛热带气旋降水的影响, 结果表明冷空气入侵热带气旋外围, 对辽东半岛地区对流云团的强度、上升运动及降水具有明显的增强作用。赵兵科等 (2008) 对 2003 年夏季梅雨期一次强气旋发展过程进行了位涡诊断分析, 指出在气旋迅速发展阶段, 高层 500 hPa 以上主要以沿急流轴下降的高层干冷气流和对流层底层流向气旋东北部并迅速上升的暖湿气流为主。在 600 hPa 及以上层次, 因凝结加热引起的垂直运动

通过垂直平流可能在冷暖气流相互作用和上下大位涡的垂直耦合中发挥了重要作用。Zhang et al. (2002) 通过对 1998 年 7 月 7 日位于台湾海峡的 MCS 进行分析, 强调指出位于 MCS 东部暖湿边界层的气流的抬升以及自西南方向低层的干空气的下沉才是对流得以维持的主要原因。于玉斌和姚秀萍 (2003) 全面综述了国外近年来干侵入研究的进展和有关结果, 指出干侵入在气旋的爆发性发展、暴雨的增幅、位势不稳定的增强、中气旋的产生发展等方面起着重要的促进作用, 同时, 它能够影响冷锋的演变及降水特征。

针对我国 2003 年梅雨期干冷空气活动情况的研究表明, 干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 (姚秀萍等, 2005)。此外, 适度的干侵入对梅雨期内暴雨的产生十分有利 (杨贵名等, 2006), 这是因为干冷空气的入侵有利于干层的形成和维持, 干层的存在加强了暴雨过程中的对流性不稳定, 对暴雨的加强和发展起重要作用 (姚秀萍和于玉斌, 2005)。Yao et al. (2007) 认为与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入来自对流层各个层次, 干侵入的机制实际上是高位涡的侵入和下传, 干侵入可作为高位涡侵入的重要指标。

上述分析主要是针对我国南方持续性暴雨进行的研究, 本文将针对 2007 年 7 月 18 日发生在济南地区的短时暴雨个例进行详细分析。由于本次暴雨事发突然, 历时短, 降雨强度大, 给当地人民群众的生命财产造成了严重损失, 导致济南地区众多人口受灾。本文将利用分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、逐日四个时次的 NCEP 资料, 着重从干空气入侵方面对本次暴雨发生的大尺度环流条件进行详尽分析。

2 济南“7.18”大暴雨雨情和灾情

2007 年 7 月 18 日, 济南地区遭遇了罕见的大暴雨灾害, 根据尹承美等 (2008) 的研究, 自 18 日 08 时至 19 日 08 时 (北京时, 下同), 济南全市平均降雨量为 82.3mm (包括水利部门自动站), 市区平

均降雨量为 142.2 mm。市区 21 个气象局自动雨量站有 19 个站降水量超过 100 mm, 11 个站降水量超过 140 mm, 4 个站降水量超过 160 mm。市区 1 小时最大降雨量达到 151 mm, 2 小时最大降雨量达 167.5 mm, 3 小时最大降雨量达 180 mm, 均为济南市有气象记录以来历史最大值。

图 1 给出了 2007 年 7 月 18 日 15 时至 19 日 00 时济南站 1 小时降水量的时间变化, 可以看出, 这次暴雨过程主要集中在 18 日 17 时至 20 时, 其中最大降雨量出现在 18 时至 19 时, 降雨量超过了 80 mm。

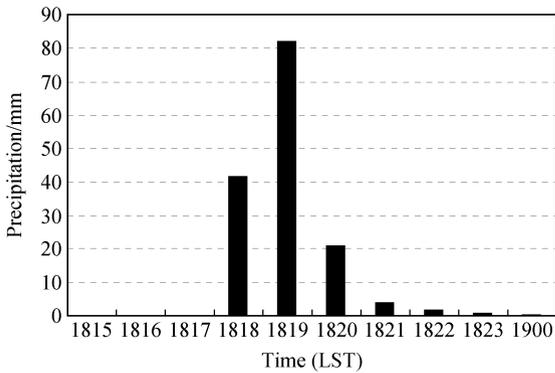


图 1 济南站 1 小时降水量的时间变化

Fig. 1 Time variation of the 1-h precipitation amount for Ji'nan station

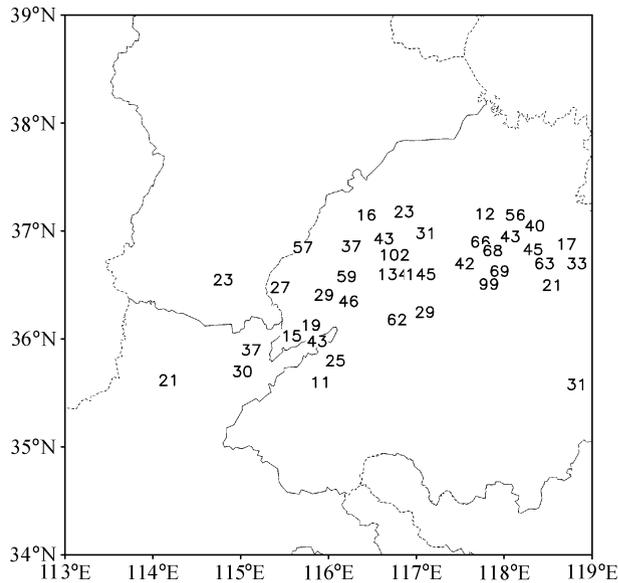


图 2 2007 年 7 月 18 日 18~20 时 3 小时降水量 (>10 mm)。数字: 站点降水量 (单位: mm)

Fig. 2 3-h precipitation amount (>10 mm) from 1800 LST 18 Jul 2007 to 2000 LST 18 Jul 2007. Number represents precipitation amount (mm) at different stations

图 2 给出了济南及其周边测站的 3 小时降水分布情况, 结果表明, 这次短时降水主要发生在山东北部, 雨带基本呈东西走向。在这次降水过程中, 最大降水量出现在了济南站, 3 小时降水量达到了 145 mm, 另外, 其周边测站齐河站和长青站的降雨量也分别达到了 102 mm 和 134 mm, 表明济南及其周边区域是这次强降水的中心地带。

尹承美等 (2008) 的研究表明, 在这次暴雨过程中, 因灾伤亡超过 200 人, 另有 33.3 万群众受灾, 倒塌房屋 1805 间, 市区内受损车辆约 802 辆。城市基础设施遭受重大损失, 毁坏市区道路 14000 平方米, 冲失井盖 500 多套, 26 条线路停电, 济南市内公交一度处于瘫痪状态。工商企业遭受很大损失, 140 多家企业进水被淹。据初步统计, 洪涝灾害给济南市造成直接经济损失 13.2 亿元。

3 大气环流形势分析

3.1 500 hPa 高度场和温度场形势分析

分析 500 hPa 环流场形势可以看出, 2007 年 7 月 14 日, 在北冰洋拉普捷夫海附近存在一个强低压系统, 而后, 这一系统沿纬圈方向向西移至北地群岛附近。在这一系统西移过程中, 其外围不断有短波槽生成并逐渐发展加强成为闭合系统 (图略)。至 7 月 16 日 14 时 (图 3a), 60°N 以北地区生成四个低压系统, 与本次济南大暴雨相关联的低压系统就是由位于贝加尔湖以北地区的低压系统发展而来的。此外, 可以发现在贝加尔湖以西地区存在一阻塞高压系统, 而在鄂霍次克海以南地区, 有一高压脊系统正在逐步生成, 这将有利于低压系统向南发展成为一个深厚系统。7 月 17 日 14 时 (图 3b), 贝加尔湖以西的阻塞高压虽然强度减弱, 但位置基本维持不变, 而鄂霍次克海以南地区的高压脊系统已经明显加强, 并向北伸展至鄂霍次克海附近。在两个高压共同作用下, 使得贝加尔湖以北的低压系统向南、向东发展并靠近贝加尔湖地区, 低压系统明显加强、南伸。从 7 月 18 日 14 时位势高度场分布形势看 (图 3c), 贝加尔湖以西的高压系统虽然强度减弱, 但形势依然存在, 而鄂霍次克海地区阻塞高压继续加强北上。两者之间的相互作用, 使得影响济南大暴雨的低压系统经贝加尔湖继续向南加深, 并向东移至我国东北地区, 至此, 一个深厚的低压系统已然形成, 济南恰好处于这一低压槽前。图 3d 是 7

