

北京地区 2004 年 7 月 10 日局地暴雨 过程中的波动分析

郭 虎¹ 季崇萍^{1,2} 张琳娜¹ 张明英¹

1 北京市气象台,北京 100089

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

摘 要 2004 年 7 月 10 日(简称 04710)北京出现了局地暴雨天气。这次暴雨的落区主要集中在城区,由于降雨时间短、雨量集中,给北京城区的部分基础设施和城市交通造成了极大的负面影响。这也是近十几年来罕见的一次北京城区暴雨。针对这次局地暴雨天气过程,利用雷达、自动气象站、常规气象站资料等,结合天气学分析和重力波指数分析方法对暴雨的触发机制和落区进行了研究。分析显示:04710 暴雨是一次中小尺度天气过程,其中由重力波所激发的小尺度波动对强降雨的产生及其时空分布起主导作用;重力波发生、发展条件与判据的分析显示,强垂直风切变使平均气流中的部分动能转化为扰动动能,促使重力波的产生与传播;重力波通过积雨云团时加快了积雨云的发展,加大了云内上升速度,使不稳定能量得以释放,进而触发强降水;天气学分析指出,中层冷空气入侵造成的垂直风切变是触发重力波的主要原因;雷达回波图显示出强降雨的产生、发展及其分布形态与小尺度重力波的分布和传输相吻合。

关键词 暴雨 重力波 垂直风切变

文章编号 1006-9895(2006)04-0703-09

中图分类号 P445

文献标识码 A

A Case Study of Local Rainstorm in Beijing on 10 July 2004: The Analysis of the Gravity Wave

GUO Hu¹, JI Chong-Ping^{1, 2}, ZHANG Lin-Na¹, and ZHANG Ming-Ying¹

1 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This is a case study of the local rainstorm on 10 July 2004, which occurred over the centric downtown area of Beijing. From dusk to nighttime, most of downtown area of Beijing was suffered from an infrequent local rainstorm. The rainfall distribution was obvious inhomogeneous and the severe rain lasted only 2-3 hours from 1700 BT to 2000 BT (Beijing Time). It became weak gradually during nighttime. The mean rainfall of 6 hours was 50.3 mm over downtown area (from 1400 BT to 2000 BT). Moreover, hourly rainfall reached 52 mm and the maximum 10 minutes rainfall was 23 mm at Fengtai station, which is located in the south part of Beijing. Such severe local rainstorm is very infrequent in Beijing area for recent twenty years. It induced serious traffic jam and destroyed some common facilities in the suburban area. Focused on the triggering mechanism of the rainstorm and the distribution of the rainfall, this case is studied by using the data of Radar, automatic weather stations and traditional observation stations, combined with the meteorological analysis and gravity wave index methods. It shows that the gravity wave

收稿日期 2005-03-18, 2005-06-15 收修定稿

资助项目 北京市自然科学基金项目 8051002, 科技部公益类项目“北京城市热岛、高温热浪监测及预测技术研究”, 科技部攻关计划 2002BA904B05-02

作者简介 郭虎,男,1962 年出生,学士,高级工程师,主要从事天气动力学和数值预报研究。E-mail: guohu@263.net

triggered by the vertical wind shear generated by the cold air-mass intrusion at 700 hPa is the key factor for this rainstorm.

There are two necessary conditions for heavy rainfall: the intensive upward motion, and abundant vapor sources. The analysis of the synoptic scale vertical motion shows that there was systemic downdraught belt over Beijing area at the lower layer. It means that the systemic vertical motion was unfavorable for forming rain. Precipitation, especially heavy precipitation needs abundant vapor source. According to the statistics, in Beijing, most heavy rainfall occurs under the specific humidity of more than 12 g/kg. The observed analysis indicates that there is intensive specific humidity zone in Beijing area (the specific humidity is about 13–17 g/kg at surface). It was very favorable for generating rain. The analysis of instability energy points out that there is a high-energy tongue from southwest to northeast of North China Plain from 0800 BT to 2000 BT, and it extended from the surface to 500 hPa. The analysis of the potential pseudo-equivalent temperature indicates that the instability energy was released before 2000 BT. The drop of temperature at 710–760 hPa shows that the cold air mass intrusion appeared in the middle layer in the eastern part of Beijing. The vertical wind profile illustrates that the cold air mass intrusion induces the vertical wind shear, furthermore, generates the gravity wave.

The Richardson number and Brünt-Väisälä frequency are used to discuss the generation and transmission of the gravity wave. It shows that the vertical wind shear mainly induces partial average kinetic energy transforming into disturbing kinetic energy, finally, triggers the gravity wave. Radar echo image has clear wave structure characteristics. Meanwhile, the radar radial velocity image illustrates the convergence and divergence belt scatter alternately over Beijing downtown area. The spatial distribution of radar echo image is coincident with rainfall very well.

