

胡金磊, 郭学良, 侯灵. 2014. 下垫面对雹云形成发展的影响 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 407–418, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12026. Hu Jinlei, Guo Xueliang, Hou Ling. 2014. Effect of underlying surface on the formation and evolution of hail cloud [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 407–418.

下垫面对雹云形成发展的影响

胡金磊^{1,2} 郭学良² 侯灵³

1 国家海洋局南海预报中心, 广州 510310

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 广东省气象信息中心, 广州 510080

摘要 利用中尺度模式 WRF (Weather Research and Forecasting) 对 2005 年 5 月 31 日发生在北京地区的一次强冰雹天气过程进行了数值模拟研究, 并与观测的雷达回波、冰雹云移动路径和冰雹落区进行比较, 在此基础上探讨了城市和农田两种下垫面对雹云的影响。结果表明, 由于“城市热岛”效应的作用, 城市下垫面的地面感热通量显著增加, 有利于雹云的发展增强和大冰雹的形成, 使地面累积降雹量增加, 但对雹云移动路径影响不大。农田下垫面具有较大的潜热通量, 局地蒸发强, 有利于大量小冰雹的形成, 云中冰雹含量增加, 但降雹强度较弱, 地面累积降雹量小。

关键词 城市下垫面 雹云 中尺度数值模拟

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0407-12

中图分类号 P458.1⁺21.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12026

Effect of Underlying Surface on the Formation and Evolution of Hail Cloud

HU Jinlei^{1,2}, GUO Xueliang², and HOU Ling³

1 South China Sea Marine Prediction Center of State Oceanic Administrator, Guangzhou 510310

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Meteorological Information Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080

Abstract Using the mesoscale model WRF (Weather Research and Forecasting), a severe hailstorm that occurred in Beijing on 31 May 2005 was simulated and compared with the observed radar echo, the hailstorm track, and the hail fall area, to investigate the effect of the underlying surface, such as urban areas or agricultural land, on the hailstorm. The results show that the sensible heat flux shows a clear increase due to the urban heat island effect. This increase in the flux is favorable for the development of hail clouds and the formation of larger hailstones, resulting in an increase in the surface-accumulated hail fall; however, its influence on the track of the hail clouds is less significant. In contrast, agricultural land surfaces have a larger latent heat flux and higher evaporation, which is favorable for the formation of a large amount of smaller hailstones, and results in reduced hail water content in the clouds. The surface-accumulated hail fall therefore decreases over these areas due to the weakening effect of agricultural land surfaces on hail clouds.

Keywords Urban surface, Hail cloud, Mesoscale numerical simulation

收稿日期 2012-02-18 收到, 2013-12-13 收到修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200806001, 国家科技支撑计划项目 2006BAC12B03

作者简介 胡金磊, 男, 1985 年出生, 硕士, 从事云物理与中小尺度数值模拟研究。E-mail: hujl1202@sina.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

1 引言

冰雹云是局地强对流天气，除产生冰雹外，还常常伴随着大风、雷电、强降水等灾害性天气。它具有突发性强、空间尺度小、内部结构复杂、发展演变迅速、生命史短及危害程度大等特点。

20世纪70年代以来，数值模拟成为研究冰雹云形成和发展的重要手段（Wisner et al., 1972; Kachurin, 1974; Takahashi, 1976; Orville and Kopp, 1977; Yau and Macpherson, 1984）。20世纪80年代以后我国学者开始进行一维冰雹云模式（许焕斌和王思微，1985；胡志晋和何观芳，1987）及二维冰雹云模式研究（许焕斌和王思微，1988；王思微和许焕斌，1989；毛玉华和胡志晋，1993；何观芳和胡志晋，1998；段英和刘静波，1998）。徐家骝（1985）首先使用三维云模式研究冰雹生长轨迹，20世纪90年代以后三维云模式在冰雹研究得以广泛使用，如孔凡铀（1990, 1991）、郭学良（1997）、洪延超（1998, 1999）、郭学良等（2001）、许焕斌和段英（2001, 2002）、洪延超等（2002）等。近年来，国内不少研究者采用冰雹云模式在雹云形成机理方面做了很多工作（付丹红等，2003；周毓荃等，2003；刘术艳等，2004；康凤琴等，2004；李兴宇和洪延超，2005；胡朝霞等，2007）。

冰雹云数值模式可以模拟研究冰雹云的形成机理，但初始场一般采用单站探空，对流启动采用热泡方式，没有考虑地形或采用理想地形等，很难再现实际冰雹云的形成和发展（黄美元和徐华英，1999）。

随着中尺度数值模式的发展，更为复杂的冰雹云微物理方案应用于中尺度模式，由于中尺度模式在初始场、地形、辐射过程、下垫面状况等方面考虑更为全面，采用高分辨率、可分辨云方案的中尺度数值模式，对于模拟和再现实际冰雹云过程具有较大的优势，已成为研究冰雹云形成、演变的重要手段。Van den Heever et al. (2006) 利用 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 研究了超级单体对冰雹分布谱的敏感性；Milbrandt et al. (2006) 利用一套新的微物理参数化方案成功再现了冰雹云结构、地面降雹最大直径等基本特征；García-Ortega et al. (2007) 研究发现地形和太阳辐射变化会改变地面低压和降水的空间分布，而二者

结合决定了雹暴的时间和空间分布；Nathan and Xue (2008) 发现冷池强度和低层风暴动力结构对冰雹粒子谱具有很强的敏感性，当粒子谱偏大时，冷池强度就偏弱；Heike (2008) 认为云凝结核 (CCN) 和云滴谱形状对地面降雹量和冰雹直径大小有重要影响。Khain et al. (2011) 认为随着 CCN 浓度增加，雹云降水量增加、降雹量明显增多并且冰雹直接增大。上述工作表明，中尺度模式在雹云研究中存在着独特优势。

城市灾害性天气不但受城市周边地形和中尺度冷暖气流分布状况的影响，同时也受城市自身状况（如粗糙度、热岛等）的影响（郭学良和付丹红，2003）。城市下垫面变化会导致大气温度、中尺度对流和降水量的变化（Niyogi et al., 2011），北京作为一个超大城市，其下垫面条件对天气过程造成的影响尤明显（汪光焘等，2005）。孙继松等（2006）认为北京地区的山区与城市下垫面特征所造成的热力差异在强对流天气的发展演变过程中起到了重要作用。王华等（2007）、王华和孙继松（2008）发现山区的地形和城市边界层对雹云发生发展的不同阶段以至冰雹的落区、强度等都有相当大的影响。

下垫面对雹云演变发展的影响研究尚少。本文利用中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecasting) 模拟研究了 2005 年 5 月 31 日 13:00 (北京时间，下同) 至 15:00 发生在北京城区的一次强冰雹天气过程，通过改变下垫面状况，开展数值模拟对比试验，分析了城市下垫面对雹云形成发展的影响机制。

2 模式设计和资料介绍

2.1 模式设计

WRF 模式是美国多家单位联合开发研制的新一代中尺度数值预报模式，是一个完全可压、非静力模式（Skamarock et al., 2008）。本文使用的是 WRF3.2.1 版本，采用双向三重嵌套网格，网格嵌套以及区域设计如表 1 所示。时间积分为 18 h，时间步长为 54 s。为了模拟城市下垫面状况对冰雹云演变的影响，模式耦合了单层城市冠层模式（Urban Canopy Model, UCM）。为更真实反映北京城市化状况，本文采用了高分辨率 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 下垫面资料，其中区域 01 采用分辨率为 2 m 的下垫面资料，而

表 1 WRF-ARW (Advanced Research WRF) 模式模拟参数设定

Table 1 The configuration of the WRF (Weather Research and Forecasting)-ARW (Advanced Research WRF) model parameters