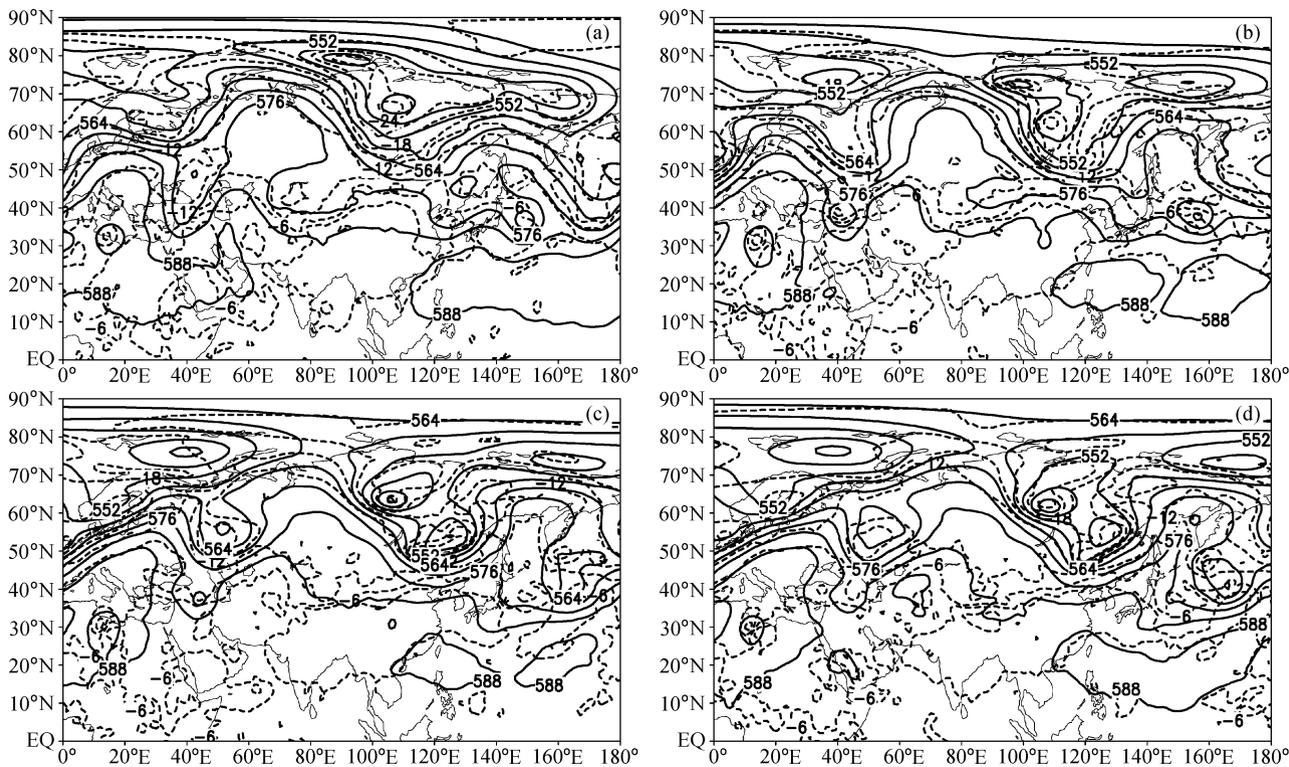


图3 2007年7月500 hPa高度场(实线,单位: dagpm)和温度场(虚线,单位: °C): (a) 16日14时; (b) 17日14时; (c) 18日14时; (d) 18日20时

Fig. 3 Geopotential height (solid lines, units: dagpm) and temperature (dashed lines, units: °C) at 500 hPa during Jul 2007: (a) 1400 LST 16 Jul; (b) 1400 LST 17 Jul; (c) 1400 LST 18 Jul; (d) 2000 LST 18 Jul

月18日20时的位势高度场的分布情况,此时虽然暴雨即将结束,但在贝加尔湖北面还有一个低压系统,它将再次影响我国,形成另一次降水过程。本文将着重分析发生在济南地区的这次短时强降水。

结合图3c和图3d,可以看出自7月18日14时至20时,我国东部到日本海有一高压脊东移和向北发展,并与鄂霍次克海高压连通。这样一个鄂霍次克海阻塞高压与中纬度高压脊打通所形成的高压,一方面阻挡了低压系统继续东移,使得低压系统持续南压,另一方面,和低槽的共同作用下,也为引导来自海上的暖湿气流进入济南地区提供了条件。而贝加尔湖以西地区高压系统的存在则为引导北部的干冷空气进入济南地区,抬升位于此地的暖湿气流,进而导致暴雨的发生提供了便利的大尺度环境条件。因而双阻形势的存在为大暴雨的发生提供了有利的环境条件。

此外,分析图3中位势高度场和温度场可以发现,温度场的低值中心和与本次暴雨紧密联系的低压系统中心几近重合,这表明伴随低压系统发展,确实有冷空气的南下。在低压系统以南地区,等温

线密集,表明这一地区有强的冷平流存在,这将有利于低压系统的加强。

3.2 850 hPa 风场形势分析

图4中水汽通量表征了风场的分布形势。从图4a可以看出,由东部高压带(包括鄂霍次克海阻高和东亚高压脊)引导下的偏南暖湿气流与沿贝加尔湖以北地区南下的干冷偏北气流相遇,在(36°N~37°N, 114°E~120°E)区域形成一条明显的切变线。分析18日14时(图略)的形势可发现,这一切变线位于37°N以北,而18日20时(图4a),低空切变线南移至济南地区。19日02时,切变线继续南移且呈现“V”字形结构,其中济南地区具有最大曲率,切变线已经南移越过济南地区。

上述分析表明,在本次暴雨过程中,低空伴随有切变线的发展和移动。此切变线是由西南风和偏北风气流的相互作用形成的,故为冷式切变线。此冷式切变线随时间的演变与整个暴雨发展过程有着很好的对应关系,冷式切变线的变化是这次暴雨发生的直接启动机制,为暴雨发生提供了有利条件。而冷式切变线的形成和移动与干冷空气的侵入密不