Key words local rainstorm, gravity wave, vertical wind shear

1 引言

前人大量的研究成果^[1~3]指出重力波对降水强度和空间分布都有明显的影响。Uccellini 和 Koch^[4]对 13 例重力波进行了分析,指出这些波动对降雨强度和分布都产生明显的影响。许多研究工作讨论了重力波的产生和维持机制,认为主要触发重力波的因素有穿透对流、切变不稳定、波道作用和地转适应过程等。Miles^[5]和 Howard^[6]研究了切变气流的稳定性,指出当风的垂直切变比较强,使得 $Ri < 1/4$, 并且存在临界层,切变气流对小扰动是不稳定的。发生切变不稳定时波动从平均气流中吸取能量。不少研究工作都指出风切变是中尺度重力波产生的能源区,重力波可因垂直切变的不稳定而增长^[6]。

当重力波在不稳定大气中传播时,波的上升部分触发对流形成积雨云团或超级单体、单积雨云团,这种积云加热反过来又加强了重力波。此外,重力波在向外频散的过程中,由于非线性集中,其能量聚集成气压跳跃、强风、强的辐合和上升运动,容易产生强烈天气^[7]。

2004 年 7 月 10 日(简称 04710)北京城区出现了罕见的局地暴雨,降水量分布极不均匀。主要降

水时段集中在 16~20 时(北京时,下同),夜间降水强度逐渐减弱。7 月 10 日 14~20 时,6 小时城区平均降水量为 50.3 mm。其中丰台气象站 17 时至 18 时 1 小时降雨量达到 52 mm,10 min 最大降雨量达到 23 mm。如此强烈的降水在北京地区近十几年的气象观测中极为少见。

本文利用 2004 年 7 月 9 日至 11 日北京地区常规气象站、自动气象站、雷达资料,结合重力波指数分析和天气学分析方法对此次局地暴雨的触发机制和主要落区进行了研究分析。

2 04710 局地暴雨的概况

2004 年 7 月 10 日,北京城区出现了罕见的局地暴雨。降雨前期北京地区高空一直处于较弱的高压脊控制中,中低空则受(700~850 hPa)偏南暖湿气流影响,空气湿度较大,天空云量较多。降雨初始阶段(16~17 时)表现为并不强烈的阵性降水天气,1 小时后降雨迅速加大并出现了局地暴雨。此次暴雨的主要降水时段集中在 17 时至 19 时,20 时以后降雨量逐渐减小并以稳定性降水为主。此次降雨表现出极强的局地性,超过 50 mm 的降雨集中在城区中心及西部地区。而北京的其他地区,如平谷、延庆、密云等地基本无降雨,通州和大兴降雨

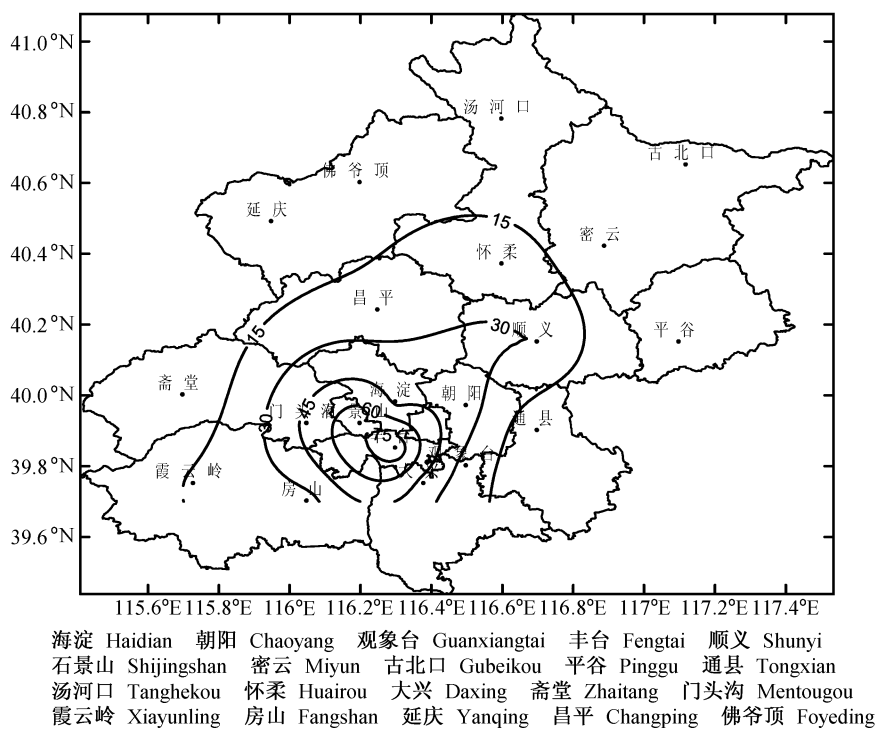


图 1 2004 年 7 月 10 日 14 时至 20 时 6 小时北京地区降水量分布图(单位: mm)
Fig. 1 The distribution of 6 hours rainfall (mm) over Beijing area from 1400 BT to 2000 BT (Beijing Time) 10 Jul 2004

量不足 3 mm, 北京周边的河北、天津也未出现中雨以上的降水。图 1 给出了 2004 年 7 月 10 日 14 时至 20 时北京地区降水量分布, 可以看到在降雨最为集中的 6 个小时内降雨主要集中在城区。此次降雨不但空间分布极不均匀, 而且具有明显的突发性。雷达回波(见图 7)显示, 从对流云团开始形成到北京城区出现局地暴雨仅仅经过了 1~2 小时。这种前兆不明显的突发性给暴雨的预报带来了一定难度。

