

北京“12·7”降雪过程的分析研究^{*}

赵思雄 孙建华 陈 红 齐琳琳

赵翼浚 李爱国 李云云

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 对2001年12月7日一次引发北京交通堵塞的降雪过程的成因进行了分析。通过对各种资料, 包括北京325 m气象塔获取的特殊观测资料的分析, 认为这次降雪过程属于较为常见的“回流天气”型。但由于该系统的信息较弱, 给预报增加了难度。对于改进预报的可能性作了一些探讨, 并对一些相关问题提出了看法。

关键词: 降雪过程; 城市灾害; 交通

1 引言

2001年12月7日下午北京下了一场小雪, 14时(北京时)开始雪花飞舞, 至17时(北京时)逐渐停止, 晚间又出现零星飘雪。24 h降雪量为1.8 mm, 量虽然不算大, 但引起了城市交通大堵塞, 影响十分严重。《北京青年报》以“大雪考验北京交通”和“雪给北京上了一课”为题, 分别于12月8日和9日在头版对此事做了报道和评述。社会各界对此十分关注。为了弄清这次降雪过程较为详细的情况, 本文作了一些分析, 希望引起更深入的讨论。

降雪和降雨同属我们所关心的降水过程。只不过它们的降落物分别以固态和液态两种不同的形式出现, 当然, 它们可能会涉及到不同的物理过程。对于降雨, 尤其是暴雨过程, 国内外已有较多的研究^[1~5]。我国是多暴雨的国家, 中国的气象学者在暴雨研究方面已有大量工作。对于冬季的暴风雪国外有不少研究。欧美的降雪过程, 大多与温带气旋的形成与发展有关^[6], 如: 1979年2月18~19日美国的总统日雪暴^[7,8], 1987年12月俄克拉荷马雪暴^[9], 1989年1月法戈的雪暴^[10], 1996年11月俄亥俄州的雪暴^[11]和1998年盐湖区的雪暴过程^[12]等。在欧洲, 尤其是西欧的暴风雪多与温带气旋发展登陆有关^[13,14]。在亚洲的日本, 降雪也多与低压系统的发生发展(尤其是经过海面, 而后登陆引起降雪)有关^[15,16]。上个世纪对于中国中纬度冷季系统, 我国科学家作了不少研究。李宪之^[17]早在30年代就已研究过“中国的寒潮”, 陶诗言^[18]对中国寒潮的源地和路径做过精辟的分析, 仇永炎^[19]对东亚寒潮冷锋的结构做过研究, 王建中、丁一汇^[20]也对一次强降雪的动力稳定性过程进行了探讨。近年来, 虽然在这方面也有一些研究工作^[20~22], 但对于我国而言, 对冬季中高纬度天气系统, 尤其是降雪的研究, 仍是一个

2002-02-08收到, 2002-02-20收到修改稿

^{*} 中国科学院大气物理研究所知识创新工程(二期)面上基金和国家重点基础研究发展规划项目“我国重大灾害天气机理和预测理论研究”(G1998040900)资助

比较薄弱的环节。特别是近十余年来,我国北方连续出现“暖冬”,少强冷空气活动,少雨雪。似乎降雪尤其是暴风雪天气已成为过去。这里,我们姑且不谈,所谓“暖冬”包含多少气候本身“年代际”的变化因素和多少人类活动对环境的影响,因为这一课题的研究超出了本文的范围,这里不作深入探讨。但是,一个重要的事实是,当中国少雨雪的同时,欧美冷空气的活动却比较活跃,近 10 年强雪暴还在不断发生^[6~14],这也许表明,20 世纪 90 年代东亚的情况并不能完全反映北半球同一纬度带上其他区域的情况。如果大气环流状况出现调整,这里冬季的天气也许会有相应的变化。还应强调指出,随着经济的发展,社会的进步,尤其是城市化进程的加快,我们正面临着新的机遇和挑战,原来不是问题的事情,在特定的条件下,也会成为问题,甚至成为很严重的问题。北京 2001 年 12 月 7 日的降雪就是一个例证。为此,我们认为不仅应加强对夏季暴雨和台风的研究,而且应加强冬季降雪过程的研究,不但要加强对强烈暴风雪的研究,而且还要加强对一般降雪过程的研究。随着我国加入世界贸易组织,以及申办 2008 年奥运会的成功,北京作为一个国际化大都市的地位毋庸置疑。保护北京的环境,保证北京交通的通畅与安全,是我们首先应当满足的基本条件。人类社会已跨入 21 世纪,对这些问题的研究应更有超前性和针对性。降雪不仅影响市区的道路畅通,而且会影响高速公路的通行,机场航班调度和飞行安全,甚至影响重大外事和旅游活动的安排等。

本文将集中讨论:(1)“12·7”降雪为何种天气系统所引发?(2)这次降雪过程是否有可能预报出来?(3)这次降雪过程中哪些物理过程可能起作用?(4)其他非气象因子可能有哪些影响?当然,要彻底弄清这次降雪过程,还应该对它的机理再进行深入的研究,本文限于篇幅,不可能包含全部内容,未尽者将在今后另文发表。

2 环流状况和天气事实

图 1 给出了 2001 年 12 月 7 日 00 时至 8 日 00 时(世界时,以下如无特殊说明者均为世界时)的降雪量(单位: mm,由降雪量折算为降雨量)。可以看出,在我国北方有成片雨雪区从河套一直向东伸至华北和东北南部,只是降水量不大,仅为 2 mm(实

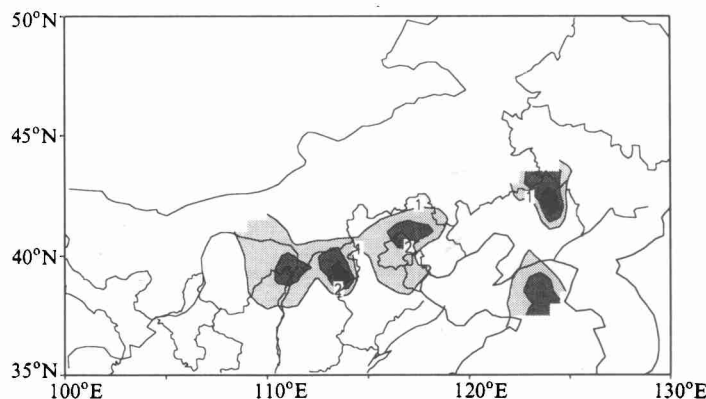


图 1 2001 年 12 月 7 日 00 时~8 日 00 时降雪量(单位: mm)

际站点观测值为 1.8 mm)。追踪到前一天, 即 12 月 6 日 00 时至 7 日 00 时的降雪区, 在河套以西, 也只有几毫米(图略)的降水, 这表明降雪区是由西向东移动的。