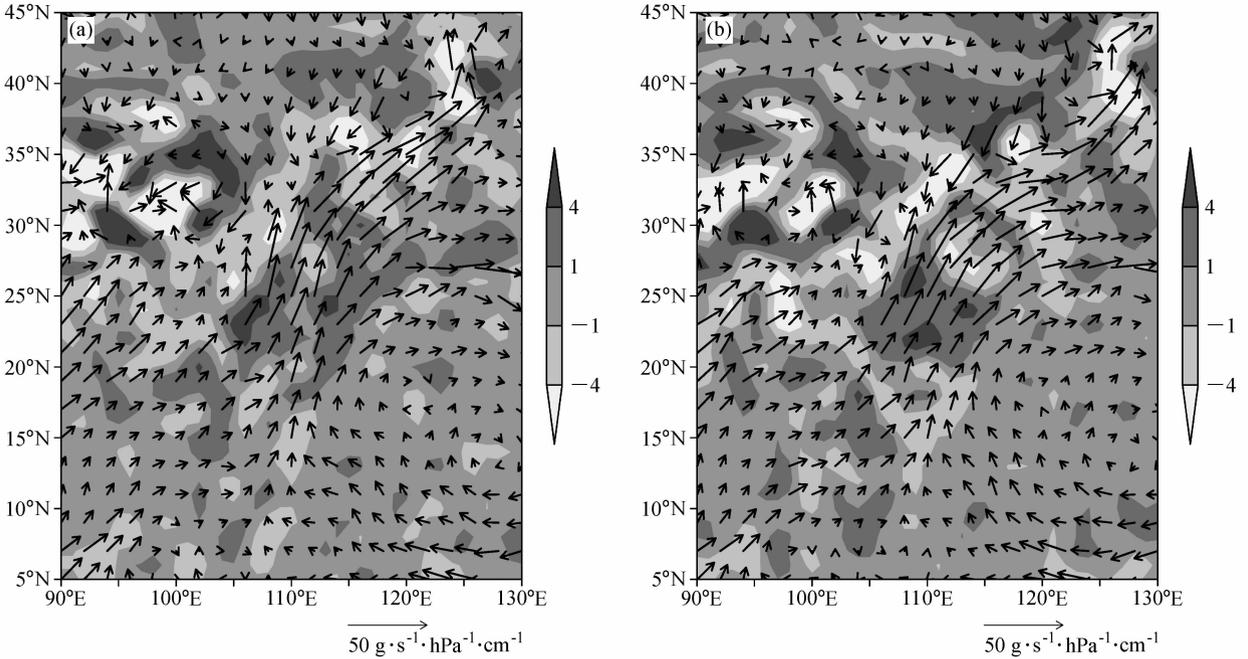


图4 2007年7月850 hPa水汽通量(矢量)和水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$): (a) 18日20时; (b) 19日02时
Fig. 4 The water vapor flux (vector) and water vapor flux divergence (shading, units: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) at 850 hPa; (a) 2000 LST 18 Jul 2007; (b) 0200 LST 19 Jul 2007

可分,这也从一个方面表明干冷空气的侵入与暴雨的发生有着密不可分的关系。

4 水汽作用分析

在暴雨的发展发生过程中,水汽是不可或缺的因素。水汽通量代表大气的水汽输送情况,水汽通量散度则反映了大气中的水汽辐散和辐合。图4分别给出了7月18日20时和19日02时的850 hPa水汽通量情况,从图4a中变量的分布形势可以看出,在这次大暴雨过程中,主要有三条气流所表征的水汽输送带,第一条西南气流来自热带印度洋,这是南亚西南季风的影响;第二条东风气流来自热带太平洋;第三条南风气流来自我国南海。由于受到我国东部海上高压系统的影响,这三条水汽输送带在高压西侧转向并建立起一条自华南至黄河下游的西南风急流带,为暴雨的发生提供了充足的水汽条件。从图4a可以看出,济南及其邻近地区处在水汽通量散度的辐合中心附近,其辐合中心量级小于 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。此外,辐合区域附近存在有水汽通量的辐散中心,表明这些区域是水汽的源,这就为济南及附近地区大量水汽的堆积提供了条件,所以非常有利于暴雨的发生。从19

日02时的情况看(图4b),济南及其附近地区位于水汽通量散度的辐散中心,中心强度超过 $4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,表明该地区由水汽的汇变为水汽的源,这使得降水停止。

图5描述了地面至300 hPa纬向和经向水汽通量沿 117°E 的纬度—时间剖面图。从图5a结果可以看出,自14日至18日暴雨发生前,济南地区有正的纬向水汽通量,其中18日08时和18日14时水汽通量值较大。图5b揭示了与图5a类似的结果,其中18日02时和18日08时的水汽通量值较大。对比分析发现,济南地区经向水汽通量的输送较纬向水汽通量的输送要大很多,这种特征几乎可以在每个时次上得到体现,表明经向水汽输送是这次暴雨发生的主要水汽条件。

上述分析表明,在暴雨发生前,济南地区有正的水汽收支,且济南地区是水汽通量的辐合中心,有利于水汽在济南地区的堆积,二者共同作用,为这次降水提供了有利的水汽条件。

5 干空气侵入在本次暴雨中的作用

5.1 干侵入在场场上的表现特征

这次暴雨的发生除了暖湿气流的作用外,还与

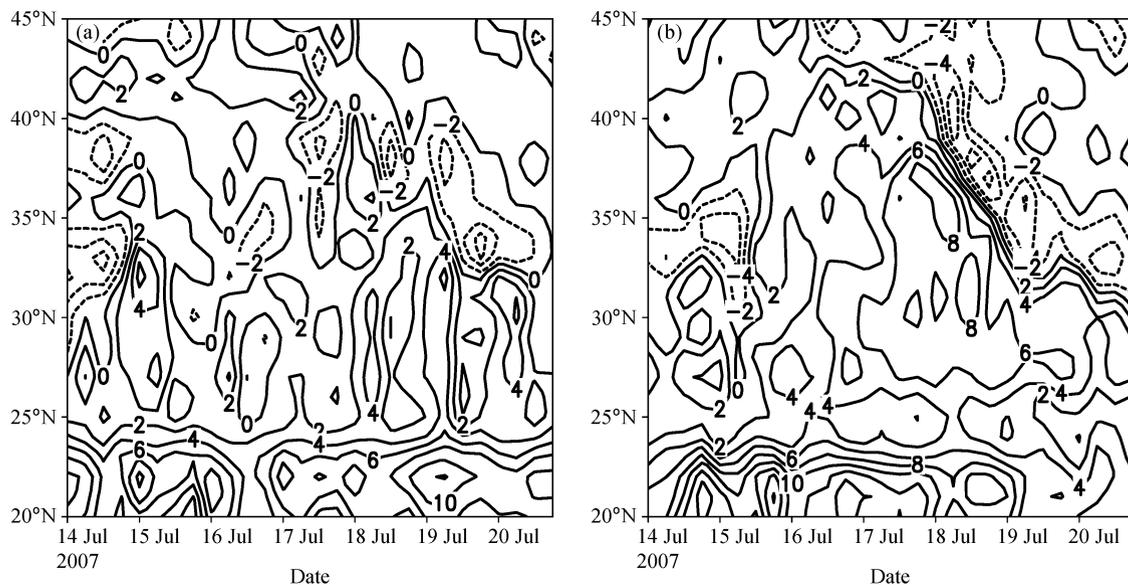


图5 地面至 300 hPa (a) 纬向和 (b) 经向水汽通量沿 117°E 的纬度-时间剖面图 (单位: $10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

Fig. 5 The latitude-time cross sections for (a) zonal and (b) meridional water vapor fluxes ($10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) from ground to 300 hPa along 117°E

干空气的侵入息息相关,这里以北风表征干空气的活动特征,其强弱可以表征干空气活动的强弱。

姚秀萍和于玉斌(2005)的研究指出,正是干空气和暖湿气流在江淮流域的对峙导致了当地的持续性暴雨。图 6a 给出了 850 hPa 沿 117°E 经向风的纬度-时间演变情况,从中可以看出,自 14 日至 20 日,干冷空气逐渐南压,尤其是 17~18 日干冷空气的南侵特别显著,这与持续性暴雨过程中的干空气和暖湿气流在某一纬度附近对峙有很大不同,因而也就导致了济南这次短时局地性暴雨的发生。从 500 hPa 结果来看(图 6b),济南北部干空气侵入主要发生在 17 日以后,且 17 日以后干空气的侵入形势与 850 hPa 类似,这主要与图 3 中阻塞高压影响下低压系统的南压有关。此外可以发现,2007 年 7 月 18 日在 37°N 以北,图 6a 和图 6b 中均存在北风的大值中心,表明在这次暴雨过程中,干空气的侵入极其明显。对比分析发现,暴雨发生前后,低层济南附近的经向风梯度较高层要大得多,表明低层侵入的强度要比高层大。