水平分辨率	积分时间	微物理过程	积云对流参数化	长波辐射方案	短波辐射方案	模式坐标	垂直分辨率		边界层方案		城区物理方案	地表方案	陆面过程	土壤方案
							层数	顶	方案	方案				
网格一	9 km 100×98	02:00 至 20:00	WDM6 Kain-Fritsch 方案	RRTM 方案	Dudhia σ-z 地形跟随坐标	40 50 hPa	YSU	单层城市	Monin-Obukhov 方案	Noah	Noah	land-surface 模式	land-surface 模式	land-surface 模式
网格二	3 km 106×106	08:00 至 20:00	WDM6 无	RRTM	Dudhia 方案	σ-z 地形跟随坐标	40 50 hPa	YSU	单层城市	Monin-Obukhov 方案	Noah	land-surface 模式	land-surface 模式	land-surface 模式
网格三	1 km 187×220	08:00 至 20:00	WDM6 无	RRTM	Dudhia 方案	σ-z 地形跟随坐标	40 50 hPa	YSU	单层城市	Monin-Obukhov 方案	Noah	land-surface 模式	land-surface 模式	land-surface 模式

注: WDM6 (WRF Double-Moment 6-class scheme), RRTM (Rapid Radiative Transfer Model scheme), YSU (Yonsei University scheme), UCM (Urban Canopy Model)

嵌套区域 02、03 采用的下垫面资料分辨率为 30 s。

2.2 资料介绍

模式初始场采用 NCEP/NCAR 提供的 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) FNL (Final) 再分析资料和 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) 海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 资料, 初始场资料每 6 h 更新一次。为验证模式模拟效果, 选用了天津塘沽每 6 min 一次的多普勒雷达 CINRAD-SA 基数据资料、自动气象站观测数据以及北京站探空数据。地面降雹数据来自文献 (王在文等, 2010)。

3 个例概况及天气形势分析

2005 年 5 月 31 日下午北京遭遇罕见强冰雹袭击, 13:17 首先在门头沟地区出现冰雹天气, 此后在多个观测点 (王在文等, 2010) 观测到降雹发生。在 14:00 至 15:00 冰雹自西向东横扫北京城区。据南郊观象台观测记录, 最大冰雹直径达 50 mm, 最大平均重量为 37 g (王华, 2007), 全市农作物受灾面积达 13374 ha, 受灾人口达 87666 人, 造成直接经济损失 4815.5×10^4 元。此次过程降雹过程的强度之大、范围之广、损失之重, 为历史罕见。

此次冰雹天气是在典型高空低涡、地面冷锋配合的天气形势下发生的, 有中 β 尺度的超级单体形成的强对流过程。从 5 月 31 日 08:00 500 hPa 环流形势图 (王在文等, 2010) 上可以看到蒙古东部为一个深厚的冷涡系统, 北京则处于该系统南部的槽区内, 并且北京周边地区中层气流辐散, 对应地面图上有强冷锋过境, 冷锋前的偏南暖湿气流

很强。

分析大气层结可以发现, 温度曲线和露点温度曲线呈典型的表征强对流天气的“喇叭口”型结构 (王秀明等, 2009), 如图 1 所示, 并且在近地面存在逆温结构。从相对湿度曲线来看, 600 hPa 以下空气湿度较大, 600 hPa 以上空气异常干燥, 这表明中层存在冷空气入侵。近地面为偏东风, 在 700 hPa 以上为偏西风, 高低层之间存在强的垂直风切变。对流有效位能 (CAPE) 为 1313 J/kg。以上表明, 中层强冷空气入侵, 低层暖湿气流不断向

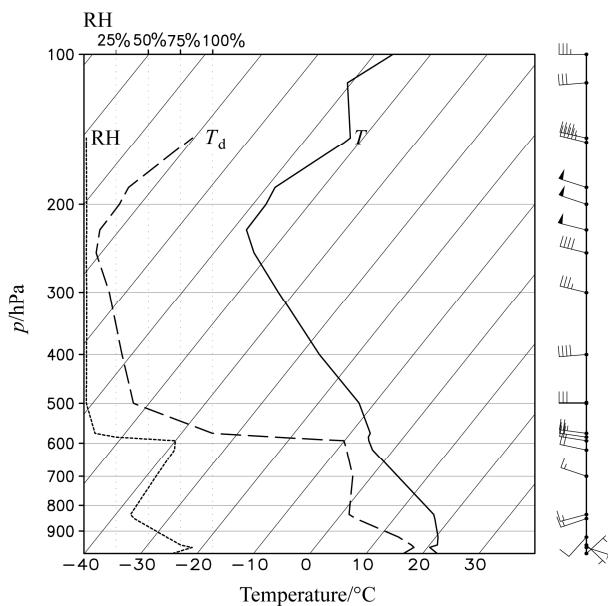


图 1 2005 年 05 月 31 日 08:00 北京地区的 T -log p 图 (T : 气温, T_d : 露点温度)

Fig. 1 The distribution of T -log p in Beijing at 0800 LST 31 May 2005 (T : air temperature, T_d : dew temperature)

北京地区输送, 大气处于对流不稳定状态, 有利于强对流的发生。

4 模拟结果验证

本文首先对此次强冰雹云过程进行了数值模拟, 并对雹云形成发展的模拟结果进行了验证分析。表 2 给出模拟雹云部分宏观特征与观测结果的比较, 其中模拟雹云最大回波为 62.7 dBZ, 略小于雷达观测到最大回波, 同时最大云顶高度比观测小 0.5 km 左右。但是, 在雹云源地、生命史、移动方向等方面, 模拟雹云与实际雹云接近, 而且模拟雹云也经过了北京城区, 并产生了降雹。

表 2 模拟的冰雹云与部分观测结果比较

Table 2 Comparison of the observed hailstorm with the simulated one

	雹云 雹云 雹云源 生命 史/h	雹云 移动 方向	最大云 最大回 波/dBZ	地面最 顶高度 /km	是否 大降水 量/mm	是否 经过 城区	城区 降雹
模拟	门头沟	4.5	西—东	62.7	>13	14	是
观测	门头沟	5	西—东	>65	13.5	13	是

图 2 为模拟与观测冰雹云的雷达反射率比较。由图 2a 可知, 当雷达观测雹云强回波区 (45 dBZ 以上) 刚刚抵达北京城区上空时, 此时最大回波 50 dBZ 以上。14:24 (图 2c) 雹云达到城区正上空, 强回波区域明显增大, 最大回波达到了 60 dBZ 以上, 并在此时段城区出现降雹。15:06 雹云即将离开北京城区, 此时降雹已经结束, 雹云最大回波降到了 55 dBZ, 但是雹云云体变大。从雹云在城区演变过程来看, 雹云经过城区使得雹云有明显增强增大。图 2b、2d、2f 分别是模拟雹云经过城区前后的回波演变。在模拟雹云刚到达城市上空时, 雹云最大回波在 50 dBZ 以上, 强中心位置在门头沟、石景山以及丰台三个区的交界之处, 并且模拟雹云强回波区的右方也存在着很大的弱回波区域 (30 dBZ 以下), 这些特征与雷达观测图 2a 基本上一致。

当 14:20 (图 2d) 模拟雹云处于城区正上空时, 此时雹云最大回波也达到了 60 dBZ 以上, 但是 60 dBZ 以上区域比雷达观测 (图 2c) 要小。雹云回波强中心在海淀、丰台、宣武等 3 个区交界之处, 并且模拟雹云在此时段也产生了降雹, 这与雷达观测相似。15:10 (图 2f) 模拟雹云离开北京城区, 此时

雹云降雹即将结束, 雹云最大回波减小到 55 dBZ 以上, 强回波区域位于通州区境内。

从以上分析可以看到, 模拟与观测的雹云移动方向趋向一致, 模拟雹云从门头沟区进入北京市区, 自西向东移动, 经过石景山、丰台、海淀、西城、东城、朝阳等, 然后在通州中部离开北京市区。从空间位置上来看, 模拟雹云和观测雹云在各个时刻强回波中心位置基本上一致。在实际天气过程中, 丰台、宣武、崇文和朝阳等地区先后观测到降雹 (王在文等, 2010)。模拟雹云 (图 4a) 降雹在丰台、朝阳、大兴等地方, 从模拟结果来看, 模拟冰雹落区与观测降雹落区比较一致。