为了弄清相关的基本环流状况, 我们对北半球的环流作了分析。从 2001 年 12 月 6 日 00 时的 200 hPa 和 500 hPa 图(图略)上, 大体可反映对流层中上层的情况, 即在东西两端各为低槽区, 西端从欧洲大陆至地中海为一槽区, 500 hPa 上有闭合中心出现, 而东端在日本列岛和西太平洋上也为一低槽区, 后者 500 hPa 上的闭合中心, 甚至低至 5080 位势米。在这两个低槽之间 40~50°N 纬度带范围内是纬向的平直西风气流, 这支气流无明显的波动, 并且在这一时段内基本维持此种流型。这就决定了这一时期不会有强烈的冷空气活动, 也不会有很剧烈的天气过程。为了仔细地分析, 这里仅给出了东亚范围(与我们关系最为密切的区域)的环流, 而略去了北半球其他部分的情况。图 2 是这次过程的 500 hPa 高度场和温度场的分布图, 可以看到有一个小槽自西向东移动, 在温度场上更为明显。12 月 6 日 12 时, 500 hPa 上的小槽位于青藏高原东北侧, 约 90°E 处, 在 7 日 00 时, 槽向东移至河套西侧, 约 100°E 处, 并逐渐移向北京, 7 日 12 时已移到河套东侧, 8 日 00 时已移至海上, 明显减弱。由于此系统较弱, 可能也比较浅, 因此, 我们还需要认真分析一下对流层低层的情况。图 3 是 2001 年 12 月 7 日 00 时和 12 时 700 hPa 的环流, 而图 4 是同一时间 850 hPa 的环流。在图 3a 中小槽位置已位于河套地区, 与图 4a 相比, 前者位于后者的西侧, 表明此冷槽系统从低层至高层是向西倾斜。至 7 日 12 时(图 3b)槽已东移, 振幅进一步减弱。而在 850

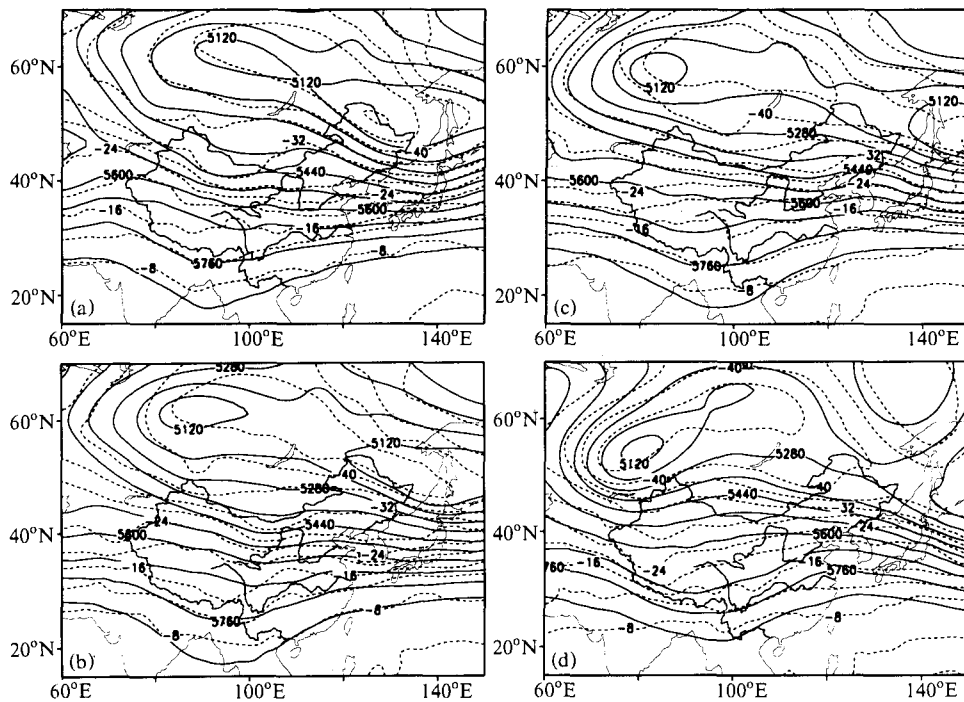


图 2 2001 年 12 月 6 日 12 时~8 日 00 时 500 hPa 高度场(实线)和温度场(虚线)
(a) 6 日 12 时; (b) 7 日 00 时; (c) 7 日 12 时; (d) 8 日 00 时

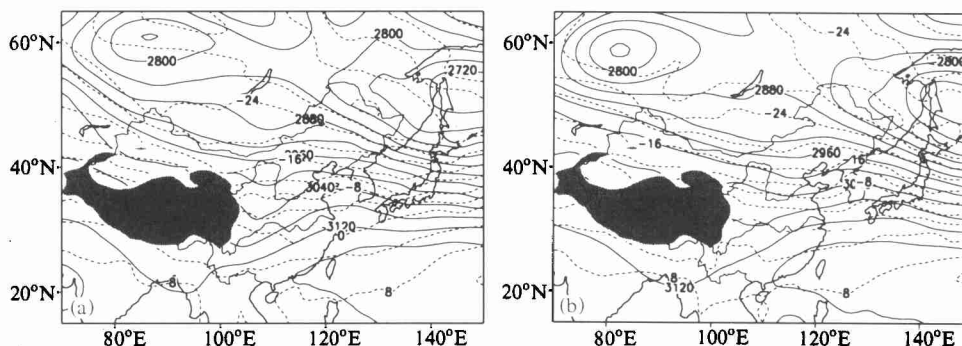


图3 2001年12月7日700 hPa 高度场(实线)和温度场(虚线)
(a) 00时; (b) 12时

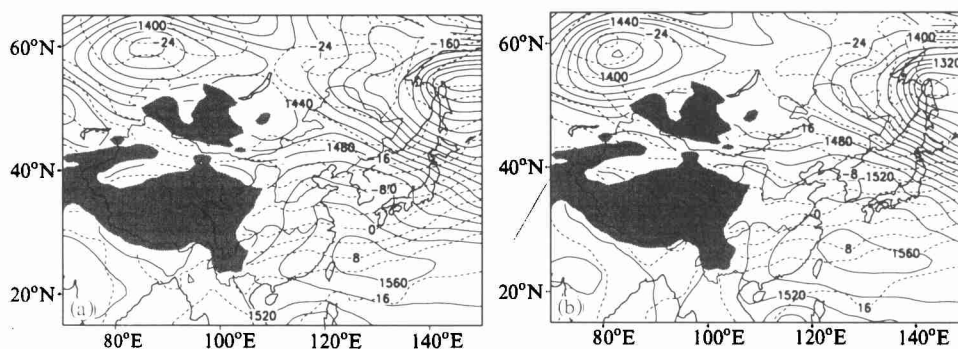


图4 2001年12月7日850 hPa 高度场(实线)和温度场(虚线)
(a) 00时; (b) 12时

hPa 上, 短波槽比 700 hPa 上要更清楚。7 日 00 时, 槽区在河套与 700 hPa 相似, 而 7 日 12 时很清楚地看到 850 hPa 上槽线位于北京西侧, 且沿太行山呈南北走向。因此, 低层的形势比高层更加明显。由于这一低槽移近北京, 与北京降雪过程的启动时间大体一致, 表明槽前的辐合上升是此次北京降雪过程可能的触发机制之一。

