

北京地区一次小雪天气过程造成路面 交通严重受阻的成因分析^{*}

孙继松 梁 丰 陈 敏 廖晓农

(北京市气象局, 北京 100089)

摘 要 通过对 2001 年 12 月 7 日降雪天气过程与历史同期降雪过程的比较以及对降雪过程中不同物理介质路面温度变化的观测研究表明,“12·7”北京地区路面交通严重受阻是由于特殊的时间、特殊的城市和特定的路面状况等多种非气象因素与“落雪成冰”的气象环境条件共同作用造成的。这种气象环境条件的形成是由于降雪过程中,雪面、路面与近地面大气之间复杂的热量交换和相互影响的结果:降雪开始时,由于雪片的吸热作用,造成路面和紧贴地面的大气温度下降,而近地面层气温的下降,反过来造成路面温度进一步降低,在两者的共同作用下,地表落雪迅速形成冰面。冰面的反射作用又进一步加速了气温、尤其是近地面层气温的下降,不断降低的气温使得冰层硬度加强、厚度迅速增加。作者还通过天气诊断和数值模拟分析,对这次降雪天气过程的物理机制进行了简单的讨论,认为这次降雪天气很可能是由对流层中层快速移动的高空槽、地面弱倒槽和近地面层弱的偏东气流共同影响而产生的。

关键词: 小雪; 城市次生灾害; 气象环境条件; 数值模拟

1 引言

降雪是华北地区冬季经常出现的一种降水形式。王文辉和徐祥德^[1]以及其他科研工作者^[2~6]曾经就发生在华北地区的几次大雪至暴雪天气过程进行过研究,一般认为,华北地区的强降雪不仅与对流层中低层西南急流的水汽输送和边界层锋面的强迫抬升有关,而且与雪区东侧、存在于对流层底部的偏东气流有密切联系。由于相对于夏季降水来说,华北东部平原的降雪天气过程是一种极小概率事件,有关的研究工作仍然比较薄弱。但是,随着社会的发展,降雪造成的损失却日渐突出。特别是随着城市化进程步伐的加快,与降雪有关的“城市次生灾害”事件逐渐显露出来。2001 年 12 月 7 日,北京地区一次突发的小雪天气过程造成了巨大的社会影响,数十万辆机动车几乎无法行驶,北京城区的交通近乎于瘫痪,下班高峰期间,近百万市民要么被困在汽车中达数小时,要么在大街小巷里长途跋涉。这次天气过程从中午 13 时开始出现降雪,至 22 时基本结束,全市平均降雪量仅为 1~2 mm,这种华北地区常见的小雪天气过程为什么会造成路面交通瘫痪? 本文将从以下两个方面进行初步分析:

(1) 与历史上相似的天气过程进行对比分析,了解这次小雪天气过程引发的“城

2002-03-18 收到, 2002-08-29 收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 资助

市次生灾害”事件的基本气象原因；

(2) 对“12·7”降雪天气的发生、发展过程进行天气学和中尺度模拟诊断分析，探讨这种天气过程形成的可能机理。

2 关于“12·7次生灾害事件”基本气象条件的探讨

2.1 降雪造成的“城市次生灾害”是否与冬季降雪量的大小有关

北京地处华北东部，属典型的东亚季风气候，冬季降雪是一种常见的天气现象，降雪量的大小是否会成为这种“城市次生灾害”的重要原因呢？

大量的诊断分析和天气学实践表明，华北东部冬半年降雪的水汽通道一般有两条：沿青藏高原—西部黄土高原东侧的远距离低层西南暖湿气流和起源于黄海渤海近距离的低层偏东气流。其中，由于西南暖湿气流含水量充沛，当它与偏西或偏北移动的冷空气在华北中东部相遇时，往往会产生大雪、暴雪甚至特大暴雪；同时由于其相对的“高温”特征，降雪过程中，近地面层的气温一般在 0℃左右甚至 0℃以上。而单一的低层偏东气流的水汽输送——即所谓完全由“回流”天气系统造成的降雪，由于它的含水量相对较低，其平均降雪量一般较小；另一方面，由于它是华北冬季风控制系统下的天气过程，降雪发生时，近地面层的气温一般在 0℃以下。事实上，华北东部的降雪天气过程往往是由上述两支气流共同作用的结果。为了便于比较，我们给出了 1961~2000 年 12 月~1 月北京观象台 24 小时降雪量超过（含）5 mm 背景下的天气要素概况（表 1）。

