

山东一次连续性降雪过程云微物理 参数数值模拟研究

迟竹萍 龚佃利

(山东省气象科学研究所, 济南 250031)

提 要: 利用 PSU/NCAR MM5V35 非静力数值模式对 2005 年 2 月 14—16 日山东连续性降雪过程进行了数值预报, 模拟的降雪开始时间、发展演变及持续时间与观测较一致。在成功模拟的基础上, 用模式输出预报资料, 特别是采用 Reisner 混合冰相过程计算的云水、雨水、冰晶、雪晶等比含水量数值, 对降雪过程的水汽输送、不同发展阶段微物理参数的演变特征进行了分析。结果表明, 来自南海的西南急流和低层的东南风水汽输送, 850hPa 中尺度切变线的维持和低涡的发生、发展, 为暴雪的产生提供了宏观条件; 模拟的运动场和微物理场的时空演变表明, 垂直运动是水汽凝结、冻结和冰粒子碰并和“蒸-凝增长”的运动学条件。

关键词: 降雪过程 数值模拟 水汽条件 冰相过程

A Numerical Simulation of Cloud Microphysics Parameters for Sustaining Snowfall in Shandong Province

Chi Zhuping Gong Dianli

(Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031)

Abstract: To better understanding of the sustaining snowfall occurred in Shandong on 14—16 February 2005, the PSU/NCAR MM5 model is used to replicate the process. The simulation results show that the start, evolvement and duration the event agree well with the observation although some shortage exist. On the basis of success simulation, the conditions of vapor and evolvement of cloud microphysics parameter in the process are analyzed with the

资助项目: 山东省气象局 2004 年重点课题“人工增雨飞机空中积冰预报方法研究与应用”资助

收稿日期: 2005 年 10 月 13 日; 修定稿日期: 2006 年 3 月 28 日

model output data, especially the quality content of ice (Q_i), graupel (Q_g), snow (Q_s), cloud water (Q_c) and rain water (Q_r) calculated with Reisner graupel scheme. The results show that the sustaining snowfall is based on the vapor supply from SW and SE winds, the development and evolution of the shear-line and intermediate cyclone on 850hPa. The simulated velocity and cloud microphysics fields show that vertical motion is dynamics factor causing the vapor condensation and freezing, and ice particle increase. The opportunity of artificial seeding in different condition is also discussed.

Key Words: snowfall numerical simulation vapor condition ice-phase

引言

自然降水是在一定宏观天气条件下,通过云元素的形成和增长产生的。大量试验研究表明^[1,2],在适当的天气条件下,在适当时机、云的适当部位、采用人工催化等技术,可达到增加局地降水的目的。

随着中尺度数值天气预报的发展,人们越来越深切地认识到云物理过程及其与大尺度天气系统相互作用的重要性。PSU/NCAR MM5 中尺度数值模式具有非静力平衡动力框架,考虑了较为完善的多种物理过程,能够预报从单一的积云尺度到天气尺度的天气过程,为研究降水云系微物理结构和降水机制提供了途径。刘奇俊等^[3]分析了显示云降水方案和物理初始化方法研究的最新动态;孙晶等^[4]利用 MM5 模式 Reisner 霰方案对华南暴雨进行了数值模拟;孙建华等^[5]探讨了 MM5 模式暖云过程和 Reisner 混合冰相过程对华北地区“12.7”降雪过程模拟结果的影响,认为冰相云物理过程对成功模拟降雪是不可忽视的。下面以 2005 年 2 月 14—16 日山东冬季连续性降雪过程为例,分析 Reisner 霰方案预报云水、雨水、冰晶比含量等微物理量的演变及其与宏观物理量场的关系,并对人工增雪作业条件进行分析,以期弥补实际探测微观资料的缺乏,为增雪作业实际播云方案的制定提供科学依

据。

1 过程概况

2005 年 2 月 14—16 日,山东受冬季较为罕见的江淮气旋影响,出现连续性大范围雨夹雪转中到大雪,部分地区为雨夹雪转大到暴雪过程,全省平均降水量为 14.2mm。降雪主要发生在 14 日 02 时(北京时,下同)—16 日 08 时,强降雪时段出现在 15 日 08—20 时,降雪中心位于鲁东南、鲁中一带(图 1a),青州站过程降雪量最大,为 34.3mm,其次日照为 30.0mm。