北京此次降雪过程与欧美等经典的降雪过程很不相同。欧美降雪过程不少是属于低压或气旋所引发, 或者气旋系统从海上登陆所致, 如大西洋气旋登陆西欧, 太平洋气旋登陆美国西海岸, 墨西哥湾气旋东北上引发美国东北部降雪等。恰恰相反, 北京这次过程与大陆上的一个小高压有关。应该说, 此次降雪过程与以往华北和北京地区的降雪过程有某些类似之处, 属于在中纬度高空气流较为平直的情况下, 高空气流引导大陆小高压移出海上, 小高压后部来自海上的空气“回流”所致。所谓“回流”, 既是流回来的意思。在北半球, 高压系统气流呈顺时针旋转, 高压南侧刮东风, 西侧刮南风, 高压出海后, 其南部偏东(偏南)气流可将大量潮湿空气吹向大陆, 而此湿空气受其后部(西侧)后续冷空气抬升或地形抬升, 可引发降雪过程。这种降雪天气通常称为“回流天气”。

型”, 属于华北地区较为常见的降雪天气类型之一, 但此次过程并不算很典型。

3 行星边界层 925 hPa 层资料的分析

此次过程不算典型, 一方面是因为这次过程北京 24 h 降雪很小, 仅为 1.8 mm (折合成降水量), 按气象定义为小雪; 另一方面, 还由于这次过程各方面的信息较弱, 如刮偏东(南)风时间较短, 系统较浅薄, 信息的确较难捕捉, 致使未能成功预报。因此, 很有必要认真剖析这类弱信息系统。在分析 500、700、850 hPa 的基础上, 我们已发现这是一个在低层较为明显的浅薄系统。越在低层, 系统越清楚。那么, 在行星边界层中, 这一系统的情况如何呢? 为此, 必须要仔细地研究行星边界层中系统的结构与演变过程, 尤其是高度场和风场的情况。图 5 给出了 2001 年 12 月 7 日 00 时和 12 时 925 hPa 的高度场与风矢量场的分布。图中的暗影区大体相当于海拔高度大于 800 m 的地区, 925 hPa 面低于 800 m, 故此区的资料给出的是不真实的信息, 应去掉。由图可见从朝鲜半岛至黄海和东海为出海高压系统所控制, 在边界层中偏东气流沿江淮流域向西后转为偏南气流再沿太行山麓到达北京和华北地区。尤其值得注意的是, 这支偏南气流在 40°N 附近, 又转为偏西气流, 这也许是实际大气在遇到真实地形后(如高分辨的地形所表示, 以东西向为主的燕山山脉)改变流向, 这一点需进一步研究。

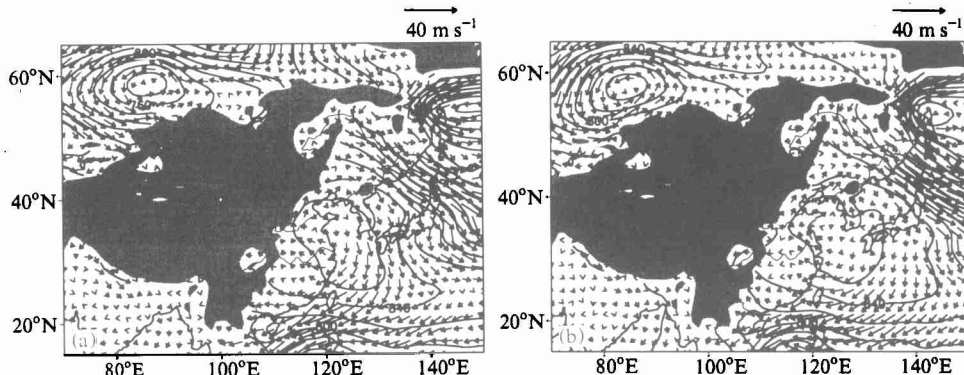


图 5 2001 年 12 月 7 日 925 hPa 高度场与风矢量场分布
(a) 00 时; (b) 12 时

为了进一步验证“回流”的作用, 确定是否真有水汽自海上向大陆尤其是华北输送, 我们又对 925 hPa 上相对湿度的分布进行了分析。图 6 中给出了 12 月 7 日 00 时和 12 时的情况, 可以看到, 00 时水汽的输送特征尚不显著, 12 时已有相对湿度大于 80% 的大值区, 先从东向西, 然后又从南向北伸展, 这一大值区与海洋向陆地的东、南风回流的分布很一致。而湿度的最小值区正好在渤海沿岸(即大陆高压主体控制区)。这从另一角度可反映出水汽的确与来自海洋上的“回流”有关。如上所述, 925 hPa 大体反映了边界层中上部的情况, 那么在边界层低层情况又如何呢? 为此, 需要寻求一些特殊资料的帮助。

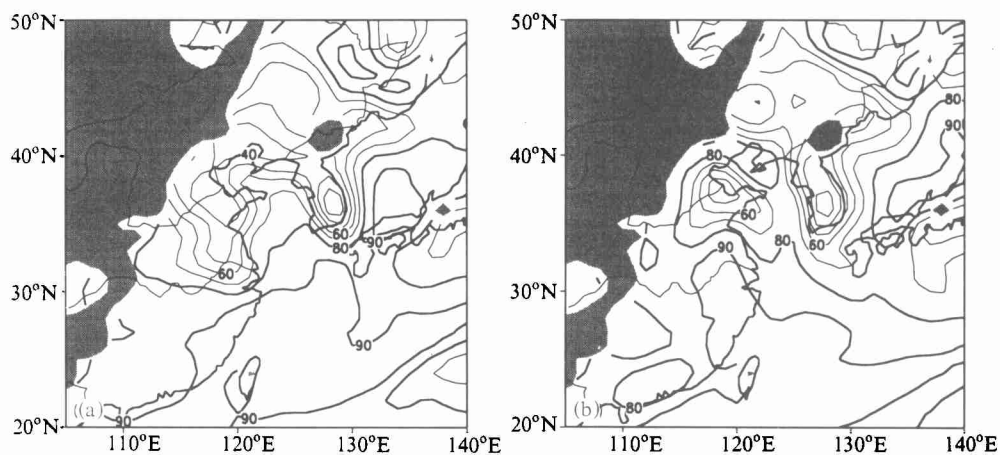


图6 2001年12月7日00时(a)和12时(b)925 hPa相对湿度分布(单位: %)

4 行星边界层低层过程的分析

为了进一步弄清行星边界层低层的过程对这次降雪的影响, 充分分析具有较高时间和空间分辨率的资料, 从中提取更多有用的信息是很有必要的。为此, 我们使用了中国科学院大气物理研究所北京 325 m 气象塔提供的行星边界层低层的观测资料。该气象塔位于北京北土城路, 具体位置为 ($39^{\circ}58'N$, $116^{\circ}22'E$), 海拔高度为 48.632 m。塔共分 15 层, 高度分别为 9、15、32、47、65、80、103、120、140、160、180、200、240、280 和 320 m, 安装在各层上的仪器可获取随时间连续演变的风向、风速、温度和湿度资料。