从雹云演变特征可以看到, 冰雹云在经过北京城区时有明显的加强现象, 为了探讨其产生的原因及机理, 本文进行了数值敏感性试验。由于模拟雹云生命史、回波强度、雹云移动方向以及空间位置, 降雹时间和冰雹落区, 与观测有着比较好的一致性, 这为进行敏感性试验奠定了良好的基础。

5 下垫面对冰雹云的影响

为探讨城市下垫面对冰雹云增强的影响, 本文设计了两个不同下垫面的模拟试验, 其中控制试验 (Case 1) 采用实际的城市下垫面, 对比试验采用将城市下垫面换成农田 (Case 2)。初始场、区域嵌套网格、地形、参数化方案等其他条件保持不变。

首先看下垫面对冰雹云移动路径和最大回波强度的影响。雹云移动路径为各个时刻雹云回波最强中心连接的线。对比两组试验结果可以看到, 将城市下垫面换成农田后, 雹云产生的时间没有推迟或提前, 移动路径变化不大 (图 3a)。13:20 雹云到达城市上空, 15:10 雹云离开北京城区, 向城市东部移动。比较这段时间内雹云最大回波演变 (图 3b) 可以发现, Case 1 的最大回波强度较 Case 2 略强。由此可见, 城市和农田下垫面对雹云移动路径的影响差别不大, 但城市下垫面可增加冰雹云最大回波强度。

对比 13:00 至 16:00 3 h 地面累积降雹量 (以等效降水表示) 可以发现 (图 4), 在城市和农田下垫面两种情况下的地面降雹量和分布有着明显的差异。城市下垫面 (Case 1) 条件下, 地面降雹存在着两个强中心。一个强中心在城区, 降雹达到了 0.8 mm 以上, 另外一个降雹强中心在郊区。当城市下

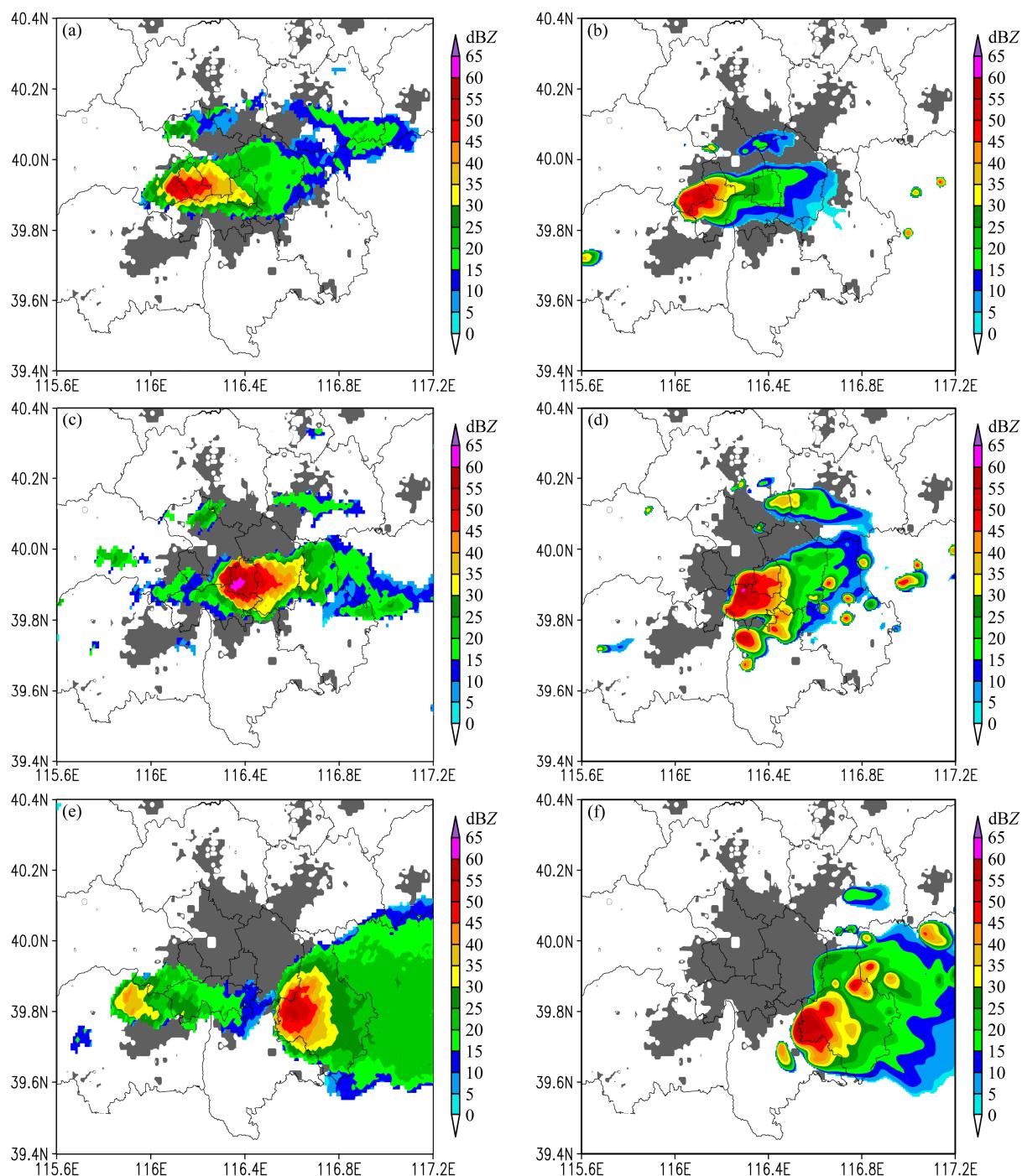


图2 (a、c、e) 观测与 (b、d、f) 模拟雹云经过城区前后雷达回波变化: (a) 13:34、(b) 13:40、(c) 14:23、(d) 14:20 4 km 高度雷达回波; (e) 15:05、(f) 15:10 8 km 高度雷达回波。灰色阴影区代表城区

Fig. 2 Comparison of the (a, c, e) observed and (b, d, f) simulated hailstorm's evolution: Radar echo at the height of 4 km at (a) 1334 LST, (b) 1340 LST, (c) 1423 LST, and (d) 1420 LST; radar echo at the height of 8 km at (e) 1505 LST and (f) 1510 LST. The gray shaded areas indicate Beijing urban

垫面换成农田以后, 只存在一个降雹强中心, 其位于郊区, 城区降雹强中心消失。与 Case 1 比较, Case 2 在城区位置上降雹量明显减少。从地面累积降雹量时间序列图 5 可知, Case 1 在 13:00 至 16:00 地面累积降雹量比 Case 2 地面累积降雹量要大, 而且

当雹云经过城市上空时 (时间为 13:20 至 15:10), Case 1 地面降雹量明显要比 Case 2 地面降雹量大, 这表明相对于农田下垫面, 雹云经过城市上空时降雹量会增加; 而农田条件下地面累积降雹量减少。