此次暴雨过程由于降雨强度大、降雨时间集中, 给北京城区的道路交通和部分基础设施带造成了较大的负面影响。一些主要交通干道上的立交桥和部分路段的排水设备满足不了当时的排水需求而造成了严重的城市积涝, 其中复兴门、莲花桥最深积水达 1.5 m 以上, 造成了北京城区交通的严重堵塞, 导致部分路段交通瘫痪。由于雨强大, 造成了部分基础设施的毁坏, 路基和人防工程被雨水冲毁或造成坍塌, 引起了社会各界的广泛关注。

3 局地暴雨产生的天气背景

区域性暴雨对天气尺度的天气系统有较高的要

求, 特别是充沛的水汽是区域性暴雨必不可少的条件之一。而局地性暴雨则与强降雨团的活动密切相关, 降雨强度主要取决于云中含水量及降水效率^[2], 水汽的要求远远低于区域性暴雨。有利的天气系统, 如发展的锋面、低涡、气旋和强烈的垂直风切变往往会激发较强的重力波^[2, 3, 7]。当波通过这种不稳定区域时, 其波动上升运动部分组织积云对流, 形成巨大的积雨云或超级单体、多单体云团, 这种积云加热反过来又加强了重力波^[7]。上升气流越强低层辐合也越强, 水汽通量辐合也随之增加。这种条件极易造成暴雨, 有时还会伴随大风、闪电等强天气现象。

降水的产生, 尤其是强降水的产生必须有充沛的水汽供应, 暴雨往往是在大气比湿达到相当大的数值后才能形成。对暴雨区附近水汽因子的计算结果表明, 850 hPa 的比湿一般接近或超过 12g/kg^[8]。2004 年 7 月 10 日北京城区的局地暴雨发生在高空弱高压脊后槽前的西南气流里, 华北地区近地面层湿度较大, 大部分测站(北京、太原、天津、山东半岛等)都有轻雾天气。中午 14 时, 北京附近形成了较强的比湿锋区(图 2, 北京地区地面比湿约为 13

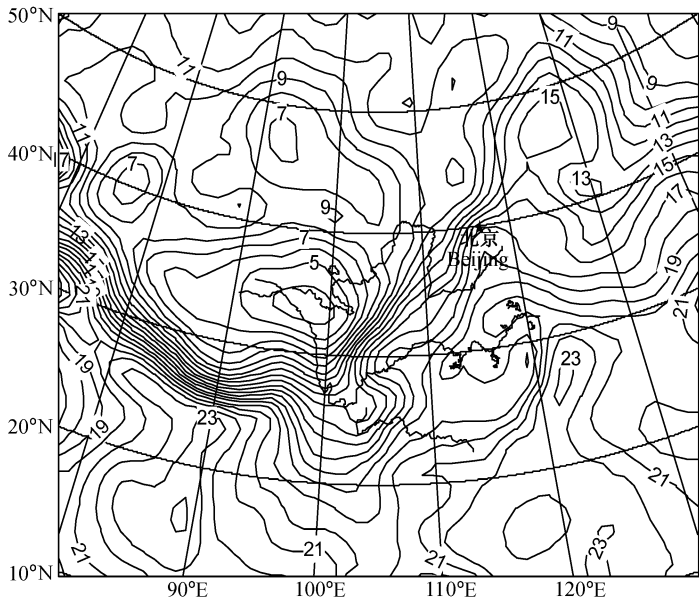


图 2 2004 年 7 月 10 日 14 时地面比湿分析(单位: g/kg, 实况资料的诊断分析)

Fig. 2 The surface specific humidity (g/kg) at 1400 BT 10 Jul 2004

~17 g/kg), 这对局地暴雨的水汽供应非常有利。对水汽通量散度(图略)的分析指出, 10 日 08 时, 北京地区水汽通量散度为正值(约为 $0.8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), 而辐合中心位于河套东南部, 强度为 $-0.8 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。此时, 水汽通量散度不利于暴雨的产生。20 时, 水汽通量散度负值区呈带状分布, 从华南、华北到内蒙古中部有三个负值中心, 北京位于华北地区水汽通量散度负值中心区附近, 其值为 $-1 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$, 已处于明显的水汽辐合区内。

层结稳定性的分析表明, 7 月 10 日 08 时到 20 时, 华北地区处于自西南向东北方向伸展的高能舌区内(图略), 高能舌从地面一直延伸到 500 hPa。地面的 θ_{se} (假相当位温)在北京附近出现一个 340 K 的高值中心。图 3 给出了北京高空测站假相当位温的时空变化, 可以看到, 08 时 500 hPa 以下的 θ_{se} 随高度的分布表现出强烈的对流性不稳定结构, 高低层之间的 $\Delta\theta_{\text{se}}$ 达到 14 K。对北京暴雨的研究表明, 几乎所有的区域性暴雨发生在本站 850 hPa、 $\theta_{\text{se}} \geq 333 \text{ K}$ 的情况下。近三十年的研究资料也指出, 本站 08 时, 850 hPa 出现高值且位势不稳定是 24 小时内形成暴雨的有利条件^[8]; 20 时, 高低层之间的 $\Delta\theta_{\text{se}}$ 减少到 2 K, 表明这一期间不稳定能量被大量释放。关于暴雨的理论分析表明, 暴雨尤其是大暴