特别应该强调的是, 为了更好理解降雪等过程受日变化的影响, 在下面的讨论中, 我们对图 7、8、11 和 12 中的资料除了标注世界时外, 在适当的地方也用北京时加以补充说明。

图 7 给出了行星边界层低层中风场随时间的连续演变。在最贴近地面的层次中, 由于下垫面及地面物体的影响, 有时风向反映出的规律不够清楚, 使用时应仔细推敲。然而, 在中高层次中, 贴地层的影响减小, 可以清楚地说明问题。在 6 日 21 时之前 (北京时 7 日 05 时), 从低至高基本上均以偏西风为主, 而 6 日 21 时以后, 从 22 时开始 100~150 m 高的层次内转为东风, 此东风层很快增厚, 23 时向上扩展至 200 m, 7 日 02 时达到了 300 m 以上, 东风层的维持时间长达 6 h, 即直到 7 日 04 时 (北京时 7 日 12 时), 这是连续观测的结果。如果仅靠每日两次的常规观测 (12 h 的时间间隔), 很难了解东风层的维持时间。325 m 气象塔的确为我们提供了大量边界层高分辨的时空分布特征的信息。但是, 仅有东风层尚难以做出判断, 例如 6 日 03 时左右和 7 日 23 时至 8 日 01 时两个时段内 120~210 m 层内也有东风出现, 但这却与降雪联系不大, 而可能只是反映出通常的日变化。因此, 如果把它们与图 8 相对比可发现, 7 日的东风层是输送水汽的, 而 6 日和 8 日的则没有输送水汽。在图 8 中, 7 日 04 时后相对湿度明显增

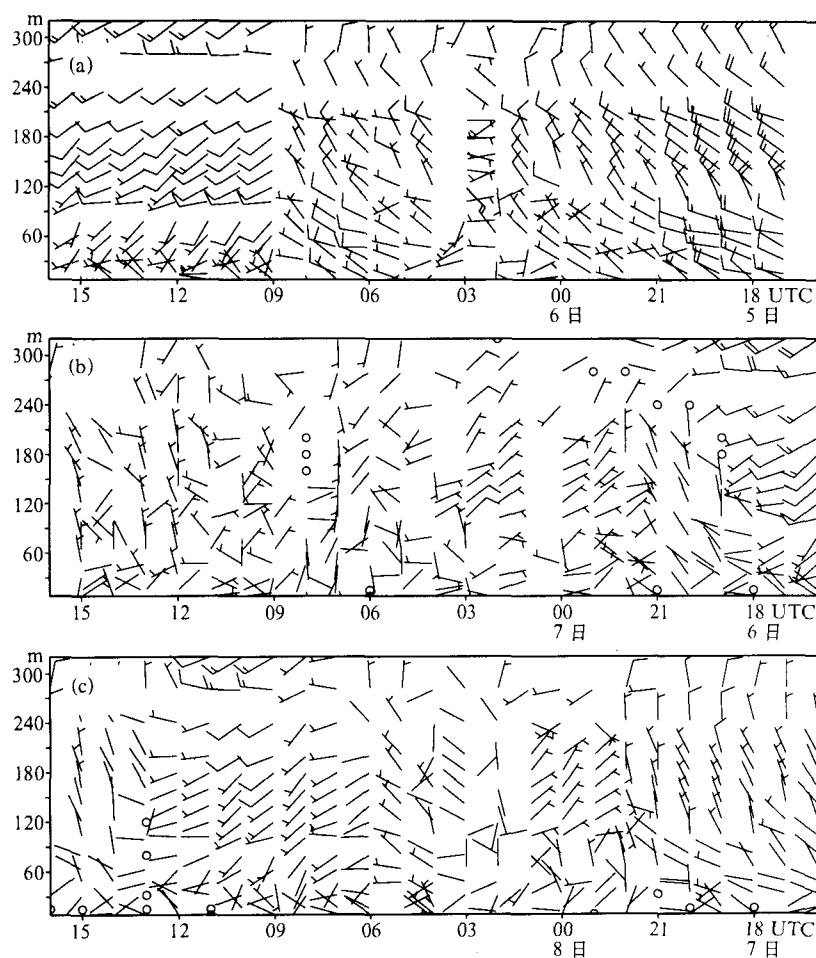


图7 2001年12月5日17时~8日16时(世界时)北京325 m气象观测塔各个高度上的边界层风场演变
(a)5日17时~6日16时; (b)6日16时~7日16时; (c)7日16时~8日16时

强,甚至是明显的跃升,而6日和8日的东风层却是伴随着空气变干,湿度明显减少。因此,7日的东风层是与水汽输送相配合的,只有这样才可能形成降水。

5 水汽的辐合与上升运动的分布

降水的发生需要两个重要条件,第一是水汽的充分供应(水汽辐合),第二是空气上升或被抬升。在这一节中,我们要讨论在这样一个弱的天气系统中,是否也具备这样的条件。为此,我们给出2001年12月7日00时(世界时)500 hPa上的垂直运动分布(图9)。由此可以看到,大陆小高压控制的区域,即朝鲜半岛、渤海及黄海地区,是下沉运动区,北京也处在这一区域中,因此对降雪来讲,属不利条件。然而,值得注意的是在这片下沉区的西面,即陕西、山西和河南为上升运动区,在大范围上升区中