姚秀萍和于玉斌(2005)对 2003 年梅雨期暴雨的研究指出,除了来自中高纬度的干空气南下外,在中高层明显也存在干冷空气的侵入,二者在暴雨过程中起到了非常重要的作用。本文的研究与之有些一致。图 6c 给出了暴雨发生地附近上空的

经向风的时空剖面图,可以看出,在暴雨发生前,对流层中低层为弱南风所控制,而在对流层上层却有较强的北风。在姚秀萍等(2005)的研究中,北风的中心值强度约为 12 m/s,本文所选取的个例中心强度达到了 30 m/s,这也从一个侧面说明济南暴雨过程中的干侵入比较强烈,这可能是导致对应这次暴雨在垂直运动场上 250 hPa 附近有极大值中心的原因(图略)。在暴雨发展过程中,自对流层中高层的干空气侵入对流层中低层,并与那里的南风暖湿气流相互作用,为暴雨发生提供了有利条件。此外,有关干侵入研究多针对持续性降水,对短时暴雨的研究相对较少,因此,本文特别强调了干空气的侵入在本次暴雨过程中的作用。

5.2 干侵入在湿度场上的表现特征

图 7 给出了相对湿度场沿 117°E 的经向-高度剖面图,定义相对湿度小于 60% 的区域为干区。18 日 08 时(图 7a),在 50°N 以北地区,干区自对流层高层呈漏斗状向下伸展至 500 hPa,其中心轴线介于 50°N~55°N 之间;18 日 14 时(图 7b),干区继续向下伸展至 600 hPa 附近,干区中心轴线南移至 45°N~50°N 之间;18 日 20 时(图 7c),干区继续向下侵入至 700 hPa 以下,干区中心轴线南移至 40°N~45°N,并与其前部干区连成一片,济南位于干区南部边缘地区;19 日 02 时(图 7d),干区继续

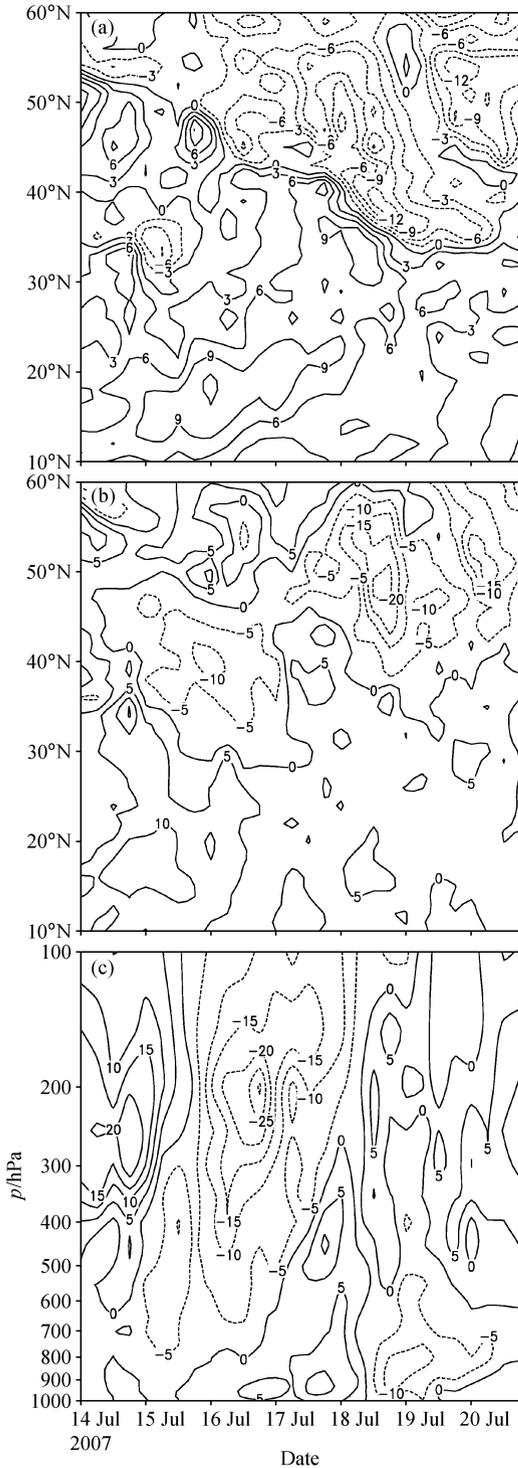


图6 暴雨发展过程中 (a) 850 hPa 和 (b) 500 hPa 沿 117°E 经向风的纬度-时间演变以及 (c) 暴雨期间经向风沿 (37°N, 117°E) 的高度-时间剖面图 (单位: m/s)

Fig. 6 The latitude - time cross sections of meridional wind along 117°E at (a) 850 hPa and (b) 500 hPa and (c) the height - time cross section of meridional wind at (37°N, 117°E) during the evolution of the torrential rain. Units: m/s

南移。

图8给出了2007年7月18日20时不同层次上相对湿度场和风场的分布特征。从图8a~c干侵入的分布可以看出:不同层次上均存在干侵入现象,且各个层次上干侵入的位置和强度不同,中高层的干侵入强度较低层要大,表明干侵入主要来自对流层中高层;干区内盛行西北风气流,受干区北侧强西北气流的影响,干区向东南方向侵入;最强干侵入出现在对流层中层500 hPa左右;自对流层高层向下的干侵入可以向下伸展至700 hPa以下。结合图7和图8d可以看出,在800 hPa层次以下,干侵入主要表现为由北向南侵入。

图7和图8的分析结果表明,在这次暴雨过程中,存在自对流层高层向下的干侵入,其形状类似漏斗。随着时间推移,干区向下向南伸展,当其到达济南北部边缘时,暴雨发生。自对流层顶至700 hPa,干侵入主要表现为由上向下的侵入;在800 hPa以下,干空气活动主要表现为由北向南的干侵入,且最大干侵入位于最低层。需要强调指出的是,图7中所强调的干侵入区域与图6中并不相同,图7中干侵入发生区域位于济南以北地区,而图6中位于济南上空,因而其表现有很大不同。

5.3 干空气侵入的动力作用分析

图9中给出了2007年7月18日14时(图9a)和20时(图9b)沿117°E的经向环流(流线,由风速的南北分量和垂直分量共同组成的环流圈)和经向风的垂直剖面图。从图9中经向环流的垂直剖面图可以看出,在济南地区存在着很强的上升运动。过去关于梅雨的研究表明,2003年梅雨期间,江淮流域的上升气流主要是由15°N附近的热力间接环流的上升支所引起的。图9分析结果表明,在济南南北两侧分别存在一支反环流和一支正环流,位于济南地区的上升气流就是由这两支环流的上升支共同作用所导致的。在50°N附近是正环流的下沉支,在其北部,对流层整层均为北风气流所占据,此下沉支携带高层冷空气下沉至500 hPa时向南发展至济南地区,与来自济南南部的暖湿气流相互作用,产生上升运动,上升支可以向上伸展至对流层顶附近。环流形势的配置形势表明干空气的侵入在暴雨的发展过程中起着举足轻重的作用。

