

石爱丽, 郑国光, 孙晶, 等. 2013. 河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的观测和数值模拟分析. 气象, 39(1): 67-73.

河南省一次秋季层状云降水增雨潜力的 观测和数值模拟分析^{* 1}

石爱丽¹ 郑国光^{1,2} 孙晶¹ 段靖¹

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局, 北京 100081

提 要: 利用常规天气资料、加密探空资料、地基微波辐射计资料和气象卫星资料, 结合数值模式 MM5V3 分析了 2002 年 10 月 19 日河南省层状云降水人工增雨潜力。资料分析表明, 这次降水过程的潜力区主要分布在 700~300 hPa 高度上, 07:00、13:00 和 16:00 时刻; 从数值模拟结果看, 增雨潜力的时空分布同探空分析大体上一致, 云系中含有比较丰富的过冷水, 冰晶粒子浓度不是很多, 这种水成物的配置存在引晶催化的增雨潜力, 有利于降水的形成。

关键词: 层状云, 增雨潜力, 数值模拟

中图分类号: P435

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.008

Observation and Simulation on Potential for Rainfall Enhancement of Autumn Stratiform Cloud in Henan Province

SHI Aili¹ ZHENG Guoguang^{1,2} SUN Jing¹ DUAN Jing¹

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: The characteristics of water vapor conditions of stratiform cloud and its potential for rainfall enhancement in the autumn 2002 in Henan Province have been investigated by means of data from meteorological observation, from upper-air soundings at 3 h intervals, and from Ground-Based Dual-Wavelength Microwave Radiometer (GBDWMR) system and meteorological satellite and combined with the results of MM5V3. It is shown from the analysis of those data that the main positions of potential are located at the 700–300 hPa level at 07:00, 13:00, 16:00 BT moment. As the result of model simulation, it is beneficial for the formation of rain in which the content of supercooled liquid water is abundant while the number concentration of ice crystal is little.

Key words: stratiform cloud, potential for rainfall enhancement, numerical simulation

引 言

大气中存在着较丰富的水汽是人工增雨的必要条件, 云系中的水汽状况及其出现的高度、强度和演变趋势是人工增雨的主要背景条件之一, 也是讨论

人工增雨潜力的重要参考因素。层状云系是一种大范围降水系统, 其主要特点是: 云中上升气流和云含水量较小, 降水持续时间较长, 其中上升气流速度在层状云降水的形成和发展过程中起主要作用。衡量混合相层状云人工增雨潜力的重要参数是云中的过冷水含量和冰晶浓度的大小, 较为丰富的过冷水含

* 中国气象科学研究院基本科研业务重点项目(2009Z003 和 2011Z005)、中国气象科学研究院基本科研业务项目(2011Y005)及公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206025)共同资助

2011 年 10 月 3 日收稿; 2012 年 9 月 7 日收修定稿

第一作者: 石爱丽, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究. Email: shial@cma.cma.gov.cn

量与较低冰晶浓度的云系具有较高的增雨潜力。自 20 世纪 50 年代末开始,我国利用飞机和高山云雾站收集有关云和降水微物理结构的资料,结合人工增雨潜力条件研究的需要,重点观测内容包括云中过冷水含量、冰晶浓度。胡志晋等(1983)用一维非定常参数化层状云模式计算得出,层状云人工增雨的水分来源不完全出自冰水转化,而可能来自水汽转化。层状云中降水是水汽不断供应转化的结果,不单纯决定于云中瞬间的液水含量。虽然云中过冷水含量大是人工催化的有利条件,但过冷水少的云仍有一些催化潜力。胡志晋(2001)、徐祥德等(2002)研究表明,人工播云催化后,水汽补充凝华增长加上过冷水冻结,合在一起释放的潜能,可使空气加热 0.1 K 的量级,导致云中上升气流速度增大 $0.01\sim 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的量级,促使催化云区内云和降水的进一步发展。李铁林等(2000)利用双通道微波辐射计遥测大气中水汽、液水并分析表明,一般气柱中的水汽累积含量远大于云中的过冷液水量。王以琳等(2002)用探空资料分析了缺少微物理观测资料时如何确定作业区的探空判据。陈进强等(2000)用天气资料、雷达、卫星资料分析了影响内蒙古的锋面云系降水过程。陈小敏等(2011)利用国家气象中心 GRAPES 人工增雨云系模式,选取 2008 年 7 月 4 日重庆地区一次降水过程进行数值模拟,分析了重庆地区降雨天气的水汽分布、云系宏微观分布、云中微物理转化和增雨潜力等特征。

本文根据 2002 年 10 月 19 日河南省出现的层状云降水天气观测资料,综合分析了该降水过程的天气形势、水汽饱和区、冰水转化区、降水前后云中水汽和液态水含量的变化特征,从水汽特征角度并结合数值模式对人工增雨潜力进行了初步分析,取得了一些很有意义的结果。