1.1 大尺度环流特征

亚洲中高纬度地区盛行纬向西风环流,巴尔喀什湖低涡不断分离小槽沿中纬度偏西气流东移;同时高原东侧南支槽前西南气流北上到达江淮地区,南支槽在东移过程中速度减慢并发展加深;在 14 日 08 时 500hPa 的形势图上(图略),南支槽与巴尔喀什湖低涡分离南压的冷空气交汇于 95~100°E 附近,槽前西南气流加强,形成大于 24 $m \cdot s^{-1}$ 从孟加拉湾、南海到山东南部的西南急流;15 日 08 时,南支槽前的西南气流发展到最强,鲁东南处于急流轴的顶端。在 13 日 08 时地面形势图上(图略),贝加尔湖东部大陆变性高压经华北入海,并入西太平洋高压,使海上高压北抬并与高原东侧宽

广的低压倒槽之间出现东升西降的变压梯度, 引导西南暖湿气流北上, 西南倒槽发展; 到15日08时, 在南支锋区上形成波动类江淮气旋, 以后气旋向北偏东方向移动, 山东位于气旋的东北端; 东南风和东北风的辐合加强了气旋北端的动力抬升作用, 促进暴雪的形成和发展。16日02时, 气旋东移到130°E附近, 山东除半岛、鲁西北仍有弱降水外, 其它地区降水已结束。

1.2 中尺度系统

2005年2月14日08时—15日08时850hPa形势图上(图略), 一直维持着一条由四川到山东省南部边缘的切变线。切变线的辐合场有利于水汽集中和能量积累, 产生上升运动和正涡度, 是与此次连续性降雪过程直接相关的中尺度系统。在切变线上, 西南涡向东北方向移动并不断加强, 15日08时低涡中心位于鲁西南地区, 风速超过 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空西南急流输送的孟加拉湾水汽和来自黄海的水汽在山东南部聚集, 为暴雪的形成和发展提供了有利的水汽条件和动力作用。

2 数值预报方案

采用2层嵌套网格(54km、18km), 以T213数值预报资料为模式背景场, 同时在模式运行前12h同化最新高空、地面观测资料, 形成模式的初值; 采用时变侧边界、MRF行星边界层参数化方案(Hong-Pan, 1996)和云辐射处理方案; 采用NCAR的 $10'$ 、 $5'$ 地形及25类植被资料形成模式所需的地形和下垫面数据; 垂直方向 σ 坐标分27层, 模式层顶取100hPa。考虑山东冬季降雪过程主要为混合云降水, 冰相云微物理过程对暴雪的形成起着十分重要的作用, 2

层网格均考虑了霰和冰相过程, 选用Reisner霰方案; 另外, 第一层网格选用Betts-Miller方案(1993), 第二层网格选用Grell方案(1993), 以反映次网格尺度的对流过程。SST利用NOAA周平均资料。模拟时间60h。

Reisner霰方案^[6]预报量有水汽(Q_v)、云水(Q_c)、雨水(Q_r)、冰晶(Q_i)、雪(Q_s)、霰(Q_g)比含量和冰晶数浓度(N_i); 零度层以上的云水和雨水为过冷却水, 是人工增雨(雪)作业决策关注的重要因素; 该方案比较完整地考虑了各种云微物理量的转化关系, 其预报结果较好地反映了云降水的微物理特征。

3 模拟结果分析

3.1 模拟降水与实况比较

图1为2005年2月14日02时—16日08时过程实况降雪量与模式预报降雪量(18km格点)分布。可见, 模拟降雪量由鲁东南向鲁西北递减, 强度也与观测相似, 只是位于鲁中的降雪中心没有模拟出来。

图2为2005年2月14日02时实况6h降雪量和模式预报6h降雪量分布。模拟预报14日02时首先在鲁西南出现降雪, 与实况一致且降水量级相同; 14日降雪较弱, 强降雪发生在15日白天, 以后逐渐减弱, 到16日08时以后停止(图略)。模拟降雪持续时间和演变特征与实况基本一致。在此基础上, 下面对这次降雪过程的中尺度系统、水汽来源及微物理过程进行分析。