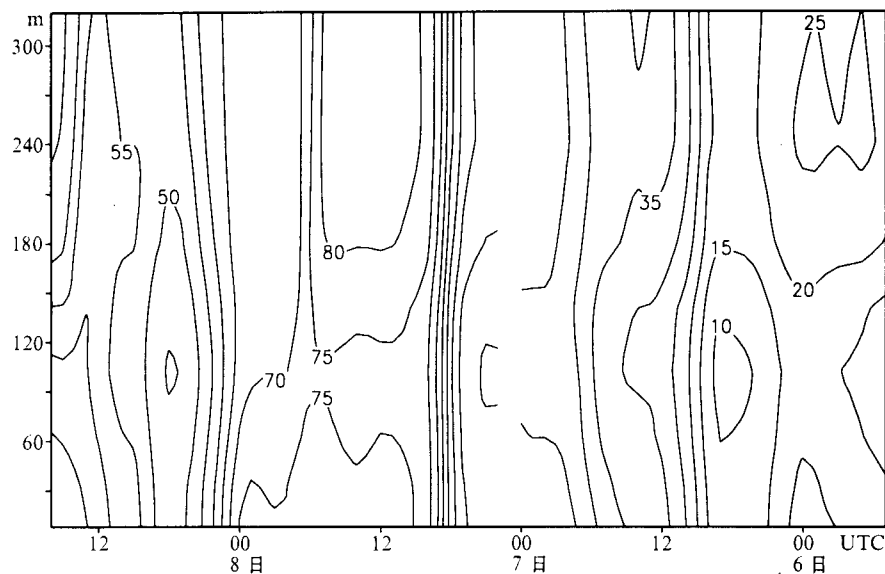


图8 2001年12月5日17时~8日16时(世界时)北京325 m气象观测塔观测的各个高度上相对湿度的高度-时间剖面图

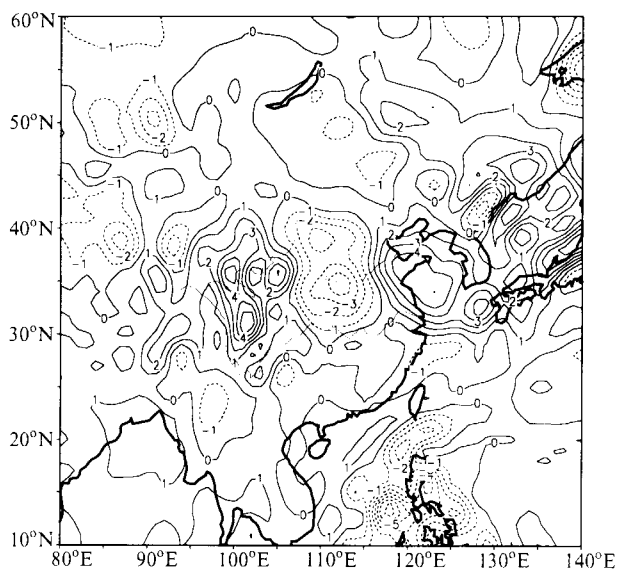


图9 2001年12月7日00时(世界时)500 hPa上升运动
单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$

有两个中心, 一个在陕北, 为 $-3 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$, 而另一个在三门峡至郑州一带, 为 $-4 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ 。这片上升区的动向很值得注意。我们可以看到, 从高空 850、700 至 500 hPa 图上, 在大陆小高压的西侧, 各层均为一短波槽, 此短波槽自西向东移动, 其槽前区域正好与 500 hPa 的上升区相对应, 有利降水的发生。但是, 值得注意的是, 此时上升运动区的零线, 正处于山西与河北交界处, 此后它的动向如何, 与降雪密切相关。根据短波槽的移动情况, 我们估计, 此后上升运动区将向东移动,

从后来垂直运动的分布图, 的确证实了这一点(图略)。

由于水汽通量散度这一物理量可表示水汽的供应和集中的能力, 我们对此作了分析, 并沿 118°E 取垂直剖面, 用 6 h 间隔的 NCEP 资料计算了垂直方向上各层的水汽

通量散度的分布 (图 10)。在图 10a 上, 即 7 日 00 时, 北京 ($39^{\circ}56'N$, $116^{\circ}17'E$), 相当的纬度区内, 水汽无明显的辐散、辐合存在。至 7 日 06 时 (即北京时间 14 时), 情况有了明显的不同, 可以看到北京处在水汽通量辐合大值区附近, 其大值区主要集中在 800 hPa 至 550 hPa 的层次, 在边界层中, 尤其是 300 m 以下的层次中, 尽管 325 m 气象塔观测到的资料表明水汽含量在不断增长, 但 NCEP 资料上还难于很好反映, 不过 NCEP 资料对于北京低空水汽辐合的总趋势的反映还是符合实际的。至 7 日 12 时 (世

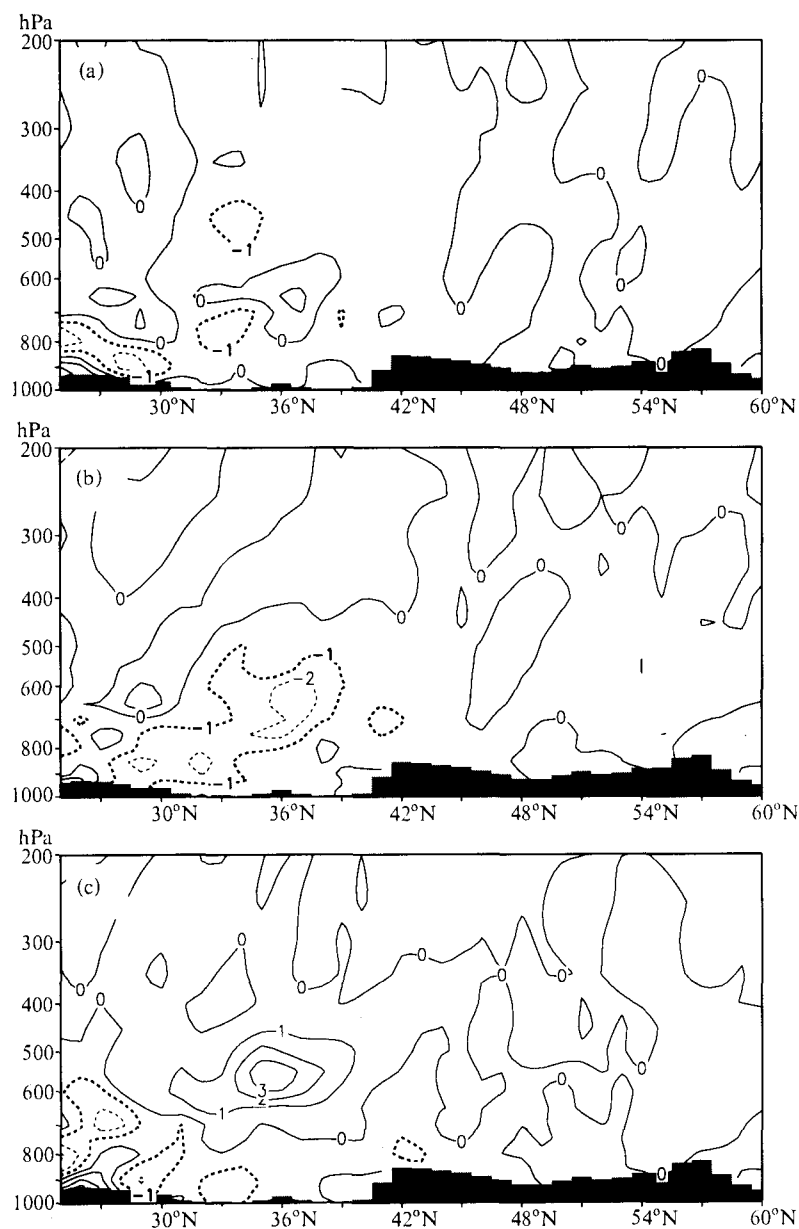


图 10 2001 年 12 月 7 日沿 $118^{\circ}E$ 各层上水汽通量散度的分布 (单位: $10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)
(a) 7 月 00 时; (b) 7 月 06 时; (c) 7 月 12 时 (世界时)

界时), 北京和华北大片地方, 已转为水汽通量辐散区。这表明, 这时对降雪已不利, 水汽向区域外供应, 在低层水汽通量虽为辐合, 但强度已变得很弱。这也许可以理解为主要的降雪过程到下午 5 点 (北京时) 即告停止, 晚上只见零星飘雪而已。

6 地表层与土壤温度变化的影响

1.8 mm 的降雪为何在地面结冰, 出现严重“地穿甲”现象? 这很可能与该日的地面温度过低有关。本来地面温度有明显的日变化, 每日 06 时 (北京时为 14 时) 前后达最高, 如午后才有雪降至地面, 就有可能融化, 而 08 时 (北京时 16 时) 后地面温度下降, 溶化的水再次结冰, 成为所谓的“地穿甲”。新结成的冰面光滑, 摩擦力小, 汽车更易打滑。地面温度的日变化, 对冬季降雪后路面状况影响很大。那么, 12 月 7 日降雪时的地表及浅层土壤的日变化的状况如何呢?