雨都集中在很短的时间内(1 小时至数小时), 因此在降水过程中低层大气的垂直运动很强。这种强烈的垂直运动往往产生在中小尺度天气系统中, 并且如此强烈的垂直运动只有在不稳定能量释放时才得以形成^[8]。因此, 在此次局地暴雨中, 前期高温高湿天气所积蓄的不稳定能量的释放是导致强降水形成的有利条件。

在此次降水过程中, 虽然水汽和热力不稳定条件都有利于降水的发生, 但对系统性垂直运动的分

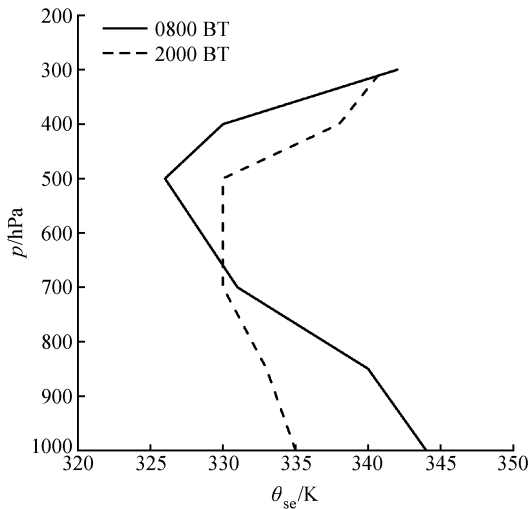


图 3 2004 年 7 月 10 日北京测站(54511)假相当位温的时空变化
Fig. 3 The spatial-temporal variation of potential pseudo-equivalent temperature at Beijing station on 10 Jul 2004

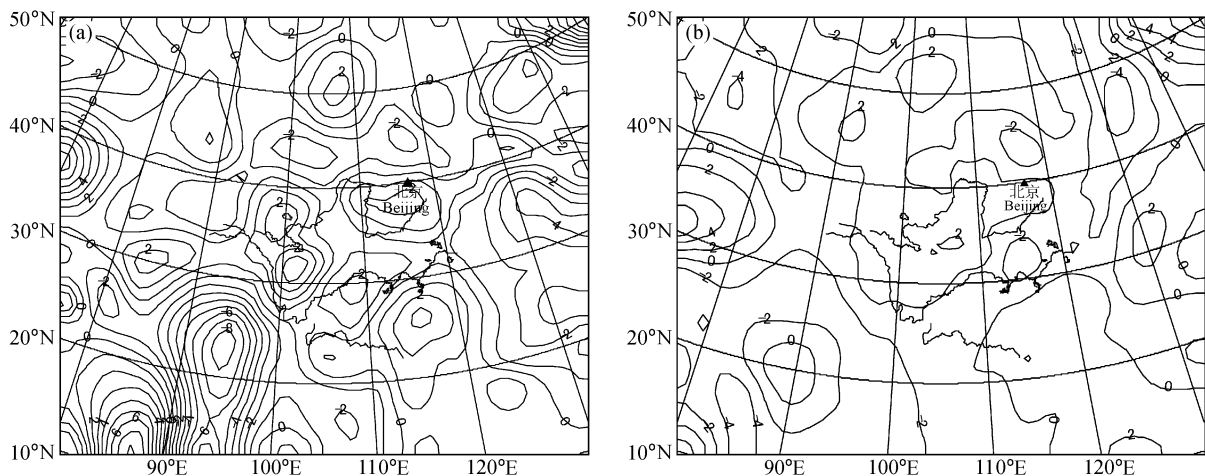


图 4 2004 年 7 月 10 日 700 hPa 垂直速度分析图 (单位: 10^{-3} hPa/s): (a) 08 时; (b) 20 时

Fig. 4 The distribution of the vertical velocity (10^{-3} hPa/s) at 700 hPa on 10 Jul 2004: (a) 0800 BT; (b) 2000 BT

析表明,北京地区低层大气一直处于较弱的下沉运动中,系统性垂直运动不利于暴雨的产生。图 4 指出 7 月 10 日 08 时和 20 时,850 hPa 垂直速度均为 1×10^{-3} hPa/s; 08 时,700 hPa 垂直速度为 1×10^{-3} hPa/s,20 时则处于强度为 2×10^{-3} hPa/s 的下沉中心内。从系统性垂直运动的演变来看,08 时至 20 时北京地区低层的下沉运动稳定少变。同时,散度场的分析也表明北京地区中低空由辐散区控制,直到强降雨结束后才转入弱的辐合区中。从理论上分析,一般雷暴云的上升气流中 10^1 m/s 的上升速度很常见,而大尺度系统中的垂直速度仅为 10^0 cm/s。因此,就 7 月 10 日天气形势而言,其高低空环流配置较为有利,但由于北京处于系统性下沉运动(强度约为 $-1.08 \sim -2.16$ cm/s)中,对暴雨天气的产生起到一定的不利影响。天气形势场的分析也表明,高空槽和地面弱辐合区的位置和强度在暴雨过程中变化很小。可以认为,在此次强天气过程中,大尺度系统为局地暴雨提供了有利的天气背景,但不是产生这一强降水过程的直接原因。如此强度的降水在大尺度动力辐合不利的条件下发生,预示着必然存在小尺度系统活动,其发生、发展触发了不稳定能量的释放和对流的发展,进而导致强降水的产生。