从经向风(图9中实线和虚线)的分布形势看,在这次暴雨中,位于济南南部对流层高层的干

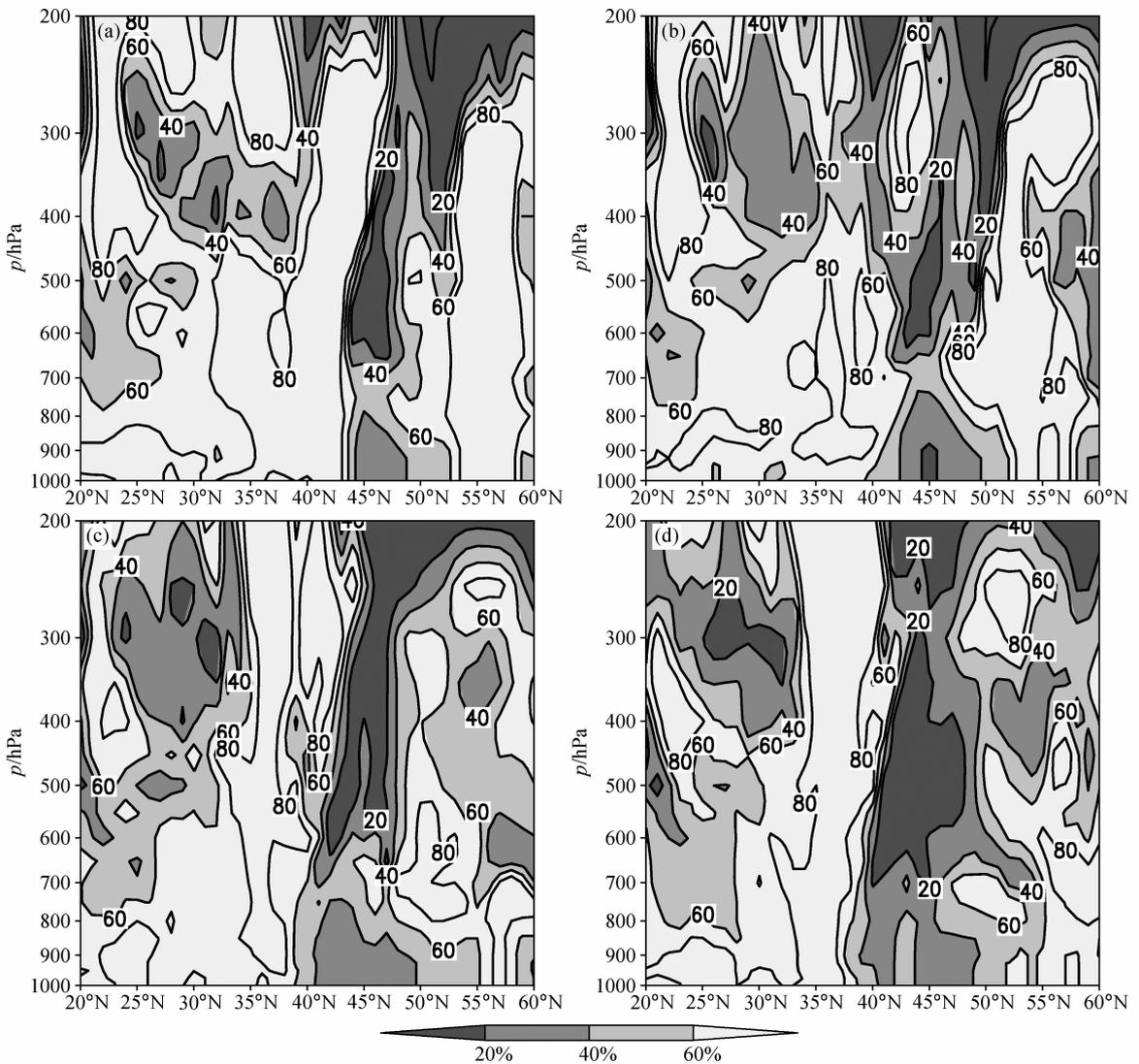


图7 2007年7月暴雨发展过程中相对湿度(%)沿117°E的纬度-高度剖面图: (a) 18日08时; (b) 18日14时; (c) 18日20时; (d) 19日02时

Fig. 7 The latitude - height cross sections of relative humidity (%) along 117°E during Jul 2007: (a) 0800 LST 18 Jul; (b) 1400 LST 18 Jul; (c) 2000 LST 18 Jul; (d) 0200 LST 19 Jul

空气与位于济南以北地区对流层中低层的干空气可以打通,表明在暴雨过程中,冷空气非常活跃。在对流层中低层,37°N以南地区盛行南风,以北则为北风;在对流层中高层,37°N以南地区盛行北风,而其以北则为南风。另外,在济南以南地区,在对流层的低层和高层分别有南、北风的大值中心,这种配置形势表明,在暴雨发展过程中,济南及其南部确实存在着来自对流层高层的干空气向中低层暖湿气流的侵入。济南以北地区和以南地区正好相反。这种配置形势表明低空存在南北风的辐合,而高空则存在南北风的辐散,这使得上升运动发展,

从而导致对流运动的产生。

总之,在暴雨发展中,济南以南地区对流层低层为南风控制,高层为北风控制;济南以北地区分布形势恰好相反。这将有利于出现低层辐合、高层辐散的配置形势,从而使得上升运动加强、对流活动活跃,并最终导致了暴雨的发生。

5.4 干空气侵入的热力作用分析

前面的分析表明,干空气的侵入在这次暴雨的发展过程中起到了十分重要的作用;而且也对干空气在暴雨发展过程中的动力作用进行了初步分析。那么,干空气侵入的热力作用又是什么样子的?利