表 1 1961~2000 年 12 月~1 月北京观象台降雪量≥5 mm 情况下的天气要素概况

发生时间	降雪量/ mm	最高气 温/℃	最低气 温/℃	主要水 汽来源	发生时间	降雪量/ mm	最高气 温/℃	最低气 温/℃	主要水汽 来源
1972-01-31	5.0	0	−10.1	西南气流	1977-12-14~15	16.3	1.0	−3.1	西南气流
1973-01-23	14.6	0.4	−1.5	西南气流	1979-12-18~19	8.8	2.1	−2.7	西南气流
1973-01-24	5.4	−0.3	−7.0	西南气流	1989-01-05~06	5.4	−0.3	−1.8	西南气流
1974-12-01~02	9.5	1.7	−1.6	西南气流	1997-12-06	8.3	4.3	0.3	西南气流

从表 1 可以看到，尽管这八次天气过程的降雪量都很大，其中包括 1973 年 1 月 23~24 日和 1977 年 12 月 14~15 日这样的特大暴雪，它们对北京城市交通造成的影响远不及“12·7”事件，这可能与降雪发生时，近地面层气温较高，落雪很快在路面融化或不能形成“冰面”有关。不可否认的另一个事实是，城市道路网结构的变迁和车流量的成倍增长等非气象因素是引发这次“城市次生灾害”的重要环境条件。

2.2 降雪过程中的低温是否一定会引发这种“次生灾害”

落雪能够迅速形成“冰面”的气温条件是否就一定会造成所谓的“次生灾害”呢？为此，我们给出了 1961~2000 年 12 月~1 月北京观象台降雪量超过（含）1 mm 的最高气温分布情况（如图 1）。

从图 1 可以看到，北京地区 12~1 月期间有明显降雪发生时，日最高气温在−1℃以下的情况（有利于落雪在地面迅速结冰）共发生过 20 次，占总数的 37%。2001 年

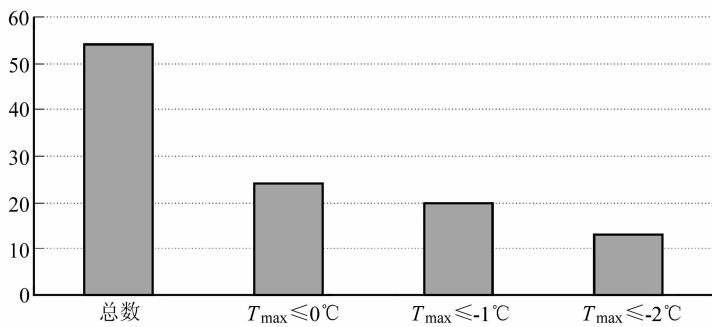


图 1 1961~2000 年 12 月~1 月北京观象台降雪量 ≥ 1 mm 背景下的气温情况

12 月 7 日降雪发生时的日最高气温为 -2.7°C ，降雪量为 1.8 mm，与此相似的气温背景下有明显降雪天气过程发生过 13 次，其概况如表 2。

表 2 1961~2000 年 12 月~1 月北京观象台降雪量 ≥ 1 mm、
日最高气温 $\leq -2^{\circ}\text{C}$ 时的天气要素概况

时间	降雪量/ mm	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	时间	降雪量/ mm	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$
1968-12-29	1.9	-3.3	-6.9	1972-01-03	2.7	-3.7	-9.2
1972-01-25	1.7	-4.7	-14.8	1978-12-18~19	3.0	-3.9	-11.4
1984-12-16	1.3	-2.9	-5.5	1986-12-27	2.2	-4.1	-8.6
1987-01-01~02	2.1	-3.6	-9.3	1987-01-10~11	1.9	-4.7	-7.8
1990-01-28	3.8	-3.1	-7.5	1997-01-04	4.9	-2.0	-8.0
2000-01-05	3.0	-7.3	-12.6	2000-01-11	3.7	-3.7	-10.3
2000-01-22	3.0	-3.6	-12.7	平 均	2.7	-3.5	-9.6

从表 2 中可以看出，在这 13 次降雪过程中，天气状况比“12·7”更严重的降雪情况（降雪量大于 1.8 mm，同时满足日最高气温低于 -2.7°C 的条件）共有 10 次，但是它们造成的社会影响远不及“12·7”降雪天气过程。上述事实表明，北京地区发生的这次“城市次生灾害”事件是在特殊的时间（恰逢周末）、特殊的城市（飞速发展的大都市）和特定的道路状况（大量的立交桥构成的坡面）等非气象因素与恶劣的气象条件相互作用造成的，而“落雪成冰”是城市交通严重不畅的直接诱发因素。