3.2 暴雪中尺度系统的发生、发展及湿舌的生成演变

从天气分析可以看出, 此次连续暴雪过程与水汽聚集和中尺度辐合线的发生演变密

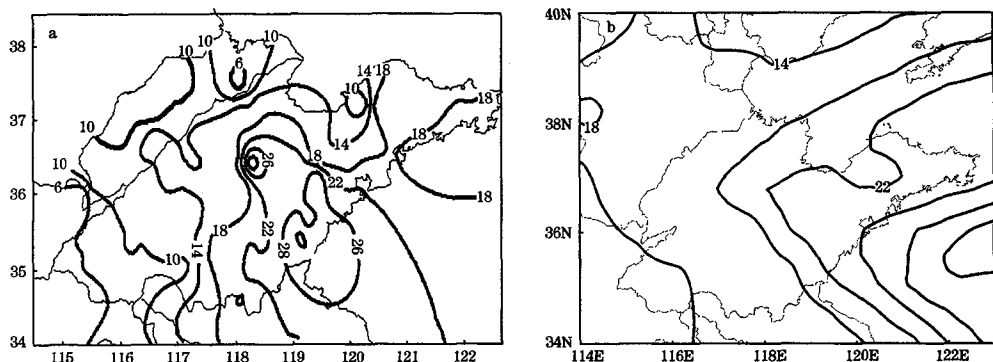


图1 2005年2月13日20:00—16日06:00过程实况雨量(a)与模式预报雨量(b)分布(单位:mm)

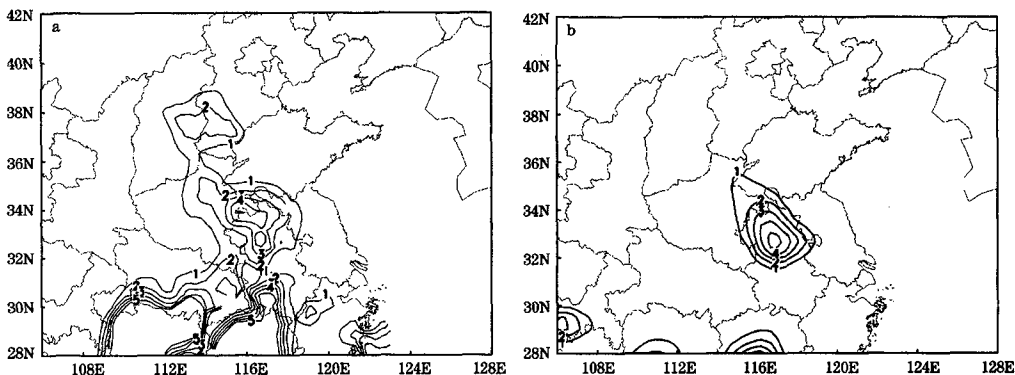


图2 2005年2月14日02:00实况6h雨量(a)与模式预报6h雨量(b)分布(单位:mm)

切相关,表现在数值模拟的500和850hPa流场和假相当位温(θ_e)上更为清楚。由流场图(图3)可见,风随高度顺转的暖平流结构,山东降雪区有两股水汽来源,一股来自孟加拉湾、南海,是主要的水汽来源,在这条路径上,对流层中低层的850~500hPa之间存在风速超过 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南风急流,山东中南部地区处于急流的左前侧,是主要暴雪中心所在;另一股来自黄海,由850hPa以下的东南风输送,是较次要的水汽来源。在850hPa流场和 θ_e 图上,13日20时至山东降雪初期,随着来自孟加拉湾、南海的暖湿空气不断向北输送, θ_e 暖湿舌由江西逐渐向北推进并加强,至14日14时290K宽广湿舌顶部(图3c)位于山东中部

地区,西南气流和东南气流在山东和江苏交界处汇合,造成山东南部地区对流层低层的水汽通量散度的辐合和上升运动(图略),使得山东南部地区的降雪有所加强;但此时中层500hPa湿舌仍位于长江以南,山东的降水仍偏弱。随着时间的推移,到15日14时在 35°N 、 118°E 附近形成明显的低涡中心(图3d),相继出现暴雪的鲁中北部、鲁东南和半岛南部处于气旋东北部东南气流曲率最大的地方;中低层湿度进一步加大,500hPa中高纬度有明显的 θ_e 暖湿舌形成,850hPa θ_e 线变密,其密集带与强暴雪带对应;16日02时以后,随着地面气旋的东移入海,湿舌移出山东, θ_e 线变疏,到模拟结束,山东受低涡后部东北气流控制,全省降