4 中小尺度暴雨中的波动现象

大量的暴雨成因研究工作^[2,4,8]指出,中小尺度天气系统或中小尺度对流云团是产生暴雨的主要

原因。04710 暴雨地面流场分析(图略)指出,暴雨产生前期,北京以西地区地面有一条长达数百公里的辐合带,暴雨过程结束后,这个辐合带有所减弱,但始终没有东移经过北京。因此,此次局地暴雨并不是在该辐合带中形成的,有利于触发上升运动并在短时内加强垂直运动的中小尺度系统是造成此次强降水的关键因素。

随着北京城区气象监测网的不断加密和完善,目前北京城区地面监测网水平分辨率可达 $3 \sim 5$ km。利用城区地面气象监测网信息对此次局地暴雨的时空分布研究指出,在城区仅十几公里范围内雨强分布明显不均匀,并表现出显著的波动状态——自东向西强弱相间。在最大 1 小时雨强的时空分布图[图 5(见文后彩图)]上,东部朝阳地区白家庄出现最大雨强的时间是 16:00,城市中心天安门出现最大雨强的时间是 16:43,最后一个最大雨强出现在丰台,时间为 18:00。最大雨强的时间基本上是按照由东向西顺序出现的。图 6 为此次局地暴雨过程 1 小时最大雨强的空间分布,可以看出雨量的分布呈强—弱—强的东西向波状分布。

位于北京市气象台的多普勒雷达对此次强天气过程进行了全程跟踪观测。雷达回波强度显示,此次局地暴雨过程中雷达回波呈现明显的强弱相间的波动分布,同时径向风的回波中也出现了相间分布的辐合、辐散带[图 7、8(见文后彩图)]。这次城区局地暴雨影响范围东西约 20 km,南北约 11 km,总降雨量自东向西有三个高中心和两个低中心。在

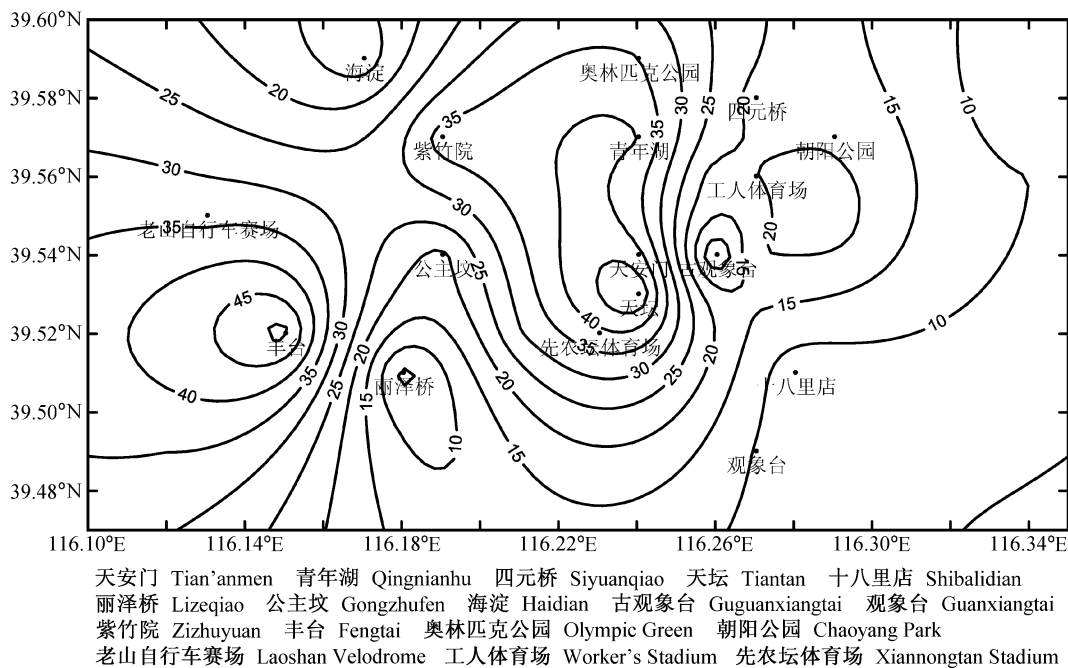


图 6 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨过程中 1 小时最大雨强的空间分布(单位: mm)

Fig. 6 The spatial distribution of hourly maximum rainfall intensity (mm) on 10 Jul 2004

多普勒天气雷达径向风场中也可看到相应的三个辐合风区和两个辐散风区(图 8)。雷达回波中所显示的波动现象和降雨量的波动在空间分布上十分吻合。这一现象进一步表明,此次局地暴雨过程中存在更小尺度的波动系统,也正是这些小尺度波动系统对暴雨的发生起了决定性作用。天气条件的分析和降水量的时空分布指出,造成这次强天气过程的主要小尺度波动系统可能是由垂直风切变激发的重力波。重力波诱发大气中的不稳定能量迅速释放而产生强对流,从而造成了这次局地暴雨。以下将对重力波的产生及其对降水的时空分布影响进行分析和讨论。