2.3 雪面温度与不同下垫面之间相互作用的关系

由于地面不同物理介质的热容量差异，它们在相同的气象条件背景下，其表层温度会有较大的不同。分析降雪过程中不同介质的下垫面与雪面温度之间存在何种相互影响，不仅有利于我们了解“12·7 落雪成冰”的真正原因，而且对城市建设具有重大的现实意义。为此，我们给出了“12·7”降雪发生前后 [12 月 7 日 02 时~8 日 02 时（北京时，下同）]，位于紫竹院公园内的自动气象站探测的不同物理介质下垫面温度的逐时变化（图 2）。

可以看到，在降雪发生前的夜间晴空少云时段（7 日 06 时之前），各种下垫面表面的温度差异是很大的，其中土地表面温度和距离草地 5 cm 高的气温最低，草地表面温度最高，它们同一时刻的最大温差可达 5°C 以上，而柏油路面与气温比较接近；天亮后，

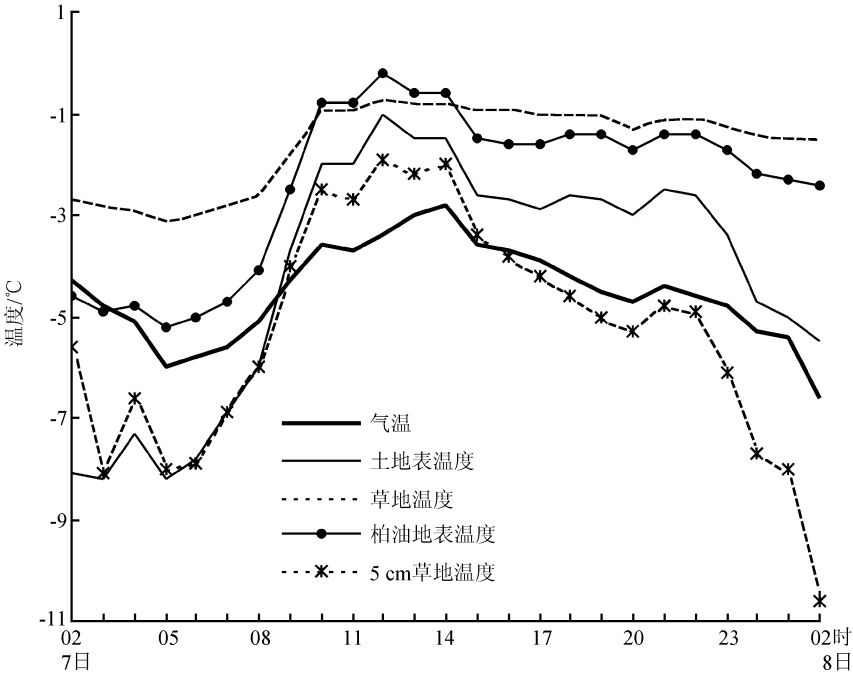


图2 7日02时~8日02时不同物理介质上温度的逐时变化

尽管没有阳光照射（7日07时以后，观测的总云量为10），与气温相比，除了草地表面温度之外，其他不同物理介质的表面温度的上升速度快得多，并且在12时达到日最高值。其中，柏油路面温度接近0℃，比同一时刻的气温观测值高3℃左右。

值得注意的是，草地表面温度在7日10时以后直到8日00时几乎一直没有明显变化，而柏油、土地表面的温度和距离草地5 cm高的气温在12~13时都有第一次小幅下降，这段时间正好是全市性降雪开始时间。但是，气温观测值却一直在缓慢上升，直到14时后才开始下降，也就是说，发生在12~13时之间的地表温度变化与气温变化趋势是反向的。另外一个值得注意的事实是，降雪开始至地表积雪还没有形成这段时间——即13~14时，柏油、土地表面的温度又停止了下降，都维持在一个相对的稳定状态；14~15时柏油、土地表面的温度出现第二次下降，此后维持在一个相对稳定状态。

上述事实表明，不同物理介质的下垫面与气温、雪面温度之间在降雪过程中存在明显、复杂的相互作用，降雪开始时，由于雪片的吸热作用，造成柏油、土地表面和紧贴地面的大气温度下降，直到达到一种短暂的动态平衡为止——即在雪片发生相变过程中所吸收的热量，与大气供给的热量基本相当时（此时的气温仍然在继续上升），各种物理介质表面的温度维持短暂的相对稳定状态。随后，由于近地面层气温的下降，造成各种不同物理介质的下垫面表面的温度进一步降低，在两者的共同作用下，地表的落雪迅速形成冰面。这层冰面形成之后，阻止了它们与大气之间的热量交换，柏油、土地等物理介质的温度稳定地维持在-1~-3℃之间。此后，飘落在冰面上的雪花继续结冰与地表温度的关系很小，而是气温、尤其是紧贴地面的大气迅速降温的结果，而雪面的反射作用又进一步加速了近地面层气温的下降，二者之间存在明显的正反馈

