

刘会荣, 李崇银, 周育锋. 2011. 山东地区一次台风降水事件的干侵入特征分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 289–300. Liu Huirong, Li Chongyin, Zhou Yufeng. 2011. The analysis of dry intrusion feature of a typhoon rainfall event occurring in Shandong Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 289–300.

山东地区一次台风降水事件的干侵入特征分析

刘会荣^{1,2} 李崇银^{1,3} 周育锋⁴

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

4 北京应用气象研究所, 北京 100029

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2008 年 7 月 17~21 日发生在山东地区的强降水事件进行了分析, 发现这次强降水是在中低纬度系统相互作用下产生的。对于干侵入特征的分析表明, 这次强降水事件中干空气主要以纬向侵入为主, 这与济南“7.18”暴雨不同。通过对假相当位温 (θ_{se}) 的诊断分析发现, 干空气侵入一方面有利于锋区的形成和维持, 另外一方面还能够加剧低层的对流不稳定性, 有利于对流运动的维持和发展。湿位涡场的分析则表明, 高位涡的下传是干空气侵入的一种可能机制, 干侵入是高位涡下传的一种表现方式。

关键词 干空气侵入 对流不稳定 假相当位温 湿位涡

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0289-12 **中图分类号** P443 **文献标识码** A

The Analysis of Dry Intrusion Feature of a Typhoon Rainfall Event Occurring in Shandong Province

LIU Huirong^{1,2}, LI Chongyin^{1,3}, and ZHOU Yufeng⁴

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*

4 *Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029*

Abstract By employing the NCEP/NCAR reanalysis datasets, the characteristic of the torrential rain event occurred in Shandong Province is analyzed. The results show that the interaction between mid and low latitude systems play an important role in the occurrence of the torrential rain event. The feature of dry air intrusion is also analyzed, it's different from the “7.18” torrential rain occurred in Jinan and mainly presents a zonal intrusion characteristic. Through the diagnostic analysis of pseudo-equivalent potential temperature (θ_{se}), it is found that the dry air intrusion is advantageous to the formation and maintenance of frontal zone, in addition, the dry air intrusion can cause the increase of convective instability which is useful to the maintenance and development of convection. The analysis of MPV (Moist Potential Vorticity) shows that the probably mechanism of the dry intrusion is that the high

收稿日期 2009-10-08 收到, 2011-03-18 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 U0833602, 国家重点基础研究发展计划 2007CB411805

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

potential vorticity descends from the upper troposphere to the lower level, therefore, the dry air intrusion is one kind of the high MPV forcing.

Key words dry air intrusion, convective instability, pseudo-equivalent potential temperature, moist potential vorticity

1 引言

2008 年 7 月 17~21 日, 山东省普降暴雨。这次强降水与 0807 号台风“海鸥”的活动密切相关, 是一次典型的台风降水过程。有很多学者对山东省台风降水的形成机制进行过探讨, 其中干冷空气活动对台风降水具有重要的影响。赵宇等 (2006) 研究了 1999 年 8 月 11~12 日山东诸城发生的特大暴雨, 指出高层冷空气侵入对流不稳定区将有利于对流不稳定能量的储存和释放, 而低层冷空气侵入台风低压环流, 可以强迫抬升低层的暖湿空气, 是暴雨发生的一种触发机制。这表明干冷空气活动与降雨过程息息相关。

针对干冷空气活动与降水的关系, 国内外诸多学者做了大量的工作。陶诗言 (1980) 研究认为, 对流层中高层槽后的冷平流有利于中尺度对流系统的侵入, 在促进对流不稳定性增强中起到了十分重要的作用, 并且西风带弱冷空气活动是产生中纬度大范围大暴雨的必要条件。Browning and Golding (1995) 将来源于对流层顶附近的气流侵入到低层的现象称之为干侵入, 这支气流具有高位势涡度和低湿球温度。虽然干侵入不利于宽广的锋面降水, 但是它对强对流性降水的产生非常有利。Browning and Roberts (1996) 研究指出, 暖输送带中的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 (2003) 的研究则进一步指出, 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。此外, Browning (1997) 的研究指出, 气旋的发展除了与湿空气上升有关外, 还与气旋中心附近从对流层顶附近下沉至低层的干侵入有关。有关干侵入对气旋发展的影响, 我国学者也做了很多工作, 杨贵名等 (2006) 对 2003 年梅雨期的一次强降水过程进行分析后指出, 对气旋附近的强降水, 干侵入起逐渐加强作用; 对远离气旋区域,

MPV1 (等压面上湿位涡垂直分量) 所反映的干侵入特征对强降水的作用在气旋附近与远离气旋区有所不同。江淮流域暴雨过程冷空气活跃的特征表现各异, 除了传统意义上的干侵入外, 还有来自中高纬度的干冷空气向南“侵入” (姚秀萍和于玉斌, 2005)。于玉斌和姚秀萍 (2000) 将位涡诊断分析方法应用于“96.8”台风暴雨的分析, 指出对流层低层中高纬度冷空气扩散南下, 在台风低压环流区附近的侵入作用是暴雨发生的最重要的原因之一。

本文选取 2008 年 7 月 17~21 日发生在山东地区的强降水事件作为研究对象, 利用分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)、逐日 4 个时次的 NCEP 资料对这次暴雨过程中的干侵入特征进行分析, 并探讨干侵入的机制及其与降水的关系。

2 资料及强降水过程简介

2.1 资料选取

本文所用资料包括 1 h 和 24 h 实况降水资料以及美国 NCEP 分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)、6 h 间隔的逐日 4 次的全球再分析资料。

2.2 强降水过程分析

图 1 给出了 2008 年 7 月 17~21 日逐 24 h 降雨量的分布情况, 可以发现雨带呈现西南—东北走向。7 月 17 日 00 时 (协调世界时, 下同) 至 18 日 00 时 (图 1a), 降水主要发生在山东西部、河南东北部以及河北南部地区, 其中降雨中心位于三省交界地区, 24 h 降雨量超过了 50 mm; 接下来, 雨带东移, 降水强度加大, 18 日 00 时至 19 日 00 时 (图 1b), 雨带中心降雨量超过了 100 mm; 而后, 雨带中心位置基本维持不变, 但范围和中心降雨强度都明显减小 (图 1c); 至 21 日 00 时, 除部分地区外, 降水结束 (图 1d)。