图 11 给出了由中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室在北京北土城路观测点 (与 325 m 气象塔位置相同) 得到的 1 cm 深度的土壤温度的连续变化。从图 11 可以清楚地看到该层地温的变化。但由于这是 1 cm 处的土壤温度, 其日变化的最高与最低温度值均比地表面温度在时间上有滞后现象。虽然如此, 其特点仍然是清楚的。尽管相差的数值不大, 但其趋势明显。在 12 月 6、7、8 和 9 日 4 天中, 7 日的最高温度相对最低, 而在 7、8 两天最低温度相当, 它们比 6 日低得多, 7 日降温非常明显, 9 日最低温度又显著回升。因此, 可推知 7 日下午开始冷空气对地面和土壤浅层的影响是存在的。这一点还可由中国科学院大气物理所 325 m 气象塔各高度层上的气温观测资料得到印证。图 12 是北京 325 m 气象观测塔在 12 月 6~8 日温度变化的时间-高度剖面图。温度日变化的特征不但见于地面和浅层土壤中, 而且在边界层低层也很明显。其共同的特点是最高温度出现在午后, 且低层比高层变化的幅度大, 这显然与白天地面受太阳辐射的影响有关。而最低温度出现在凌晨。在降雪前 (6 日) 低层最高温 +2°C, 降雪后 (8 日), 低层最高温也达 +2°C, 而降雪当天低层气温达到

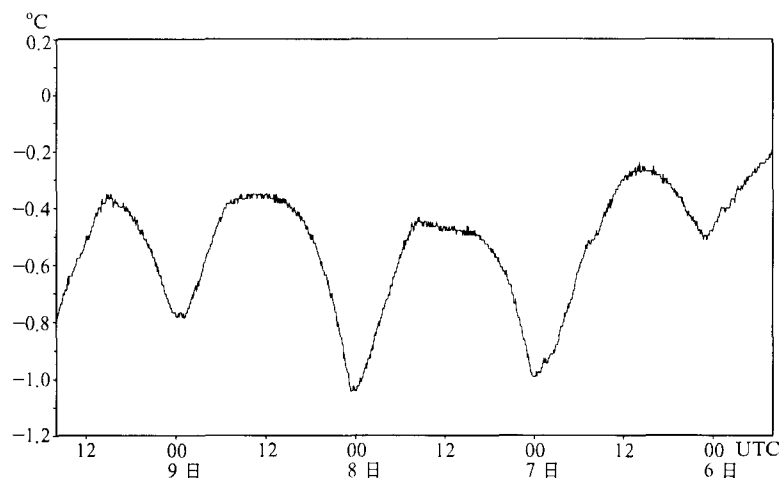


图 11 2001 年 12 月 5 日 17 时至 9 日 16 时 (世界时) 1 cm 深处地温随时间的变化曲线 (单位: °C)

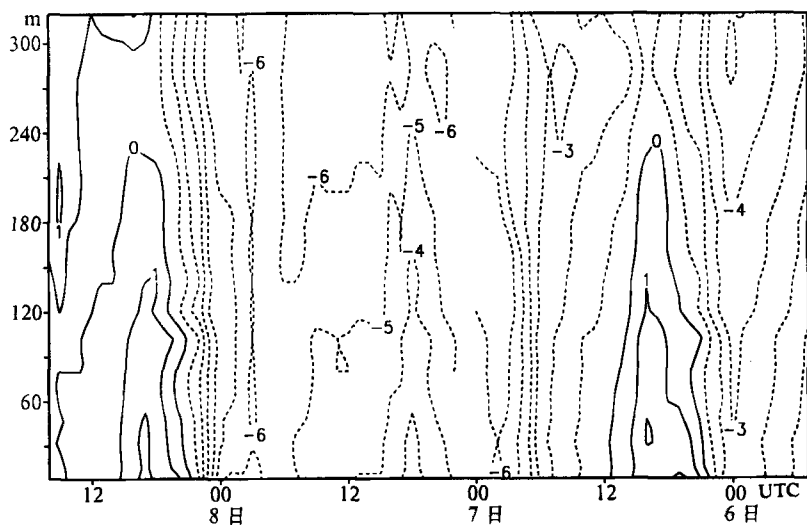


图 12 2001 年 12 月 5 日 17 时至 8 日 16 时 (世界时) 北京 325 m 气象观测塔各层温度-时间剖面图
单位: $^{\circ}\text{C}$

了 -3°C , 当天与前后两天温差达 5°C , 在气象塔 300 m 高处也有类似情况, 由 -1°C 降至 -6°C , 相差也达 5°C 。7 日下午最高气温在零度之下。这表明低层的降温似与这次降雪过程有关。

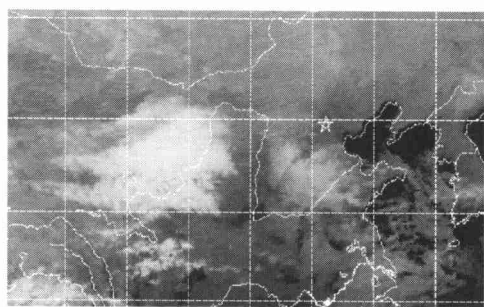
就降雪凝冻来说, 路面温度对道路状况的影响是很重要的。至于路面温度是如何影响道路结冰的, 需要进行更多的研究。因为, 仅有 1.8 mm 的降水就会造成严重的交通堵塞, 单从气象上是难于简单地回答的。路况是如何出现这样严重局面的? 最直接有关的因子应该是地面温度。因此, 加强地面温度的监测与预报是今后值得重视的一个问题。我们猜测, 最可能的是路面的温度不等于气温, 尤其不等于百叶箱的气温, 也不等于气象观测场地的地表温度, 而是较高, 致使 7 日初降雪时路面温度有可能高于 0°C , 而后形成“地穿甲”现象。请注意, 路面及其下一定深度都是水泥地或沥青, 地下可以较易向上传递热流, 而路上的汽车又川流不息, 摩擦及尾气又使路面得到大量热量而升温。由图 11 可知, 即使是土壤 1 cm 深处, 也只在 -1°C 至 -0.2°C 之间。可见, 路面在初下雪时温度大于 0°C 时是可能的。其后融雪的冷却作用以及随后的自然降温则使得路面温度降至 0°C 以下。也许, 这一系列的过程进行得较为迅速。当然, 这只是我们的猜测, 尚需进行细致的计算; 若再有路面温度实测资料当更好。