关系, 这种关系随着高度增加而减弱, 这一点可以从图 2 中距离草地表面 5 cm 的气温变化得到证明: 在冰面形成的过程中和形成后, 它的温度比标准气温观测值下降的更快。

总之, “12·7” 小雪天气造成的城市交通严重受阻, 是在特殊的时间 (恰逢周末)、特殊的城市 (飞速发展的大都市) 和特定的道路状况 (大量的立交桥构成的坡面) 等非气象因素与 “落雪成冰” 的气象条件相互作用的结果, 而落雪迅速结冰现象是降雪、路面与气温相互作用的结果。

3 “12·7” 小雪天气过程的成因分析

上面的分析表明, 尽管从天气学的意义上来说, “12·7” 小雪天气过程是一次不容易被归类于 “灾害性天气” 的弱过程, 但是, 就其造成的影响和损失而言是巨大的。因此, 全面分析近地面层和对流层中层水汽输送条件、环流形势的演变过程, 对于全面地了解北京地区冬季经常出现的、类似于 “12·7” 小雪天气过程的形成物理过程和触发机制, 具有重要的实际意义。

北京市气象局的中尺度业务模式在以 12 月 6 日 20 时为初始时刻的业务预报中较好地预报了这次小雪过程 (图 3)。模式预报的降水落区和总量基本上与实况接近, 出现最大降水的时段及降水结束时间的预报也与实况基本吻合, 但降水开始时间比实况偏晚 1~2 小时。因此, 对模式输出的各种物理量场与天气实况相结合, 进行综合分析, 有利于了解这次降雪形成和触发的物理机制。

3.1 中尺度模式简介

北京市气象局的中尺度业务模式^[7]是在 PSU/NCAR 开发的非静力中尺度数值模式 MM5V2 版基础上改进的, 采用两层嵌套网格, 外层 101×101 个网格点, 水平格距 45 km, 内层 103×103 个网格点, 水平格距 15 km, 中心点经纬度为 (40°N, 116°E), 垂直方向为 23 层 (σ 面), 使用国家气象中心 T106 模式的输出场为背景场和侧边界, 并采用 Cressman 插值方案引入实况观测资料生成初始场。模式的主要物理过程包括简单冰相显式湿方案、Grell 积云参数化方案、Dudhia 云辐射方案和 MRF 边界层方案。

3.2 低层大气的迅速增湿过程

空中水汽的积累和输送是任何降水过程发生的必要条件。但是, 由于 12 月 6 日北京地区出现了 4~5 级偏北风, 造成本地湿度明显下降, 6 日 14 时南郊观象台的相对湿度只有 13%。然而, 到 7 日 08 时观象台的相对湿度却急升到了 83%, 18 个小时相对

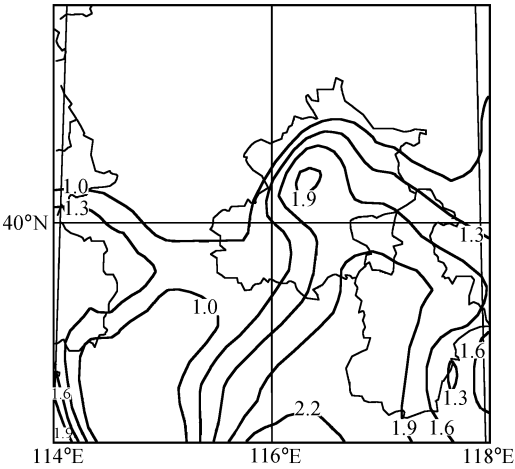


图 3 MM5 模式预报的 12 月 7 日 08 时~8 日 08 时的 24 小时累积降水量 (单位: mm)