图 2 给出了 18 日牟平、文登、昌邑和安邱 4 站 1 h 降雨量变化情况, 可以发现, 15 时以后降雨量明显增大, 其中安邱站 1 h 最大降雨量超过

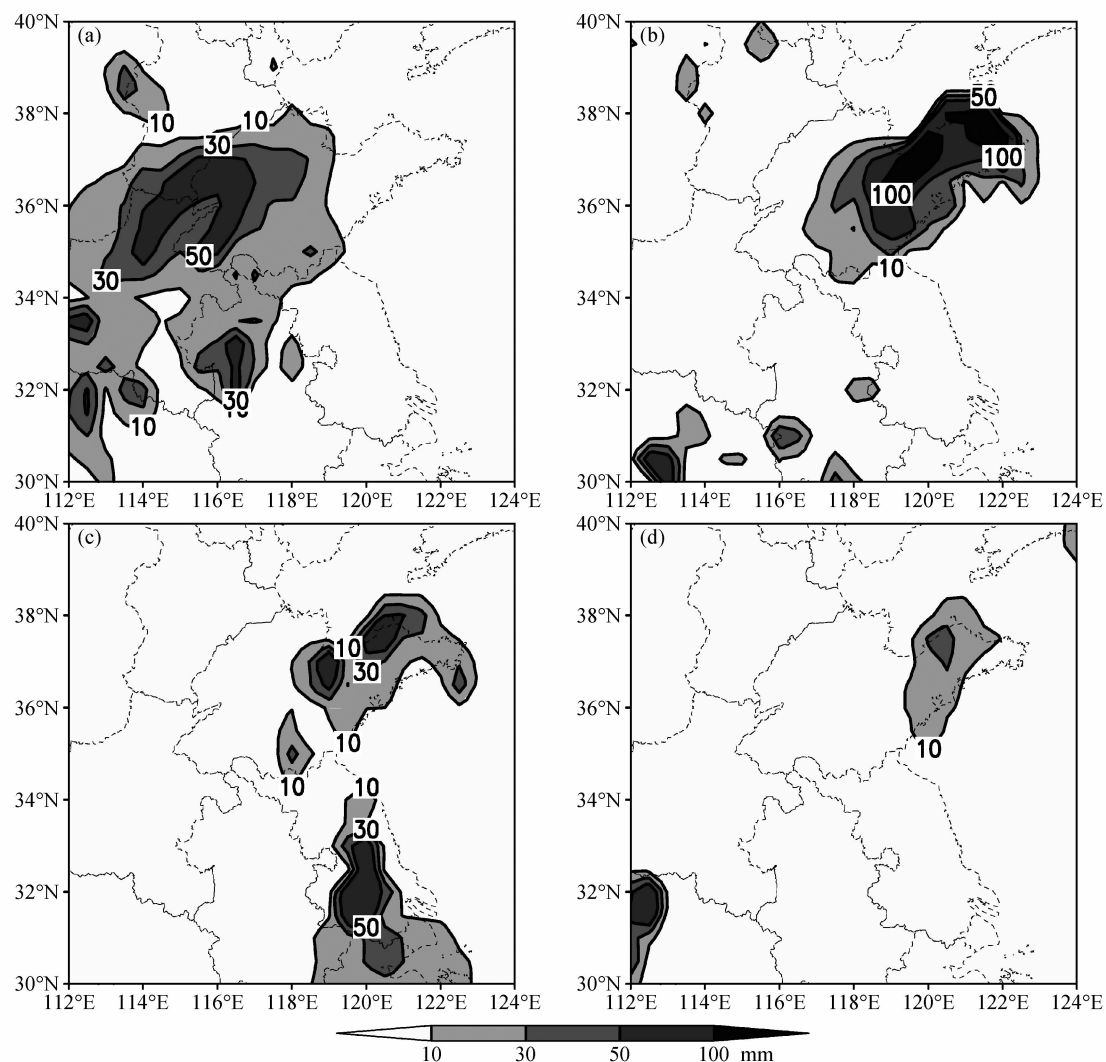


图1 2008年7月17日00时至21日00时逐24 h降雨量分布：(a) 17日00时至18日00时；(b) 18日00时至19日00时；(c) 19日00时至20日00时；(d) 20日00时至21日00时

Fig. 1 The 24-h accumulated precipitation amount from 0000 UTC 17 Jul to 0000 UTC 21 Jul 2008: (a) 0000 UTC 17 Jul to 0000 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 18 Jul to 0000 UTC 19 Jul; (c) 0000 UTC 19 Jul to 0000 UTC 20 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul to 0000 UTC 21 Jul

了60 mm，表明这次降水与强对流活动有关。

根据山东省水文水资源勘测局监测，全省平均降雨量72 mm，最大市平均降雨量发生在烟台市，达到145 mm，最大县（市、区）平均降雨量烟台龙口市达到了220 mm，最大站点降雨量莱西市北墅水库为335 mm。山东省全省3个县（市、区）平均降雨量超过200 mm，29个县（市、区）平均降雨量超过100 mm，92个县（市、区）平均降雨量超过50 mm。

此外，这次降雨过程导致154 km²的土地上降水超过300 mm，3863 km²土地上降雨量超过200 mm，33379 km²土地上降雨量超过100 mm。这次

降水还使得全省大中型水库增水4×10⁹ m³，导致20座大型水库超限。

上述分析表明，2008年7月18日00时至19日00时是这次降水发生的主要时段，本文将主要对这一时段内的干空气活动特征进行分析。

2.3 大气环流形势分析

中高纬度与低纬度系统的相互作用是这次暴雨发生的主要原因。图3给出了0807号台风的路径图，0807号台风“海鸥”于15日在菲律宾以东洋面上生成，经台湾岛后，于18日10时左右在福建省霞浦县长春镇登陆，并减弱为热带风暴，而后，它向北偏东方向移动，开始影响我国东部

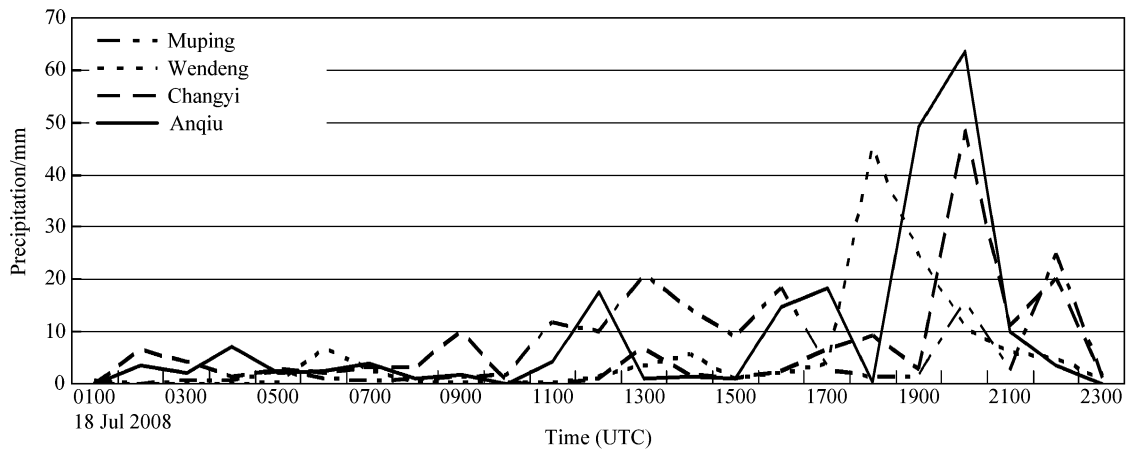


图2 2008年7月18日牟平、文登、昌邑和安邱4站01时至23时1 h降雨量的时间变化

Fig. 2 Time variation of the 1-h precipitation amount from 0100 UTC to 2300 UTC 18 Jul 2008 at Muping, Wendeng, Changyi, and Anqiu