图 6 给出了 Case 1 和 Case 2 雹云最大上升气

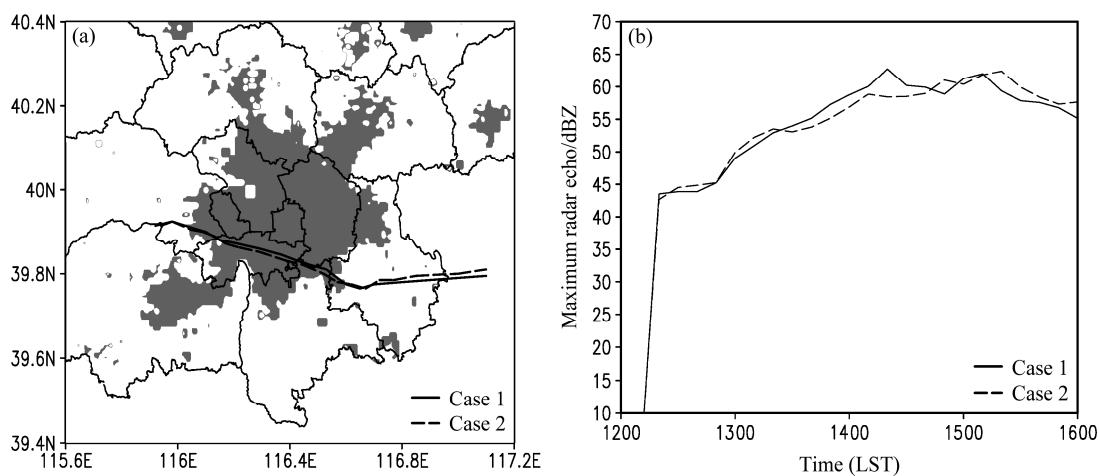


图 3 两组试验 (a) 霹云移动路径 (灰色阴影区代表城区) 和 (b) 最大回波时间序列

Fig. 3 (a) Moving path of hail cloud (the grey shaded areas indicate Beijing urban) and (b) time series of maximum radar echo for Case 1 and Case 2

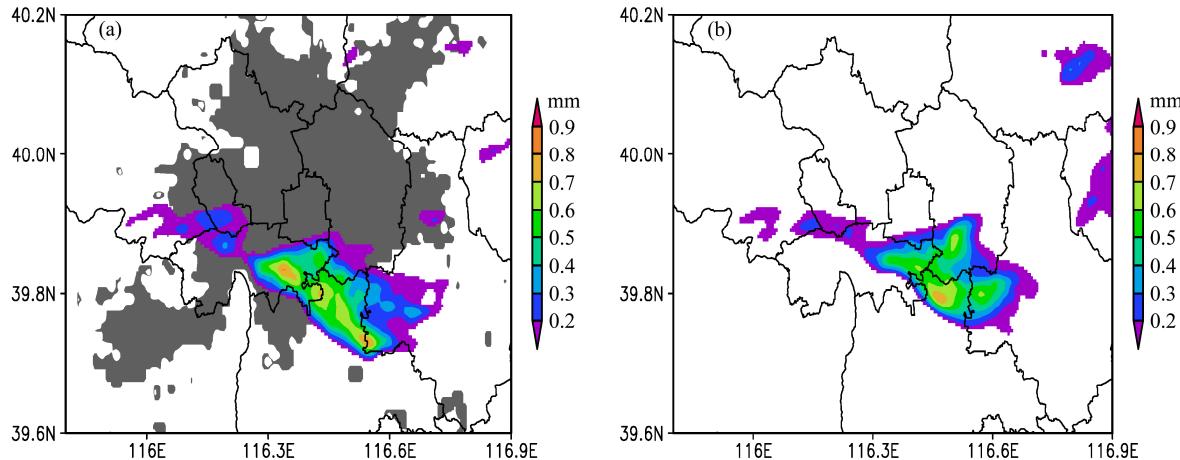


图 4 (a) Case 1、(b) Case 2 13:00 至 16:00 地面累积降雹量。灰色阴影区代表城区

Fig. 4 The distributions of accumulated hail at the surface from 1300 LST to 1600 LST for (a) Case 1 and (b) Case 2, the grey shaded areas indicate Beijing urban

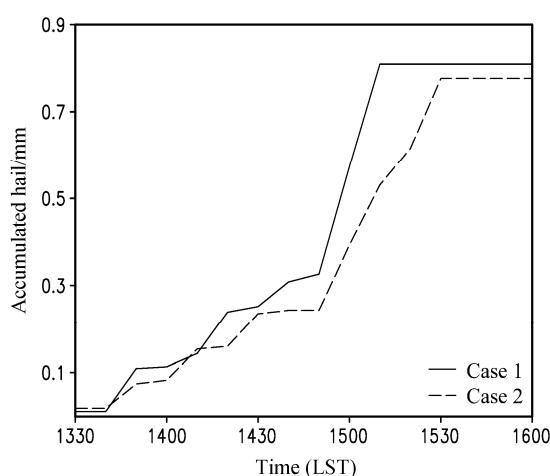


图 5 地面累积降雹量随时间变化曲线

Fig. 5 The time series of accumulated hail at the surface for Case 1 and Case 2

流、最大下沉气流随时间变化特征。可以看出，该雹云发展强烈，生命史较长，持续时间超过 4 h。在冰雹云产生以前，上升气流和下沉气流都很小，从 13:00 两者均开始增大，雹云产生。13:30 以后气流急剧增大，雹云强烈发展，地面开始出现降雹。在 14:20 左右，上升气流达和下沉气流达到最大，地面降雹增多。在雹云的成熟阶段，上升气流一直维持在 20 m/s 以上。在 15:30 以后，上升气流和下沉气流均开始减小，雹云随之减弱，雹云停止降雹。两组试验雹云演变趋势基本一致，但是 13:20 至 15:10 霹云经过城市上空，Case 1 中上升气流和下沉气流明显比 Case 2 强，Case 1 最大上升速度可达到 38.4 m/s，Case 2 上升速度为 34.3 m/s，两者相差 4.1 m/s，此时 Case 1 下沉速度达到 -12.6 m/s，Case 2 下沉速度为 -11.1 m/s，两者相差 1.5 m/s。这说明，

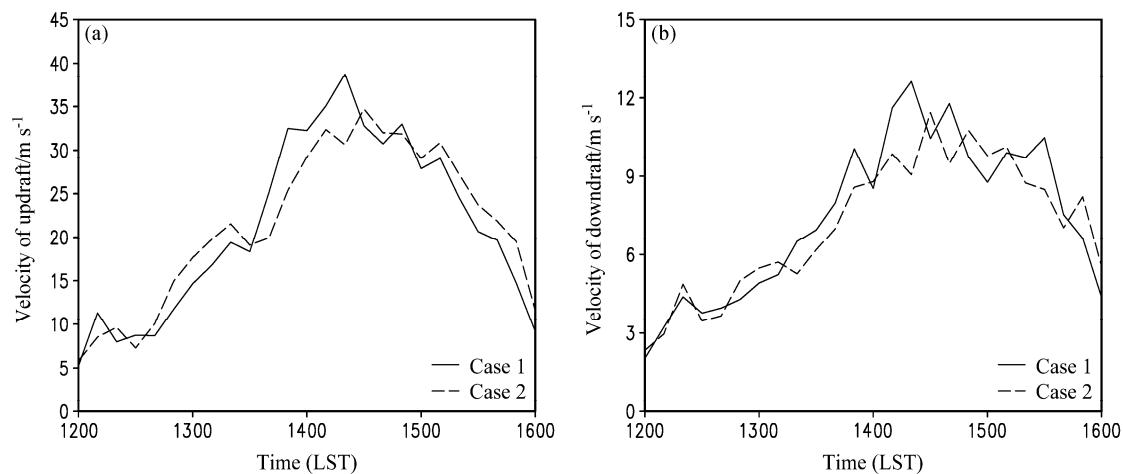


图 6 两组试验 (a) 垂直上升速度和 (b) 垂直下沉速度随时间变化曲线

Fig. 6 The time series of (a) updraft and (b) downdraft vertical velocity for Case 1 and Case 2