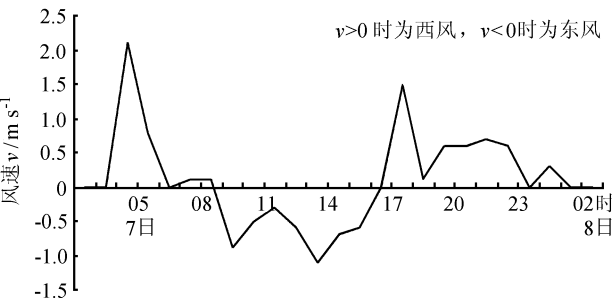


图 4 2001 年 12 月 7 日 02 时~8 日 02 时紫竹院自动气象站风向风速的逐时变化

料也表明，200 m 以下 7 日 02~08 时，观象台由西南风转为东北风 $1\sim2\text{ m s}^{-1}$ 。从分布在北京城近郊区 20 多个自动站的风场变化来看（如图 4，以紫竹院公园内的自动气象站为例），这支偏东气流几乎一直维持到 7 日 16 时，此后，地面开始为西风气流控制。从 12 月 7 日 02 时 975 hPa 的散度通量和风场分布的数值模拟结果（图 5）可以看到，模式较好地模拟出了北京东部的偏东气流，但是它比实际观测到的范围要小——模式得到的河北省东北部—辽东半岛为西风气流控制，这可能与模式对边界层风场的模拟能力不足有关。模拟的结果还表明，在这支浅薄的偏东气流与 40°N 以南的西风气流之间此时已经出现了微弱的辐合运动，而北京西侧—河北西部辐合带显然与燕山、太行山的地形作用有关。

以上分析表明，存在于北京以东大范围的、非常浅薄的低层偏东气流可能对北京

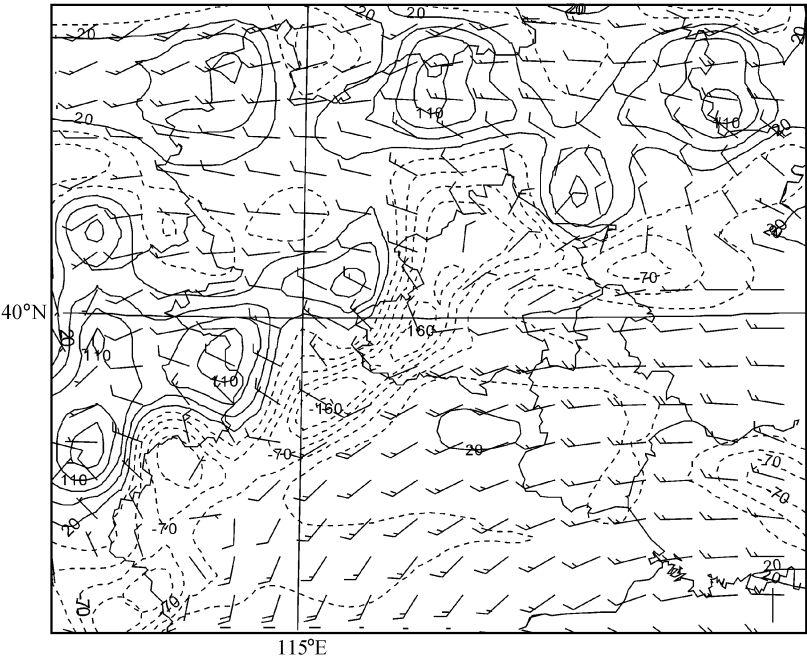


图 5 中尺度模式预报的 12 月 7 日 02 时 975 hPa 的散度通量和风场
散度通量的单位： $10^{-13}\text{ s}^{-1}\text{ m}^{-1}$ ；间隔：30；虚线为负，实线为正

湿度增加了 70%，这种变化显然大大超出了日变化的范围，那么造成近地面湿度大幅度迅速上升的原因何在？

通过对地面天气形势演变的连续变化分析（图略），我们发现：6 日 23 时东北地区南部（沈阳—辽东半岛）气压场开始出现正变压，此后，丹东和大连等地相继出现偏东风。北京的探空资

料也表明，200 m 以下 7 日 02~08 时，观象台由西南风转为东北风 $1\sim2\text{ m s}^{-1}$ 。从分布在北京城近郊区 20 多个自动站的风场变化来看（如图 4，以紫竹院公园内的自动气象站为例），这支偏东气流几乎一直维持到 7 日 16 时，此后，地面开始为西风气流控制。从 12 月 7 日 02 时 975 hPa 的散度通量和风场分布的数值模拟结果（图 5）可以看到，模式较好地模拟出了北京东部的偏东气流，但是它比实际观测到的范围要小——模式得到的河北省东北部—辽东半岛为西风气流控制，这可能与模式对边界层风场的模拟能力不足有关。模拟的结果还表明，在这支浅薄的偏东气流与 40°N 以南的西风气流之间此时已经出现了微弱的辐合运动，而北京西侧—河北西部辐合带显然与燕山、太行山的地形作用有关。