5 垂直风切变与重力波触发机制分析

重力波在地球大气和海洋中普遍存在,并对能量的输送有重要作用。一般的重力波振幅小、周期短、对天气的影响不大,但有些重力波振幅大、生命期长,过境时温度场、气压场和风场将发生明显的变化。有些重力波则与对流运动密切相关,可以驱动对流的产生,也可以在对流系统中传播^[8]。Uccellini 和 Koch^[4]对 13 例重力波进行了分析,指出这些波动对降雨强度和分布都产生了明显影响。不少研究工作都指出,垂直风切变是中尺度重力波

产生的能源区。Miles^[5]和 Howard^[6]证明如果里查森数小于 1/4,可能出现重力波不稳定。当重力波不稳定(切变不稳定)时,基本气流动能转化为波能。这种重力波具有频散的特点,当扰动区向外传播通过对流不稳定大气时,其波动上升部分组织积云对流,形成强大的上升气流,同时加大低层水汽辐合,对暴雨有触发作用^[1, 7, 9]。

为探讨 7 月 10 日局地暴雨过程中重力波的影响,本文根据环境风场的垂直切变、静力稳定度参数和布伦特-维亚塞拉频率来讨论重力波的发生、发展及其对暴雨的触发作用。

公式(1)、(2)分别表示了 Ri 数和布伦特-维亚塞拉频率(N):

$$Ri = -\frac{g}{\theta_{sc}} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial z} \left/ \left(\frac{\partial V_h}{\partial z} \right)^2 \right., \quad (1)$$

$$N = \left(-\frac{g}{\theta_{sc}} \frac{\partial \theta_{sc}}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

为了计算方便,将微分改写为差分,而 $\Delta p = -\rho g \Delta z$,则公式(1)、(2)可以表示为

$$Ri = -\frac{\Delta \theta_{sc}}{\theta_{sc}} \frac{\Delta p}{\rho (\Delta V_h)^2}, \quad (3)$$

$$N = \left(-\frac{\rho g^2}{\theta_{sc}} \frac{\Delta \theta_{sc}}{\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

在利用观测资料计算时,取 500 hPa 和 850 hPa

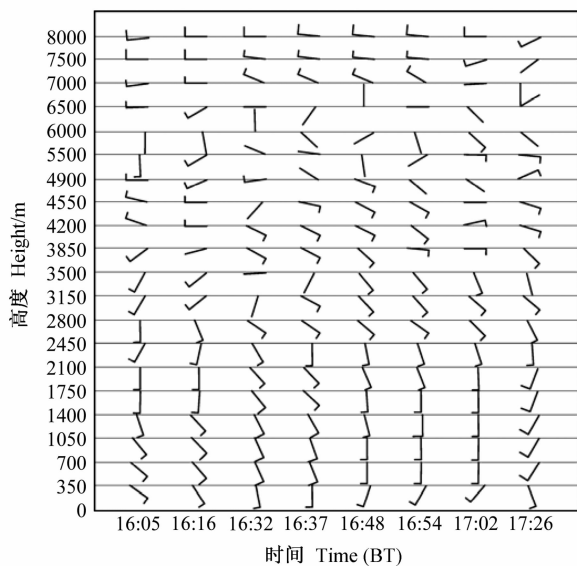


图9 2004 年 7 月 10 日雷达风廓线图

Fig. 9 The profile of radar wind on 10 Jul 2004

分别代表上下层。其中 θ_{sc} 取上下层平均值, $\rho = 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, $g = 10^3 \text{ m/s}$, $\Delta p = 350 \text{ hPa} = 3.5 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。在计算时, 依据矢量方法计算 500 hPa 与 850 hPa 之间的风速矢量差。计算结果表明: 08 时, $Ri = -1.513 \ll 1/4$; 20 时, $Ri = -0.33 \ll 1/4$, 表明由于环境场存在较明显的垂直风切变 (图 9), 10 日 16:37, 在 700 hPa 高度上首先出现了东风, 而低层仍然维持偏南气流和层结对流性不稳定 (见图 3), 这种结构极有利于重力波的发生和传播。同时, 静力稳定度参数布伦特-维亚塞拉频率 (N) 的计算表明: 由于 $\Delta\theta_{sc}$ 为负值 (08 时为 -14 , 20 时为 -2), 显然 N 为虚数, 随时间呈指数形式增大, 有利于强对流天气的发生和发展^[6, 10]。

许多关于重力波的研究工作都讨论了重力波的产生和维持机制。在此个例研究中, 中层 (700 hPa) 冷空气的入侵在时间和空间的分布上都十分有利于激发重力波。垂直风廓线是比较常用的多普勒天气雷达二次产品。图 9 是利用雷达的速度立体扫描资料, 根据 VAD (Velocity Azimuth Display) 方法制作的北京气象台雷达风廓线高度-时间剖面图。可以看到降水发生前期 (7 月 10 日 16 时之前) 北京地区中低空均为较弱的偏南气流, 16:37 开始在 3150 m 的中空首先出现较薄的偏东风层。很快这一偏东风层加厚。探空资料的分析则指出 7 月 10 日 08 时到 20 时北京地区中空 (710~760 hPa)