7 降雪系统的云系特征及云物理过程的可能影响

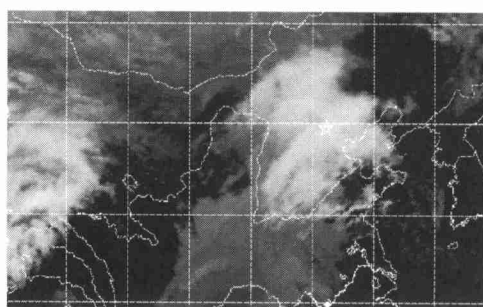
为何出现“地穿甲”, 这是否是该日降雪云中的微物理过程较为特殊所致? 一般来说, 除了预先计划, 安排进行专门的监测, 我们很难有当天降雪云中的微物理过程的详细观测资料。但据某些目击到降雪的专业人士称, 当时降下的不完全是雪花, 其中有不少固体颗粒状的冰晶之类的物质, 其云中水物质的状况如何, 不得而知。是否是气象上

称为霰的现象,也需要研究。总之,对云的微物理过程需进一步了解和研究。这里,作为第一步,我们能做的是借助气象卫星云图对云的外观有一些了解,从而对云的性质做一些分析和推断。

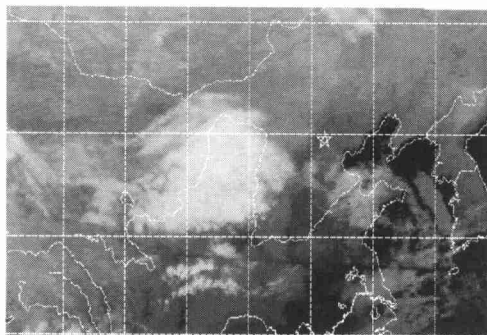
从气象卫星云图(图 13)上,可以追踪到这次降雪云系的连续变化。这片云区,显然一开始与锋面及出海小高压本身无关,它是属于对流层中低层短波槽的云系。6 日 12 时中心位于青海湖附近,6 日 15 时云系接近河套西侧,6 日 18 时到达河南,6 日 21 时至河套东,此前云系主体基本上位于 40°N 以南,向东移动。7 日 00 时,云系移向东北方,至河北北部,7 日 03 时云区中心正好在北京上空,14 时云系至东北的南部及华



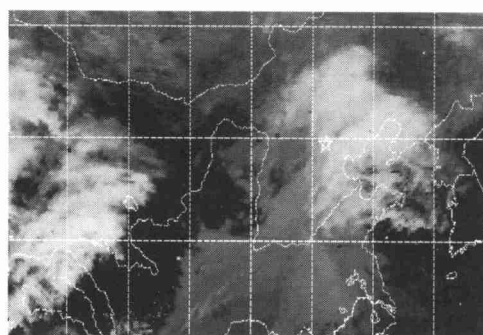
12月6日15时



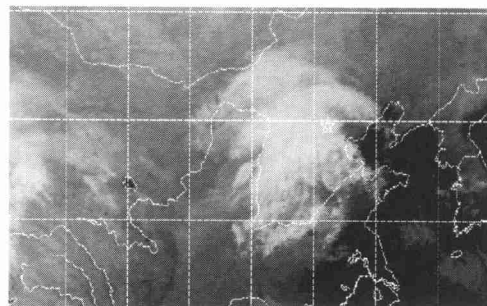
12月7日03时



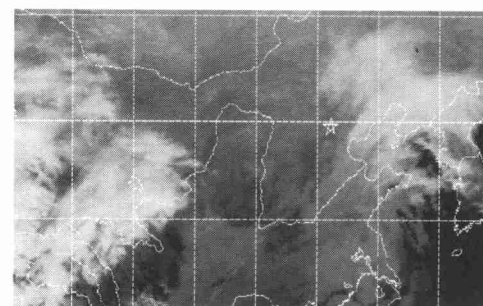
12月6日18时



12月7日06时



12月7日00时



12月7日09时

图 13 2001 年 12 月 6~7 日(世界时)的 GMS 气象卫星红外云图
(3 h 间隔, 6 日 21 时图未给出, 云图资料由中国科学院大气物理研究所卫星资料组提供)

北北部。当 7 日 06 时(即北京时 14 时)云系在北京上空时,其东侧明亮的部分为卷云,而其西侧灰暗的部分为层状云,这次降雪可能主要来自层状云区。因为降雪量不大,也未见到很明显的对流活动。

8 小结与讨论

通过对 2001 年 12 月 7 日引发北京交通堵塞的降雪过程的分析,认为这次降雪与欧美降雪的物理模型很不相同,它不是“锋面气旋型”,而是“高压回流型”,是具有我国特色的。此次过程北京 24 h 降雪量为 1.8 mm(折合为降水量),按气象上的定义为小雪。对于它的预报,存在一定的难度。我们知道,对于像爆发性气旋(气象炸弹)这样猛烈发展的系统预报比较困难,但对于小槽所伴随的小雪过程那样的信息较弱系统的预报也存在困难。尤其是这次过程信息较弱、时间较短,因此较难捕捉。这次过程中,出现“回流天气型”刮偏东风的时间较短,系统尺度偏小,而且较为浅薄等特征都是导致未能成功预报的因素。初步的分析表明,未能成功预报的原因是多方面的。我们认为主要在于现有观测网所提供的初始信息还不够完全,对于一些比较浅薄的系统,某些重要信息可能被遗漏,加之目前采用的这种时空分辨率的数值预报模式,尚难于很好描述这类强度较弱的系统。也许未来对初始资料和模式进一步改进后,同时加强对各种非常规资料的同化和应用,再将预报员经过实践积累所特有的经验合理地集成进去,应该说,是有可能将现有的预报准确率进一步提高,从而满意地做出正确的预报。当然,要做好预报,涉及的问题是多方面的,包括特殊的加密资料(尤其是边界层资料)的获取,云物理过程(尤其是层状云物理过程)的描写,以及地表层温度和路面温度(特别是关键地区路面温度)的监测和预测。也就是说为了改进服务效果,今后应考虑在监测和预报中增加新的内容。由此可见,本文涉及的问题不仅属于国际上正在大力发展的“定量降水预报”问题^[23],同时似乎还涉及到地表(尤其是城市地表)和路面温度的预报问题。只有这些做好了,才能做到定时、定量和定点预报。

作为今后工作的参考,如下的一些内容是应该认真考虑的:

(1) 发展更精细的数值预报模式:充分发展并应用华北及北京周边地区的非常规资料观测系统,并发展相应的资料同化系统,有效地利用这些重要的信息为更精细的中尺度数值预报服务。

(2) 卫星和雷达适时监测:充分利用雷达、卫星资料,由卫星资料了解云区的演变和移动,由双偏振雷达了解云中雪花和霰的分布。

(3) 地温和路面温度的监测与预报:加强地温的监测,尤其是交通要道,北京各主要环路,大型立交桥地区的路面温度状况的适时监测,并作出地温和路面温度日变化的预报,以找出降雪与地温和路面状况的可能关系。