与农田下垫面相比较, 雹云经过城市下垫面时雹云垂直上升速度和垂直下沉速度会明显增大, 雹云加强。

雹云在 14:20 垂直速度和最大回波均达到最大, 并且此时也产生了降雹, 所以选择此时刻雹云状况进行结构分析。图 7a、7b 为 Case 1 和 Case 2 最大雹混合比分布。城市下垫面条件下雹混合比最大达到 6.5 g/kg 以上, 雹混合比高值(4.5 g/kg 以上)区域范围比较小, 低值(4.5 g/kg 以下)区域范围比较大。农田下垫面条件下雹混合比最大也达 6.5 g/kg 以上, 但高值区域范围明显大于 Case 1, 而低值区域范围小于 Case 1。从沿直线 AB 所做垂直剖面图上来看, 雹云雹混合比分布在 3 km 至 12 km 高度之间, 其强中心在 8 km 附近, Case 1 雹混合比覆盖范围比 Case 2 要大。从沿直线 CD 所做垂直剖面图上来看, Case 2 强中心所覆盖范围大于 Case 1。

农田垫面条件下, 雹云中雹混合比强中心区域增大, 这表明雹云中雹含量增加; 同时城市下垫面条件下, 雹云覆盖范围大于农田下垫面条件下的雹云覆盖范围, 这就说明了雹云在城区发展更强烈。

在 Morrison 双参数化方案中, 霰、雹过程采用相似的处理方法, 其不同之处在于对密度和落速度的处理, 而对于深对流方案统一采用了雹密度和雹落速度来计算地面降霰降雹。利用 Q_{hail} (冰雹混合比)、 N_{hail} (冰雹数浓度) 以及 ρ_{hail} (冰雹密度) 可以粗略估计出冰雹平均直径 D_{hail} :

$$\frac{Q_{\text{hail}}}{N_{\text{hail}}} = \frac{1}{6} \pi D_{\text{hail}}^3 \times \rho_{\text{hail}}, \quad (1)$$

其中, 文中取值 $\rho_{\text{hail}}=900 \text{ kg/m}^3$ 。

图 8 为 Case 1 和 Case 2 雹云中霰/雹粒子平均直径的垂直分布。从图 8a、8b 可知, 城市下垫面条件下平均直径为 1 mm 的霰/雹粒子分布区域比较大, 最高可以达到 8 km, 平均直径为 2.5 mm 的粒子最高可以达到 3 km; 而农田下垫面条件下平均直径为 1 mm 的霰/雹粒子最高达到 5 km, 平均直径为 2.5 mm 的粒子最高可以达到 2 km。同样从图 8c、8d 也可以看出, 同一高度上城市下垫面条件下粒子平均直径大于农田下垫面条件下粒子平均直径。这说明当雹云经过城市上空时雹粒子的平均直径会明显增大。

通过以上分析发现, 农田下垫面条件下, 雹云中雹含量显著增大, 但是雹粒子平均直径会明显减小, 说明城市地区比农田更容易出现大冰雹。同时, 城市大雹增多造成了 Case 1 地面累积降雹量比 Case 2 地面降雹量增多。

为了解雹云经过不同下垫面产生变化的机理, 图 9 给出了影响雹云城区范围 ($39.75^{\circ}\text{N} \sim 40.0^{\circ}\text{N}$, $116.05^{\circ}\text{E} \sim 116.6^{\circ}\text{E}$) 的区域平均向下短波辐射通量、长波辐射通量、地面潜热通量以及地面感热通量随时间的变化。在雹云到达城市上空以前, Case 1 和 Case 2 地表向下短波辐射通量和长波辐射通量几乎没有变化。13:00 至 15:00, 雹云开始影响城市上空, 短波辐射通量和长波辐射通量开始出现差异, 但此时差异不大。13:00 以后, 由于雹云的影响, 短波辐射通量急剧下降, 长波辐射通量增大。15:00 以后雹云离开城区, 短波辐射增加, 长波辐射减少。雹云影响城市上空的时间段为 13:00 至

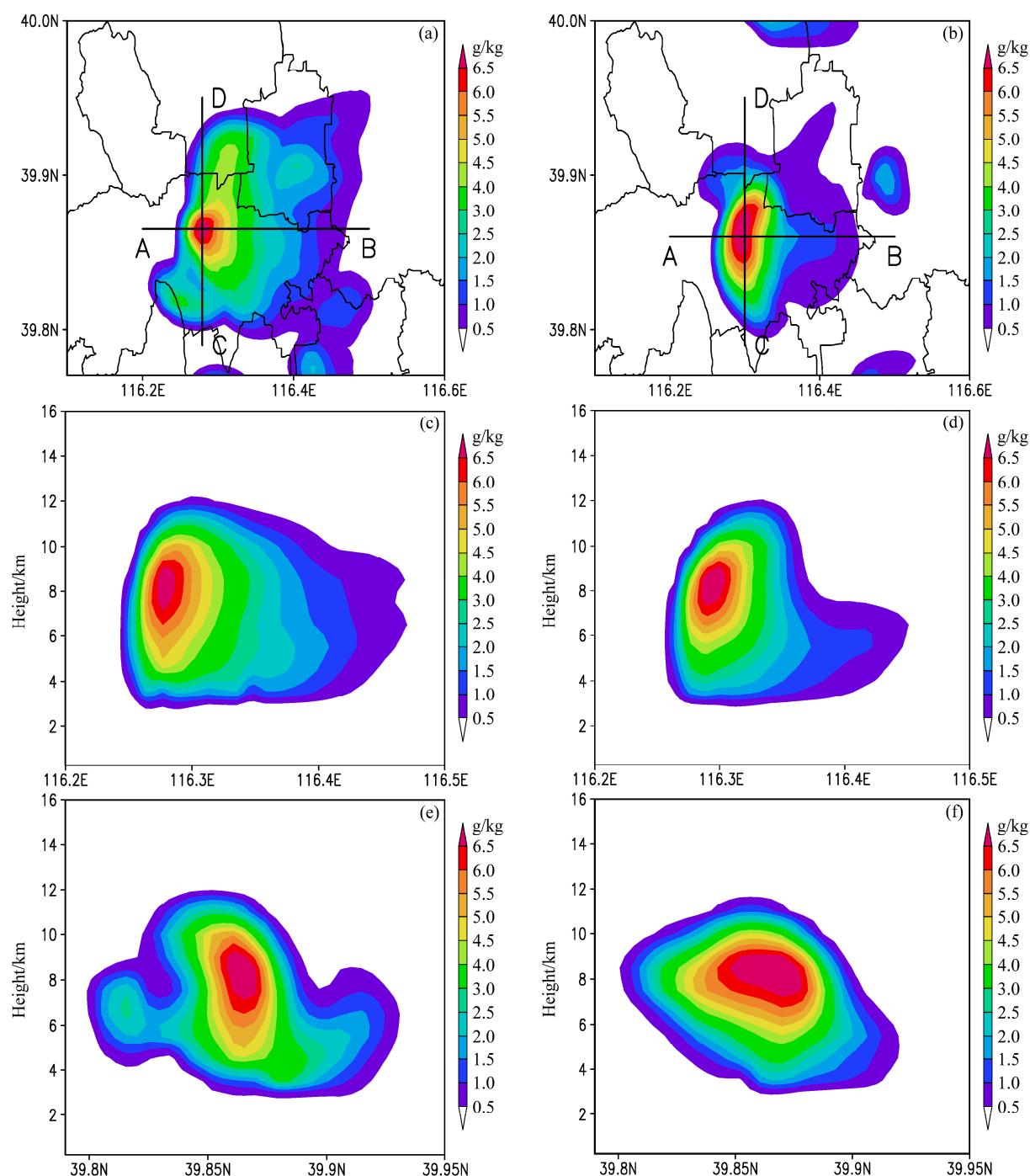


图 7 14:20 (a、b) 最大雹混合比分布以及最大雹混合比沿 (c、d) AB、(e、f) CD 线的垂直剖面: (a、c、e) Case 1; (b、d、f) Case 2