气温明显下降, 最大降幅为一 3°C 。中空大气温度的变化说明在这一高度有明显的冷空气入侵。正是由于中空冷空气从北京东部向西的入侵造成了环境风场的垂直切变, 进而产生了重力波。重力波首先在北京的东部地区被激发, 之后迅速自东向西传播。有研究指出, 由于暴雨中层结不稳定, 重力波的波速一般在 $10^0 \sim 10^1 \text{ m/s}$, 即以大约相当于环境风速的量级或比环境风速稍大^[2, 10]。从此次局地暴雨过程雨强的时空分布来看, 城区有自东向西的三个高中心和两个低中心, 可以估算重力波的波长约为 10 km, 其速度约为 3 m/s。

从雷达回波 (图 7、8) 中可以看出, 15 时北京已经开始出现孤立的对流云团回波, 16 时零散的对流回波已覆盖全市范围。正是此时, 由于中空冷空气的入侵激发了重力波, 重力波自东向西传播经过对流云团。在重力波作用下, 对流云团迅速发展并受重力波的影响呈现了与重力波一致的强弱波状分布。由于出现强降水, 大气中的能量很快被释放, 重力波也很快衰减。北京西部山区地形复杂, 对重力波有明显的阻尼作用。因此, 此次强降雨在到达西部山前的石景山和海淀地区后就停止向西传播, 最终减弱并结束。

6 小结

(1) 2004 年 7 月 10 日北京出现的局地暴雨天气是一次中小尺度天气过程, 其中由重力波所激发的小尺度波动对局地暴雨的产生和分布起主导作用。

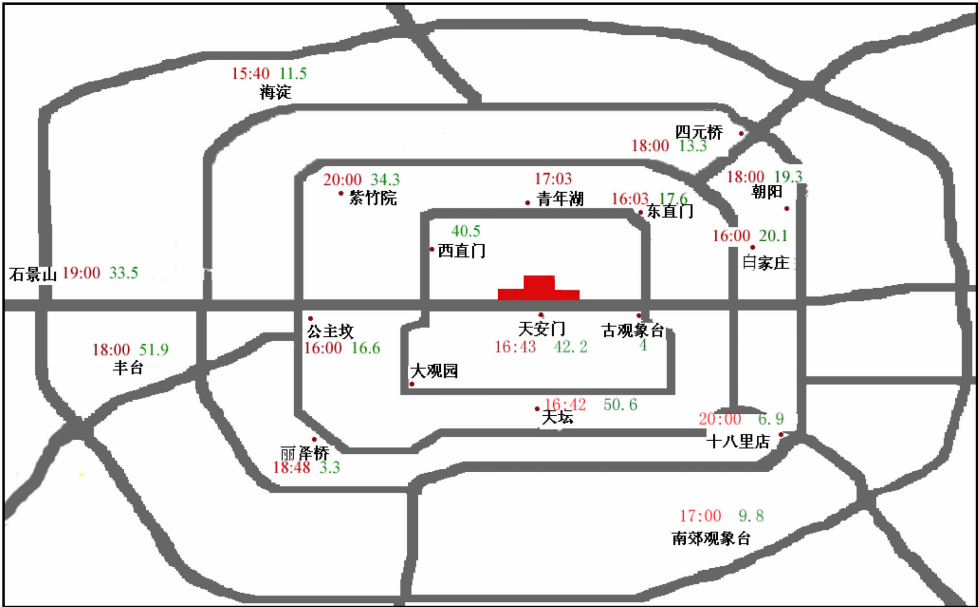
(2) 对重力波发生、发展条件与判据的分析指出, 环境风场的垂直风切变使得平均气流动能转化为扰动动能成为可能, 并激发了重力波的产生; 而重力波通过积雨云团时, 加大了云内上升速度, 使不稳定能量得以释放, 触发并加强了降水。

(3) 天气学分析指出, 北京东部地区中层 (700 hPa) 冷空气入侵造成的垂直风切变, 是触发重力波的主要原因; 雷达回波强度呈小尺度波状分布特点, 进一步证实了重力波在此次降水中的触发和加强作用。

(4) 充沛的水汽输送、大量不稳定能量的积聚以及对流性不稳定层结是产生此次局地暴雨的重要条件。

参考文献 (References)