地区低空水汽的初期积累起到了非常重要的作用。同时, 这支气流的低温特征可能也是造成北京地区的气温回暖缓慢的重要原因之一。

3.3 对流层中低层系统与北京降雪的联系

从 12 月 6 日 08 时~7 日 20 时动态地面天气示意图 (图 6) 上可以看到, 在对流层中低层暖平流的作用下, 首先从四川盆地—河套西南有倒槽辐合区生成并发展, 倒槽的主体在东移的过程中, 并未直接影响北京, 而是在山西高原上逐渐填塞, 北京始终处于从东北方向减弱南下后残存的迴流高压底部。而且, 7 日 08 时与系统相配合产生的雪区北端, 还远在内蒙古自治区的东胜 (110°E) 附近, 但是 13 时前后北京地区却突然开始降雪。从表面上看, 地面降雪区在 7 日 08 时后出现了东移过程中的不连续现象。

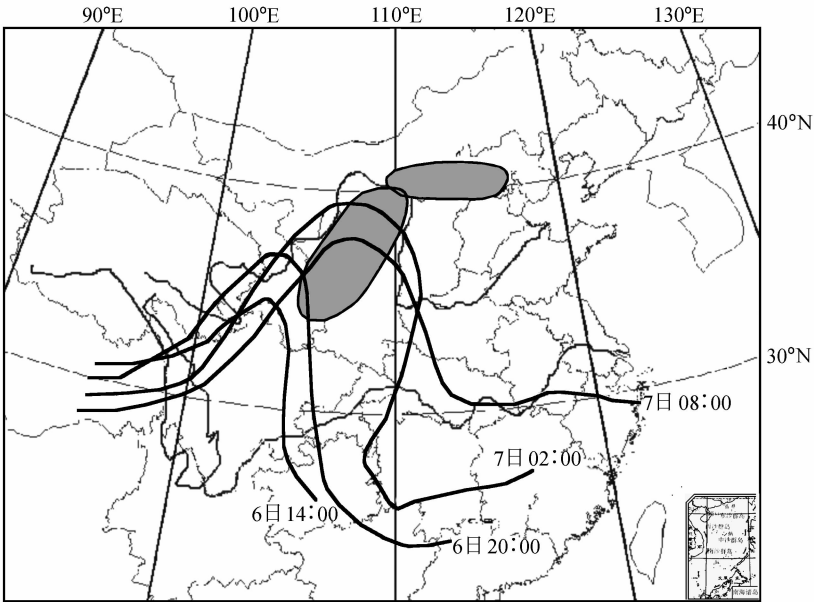


图 6 12 月 6 日 14 时~7 日 14 时动态地面天气示意图
(位于河套和 40°N 附近的阴影区分别为 7 日 08 时、14 时降雪区)

为了寻找雪区在东移过程中出现的不连续现象的原因, 有必要分析对流层中层系统的水汽输送作用和动力触发作用。

与 12 月 7 日降雪天气对应的对流层中低层系统是一个快速移动的高空槽 (图 7)。6 日 08 时, 它位于乌鲁木齐和哈密之间, 7 日 08 时已快速东移到银川附近并与缓慢向东北方向移动的、富含充沛水汽的南支槽同位相叠加, 从而使 110°E 以东、40°N 附近及其以南地区均处于槽前的偏南暖湿气流控制之下。数值模拟的结果证实了这支南北结合后形成的高空槽在北京降雪过程中的重要作用: 7 日 14 时, 700 hPa 高空槽的模拟位置位于山西高原 (参见图 7), 高空槽前存在深厚的、大范围的西南气流。从 MM5 模拟的 925 hPa 高度上的水汽辐散辐合分布 (图 8) 可以看到, 这支西南气流与槽后的偏西气流造成的水汽辐合带 7 月 20 时仍然位于北京西部, 而模拟的北京城区降雪已经出现数小时 (与实况观测到的降雪区分布也非常接近)。这表明, 对流层中层出现的这支天气尺度偏南气流不仅为长时间降雪提供了良好的水汽通道, 而且, 当这支暖湿气