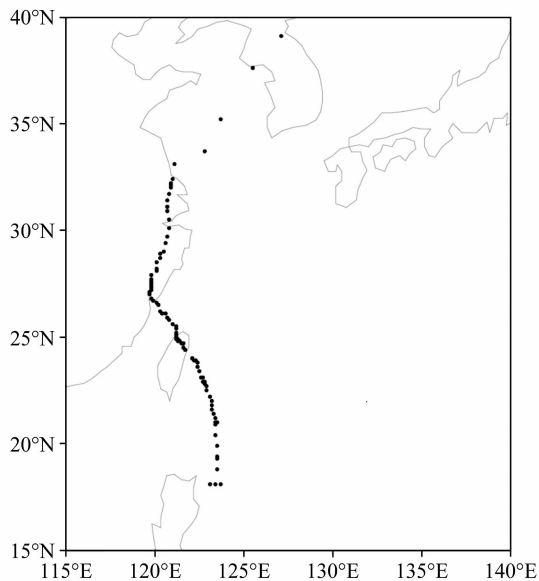


图3 台风“海鸥”移动路径

Fig. 3 Moving route of typhoon Kaimaegi

沿海地区。19日17时以后，热带风暴减弱为热带低压，并东移出海。

图4给出了暴雨过程中500 hPa层次上逐日平均的位势高度场的分布情况。2008年7月17日(图4a)，西太副高外围西伸进入我国内陆地区，台风外围偏南气流沿副高西侧携带大量水汽进入暴雨发生地。在110°E附近，中纬度存在一个明显的低压槽，并出现闭合的低涡系统，这有利于冷空气沿低压槽进入山东西部地区，冷暖气流在此交绥，导致山东西部发生了一场强降水。2008年7月18日(图4b)，西太平洋副热带高压主体

(588 gpm线)位于我国东部海上，副高脊线北抬至33°N附近且台风登陆北上，这都为台风外围暖湿气流源源不断地进入山东地区提供了便利条件。此外，西风带上低压槽东移至115°E附近并有所加深，这有利于弱冷空气进入山东东部地区。而后，虽然台风环流继续北上，但随着其强度减弱和携带水汽的减少，且西风带低压槽变浅，这使得降水逐渐减小(图略)。

从2008年7月18日NCEP资料分析的700 hPa流场(图5)可以知道，在这次较强的降水过程中，有华北低涡的发生发展，这次的低涡系统非常深厚，可以向上伸展至对流层中高层，并随高度向西北方向倾斜。华北低涡于2008年7月16日在(35°N~40°N, 110°E~115°E)地区生成，而后在华北地区摆动，并逐渐东移，至2008年7月18日06时(图5a)，低涡中心位于(36°N, 114°E)，接下来低涡东移，至18日18时(图5b)，低涡中心东移至(36°N, 116°E)。这一低涡在华北地区滞留4~5日，而后向东北地区移动。孙建华等(2005)的研究指出，当华北夏季冷涡维持，水汽供应不太丰富时，一般不会出现暴雨，而是仅引发强烈对流天气，诸如飑线和强风暴之类。这次暴雨个例比较特殊，恰逢台风登陆，为山东地区提供了丰富的水汽。

综上所述，在副高西侧偏南气流和华北低涡东侧西南气流引导下，0807号台风登陆后向北移动，其外围偏南气流携带大量水汽进入山东地区，为这次暴雨的发生提供了水汽条件。此外，中纬度低涡

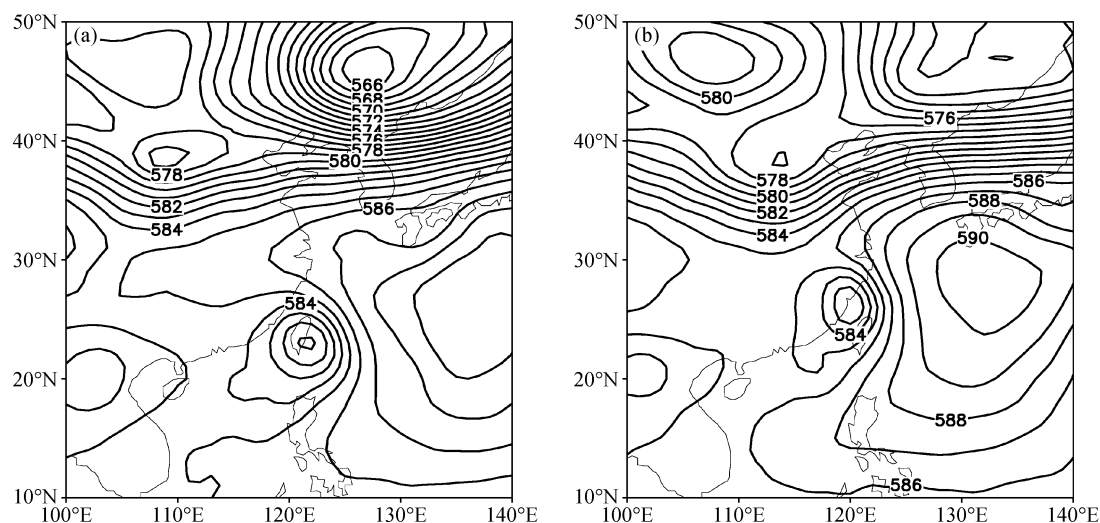


图4 500 hPa 平均高度场 (单位: dagpm): (a) 2008 年 7 月 17 日 00 时至 18 时; (b) 2008 年 7 月 18 日 00 时至 18 时

Fig. 4 Average geopotential height (dagpm) at 500 hPa; (a) 0000 UTC to 1800 UTC 17 Jul 2008; (b) 0000 UTC to 1800 UTC 18 Jul 2008

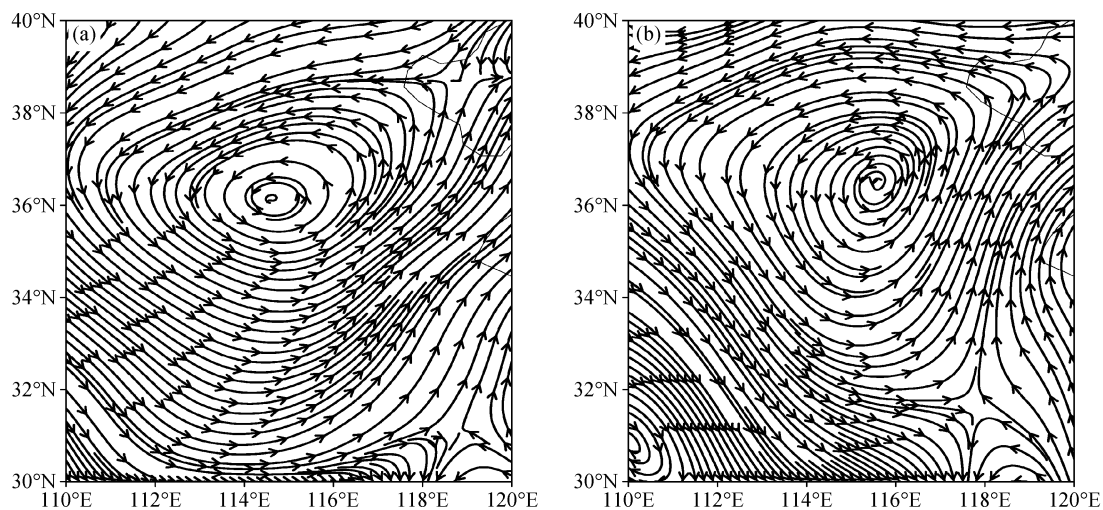


图5 700 hPa 流场: (a) 2008 年 7 月 18 日 06 时; (b) 2008 年 7 月 18 日 18 时

Fig. 5 The streamline at 700 hPa; (a) 0600 UTC 18 Jul 2008; (b) 1800 UTC 18 Jul 2008