(4) 降雪的云物理过程研究:发展与改进适用于我国华北及北京地区降雪预报的中尺度数值预报模式系统,尤其是云物理过程(包括层状云)的参数化方案。

(5) 回流天气型机理的再深入研究:在回流天气背景下,有时并未出现降雪,要通过研究以揭示回流天气背景下,引发降雪的一些关键因素或者判定有无降雪的临界条件,以避免出现空报和漏报。

(6) 城市灾害气象研究: 必须尽早开展包括降雪预报在内的城市灾害气象学的研究, 这是我们必须面对的新课题。

此外, 我们注意到, 这次降雪引起的交通严重堵塞, 除了缺乏及时准确的气象预报外, 其他一些非气象因子可能也是有影响的。据媒体称, 如道桥建设, 交通调度与管理以及融雪剂播撒的安排, 均有值得改进之处, 也许应该用“自然控制论”的方法, 至少也得用运筹学的方法^[24]。加之 12 月 7 日是星期五, 下午本来又是交通高峰时段, 下雪开始时, 大量汽车已经上路, 如不采用及时、有效、强力的调度系统, 则疏散定会非常困难。这些非气象因素的存在, 使得气象学上的小雪过程酿成严重的地面交通拥堵。讨论这些非气象因子的问题已超出了本文的范围, 这里不再多述。但是, 必须注意到, 这些非气象因子的影响的确存在, 应提请有关部门认真考虑, 专门研讨应急措施和对策。

由于本文资料收集还不够多, 作者的经验和认识有限, 因此, 这里的看法只能是初步的, 还应作更深入的动力分析和数值模拟, 并且希望今后对更多的北京和华北的降雪个例进行深入的研究。

致 谢 曾庆存院士曾对本研究工作给予热情的指导和帮助, 提出了宝贵意见; 作者和中国气象局以及北京市气象局的同志也进行过有益的讨论; 中国科学院大气物理研究所卫星资料组提供了 GMS 气象卫星云图等有关资料, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 陶诗言, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 1~225.
- 2 丁一汇, 1991 江淮流域持续性特大暴雨研究, 北京: 气象出版社, 1993, 1~255.
- 3 赵思雄, 孙建华, 陈红, 张凤, 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究, 气候与环境研究, 1998, 3(4), 368~381.
- 4 Matsumoto, S. K., Ninomiya and S. Yoshizumi, Characteristic features of “Baiu” front associated with heavy rainfall, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1971, 49, 267~281.
- 5 Bell, G. D. and J. E. Janowiak, Atmospheric circulation associated with the midwest floods of 1993, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, 76(5), 681~695.
- 6 Braham, R. R., Jr., The midwest snow storm of 8–11 December 1977, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, 111, 253~272.
- 7 Bosart, L. F., The President’ Day snowstorm of 18–19 February 1979: A subsynoptic-scale events, *Mon. Wea. Rev.*, 1981, 109, 1542~1566.
- 8 Uccellini, L. W., D. Keyser, K. F. Brill and C. H. Wash, The Presidents’ Day cyclone of 18–19 February 1979: Influence of upstream trough implication and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis, *Mon. Wea. Rev.*, 1985, 113, 962~988.
- 9 Marwitz, J. D. and J. Toth, A case study of heavy snowfall in Oklahoma, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121, 648~661.
- 10 Weisman, R. A., The Fargo Snowstorm of 6–8 January 1989, *Weather Forecasting*, 1996, 11, 198~216.
- 11 Schmidlin, T. W. and J. Kosarik, A record Ohio snowfall during 9–14 November 1996, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, 80(6), 1107~1116.
- 12 Onton, D. J. and W. J. Steenburgn, Diagnostic and sensitivity studies of the 7 December 1998 great Salt Lake-effect snowstorm, *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129, 1318~1338.
- 13 Ulbrich, U., A. H. Fink, M. Klawns and J. G. Pinto, Three extreme storms over Europe in December 1999, *Weather*, 2001, 56(3), 70~80.
- 14 Pearce, R., D. Lloyd and D. McConnell, The post-Christmas “French” storms of 1999, *Weather*, 2001, 56(3), 81~90.
- 15 Ninomiya, K., Polar low development over the east coast of Asian continent on 9–11 December 1985, *J. Meteor.*

- Soc. Japan*, 1991, **69**(6), 669~685.
- 16 Shumizu, N. and A. Uchida, An observational study of organized snow echo over the Japan Sea, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1974, **52**(3), 289~299.
- 17 Li, S. C., Die Kaelteeinbrüche in Ostasien, *Met. Zeit. Bd.*, 1936, **53**, 74~76.
- 18 陶诗言, 阻塞形势破坏时期东亚的一次寒潮过程, *气象学报*, 1957, **28**(1), 63~74.
- 19 仇永炎, 在一种寒潮情况下水平温度场及冷锋的构造, *气象学报*, 1957, **28**(1), 13~26.
- 20 王建中, 丁一汇, 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究, *气象学报*, 1995, **53**(4), 451~460.
- 21 刘延英, 吴宝俊, 2、3月份大雪的大尺度物理条件, *气象*, 1988, **14**(3), 29~31.
- 22 张小玲, 程麟生, “96·1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力分析 I. 涡度及涡度变率诊断, *高原气象*, 2000, **19**(3), 285~294.
- 23 Fritsch, J. M., R. A. Houze Jr., R. Adler et al., Quantitative precipitation forecasting: Report of the eighth prospectus development team, U.S. Weather Research Program, *Bull Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**(2), 285~299.
- 24 曾庆存, 自然控制论, *气候与环境研究*, 1996, **1**(1), 11~20.

A Study on Snowfall in Beijing on 7 December 2001

Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, Qi Linlin,
Zhao Yijun, Li Aiguo and Li Yunyun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract A light snowfall with precipitation amount of 1.8 mm/d occurred in Beijing on 7 December 2001 and the serious traffic jam appeared. For better understanding of the snowfall process, the circulations, synoptic systems have been investigated. The conclusions are as follows: (1) The moisture transportation in PBL by the eastern current from the Yellow Sea and East China Sea play a very important role in the process. (2) The trough (or short wave) at 500 hPa from West China overlay on the maximum area of moisture flux convergence to initiate and enhance the upward motion. (3) It is very difficult to predict successfully the snowfall in Beijing of 7 December 2001 due to the shallow of the systems, however, the higher time and space resolution data from the 325 m meteorological tower can reveal the finer and detailed structure of snowfall process. (4) It is suggested that more special data is needed and the cloud physical processes, including stratum cloud, and planetary boundary layer, in the numerical model should be improved farther, if the better prediction is expected. (5) The observation and prediction on real time ground temperature should be conducted so that condition of the roads can be estimated earlier. (6) In addition, some problems beyond meteorology, for example, roads and bridges construction, traffic management and so on should be paid more attention to in the future.

Key words: snowfall; city disasters; traffic