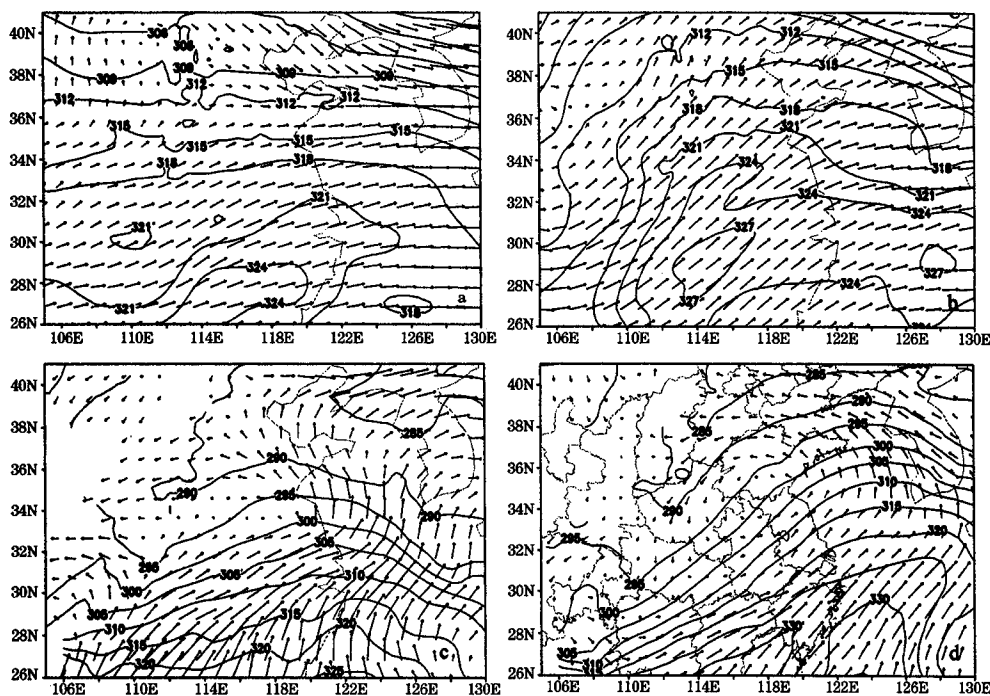


图3 2005年2月14日14时(a、c)和15日14时(b、d)流场和 θ_{se} 场

(a)、(b)为500hPa流场和 θ_{se} 场; (c)、(d)为850hPa流场和 θ_{se} 场

水基本结束。

4 微物理过程的演变

4.1 冰水共存云中的“蒸—凝过程”

冬季, 冰相云物理过程对降雪的形成非常重要。冰相的形成涉及云水、雨水和云冰之间复杂的冰相物理过程。冰晶的凝华增长、碰并过冷水滴的结凇增长、相互之间碰并形成雪晶的碰连增长是冷云形成降水的主要机制。云中有冰(雪)晶和过冷水滴同时并存, 由于冰粒子的饱和水汽压小于水滴的饱和水汽压, 致使水滴蒸发并向冰晶、雪晶上凝华, 通过冰—水转化促使云滴迅速增长而产生降水。冰水饱和水汽压差大于零($E - E_b > 0$)的区域认为是冰粒子增长区, 可选择为人工增雨、雪的作业区域。

由于此次降雪过程中, 暖湿舌是随着辐合中心由南向北移动并加强的, 因此对模拟结果沿 119°E 穿过暴雪中心(日照, 35.2°N 、 119.3°E)冰晶、雪晶比含水量、冰水饱和水汽压差和垂直速度的分布垂直剖面(沿 119°E 在 $35.2 \sim 38.0^\circ\text{N}$ 之间), 在这个经度带的整个模拟过程中, 冰晶、雪晶比含水量大值区与上升速度大值区相对应, 上升运动将水汽输送到高空凝结或冻结成冰晶, 冰晶主要形成于 -30°C 以上的高度, 中心值位于上升运动的顶部附近, 通过碰连、凝华长大下落对下层云降水起“播种”冰晶的作用; 含雪量最大层在对流层的中下层 $600 \sim 800\text{hPa}$, 温度 -5°C 附近, 且最大中心与上层冰晶的最大中心对应。