系统的存在,有利于干冷空气沿低涡南侧进入山东地区。二者共同作用,导致了这次持续性强降水事件的发生。以往台风降水过程中有关于冷空气的活动特征研究不多,本文拟从干冷空气角度出发,分析它在这次降水过程的表现形式和作用。

3 水汽作用分析

充沛的水汽条件是暴雨发生的不可或缺的条件,图1结果表明,2008年7月18日00时至19日00时是暴雨发生的主要时段,图6给出了这一

时间范围内水汽通量和水汽通量散度的分布情况,其中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水汽的辐散和辐合。分析结果表明,这次暴雨的水汽主要来源于台风外围东侧的偏南气流,受副高北抬的影响,可以将暖湿气流源源不断的输送到山东地区。2008年7月18日00时至18时,在暴雨发生地附近一直存在水汽通量散度的辐合中心,其强度小于 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。此外,在辐合区域附近则有水汽通量散度的辐散中心,表明这些区域是水汽的源,这有利于山东地区水汽的堆积,为暴雨

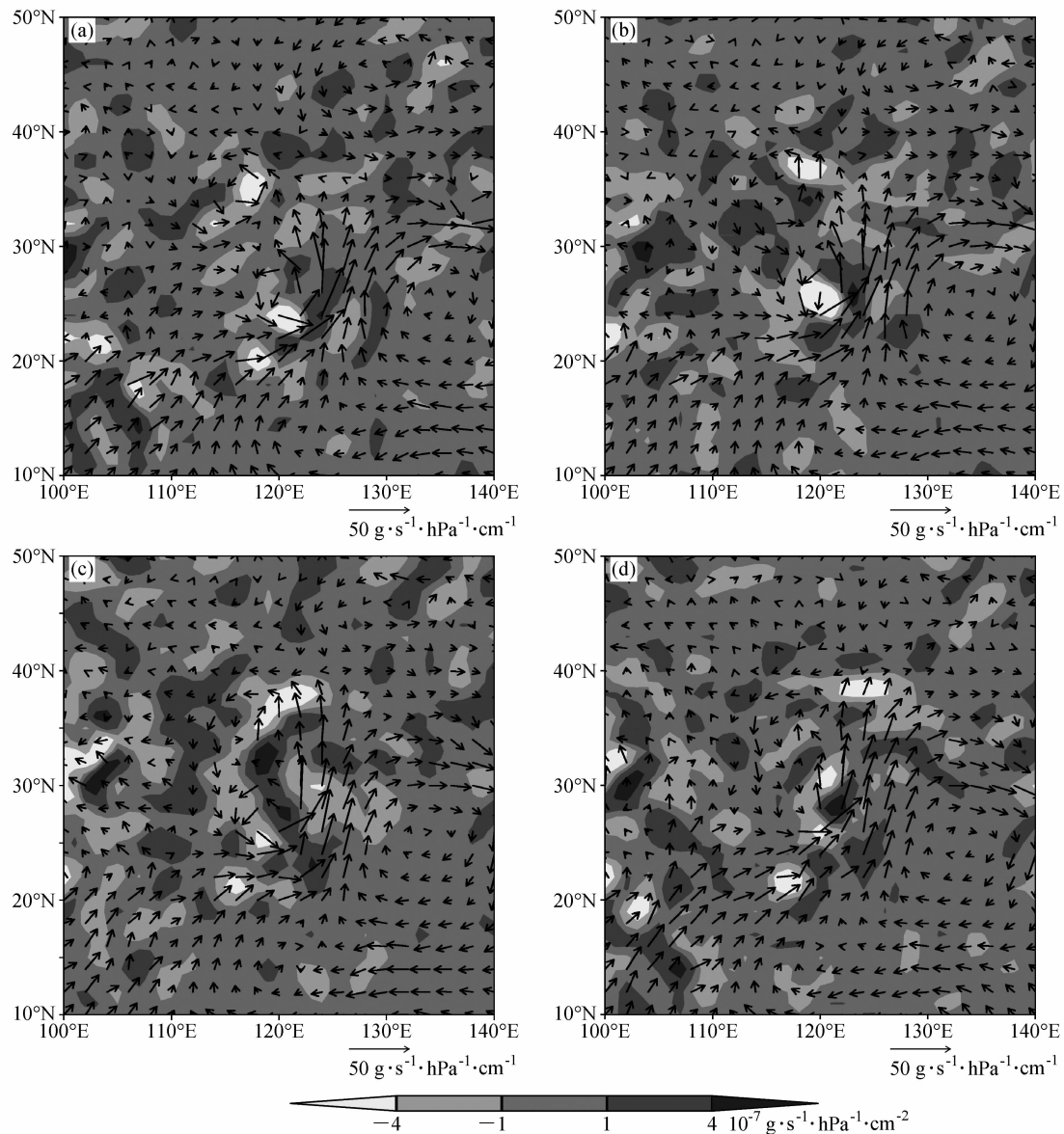


图6 850 hPa水汽通量(矢量)和水汽通量散度(阴影): (a) 2008年7月18日00时; (b) 2008年7月18日06时; (c) 2008年7月18日12时; (d) 2008年7月18日18时

Fig. 6 The water vapor flux (vector) and water vapor flux divergence (shading) at 850 hPa: (a) 0000 UTC 18 Jul 2008; (b) 0600 LST 18 Jul 2008; (c) 1200 UTC Jul 2008; (d) 1800 UTC Jul 2008

的发生提供了水汽条件。

4 干侵入过程分析

强降水的发生除了暖湿气流的作用外, 还与干空气活动有着密切的关系, 下面将研究干空气侵入的主要特征。

4.1 干侵入的湿度场特征

初步分析表明, 这次暴雨过程中的干空气主

要来源于对流层中上层。参考 Browning and Golding (1995) 的做法, 这里定义相对湿度小于60%的区域为干区, 图7描述了500 hPa上不同同时次的相对湿度场和风场的分布情况。2008年7月17日00时(图7a), 在(30°N~40°N, 100°E~110°E)范围内, 有一股干空气存在, 它位于500 hPa低压槽后; 2008年7月17日12时(图7b), 干空气东移至110°E附近, 且强度加大; 此后, 干空气持续东移, 且位于雨区西侧(图7c、