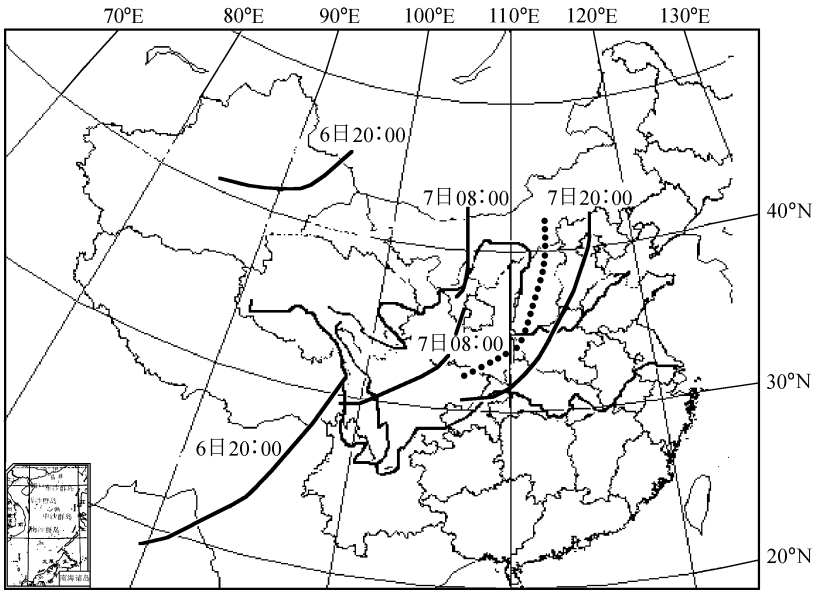


图 7 700 hPa 槽线动态示意图 (.....为 MM5 模拟的 7 日 14 时槽线位置)

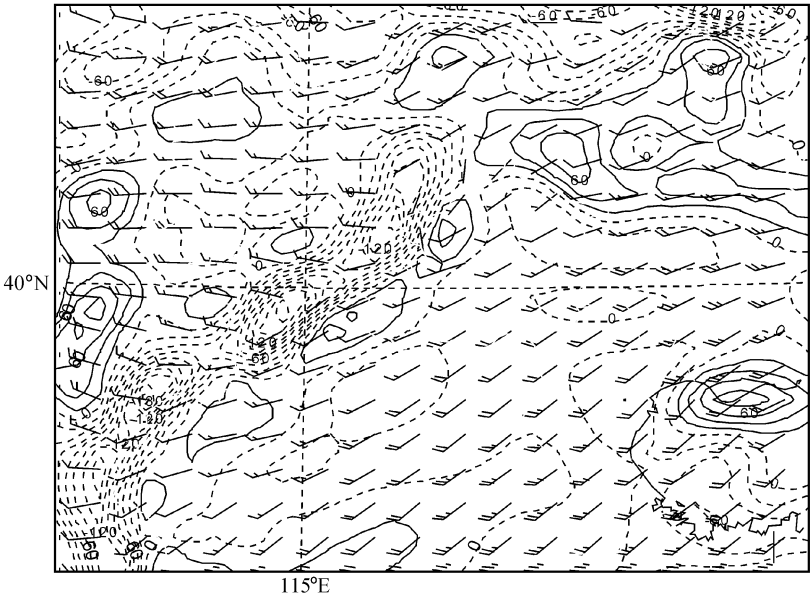


图 8 中尺度模式预报 7 日 20 时 925 hPa 水汽通量散度和风场
水汽通量散度的单位: $10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$; 间隔: 20, 虚线为负, 实线为正

流与近地面冷湿气流在空中重叠时, 造成了对流层中低层水汽迅速凝结而首先出现降雪, 随后由高空槽造成的辐合上升运动是降雪得以维持的重要条件。

观测事实表明, 7 日 17 时前后几个小时, 北京地区的降雪强度最大。从 850 hPa 上模拟的散度场分布可以看到 (图 9), 除了北部的小片区域以外, 北京大部分地区存在明

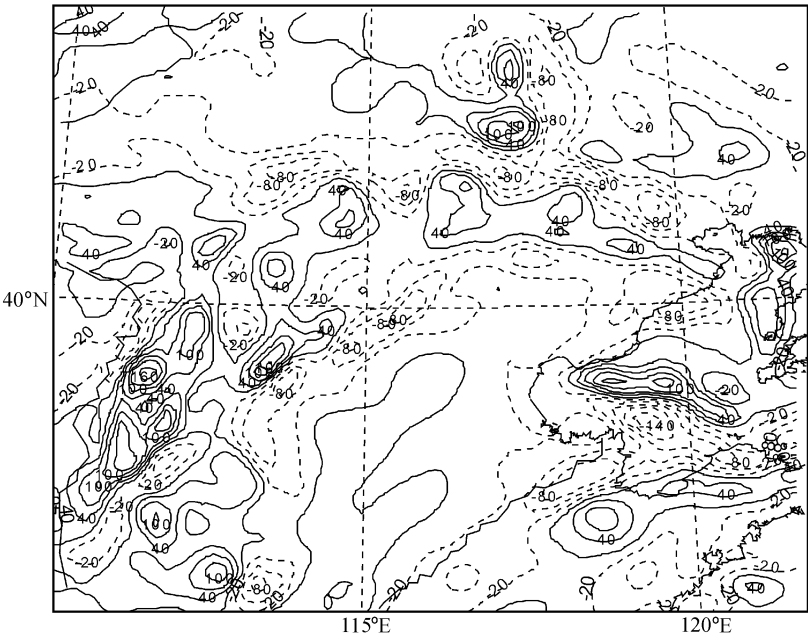


图9 中尺度模式预报7日20时850 hPa散度场
单位： 10^{-6}s^{-1} ；间隔：20，虚线为负，实线为正

显的辐合上升运动，其中西南部存在一个强烈的辐合上升运动中心，这一辐合上升运动中心一直维持到23时（图略）。而在河北东北部—辽东半岛存在着大范围的、纬向分布的辐散下沉运动，正是这支下沉气流造成了位于北京东北方向的廻流高压的存在。