降水初期的14日02时(图4a), 山东这个经度带在中高层($400 \sim 600\text{hPa}$)有弱的上升区, 冰粒子增长区就出现在弱上升区

中,冰晶和雪晶分别出现在 300hPa 和 500hPa 附近,其比含水量分别为 $0.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;以后增长区下移,但直到地面气旋生成时的 15 日 08 时,山东上空 $E-E_b > 0$ 区域厚度都很薄,冰晶和雪晶的含量小,表明冰粒子的“蒸—凝”增长过程条件较差。15 日 08 时以后,伴随着地面江淮气旋的生成发展和向北移动,气旋东北部的东南气流向山东输送的水汽也随之增强,辐合上升运动加强,增长区增厚并向高层发展,到气旋中心北移到鲁南地区的 15

日 14 时,增长区已从地面伸展到 250hPa 附近(图 4c),水汽在上升气流的顶部迅速冷却凝结、冻结形成冰晶,同时因云中“蒸—凝过程”的增强,其冰晶和雪晶的比含水量迅速增大,暴雪中心日照高空的冰晶和雪晶含量分别达 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;随着气旋中心的东北移和 20 时以后的逐渐减弱,上升运动中心等也随之移动并减弱;到 15 日 23 时,日照上空的上升运动及增长区已迅速减小。

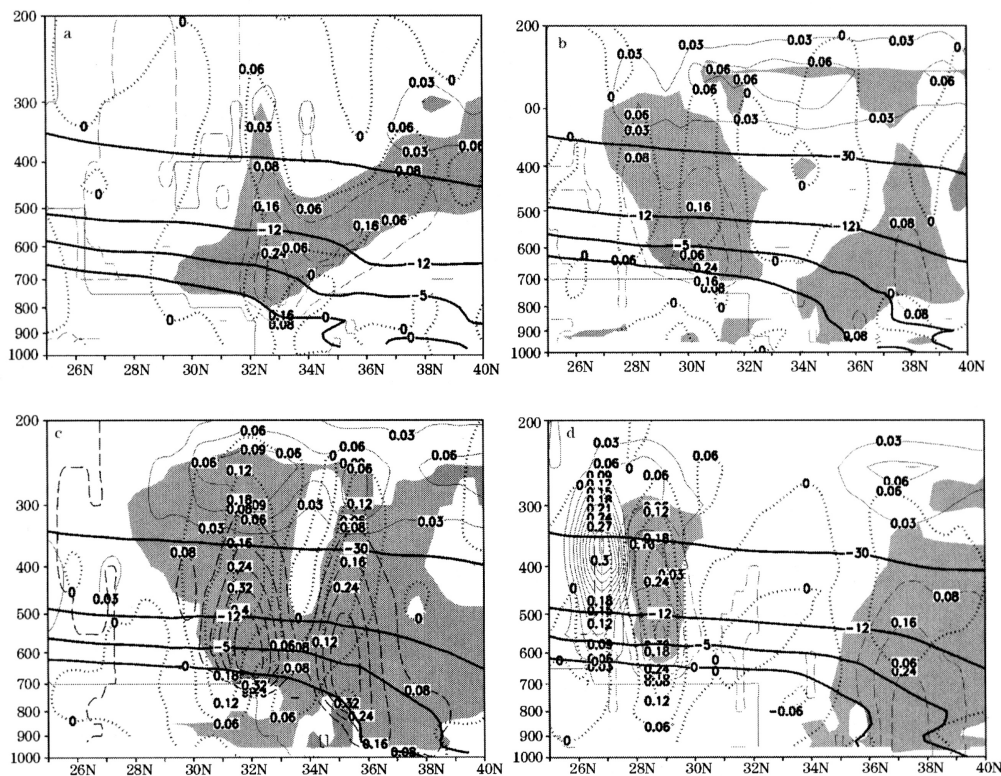


图 4 沿 119°E 穿过暴雪区垂直速度和微物理参数的分布剖面

(a) 14 日 02 时 (b) 15 日 08 时 (c) 15 日 14 时 (d) 15 日 23 时

实线: 冰晶比含水量, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 长虚线: 雪晶比含水量, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 阴影区: $E-E_b > 0$;