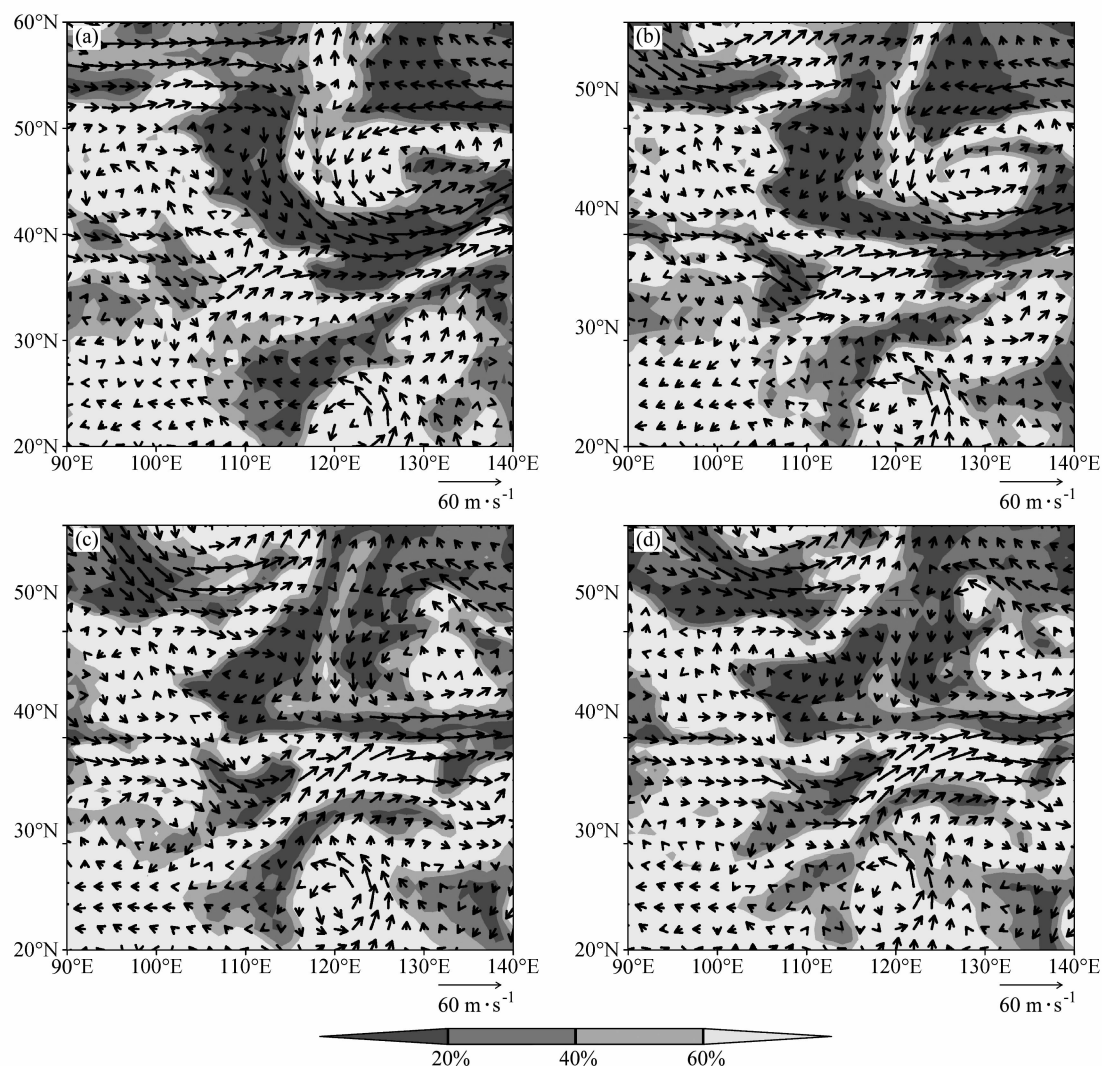


图7 500hPa相对湿度场(阴影)和风场(矢量): (a) 2008年7月17日00时; (b) 2008年7月17日12时; (c) 2008年7月18日00时; (d) 2008年7月18日12时

Fig. 7 The relative humidity (shading) and wind field (vector) at 500 hPa: (a) 0000 UTC 17 Jul 2008; (b) 1200 UTC 17 Jul 2008; (c) 0000 UTC 18 Jul 2008; (d) 1200 UTC 18 Jul 2008

7d)。另外,干空气前沿呈西南—东北走向,这与雨带形状一致,表明干空气活动对降雨的分布具有重要的影响。

图8给出了不同时段相对湿度场沿36°N的纬向—高度剖面图,对相对湿度小于20%的干空气活动特征进行分析,17日00时(图8a),在110°E以西地区,干区自对流层高层呈漏斗状向下伸展至500 hPa,干区前沿位于105°E附近;17日12时(图8b),干区向下伸展至600 hPa附近,且其位置明显东移,干区前沿位于110°E以东地区;18日00时(图8c),干区的垂直厚度变化不大,但它的前沿已经到达115°E附近;18日12时,干

区继续向下伸展至600 hPa以下,并东移至雨区西部前沿地区。

上述分析表明,这次暴雨过程中确实存在干空气侵入现象,虽然水平层次上干区范围相对较小,但是垂直层次上,干空气可以向下侵入到600 hPa以下。此外,随着时间推移,干区具有明显的东移特征,强降水事件就发生在干区前部。

2007年7月18日,济南地区发生了一次局地性短时强降水事件,对“7.18”暴雨过程中的干空气活动特征进行分析(图略),发现受40°N以北地区偏北风影响,500 hPa上干空气活动特征主要表现为向南移动,垂直层次上干空气沿经向向