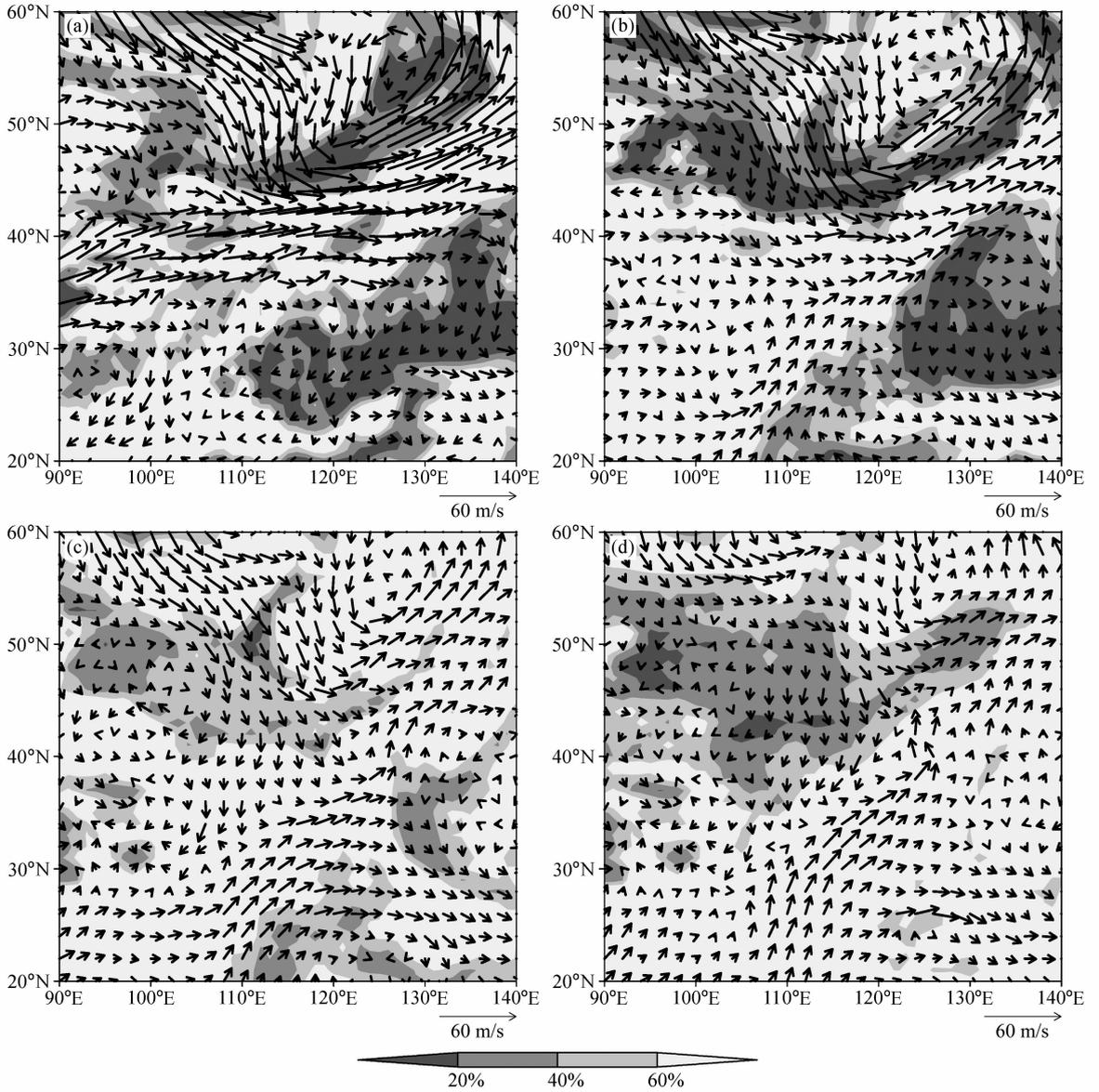


图 8 2007 年 7 月 18 日 20 时相对湿度场 (阴影) 和风场 (矢量): (a) 300 hPa; (b) 500 hPa; (c) 700 hPa; (d) 850 hPa

Fig. 8 Relative humidity (shaded) and wind field (vector) at 2000 LST 18 Jul 2007: (a) 300 hPa; (b) 500 hPa; (c) 700 hPa; (d) 850 hPa

用温度露点差 ($T - T_d$) 来刻画湿度场的结构, 这里规定 $T - T_d > 4^\circ\text{C}$ 的空气为干空气。下面, 分析干空气侵入和湿度场之间的关系。

图 10a 给出了与暴雨发生相伴的温度露点差的分布情况, 比较图 8c 和图 10a 的结果可以发现, 二者发展形势具有很强的相似性。自 15 日至 17 日, 北风经历了弱—强—弱的变化, 对应的空气湿度也发生了相同变化, 此时干空气主要位于对流层中上层, 其中中层具有最干空气, 且在整个对流层, 空气几乎未达到饱和。17 日 08 时, 在对流层中层有一深厚的干层存在, 而在其上下方则为相对较湿的

区域; 17 日后, 北风减弱, 相应的空气湿度迅速增大, 至 18 日暴雨发生前后, 弱北风贯穿整个对流层, 此时只有对流层中层小范围内未达到饱和, 其它区域空气均已达到饱和。图 10a 中所分析的干侵入特征同样可以在相对湿度场上得到很好的体现 (图略)。

图 10b 中给出了沿济南地区地面处对流有效位能 (CAPE) 随时间的变化情况, 自 17 日 08 时开始, 对流有效位能产生; 17 日 14 时后, 对流有效位能快速积聚, 至 18 日 08 时, 对流有效位能达到最大值; 18 日 08 时以后, 对流有效位能迅速减小,

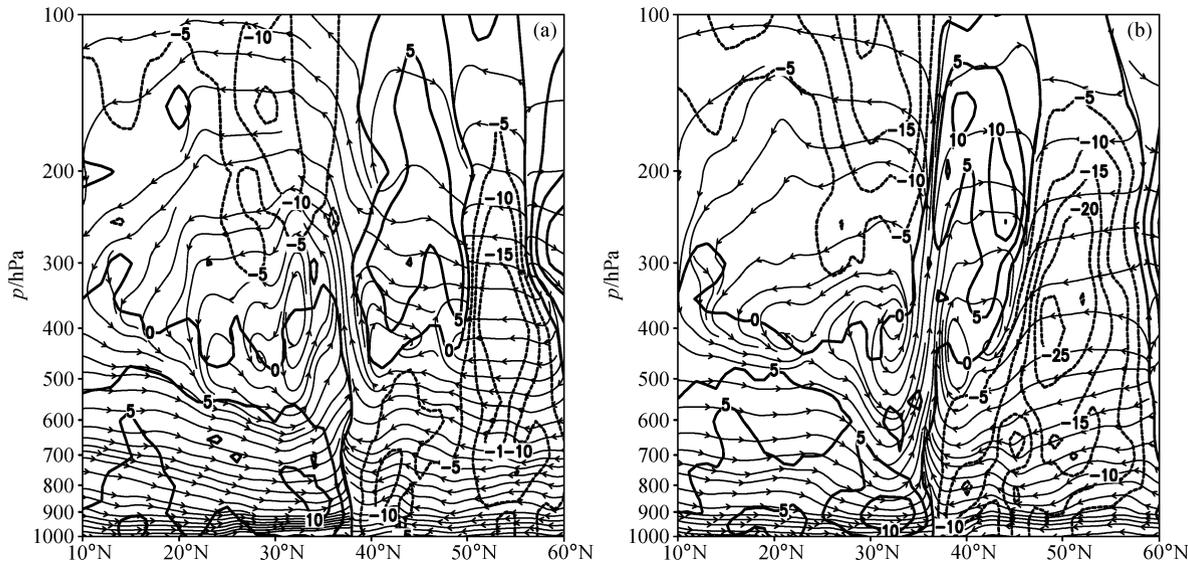


图 9 2007 年 7 月 18 日沿 117°E 的经向环流 (流线) 和经向风的经向垂直剖面图 (单位: m/s): (a) 14 时; (b) 20 时。实线: 南风; 虚线: 北风

Fig. 9 The meridional-vertical cross sections for meridional circulation and meridional wind (m/s) on 18 Jul 2007: (a) 1400 LST; (b) 2000 LST. The solid line shows southerly, and the dashed line shows northerly