粗实线: 0°C 、 -5°C 、 -12°C 、 -30°C ; 点虚线: 垂直速度, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

等值线间隔: 冰晶 $0.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 雪晶 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 速度 $0.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

4.2 冰粒子结冻增长条件的演变

饱和区 ($T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$) 的存在, 是冰晶、雪晶淞附增长所需的环境场条件; 当云层发展较厚, 云中过冷却水含量较大, 冰晶、雪晶的淞附增长在冷云降水中将起着重要的作用, 可造成较强的降水。

图 5 是对模拟结果沿 119°E 穿过暴雪中心 (日照, 35.2°N 、 119.3°E) 的垂直速度、饱和区、过冷却水 (云水+雨水) 比含量和雪晶比含量的分布垂直剖面, 在这个经度带的整个模拟过程中, 可看出饱和层由南

向北的移动发展。山东上空云中一直有过冷却水存在, 中心值主要位于 $0^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ 高度之间, 仅在气旋中心控制日照的 15 日 17 时 (图略), 过冷却水比含量为 $0.1\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线伸达 -15°C 。饱和区基本与云中上升速度区相对应, 最早出现在 $600 \sim 400\text{hPa}$ 之间 (图 5a), 随着降水的持续, 饱和层下移, 至地面气旋生成前的 15 日 05 时, 日照上空云中的过冷水含量开始增大, 其值达 $0.15\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 饱和区增厚并伸展到 500hPa , 云中雪晶的淞附增长过程得以增强。伴随着地面江淮气旋的生成北移, 沿