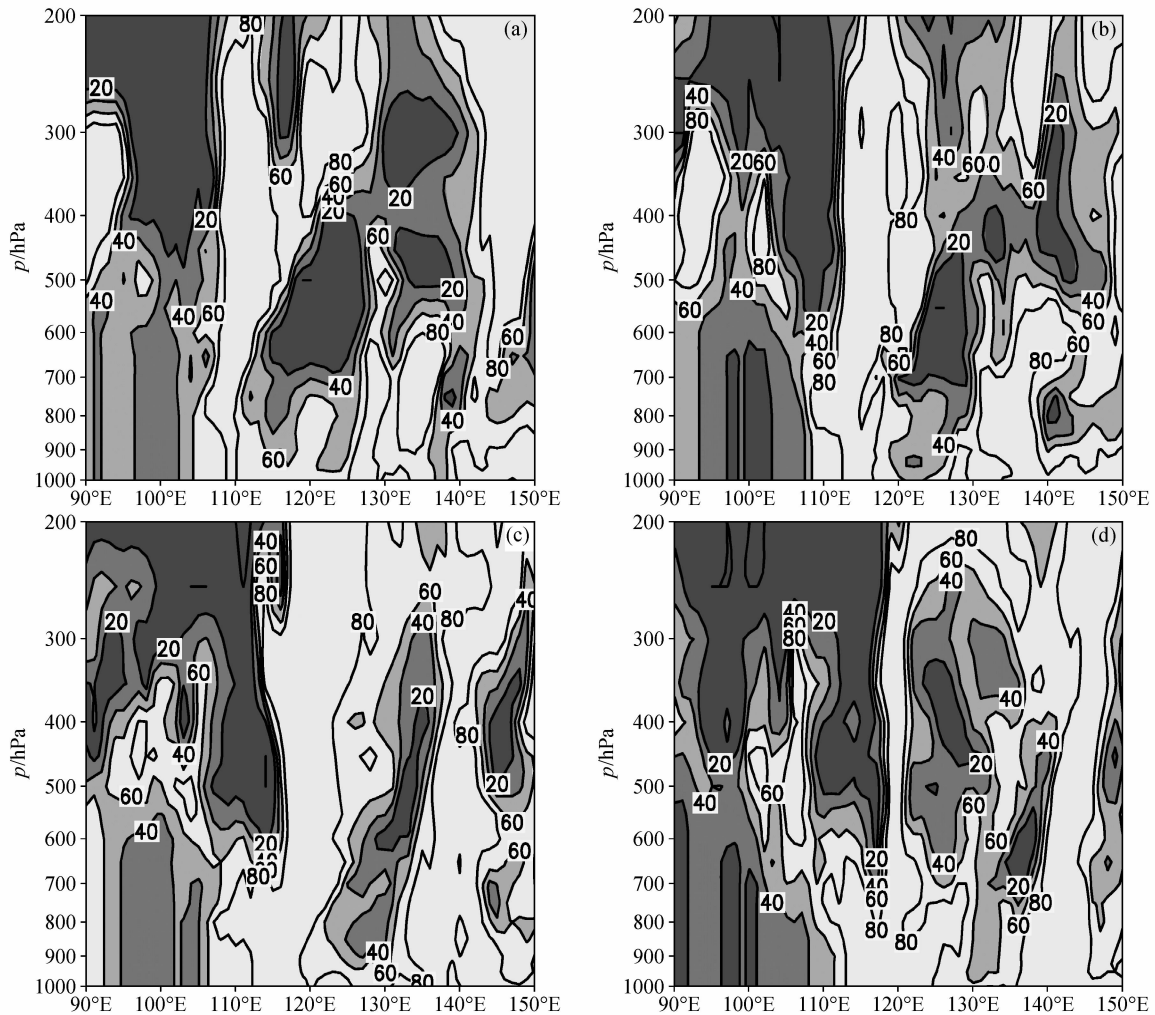


图8 暴雨发展过程中相对湿度(%)沿36°N的经度—高度剖面图: (a) 2008年7月17日00时; (b) 2008年7月17日12时; (c) 2008年7月18日00时; (d) 2008年7月18日12时

Fig. 8 The longitude-height cross section for relative humidity (%) over 36°N: (a) 0000 UTC 17 Jul 2008; (b) 1200 UTC 17 Jul 2008; (c) 0000 UTC 18 Jul 2008; (d) 1200 UTC 18 Jul 2008

下侵入。对图6结果进行分析,发现这次降水事件中干空气移动路径主要是受西风带上低压槽影响,且水平方向上,干空气主要特征表现为东移,垂直层次上干空气沿纬向向下侵入,这与“7.18”降水事件中干空气活动特征有很大不同。

4.2 干侵入的三维流场结构分析

为了进一步探讨干空气侵入的特征,考虑到影响这次暴雨的干空气的活动特征,在 $x-z$ 面上做 u (纬向风速)与 $100 \times \omega$ (垂直风速)合成气流的垂直纬向环流剖面图,来进一步剖析干侵入的特征(图9)。

图9分析结果表明,在120°E附近存在很强的上升运动,下沉支则位于110°E~115°E之间,

它是干冷空气入侵的载体,由于高层西风强度较大,并非所有的干空气都可以侵入到对流层底部,部分干空气甚至在较高的层次上就侵入到了暖湿气流前沿,这也导致干空气类似漏斗状的向下侵入(图8)。

针对济南“7.18”暴雨的分析表明,在济南以北地区的下沉支可以和济南附近的上升支组成一个完整的经向环流圈,其中经向环流圈的下沉支是干空气侵入的主要载体。这次暴雨过程中(图9a),在115°E以西地区,有一明显的纬向环流圈,它的上升支位于105°E以西地区,下沉支位于暴雨区西侧,暴雨区西侧的下沉支是暴雨过程中干空气侵入的载体。前面分析表明,济南

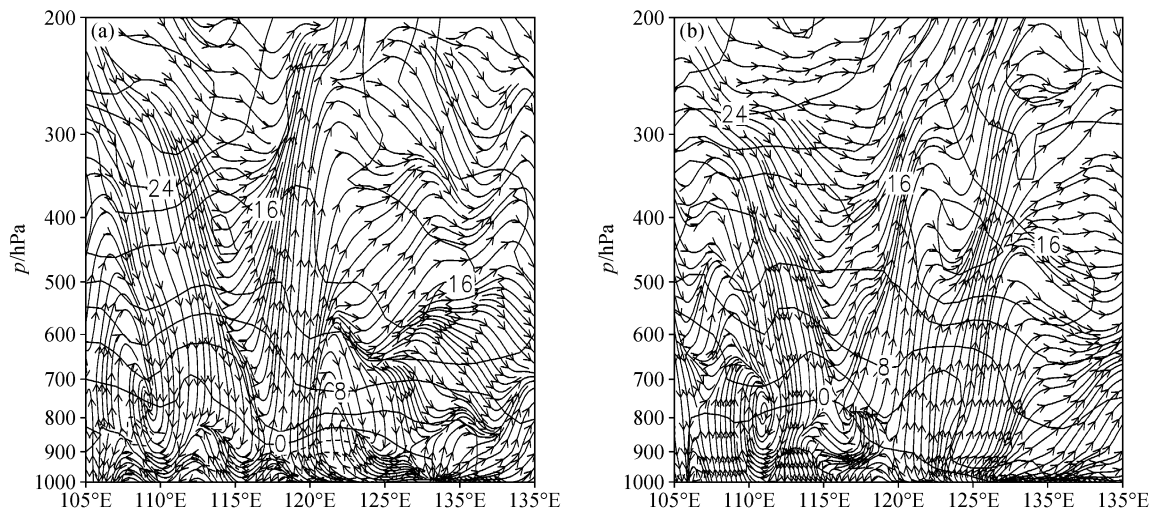


图9 沿 36°N 的纬向环流 ($u, 100 \times \omega$) 和纬向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的纬向垂直剖面图: (a) 2008 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2008 年 7 月 18 日 18 时

Fig. 9 The zonal vertical cross section for the zonal circulation ($u, 100 \times \omega$) and the zonal wind ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) over 36°N: (a) 1200 UTC 18 Jul 2008; (b) 1800 UTC 18 Jul 2008