Fig. 7 (a, b) Distributions of maximum hail mixing ratio at 1420 LST; vertical cross sections of hail mixing ratio at 1420 LST along the lines (c, d) AB and (e, f) CD: (a, c, e) Case 1; (b, d, f) Case 2

15:00, 下文将重点关注这个时间段地表感热通量和潜热通量的变化情况。

地表感热通量是由湍流运动从地表向大气输送的热量通量 (Priestley and Taylor, 1972), 城市中大量的水泥混凝土建筑的热容较小, 而农田地区土壤植被的热容比较大, 在相同的天气状况下, 接

受等量的短波辐射, 城市地表温度更容易上升, 地表与近地层大气之间温差增大, 在能量平衡调节作用下, 地表感热通量增多。从图 9c 可以看出, 将城市下垫面换成农田以后, 地表感热通量减少, 尤其是在雹云经过城市上空时间段内, Case 1 和 Case 2 感热通量有明显的差别, 最大差值可达 90 W/m^2 。

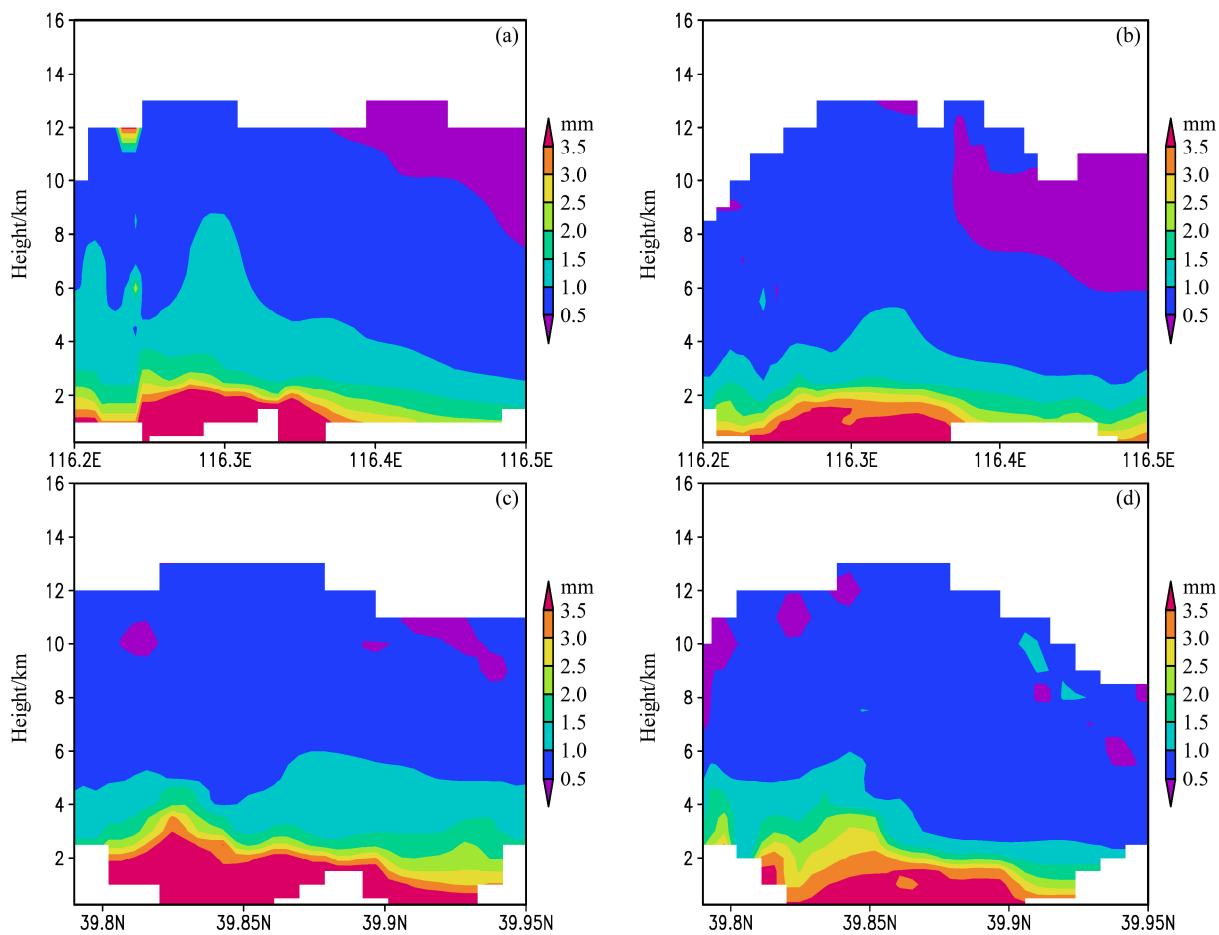


图 8 14:20 霰云中霰/雹粒子平均直径沿 (a, b) AB、(c, d) CD 线的垂直剖面: (a, c) Case 1; (b, d) Case 2

Fig. 8 Vertical cross sections of graupel/hail mean diameter in the hail cloud at 1420 LST along the lines (a, b) AB and (c, d) CD: (a, c) Case 1; (b, d) Case 2

地表潜热通量是因地表水汽相变向大气输送的热量通量, 反映了地表与大气的水汽交换状况 (吕美仲等, 2004)。相对于农田地区, 城市地区不透水地表增加, 进而使得局地蒸发减弱, 地表向大气输送水分减少。从图 9d 可以看出, 将城市下垫面换成农田以后, 潜热通量显著增加, 这是农田下垫面地表蒸发增强、大气水分供应增多的直接结果。在雹云经过城市上空时, Case 1 和 Case 2 中潜热通量差异在 $-100 \sim -50 \text{ W/m}^2$ 左右, 而感热通量差异在 $40 \sim 90 \text{ W/m}^2$, 这说明在雹云发展过程中, 与农田下垫面相比较, 城市下垫面使得地表潜热通量减少, 感热通量增加, 而且感热通量的增加量小于潜热通量的减少量。

综上所述, 将北京城区下垫面换成农田以后, 局地蒸发增强, 使得近地面层水汽含量增加, 当雹云经过此区域时, 若雹云获得充足水汽供应, 会造成雹云中雹含量增加。然而, 与农田下垫面相比较, 城市下垫面在接受同样的短波辐射情况下, 感热通

量会显著增加, 近地面层大气不稳定能量增加, “城市热岛”效应使得城区对流层低层垂直速度增强, 边界层对流活动增强。当雹云经过城区时, 霰云发展加强, 因此雹云中冰雹粒子在云中停留时间增长, 有利于大冰雹形成。

6 结论与讨论

本文利用中尺度数值模式模拟研究了 2005 年 5 月 31 日发生在北京的一次冰雹天气过程, 并针对城市和农田两种不同下垫面条件进行了数值模拟对比试验, 分析了城市和农田下垫面对雹云形成发展的影响, 着重探讨了城市下垫面对雹云发展演变的影响机制。主要结论如下:

(1) WRF 模式模拟的雹云移动路径、冰雹落区和演变特征与观测具有较好的一致性。

(2) 城市和农田下垫面对雹云移动路径和最大回波的影响较小。但城市下垫面导致雹云垂直上升

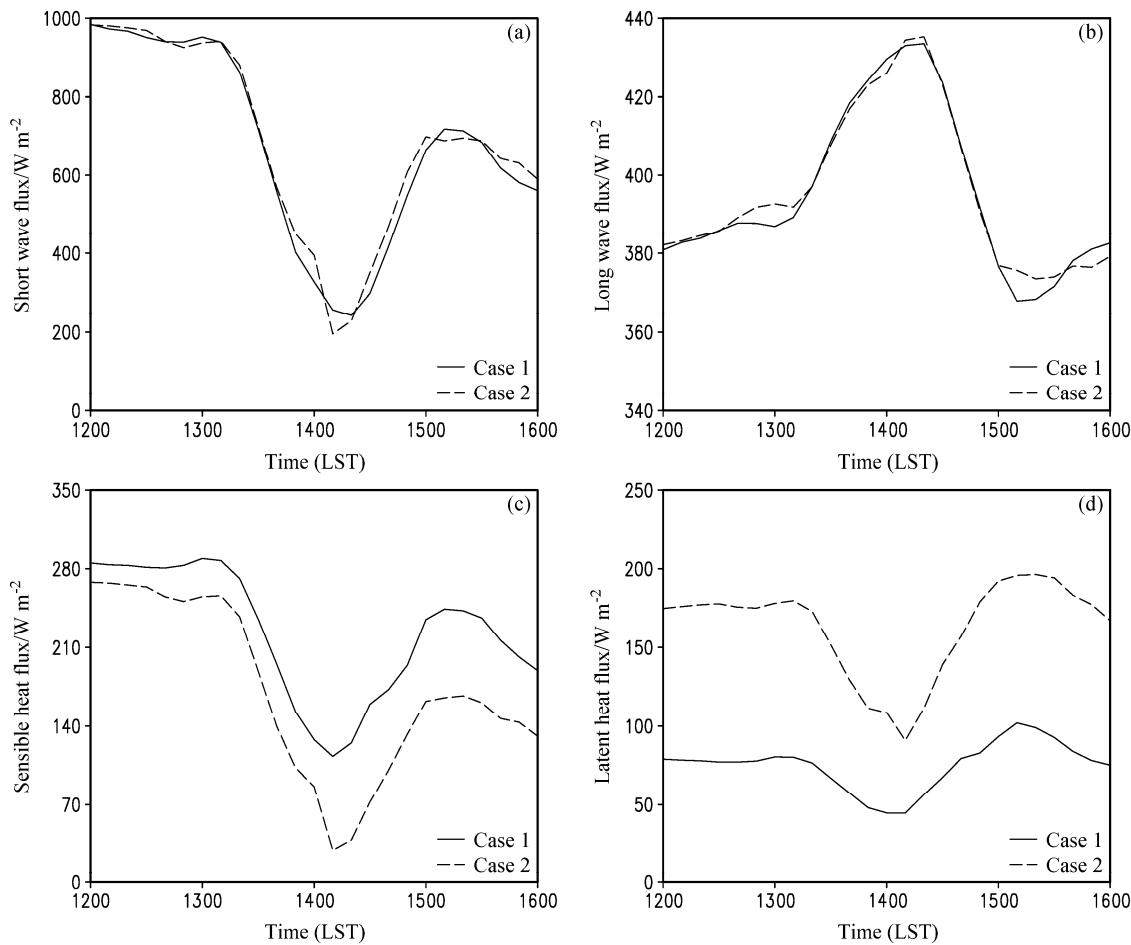


图 9 Case 1 和 Case 2 区域平均 (a) 向下短波辐射通量、(b) 向下长波通量、(c) 地表感热通量以及 (d) 地表潜热通量

Fig. 9 The times series of the area averaged (a) downward short wave flux, (b) downward long wave flux, (c) surface sensible flux, and (d) surface latent heat flux for Case 1 and Case 2

气流增强，冰雹直径变大，地面降雹量增加。农田下垫面有利于大量小冰雹的形成，云中冰雹含量增加，但降雹强度较弱，地面累积降雹量小。

(3) 相对于城市下垫面，农田下垫面局地蒸发更强，增加了雹云发展的水汽来源，这也是雹含量增加的原因之一。

(4) 雹云经过城区时，由于感热通量显著增加以及“城市热岛”效应的作用，雹云发展加强，有利于大冰雹形成。因此，城市比农田更容易出现大冰雹。

参考文献 (References)

段英, 刘静波. 1998. 超级单体单体多单体雹云及其成雹特点的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 56 (5): 529–539. Duan Ying, Liu Jingbo. 1998. Numerical simulation about the hailstone growing processes in super cell, multi cell, and single cell hailstorm[J]. Acta Meteorologica Sinica (in

Chinese), 56 (5): 529–539.

付丹红, 郭学良, 肖稳安, 等. 2003. 北京一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 26 (2): 190–200. Fu Danhong, Guo Xueliang, Xiao Wenan, et al. 2003. Numerical study on the formation a severe storm accompanied with gale and heavy rain in Beijing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (2): 190–200.

García-Ortega E, Fita L, Romero R, et al. 2007. Numerical simulation and sensitivity study of a severe hailstorm in Northeast Spain [J]. Atmospheric Research, 83: 225–241.

郭学良. 1997. 三维强对流云的冰雹形成机制及降雹过程的冰雹分档数值模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 6–25. Guo Xueliang. 1997. The studies on three-dimensional hail category numerical simulations of hail formation and hailfall processes [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 6–25.

郭学良, 黄美元, 洪延超, 等. 2001. 三维冰雹分档强对流云数值模式研究. I: 模式建立及冰雹的循环增长机制 [J]. 大气科学, 25 (5): 707–720. Guo Xueliang, Huang Meiyuan, Hong Yanchao, et al. 2001. A study of three-dimensional hail-category hailstorm model part I: Model