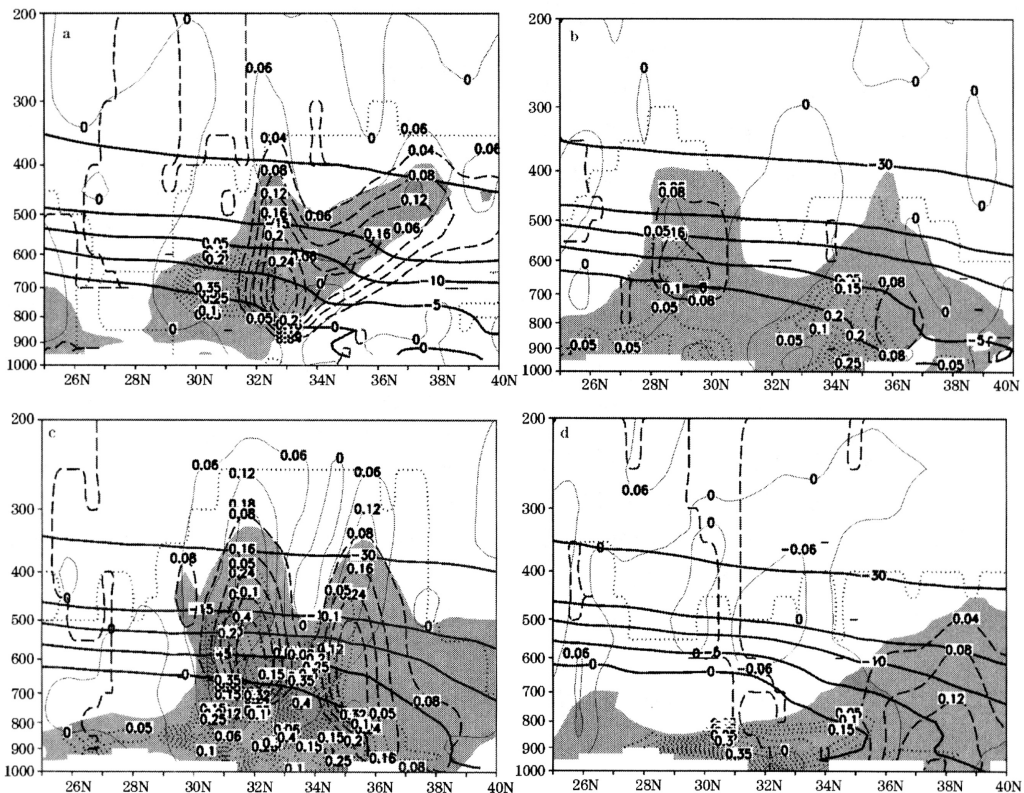


图 5 沿 119°E 穿过暴雪中心垂直速度、饱和区、冰 (雪) 晶的剖面分布图

(a) 14 日 02 时 (b) 15 日 05 时 (c) 15 日 14 时 (d) 16 日 05 时

细实线: 垂直速度 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 $0.06\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 粗实线: 0°C 、 -5°C 、 -10°C 、 -15°C 、 -30°C ;
点虚线: 液水 (云水+雨水) 比含量, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 等值线间隔 $0.05\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 阴影区: $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$ 区
长虚线: 雪晶比含量, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 等值线间隔 (a、b、c) $0.04\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、(d) $0.08\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

119°E, 山东自南向北空中过冷水含量增多、饱和区增厚、含雪量增大。到 15 日 14 时, 饱和层顶部到达 450hPa, 过冷却水含量为 $0.05\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线伸达 -15°C (图 5c); 以后伴随着气旋中心的东北移和逐渐减弱, 到 16 日 05 时, 山东高空云中的过冷水含量已减少到 $0.05\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下, 饱和层顶部降低到 600hPa 以下。

综上所述, 山东沿 119°E 经度带的增雪作业可于气旋生成并发展北移的 15 日 08 时开始, 到 16 日 02 时山东处于气旋后部的东北气流时结束, 这段时间云中的上升运动较强、云中过冷水含量丰富、饱和区及冰粒子增长区深厚; 对“蒸—凝过程”而言, 最佳作业时间为气旋生成的 15 日 08 时到气旋中心控制鲁南前的 15 日 14 时, 此段时间增长区深厚但云中冰粒子含量较小, 人工向云中播撒催化剂可增强“蒸—凝过程”, 提高降水云降水效率。

5 结 论

(1) 天气分析结果表明, 连续降雪发生在东亚稳定的纬向环流形势下, 山东沿海高压加强, 引导西南暖湿气流北上, 不仅为连续性降雪提供了必要的水汽条件, 而且也为暴雪中尺度低涡的生成和斜压发展提供了极为有利的环境场, 正是在这种有利的大、中尺度系统的相互作用下, 产生这次连续性降雪过程。

(2) 中尺度有限区域模式 MM5 比较准

确地模拟了此次连续性降雪过程的起止时间、发展演变特征。山东暴雪区有两股水汽来源, 一股来自南海, 由西南气流输送, 是主要的水汽来源; 另一股来自黄海, 由 850hPa 以下的东南风输送, 是较次要的水汽来源。

(3) 模拟的运动场和云微物理场的时空演变表明, 垂直上升运动是水汽凝结、冻结和冰粒子增长的运动学条件; MM5 中尺度数值模式 Reisner 霰方案能够较好地模拟云系降水的微物理过程, 模式预报结果一定程度上展示了降水云微物理结构特征, 可为实际人影作业催化时机和部位的确定提供有价值的参考信息。

参考文献

- 1 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨 [J]. 应用气象学报, 2001, 12 (3): 11-13.
- 2 刘玉宝, 游来光. 北疆冬季降水的中尺度结构与人工增雨作业潜力和自然条件探讨 [J]. 应用气象学报, 1990, 1 (2): 114-121.
- 3 刘奇俊, 胡志晋. 中尺度模式湿物理过程和物理初始化方法. 气象科技, 2001, 2: 1-10.
- 4 孙晶, 王鹏云. 用 MM5 模式 Reisner 霰方案对华南暴雨的数值模拟 [J]. 气象, 2003, 29 (4): 35-38.
- 5 孙建华, 赵思维. 华北地区“12.7”降雪过程的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8 (4): 387-401.
- 6 Reisner J, Rasmussen R M, Bruintjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. Q. J. R. Meteor. Soc., 1998, 124: 1071-1107.