综上所述，2001年12月7日北京地区的降雪天气很可能是由对流层中层快速移动的高空槽、地面弱倒槽和近地面层弱的偏东风共同影响而产生的，近地面层弱的偏东风不仅首先为北京地区的降雪提供了必要的水汽积累，而且当快速移动的槽前偏南暖湿气流与这支冷湿气流在空中重叠时，造成对流层中低层水汽迅速凝结；同时由高空槽和地面弱倒槽共同构成的辐合上升系统，不仅对降雪发生有明显的触发作用，而且对降雪的长时间维持提供了水汽辐合条件。

4 小结

(1) 通过与历史同期降雪过程的降雪量、气温状况的比较，以及“12·7”降雪过程前后不同物理介质下垫面温度的演变情况分析，我们认为：“12·7”小雪天气造成的城市交通严重受阻，是在特殊的时间、特殊的城市和道路状况等非气象因素与“落雪成冰”的气象条件相互作用的结果，而落雪迅速结冰现象是降雪、路面与气温相互影响的结果。

(2) 对2001年12月6~8日近地面层和对流层中层水汽输送条件、物理量场以及大气环流形势演变分析表明，此次北京地区的降雪天气很可能是由对流层中层快速移动的高空槽、地面弱倒槽和近地面层弱的偏东风共同影响而产生的。近地面层弱的

偏东风不仅首先为北京地区的降雪提供了必要的水汽积累条件，而且当快速移动的槽前偏南暖湿气流与这支冷湿气流在空中重叠时，造成对流层中低层水汽迅速凝结；同时对流层中层自西向东移动的高空槽与低层大气构成的辐合上升运动，不仅对降雪发生有明显的触发作用，而且对降雪的长时间维持提供了水汽辐合条件。

(3) 中尺度模式虽然不能很好地模拟出近地面层大范围的偏东气流的存在，但却很好地再现了对流层中下层、河北东北部—辽东半岛大范围的辐散下沉运动。正是这支下沉气流造成了位于北京东北方向的回流高压的存在，从而导致近地面层偏东风的产生。

参 考 文 献

1 王文辉、徐祥德，锡盟大雪过程与“77.10”暴雪分析，气象学报，1979，**37**（3），80～86。
2 雷振发，1977年10月的一次大雪，气象，1979，**9**（9），5～6。
3 范永祥，华北春季大雪与黄勃海强东风，气象，1979，**9**（9），9～10。
4 郭进修，华北地区1978年的初雪，气象，1980，**1**（1），14～15。
5 马振峰，一次大～暴雪过程的诊断分析，气象，1988，**3**（3），20～24。
6 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。
7 王建捷、王迎春、崔波等，北京地区中尺度非静力数值预报系统的开发与实时预报应用，应用气象学报，1999，**10**（4），385～393。
8 赵思雄等，北京“12·7”降雪过程的分析研究，气候与环境研究，2002，**7**（1），7～21。

An Analysis on Serious City Traffic Trouble Caused by Light Snow

Sun Jisong, Liang Feng, Chen Min, and Liao Xiaonong

(Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089)

Abstract In this paper, the basic weather condition, which caused serious traffic trouble in Beijing city, has been analysed by comparing the history situation with the light snow happened in 7 December 2001. It has been proved that the disastrous event is related with interaction between the special city circumstance and serious weather phenomenon which happened when the fallen snow rapidly froze, and this serious condition is caused by sophisticated inter-effect between the temperature on different material surface and air temperature on different level. It has been found that the temperature's falling of the road surface and near-surface's air is caused by the snow's endothermic reaction during initial stage, in return, the lower air temperature will accelerate falling of the road surface temperature, and the first ice layer is come to being by this positive feedback. However, its reflection of heat will make near-surface's air temperature decrease more. Based on the results of numerical experiment and weather analysis, the possible mechanisms of this snow have been studied. It is considered that the light snow is possibly caused by interaction among rapid moving trough in troposphere, weakly air pressure trough and thin east-flows on near-surface.

Key words: light snow; derivative city disaster; weather circumstance condition; numerical simulation