“7.18”暴雨和这次台风降水过程中的干空气是通过两种不同性质的环流圈的下沉支作为输送载体侵入至暴雨区的。

4.3 干空气侵入影响降水的机制

图 10 给出了 2008 年 7 月 18 日不同时次假相当位温 (θ_{se}) 沿 36°N 的纬向—高度剖面图。2008 年 7 月 18 日 00 时 (图 10a), 在 115°E 附近, 等 θ_{se} 线密集, 且随高度增加向西倾斜。在对流层低层 120°E~125°E 之间是对流不稳定区域 ($\partial\theta_{\text{se}}/\partial\theta > 0$); 2008 年 7 月 18 日 06 时 (图 10b), 锋区东移, 到达暴雨发生地西侧。对流不稳定区域向上伸展, 且低层水汽湿度增加; 2008 年 7 月 18 日 12 时 (图 10c), 锋区位置维持不变, 但等 θ_{se} 线变的更加密集, 且锋区变得相对陡直并向上伸展; 2008 年 7 月 18 日 18 时 (图 10d), 锋区进一步向上伸展至 400 hPa 以上。在对流层低层 120°E 以东地区, 等 θ_{se} 线变的密集, 对流不稳定度进一步增大。

此外, 图 10 结果显示, 在山东地区附近, 对流层中高层等 θ_{se} 线呈漏斗状下凹, 这有利于对流层高层的干空气沿等熵面下滑, 干空气气块具有较低的 θ_{se} , 其侵入至对流层低层具有较高 θ_{se} 的湿空气上方时, 必然导致对流不稳定度的增加, 这使得对流运动进一步发展, 有利于暴雨的产生。

上述分析表明, 干空气侵入有利于低层对流

运动的发展, 这使得低层的暖湿气流可以沿上凸的等熵面爬升至较高的高度, 干冷空气东移并侵入至暖湿气流之中, 两种不同性质的气团遭遇, 这有利于锋区的形成和维持。

4.4 干空气侵入的可能机制

前面的分析表明, 在这次降水过程中确实存在高层干空气侵入对流层中低层的现象, 下面本文将进一步分析干空气侵入的可能机制。

湿位涡是近年来引入天气分析和预报的一个重要的物理量, 由于干空气中湿位涡和干位涡强度相当, 因此我们利用这一变量对于干空气活动特征进行了分析。图 11 给出了 2008 年 7 月 18 日不同时次的湿位涡的纬向—高度剖面图, 通过与图 8 作比较, 能够看出, 湿位涡场的分布形势可以更好的刻画出干空气侵入的特征。从图 11 结果可以看出, 干空气具有较高的位涡, 其中 0.5 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) 线可以向下伸展至 600 hPa 附近, 这表明干空气可以自对流层顶向下呈倾斜的漏斗状侵入至对流层中低层以下, 这种侵入形势在 2008 年 7 月 18 日全天都有很好的体现, 只是侵入的强度稍有差别。干空气侵入可以将高层的高位涡带至对流层中低层, 这有利于对流层中低层低涡的维持和发展, 对降水的发生十分有利。

上述分析表明, 高位涡下传是干空气侵入的

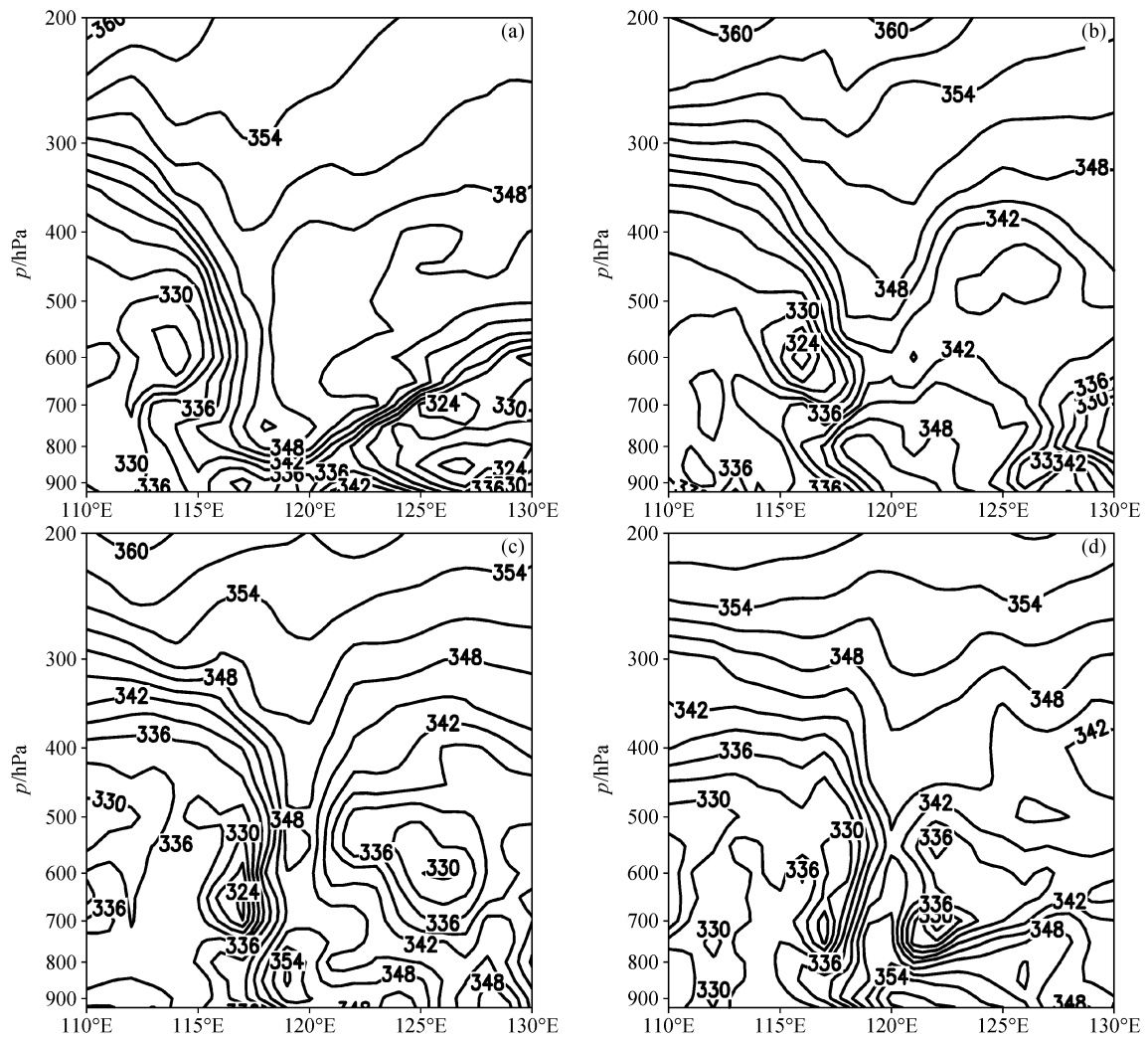


图 10 θ_{se} (单位: K) 沿 36°N 的经度—高度剖面图: (a) 2008 年 7 月 18 日 00 时; (b) 2008 年 7 月 18 日 06 时; (c) 2008 年 7 月 18 日 12 时; (d) 2008 年 7 月 18 日 18 时