- description and the mechanism of hail recirculation growth [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (5): 707–720.
- 郭学良, 付丹红. 2003. 北京一次典型灾害性雹暴、大风的形成过程与云物理特征 [J]. 科学通报, 40 (S2): 65–69. Guo Xueliang, Fu Danhong. 2003. The formation and microphysical characteristics of a hazardous microburst producing hails and heavy winds in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (S2): 65–69.
- 何观芳, 胡志晋. 1998. 不同云底温度雹云成雹机制及其引晶催化的数值研究 [J]. 气象学报, 56 (1): 31–45. He Guanfang, Hu Zhijin. 1998. Numerical study on ice seeding in hailstorms with various cloud base temperatures [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (1): 31–45.
- Heike N, Blahak U, Seifert A, et al. 2008. Simulations of a hailstorm and the impact of CCN using an advanced two-moment cloud microphysical scheme [J]. Atmospheric Research, 96 (2–3): 286–301.
- 洪延超. 1998. 三维冰雹云催化数值模式 [J]. 气象学报, 56 (6): 641–653. Hong Yanchao. 1998. A 3-D hail cloud numerical seeding model[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (6): 641–653.
- 洪延超. 1999. 冰雹形成机制和催化防雹机制研究 [J]. 气象学报, 57 (1): 30–44. Hong Yanchao. 1999. Study on mechanism of hail formation and hail suppression with seeding [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (1): 30–44.
- 洪延超, 肖辉, 李宏宇, 等. 2002. 冰雹云中微物理过程研究 [J]. 大气科学, 26 (3): 421–432. Hong Yanchao, Xiao Hui, Li Hongyu, et al. 2002. Studies on microphysical processes in hail cloud [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 421–432.
- 黄美元, 徐华英. 1999. 云和降水物理 [M]. 北京: 科学出版社, 291pp. Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1999. Physics of cloud and precipitation [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 291pp.
- 胡朝霞, 齐彦斌, 郭学良, 等. 2007. 青藏高原东部冰雹形成机理的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 73–84. Hu Zhaoxia, Qi Yanbin, Guo Xueliang, et al. 2007. Numerical simulation of hail formation mechanism in east of the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 73–84.
- 胡志晋, 何观芳. 1987. 积雨云微物理过程的数值模式 (一) 微物理模式 [J]. 气象学报, 45 (4): 467–484. Hu Zhijin, He Guanfang. 1987. Numerical simulation of microphysical processes in cumulonimbus clouds (1): Microphysical model [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 45 (4): 467–484.
- 康凤琴, 张强, 渠永兴, 等. 2004. 青藏高原东北侧冰雹物理过程模拟研究 [J]. 高原气象, 23 (6): 735–742. Kang Fengqin, Zhang Qiang, Qu Yongxing, et al. 2004. Simulating study on hail microphysical process on the northeastern side of Qinghai–Xizang Plateau and its neighborhood [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (6): 735–742.
- Kachurin L G. 1974. A numerical model of a hailstorm, 9th Inter Conf. On cloud phycics. 545–548
- Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A, et al. 2011. The role of CCN in precipitation and hail in a mid-latitude storm as seen in simulations using a spectral (bin) microphysics model in a 2D dynamic frame [J]. Atmospheric Research, 99 (1): 129–146.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1990. 对流云中冰相过程的三维数值模拟. I: 模式建立及冷云参数化 [J]. 大气科学, 14 (4): 441–453. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1990. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds, part I: Model establishment and ice phase parameterization [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (4): 441–453.
- 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 1991. 对流云中冰相过程的三维数值模拟. II: 繁生过程作用 [J]. 大气科学, 15 (6): 78–88. Kong Fanyou, Huang Meiyuan, Xu Huaying. 1991. Three-dimensional numerical simulation of ice phase microphysics in cumulus clouds, Part II: Effects of multiplication processes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (6): 78–88.
- 李兴宇, 洪延超. 2005. 三维冰雹云数值催化模式改进与个例模拟研究 [J]. 气象学报, 63 (6): 874–888. Li Xingyu, Hong Yanchao. 2005. The improvement of 3D hail cloud model and case simulation[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 874–888.
- 刘术艳, 肖辉, 杜秉玉, 等. 2004. 北京一次强单体雹暴的三维数值模拟 [J]. 大气科学, 28 (3): 455–470. Liu Shuyan, Xiao Hui, Du Bingyu, et al. 2004. Three-dimensional numerical simulation of a strong convective storm in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (3): 455–470.
- 吕美仲, 侯志明, 周毅. 2004. 动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 419pp. Lü Meizhong, Hou Zhiming, Zhou Yi. 2004. Dynamic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: Meteorological Press, 419pp.
- 毛玉华, 胡志晋. 1993. 强对流云人工增雨和防雹原理的二维数值研究 [J]. 气象学报, 51 (2): 184–194. Mao Yuhua, Hu Zhijin. 1993. The 2-D numerical study of rain-enhancement and hail-suppression principles on convective clouds[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 51 (2): 184–194.
- Milbrandt J. A. and Yau M. K. 2006. A multi moment bulk microphysics parameterization. Part III: Control simulation of a hailstorm [J]. J. Atmos. Sci., 63:3114–3136.
- Nathan S, Xue M. 2008. Effects of microphysical drop size distribution on tornadogenesis in supercell thunderstorms [J]. Geophys. Res. Lett., 35: L24803, doi: 10.1029/2008GL035866.
- Niyogi D, Pyle P C, Lei M, et al. 2011. Urban modification of thunderstorms—an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50: 1129–1144.
- Orville H D, Kopp F J. 1977. Numerical simulation of the life history of a hail storm [J]. J. Atmos. Sci., 34 (10): 1596–1618.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. Mon. Wea. Rev., 100 (2): 81–92.
- Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note TN-475+STR.
- 孙继松, 石增云, 王令. 2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 76–84. Sun Jinsong, Shi Zengyun, Wang Ling. 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 76–84.
- Takahashi T. 1976. Hail in an axsymmetric cloud model [J]. J. Atmos. Sci., 33 (8): 1579–1601.
- Van den Heever S C, Carrión G G, Cotton W R, et al. 2006. Impacts of nucleating aerosol on Florida storms. Part I : Mesoscale simulations [J].

- J. Atmos. Sci., 63: 1752–1775.
- 汪光焘, 王晓云, 苗世光, 等. 2005. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用 [J]. 中国科学 (D辑), 35 (增刊 I): 145–155.
- Wang Guangtao, Wang Xiaoyun, Miao Shiguang, et al. 2005. Research and application on the technology system of multi scale assessment of the impact on the atmospheric environment by urban planning [J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences* (in Chinese), 35 (Suppl. I): 145–155.
- 王华, 孙继松, 李津. 2007. 2005年北京城区两次强冰雹天气的对比分析 [J]. 气象, 33 (2): 49–56. Wang Hua, Sun Jisong, Li Jin. 2007. A comparative analysis on two severe hail events in Beijing urban district in 2005 [J]. *Meteorology Monthly* (in Chinese), 33 (2): 49–56.
- 王华, 孙继松. 2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用 [J]. 气象, 34 (2): 16–21. Wang Hua, Sun Jinsong. 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area [J]. *Meteorology Monthly* (in Chinese), 34 (2): 16–21.
- 王思微, 许焕斌. 1989. 不同流型雹云中大雹增长运行轨迹的数值模拟 [J]. 气象科学研究院院刊, 4 (2): 171–176. Wang Siwei, Xu Huanbin. 1989. The simulation of travel-growth trajectories of large hailstones for various airflow patterns of hailstorms [J]. *Bulletin of the Academy of Meteorological Sciences* (in Chinese), 4 (2): 171–176.
- 王秀明, 钟青, 韩慎友. 2009. 一次冰雹天气强对流(雹)云演变及超级单体三维结构的个例模拟研究 [J]. 高原气象, 28 (2): 352–365. Wang Xiuming, Zhong Qing, Han Shenyou. 2009. A numerical case study on the evolution of hail cloud and the three-dimensional structure of supercell [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (2): 352–365.
- 王在文, 郑永光, 刘还珠, 等. 2010. 蒙古冷涡影响下的北京降雹天气特征分析 [J]. 高原气象, 29 (3): 763–777. Wang Zaiwen, Zheng Yongguang, Liu Huaijun, et al. 2010. Analyses on weather characters of hail events in Beijing with Mongolia cold vortex [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 29 (3): 763–777.
- Wisner C H, Orville D, Myers C. 1972. A numerical model of a hailbearing cloud [J]. *J. Atmos. Sci.*, 29 (6): 1160–1181.
- 许焕斌, 王思微. 1985. 一维时变冰雹云模式研究 (一) —— 反映雨和冰雹谱的双参数演变 [J]. 气象学报, 43 (1): 13–24. Xu Huanbin, Wang Siwei. 1985. A numerical model of hail-bearing convective cloud (1): Double parameters evolution of size distribution of raindrops, frozen raindrop hailstones [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 43 (1): 13–24.
- 许焕斌, 王思微. 1988. 二维冰雹云数值模式 [J]. 气象学报, 46 (2): 227–236. Xu Huanbin, Wang Siwei. 1988. Two-dimension hail cloud model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 46 (2): 227–236.
- 许焕斌, 段英. 2001. 冰雹形成机制的研究并论人工雹胚与自然雹胚的“利益竞争”防雹假说 [J]. 大气科学, 25 (2): 277–288. Xu Huanbin, Duan Ying. 2001. The mechanism of hailstone's formation and the hail-suppression hypothesis: “Beneficial competition” [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 25 (2): 277–288.
- 许焕斌, 段英. 2002. 强对流(冰雹)云中水凝物的积累和云水的消耗 [J]. 气象学报, 60 (5): 575–584. Xu Huanbin, Duan Ying. 2002. The accumulation of hydrometeor and depletion of cloud water in strongly convective cloud (hailstorm) [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (5): 575–584.
- 徐家骝. 1985. 经验性三维云模式中冰雹生长的数值试验研究 [J]. 气象学报, 43 (4): 469–478. Xu Jialiu. 1985. A numerical experiment on the hail growth in a geven three-dimensional cloud model [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 43 (4): 469–478.
- Yau M K, Macpherson S. 1984. Numerical simulation of an Alberta hailstorm [C]. 9th Inter Conf. On cloud phycics. 585–588.
- 周毓荃, 陈宝君, 肖辉, 等. 2003. 撒播碘化银实施雹云催化的数值试验——一个例研究 [J]. 大气科学, 27 (1): 8–22. Zhou Yuquan, Chen Baojun, Xiao Hui, et al. 2003. A case study of hail suppression by AgI seeding using 3D hailstorm model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (1): 8–22.