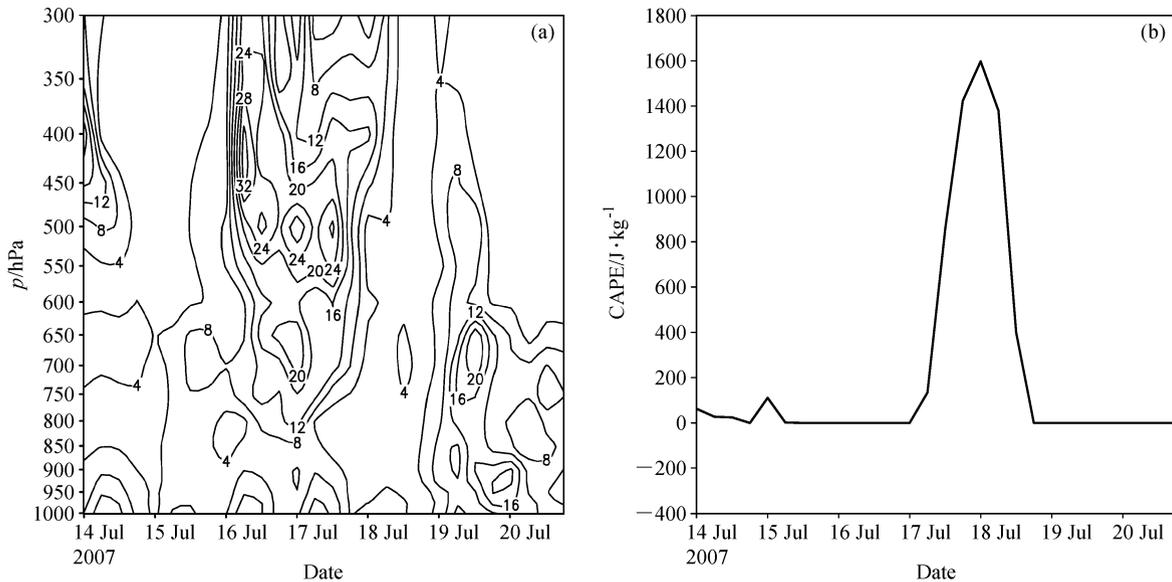


图 10 暴雨发生前后沿 (37°N, 117°E) 温度露点差 ($T - T_d$) 的高度-时间剖面图 (a, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 以及地面对流有效位能随时间的变化 (b, 单位: J/kg)

Fig. 10 (a) The height-time cross section for the difference between temperature and dew-point ($T - T_d$) at (37°N , 117°E) (units: $^{\circ}\text{C}$) and (b) the time series for the surface convective available potential energy (CAPE) at (117°E , 37°N) during the evolution of the torrential rain

这属于能量的释放过程, 这次强降水就是发生在这个过程中。

上述分析表明, 干空气活动与湿度场变化具有很好的对应关系。在暴雨酝酿过程中, 由于对流层中上层存在着强的干空气活动, 使得对流层中层形

成一深厚的干层。这种强对流天气发生前高层的干冷空气倾斜状向下侵入到对流层中低层附近, 对强对流天气的发生发展具有重要作用 (钱传海等, 2007)。在深厚干层的下方是对流不稳定层, 由于强大干层的存在, 有利于对流不稳定能量在低层的

聚积。伴随着北风的减弱以及对流不稳定能量的释放,垂直运动得到发展,位于对流层低层的暖湿气流可以向上伸展到较高的层次,直至贯穿整个对流层,进而导致了这次强降水的发生。

5.5 干空气侵入与锋区关系分析

根据假相当位温 θ_{sc} 的定义可知,干空气具有较低的 θ_{sc} 。图 11 给出了假相当位温 (θ_{sc}) 沿 (37°N, 117°E) 的高度—时间剖面图,从中可以看出,其刻画的干空气活动特征与图 10a 具有很好的一致性。18 日之前,在对流层的中层是 θ_{sc} 的低值区,表明对流层中层干空气活动强烈,而对流层上层干空气活动相对较弱;18 日,在对流层底层和高层分别存在 θ_{sc} 的大值中心,表明这一时段暖湿气流活跃,为降水的发生提供了水汽条件。

图 12 给出了暴雨发展过程中不同时次 θ_{sc} 的纬度—高度剖面图,18 日 08 时,在 40°N 以北地区有 θ_{sc} 的密集区,表明有锋区的存在,且锋区向北倾斜;随时间推移, θ_{sc} 密集区逐渐南移,并可向上伸展至对流层高层,表明锋区发展强烈,当锋区发展至济南北部边缘时就导致了这次暴雨的发生。

分析图 12 还可以发现,锋区后部干空气来自对流层各个层次,干空气一方面自对流层高层向下侵入,另外还由北向南侵入至济南地区。分析 352 K 等 θ_{sc} 线,其上下贯通,这有利于济南北部边缘锋

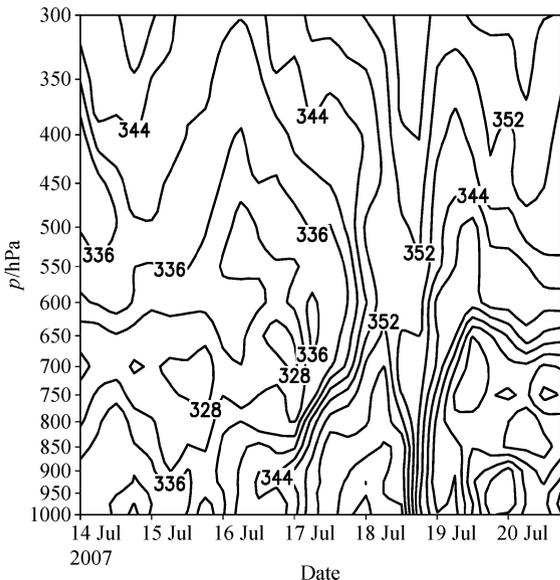


图 11 暴雨发生前后沿 (37°N, 117°E) 假相当位温的高度—时间剖面图 (单位: K)

Fig. 11 The height - time cross section for θ_{sc} at (37°N, 117°E) during the evolution of the torrential rain (units: K)

区前沿干空气下滑至对流层低层。分析 360 K 等 θ_{sc} 线可以发现,在济南附近对流层低层有暖湿气流的活动,360 K 等 θ_{sc} 线的变化表明,暖湿气流活跃,可以沿等熵面向上伸展至较高的高度,并与那里的下沉干空气气流相互作用,为暴雨的发生提供了条件。

此外,随着时间的变化,对流层中高层锋区向南移动缓慢,而对流层低层相对较快,这表明:在对流层低层,干空气活动主要表现为由北向南的侵入;而在对流层中高层,干空气活动表现为自对流层顶附近向下的干侵入。这与前面利用相对湿度场分析得到的结果具有一致性。

6 结论和讨论

针对 2007 年 7 月 18 日发生在济南地区的短时强降水,本文对导致本次暴雨的大尺度环流背景场进行了分析,并利用经向风、相对湿度以及 θ_{sc} 等物理量探讨了干侵入的特征及其在暴雨中的作用,得到以下结论:

(1) 大尺度环流背景场有利于暴雨的发生:500 hPa 位势高度场分布为明显的“两脊一槽”形势。在暴雨过程中,贝加尔湖以西地区阻塞高压的存在有利于冷空气沿阻高东部边缘进入济南地区;而鄂霍次克海阻高的发展加强及与东亚高空脊的打通一方面有利于低压系统加强南伸,另一方面又使得来自海上的暖湿气流可以沿高压脊西部边缘进入济南附近区域。暖湿气流和干冷空气相互作用,为暴雨发生提供了条件。此外,在 850 hPa 上有一条冷式切变线,其存在和移动对暴雨具有重要影响,是这次暴雨发生的直接启动机制。

(2) 在济南附近,最大干侵入出现在暴雨发生前 1~2 天,主要表现为在对流层中高层的一个深厚干层,干层的存在有利于对流不稳定能量在低层的积聚,对流不稳定能量的释放可以将低层的暖湿气流向上输送至较高的层次,有利于降水的发生。

(3) 暴雨过程中,济南以北地区干侵入活动一直存在,并且干侵入有两种表现形式:在 700 hPa 以上,向下伸展很快,主要表现为由对流层顶附近向下的干侵入;在对流层低层则主要表现为由北向南的干侵入。