Fig. 10 The longitude-height cross section for θ_{se} (K) along 36°N : (a) 0000 UTC 18 Jul 2008; (b) 0600 UTC 18 Jul 2008; (c) 1200 UTC 18 Jul 2008; (d) 1800 UTC 18 Jul 2008

一种可能机制, 而干空气侵入是高位涡下传的一种表现形式, 这和 Yao et al. (2007) 的研究一致。

5 结论和讨论

针对 2008 年 7 月 17~21 日发生在山东地区的强降水事件, 对导致本次暴雨的大尺度环流背景场进行了分析。此外, 本文着重探讨了干空气侵入在这次暴雨事件中的表现特征、干侵入影响降水的机制和干空气侵入的机制, 得到了以下结论:

(1) 大尺度环流条件有利于暴雨的发生: 这

次降水过程中, 中纬度华北地区有一深厚的低涡系统存在, 其与位置偏北的副热带高压的共同作用, 有利于台风外围偏南气流携带大量水汽进入山东地区。此外, 华北低涡的存在还有利于干空气自西向东进入山东地区, 冷暖空气对峙, 有利于降水的产生。

(2) 这次暴雨过程中确实存在干空气自高层侵入山东地区的现象, 与济南“7.18”暴雨的对比分析表明, 这次干空气侵入主要表现为由西向东自对流层高层向下的侵入, 即这次暴雨事件中干空气侵入具有很强的纬向特征, “7.18”暴雨事件中干侵入主要表现为经向特征, 二者在侵入的

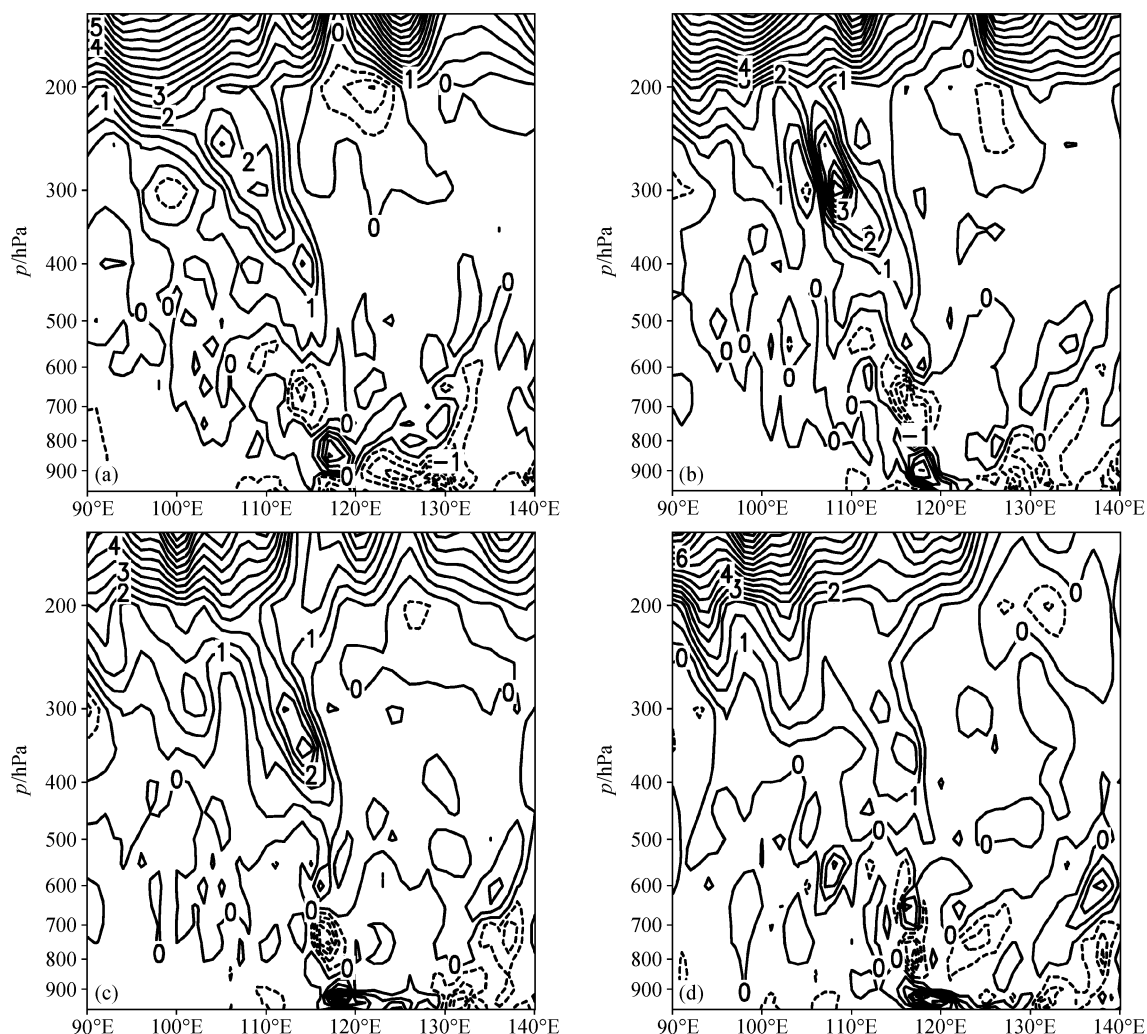


图 11 同图 10, 但为湿位涡 (单位: PVU)

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for moist potential vorticity (PVU)

方式上有很大的不同。

(3) 利用物理量 θ_{se} 探讨了干侵入影响暴雨的机制, 干空气向下侵入至暖湿气流上方时会导致对流不稳定性进一步加大, 从而有利于低层对流不稳定的发展, 这使得低层水汽可以被抬升到一个较高的高度, 有利于降水的产生。

(4) 湿位涡分析表明, 干空气具有较高的位势涡度, 干侵入的可能机制是高位涡的下传, 干侵入是高位涡下传的一种表现方式。

参考文献 (References)

Browning K A. 1997. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development [J]. *Meteorological Applications*, 4:

317-324.

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

James R P, Clark J H E. 2003. The diagnosis of vertical motion within dry intrusions [J]. *Wea. Forecasting*, 18: 825-835.

孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 492-506.

Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (3): 492-506.

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 [M] (in Chinese). 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 (Ser. D), 50 (9): 1396 - 1408.
- 于玉斌, 姚秀萍. 2000. 对华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析 [J]. 高原气象, 19 (1): 111 - 120. Yu Yubin, Yao Xiuping. 2000. The diagnosis analysis of potential vorticity for a severe typhoon rainstorm in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (1): 111 - 120.
- 赵宇, 龚佃利, 刘诗军, 等. 2006. “99. 8” 山东特大暴雨形成机制的数值模拟分析 [J]. 高原气象, 25 (1): 95 - 104. Zhao Yu, Gong Dianli, Liu Shijun, et al. 2006. Numerical simulation of forming mechanism for the torrential rain in Shandong Province in August 1999 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 95 - 104.