- [1] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用. 大气科学, 1978, **3**: 201~209
Li Maicun. The trigger mechanism of gravity wave upon rain-storm. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1978, **3**: 201~209
- [2] 马振锋. 大气中低频重力波指数与西南低涡发展及暴雨的关系. 高原气象, 1994, **13** (1): 50~56
Ma Zhenfeng. The relations between the index of low-frequency gravitational wave and heavy rain precede form development of southwest vortex. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1994, **13** (1): 50~60
- [3] 陈金中, 黄荣辉. 中层大气重力波的一种激发机制及其数值模拟 I. 非地转不稳定和波结构. 大气科学, 1995, **19** (5): 554~562
Chen Jinzhong, Huang Ronghui. A possible mechanism for exciting gravity wave in middle atmosphere and its numerical simulation. Part I: Ageostrophic instability and wave structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19** (5): 554~562
- [4] Uccellini L W, Koch S E. The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbance. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 721~729
- [5] Miles J W. On the stability of heterogeneous shear flows. *J. Fluid Mech.*, 1961, **10**: 496~508
- [6] Howard L N. Note on a paper of John W. Miles. *J. Fluid Mech.*, 1961, **10**: 509~512
- [7] 李麦村. 飚线形成的非线性过程. 中国科学, 1976, **6**: 592~601
Li Maicun. Nonlinear forming process of the squall line. *Sciences in China* (in Chinese), 1976, **6**: 592~601
- [8] 华北暴雨编写组. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 162~163
The Research Group of North China Heavy Rainfall. *North China Heavy Rainfall*. Beijing: China Meteorological Press, 1992. 162~163
- [9] 丁德刚, 王树芬. 相向而行的重力波与暴雨. 大气科学, 1994, **7**: 451~455
Ding Degang, Wang Shufen. The gravity wave of relative motion and heavy rain. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **7**: 451~455
- [10] 张玉玲. 中尺度大气动力学引论. 北京: 气象出版社, 1999. 38~46
Zhang Yuling. *Mesoscale Atmospheric Dynamics*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 38~46



海淀 Haidian 石景山 Shijingshan 丰台 Fengtai 丽泽桥 Lizeqiao 公主坟 Gongzhufen 紫竹院 Zizhuyuan
大观园 Daguan Yuan 西直门 Xizhimen 天安门 Tian'anmen 天坛 Tiantan 青年湖 Qingnianhu
古观象台 Guguanxiangtai 南郊观象台 Nanjiaoguanxiangtai 十八里店 Shibalidian 白家庄 Baijiazhuang
东直门 Dongzhimen 四元桥 Siyuanqiao 朝阳 Chaoyang

图 5 2004 年 7 月 10 日北京局地暴雨过程中 1 小时最大雨强的时空分布(单位: mm)。红色表示最大雨强出现的时间, 绿色数值为最大雨强
Fig. 5 The spatial-temporal distribution of hourly rainfall intensity (mm) on Jul 10 2004 (Red: the time of maximum rainfall intensity; green value: the maximum rainfall intensity)

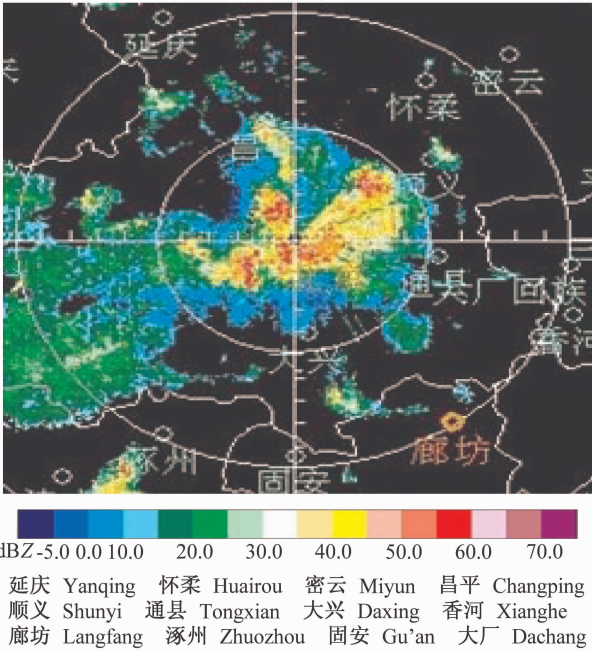


图 7 2004 年 7 月 10 日 17:11 雷达回波强度图
Fig. 7 Radar echo image over Beijing area on 1711 BT 10 Jul 2004

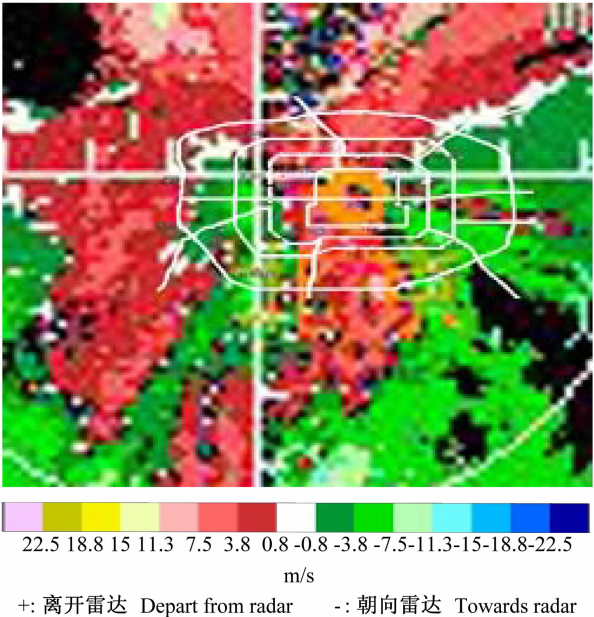


图 8 2004 年 7 月 10 日 17:48 雷达径向速度图
Fig. 8 Radar radial velocity image over Beijing area on 1748 BT 10 Jul 2004