(4) 经向风和经向环流的经向垂直剖面图分析表明,干侵入有利于对流层低层辐合、高层辐

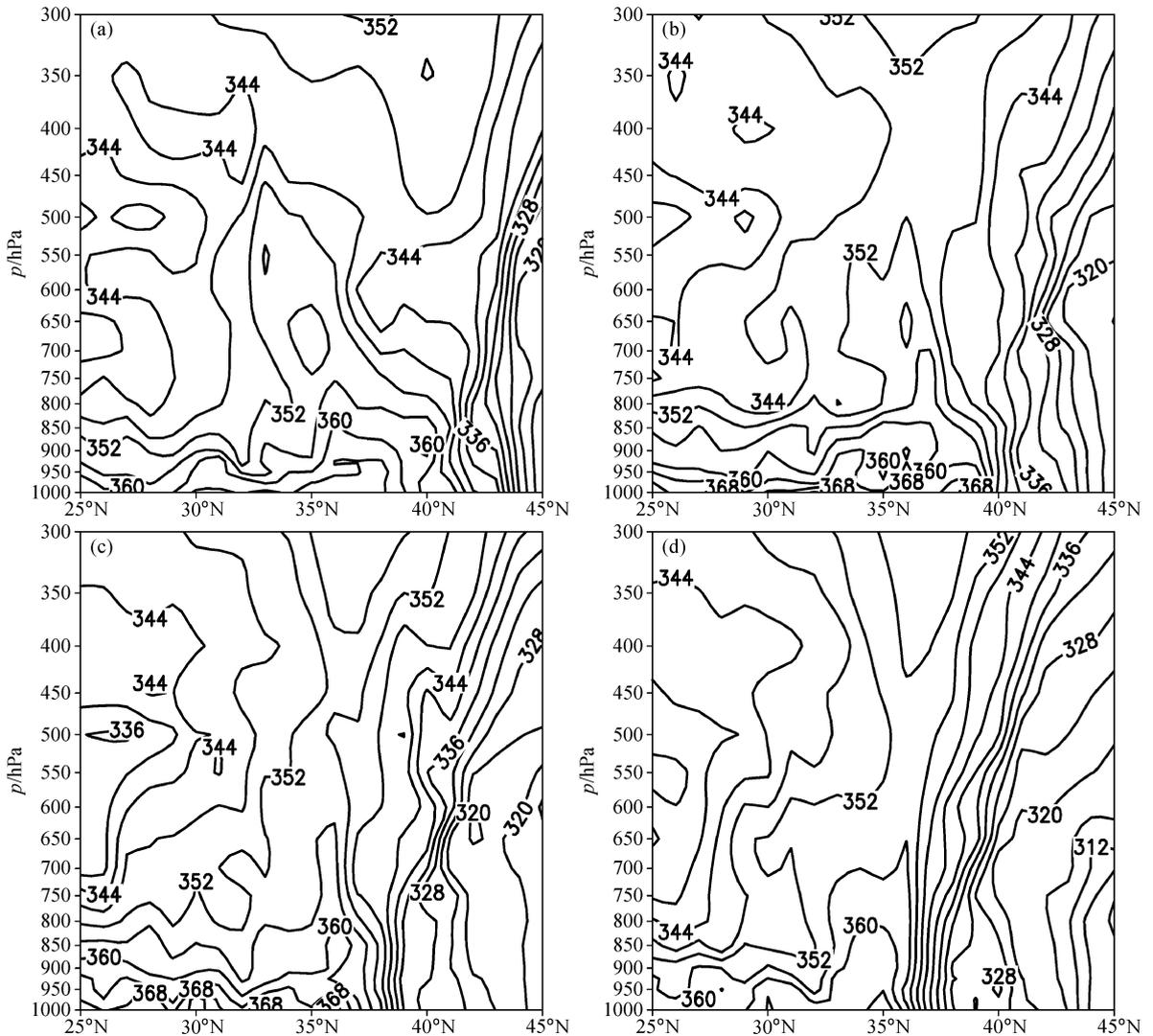


图 12 同图 7，但为假相当位温 (单位: K)

Fig. 12 Same as Fig. 7, but for θ_{sc} (units: K)

散，从而导致强的上升运动，可以将低层水汽源源不断地输送到高层，有利于暴雨的产生。

(5) 对 θ_{sc} 的经向垂直剖面图分析表明，在这次暴雨过程中有锋区的存在，此外，这次暴雨过程中的干空气活动非常强烈。济南北部干侵入的存在对锋区的形成和移动具有重要作用。

本次个例分析发现，济南地区干冷空气活动对暴雨的发生具有一定的指示意义；济南以北地区干侵入则对暴雨过程中的动力过程和热力过程均有重要影响。此外，本文尚未涉及有关这次暴雨过程中的一些中尺度特征，以后，我们将利用一个数值模式对这次暴雨过程中的中尺度特征进行详细分析。

参考文献 (References)

Browning K A, Harrold T W. 1969. Air motion and precipitation growth in a wave depression [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 21: 288 - 309.

Browning K A, Mason S J. 1980. Air motion and precipitation growth in frontal systems [J]. *Pure. Appl. Geophys.*, 119: 577 - 593.

Browning K A, Golding B W. 1995. Mesoscale aspects of a dry intrusion within a vigorous cyclone [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121: 463 - 493.

Browning K A, Roberts N M. 1996. Variation of frontal and precipitation structure along a cold front [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 1845 - 1872.

- Browning K A. 1997. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development [J]. *Meteor. Appl.*, 4: 317-324.
- James R P, Clark J H E. 2003. The diagnosis of vertical motion within dry intrusions [J]. *Wea. Forecasting*, 18: 825-835.
- 梁军, 陈联寿, 张胜军, 等. 2008. 冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验 [J]. *大气科学*, 32 (5): 1107-1118. Liang Jun, Chen Lianshou, Zhang Shengjun, et al. 2008. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (5): 1107-1118.
- 钱传海, 张金艳, 应冬梅, 等. 2007. 2003 年 4 月江西一次强对流天气过程的诊断分析 [J]. *应用气象学报*, 18 (4): 460-467. Qian Chuanhai, Zhang Jinyan, Ying Dongmei, et al. 2007. A severe convection weather of Jiangxi in April 2003 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (4): 460-467.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 255pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 杨贵名, 毛冬艳, 姚秀萍. 2006. “强降水和黄海气旋”中的干侵入分析 [J]. *高原气象*, 25 (1): 16-28. Yang Guiming, Mao Dongyan, Yao Xiuping. 2006. Analysis on dry intrusion in heavy rain and Huang-Hai cyclone [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (1): 16-28.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2005. 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*, 29 (6): 973-985. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (6): 973-985.
- Yao X P, Wu G X, Zhao B K, et al. 2007. Research on the dry intrusion accompanying the low vortex precipitation [J]. *Science in China (Series D)*, 50 (9): 1396-1408.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2003. 干侵入的研究及其应用进展 [J]. *气象学报*, 61 (6): 769-778. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2003. Reviews on the dry intrusion and its application [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 769-778.
- 尹承美, 卓鸿, 胡鹏, 等. 2008. FY-2 产品在济南“7.18”大暴雨临近预报中的应用 [J]. *气象*, 34 (1): 27-34. Yin Chengmei, Zhuo Hong, Hu Peng, et al. 2008. The application of FY-2 satellite products to Jinan severe heavy rain Nowcasting on 18 July 2007 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (1): 27-34.
- Zhang Q H, Lau K H, Kuo Y H, et al. 2002. A numerical study of a mesoscale convective system over the Taiwan Strait [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1150-1170.
- 赵兵科, 吴国雄, 姚秀萍. 2008. 2003 年夏季梅雨期一次强气旋发展的位涡诊断分析 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1241-1255. Zhao Bingke, Wu Guoxiong, Yao Xiuping. 2008. A diagnostic analysis of potential vorticity associated with development of a strong cyclone during the Meiyu period of 2003 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (6): 1241-1255.
- Zhao S X, Bei N F, Sun J H. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24: 555-572.