1 天气形势

影响这次降水过程的主要大气环流形势特征是:高空 500 hPa 低槽南压东移,伴随着 700 hPa 低涡与低槽、850 hPa 切变线和地面冷锋的共同作用(图略)。

2002 年 10 月 18 日 08:00,500 hPa 高空锋区位于 $38^{\circ}\sim 48^{\circ}\text{N}$ 之间,高原南部到河套地区上空有偏南气流发展。700 hPa 低涡移至安徽、江苏附近,强度不变;到 20:00,该低涡在东移过程中强度有所减

弱,移至江苏东部及黄海上空时,已无闭合环流中心,演变为低槽,并与位于 $123^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ 的北槽合并东移,此时,高原东南部又出现一低涡向东移动。地面冷锋位于丹东、济南到郑州一线,贝加尔湖附近有一冷高压不断南压,郑州始终处于高压底部,有利于降水生成。

在 19 日 08:00,500 hPa 高空锋区略有东移,槽线移至陕西西部。700 hPa 低涡移至四川上空,从云贵高原到郑州形成西南低空急流。850 hPa 图上,在达川、三门峡到邢台一线有一切变线,在其右端有源源不断地从东南沿海输送来的水汽,左端受西北冷空气的影响,在缓慢南压过程中形成了地面气旋波。地面图上,贝加尔湖东部经华北伸向长江以南地区为一冷高压,河南省处于高压底部的东北气流里,在河南省西北部地区出现了小到中雨。到 20 日 08:00,河套北部到郑州转为一致的西北气流,河南降水天气逐渐结束。

为了便于讨论,本文中,我们只重点讨论此次过程 19 日的降水特征。

2 大气水汽和可降水量

本文使用 QFW-1 型双通道微波辐射计(工作频率为 23.8 和 31.65 GHz),直接测量地面大气温度、湿度和气压以及两个通道的大气辐射亮度温度。选用不同的测量模式可输出大气积分水汽含量(V)、云中液态水含量(L),采用扫角模式可反演大气湿度廓线。国内外许多研究表明,地基微波辐射计是监测大气水汽场的最佳手段之一(雷恒池等,2001)。观测时间从 17 日 22:24 到 20 日 17:21,观测地点在距郑州偏北方向 80 km 处的新乡市。本文采用的资料观测时段为 10 月 19 日全天。微波辐射计接收到的来自大气和云的微波辐射总量一般可以用微波亮度温度 T_B 来表示,对大气积分水汽含量(V)和云中液态水含量(L)分别采用线性和非线性的统计模式计算得出。由图 1 可见,云中积分液态水含量和水汽总量的发展呈起伏并逐渐减少,总体变化趋势基本一致,其中出现 3 个极值。在 08:00,水汽总量和液水总量的数值逐渐累积到最大值,在 07:00、14:00 液水含量出现明显的跃增现象,累积到最大,随着降雨从发生到发展直至结束,两者的数值逐渐变小,液水总量从 1.5 mm 减少了到 0.7 mm。

杨景梅等(1996)给出了可降水量与地面水汽压

关系的经验表达式

$$W = a + b e, \quad (1)$$

式中, a 、 b 为经验系数, W 代表测站整层大气可降水量(单位: cm), e 代表地面水汽压(单位: hPa)。郑州站的可降水量与地面水汽压的经验关系为

$$W = 0.321 + 0.193e \quad (2)$$

根据式(2), 可以算出郑州站 10 月 19 日地面水汽压和整层大气可降水量的变化情况(如表 1)。

由表 1 可看出, 整层大气可降水量随地面水汽压变化而变化, 基本上呈线性关系。在这次降水过程中, 从降水的最初发生到后来的发展, 地面水汽压先增加后逐渐减少, 整层大气可降水量也经历了一个先累积增加、再逐渐消耗减少的过程, 整层大气可降水量呈递减趋势。用探空资料计算得到的水汽总量从 04:00—10:00 缓慢减小到 1.95 cm, 10:00 开始缓慢增长, 到 13:00 达到 1.98 cm, 对应的降水分布(见图 5), 13:00—15:00 降水量达到最高值 1.4 mm, 随后逐渐减小。与新乡站地基微波辐射计所反演的积分水汽含量相比(如图 1 所示), 用式(1)计算得到的整层大气可降水量要高 0.846 ~ 1.12 mm, 但变化的总体趋势是一致的。

表 1 2002 年 10 月 19 日郑州站地面水汽压(e)、水汽总量和整层大气可降水量(W)

Table 1 Surface pressure (e), water vapor and potential precipitation (W) at Zhengzhou Station on 19 October 2002

	04:00	07:00	10:00	13:00	16:00	20:00
e /hPa	9.8	9.7	9.2	9.3	9.2	8.8
水汽总量/cm	2.08	2.04	1.95	1.98	1.92	1.90
W /cm	2.21	2.19	2.09	2.12	2.09	2.02
(新乡)反演值/cm	2.73	2.15	1.99	1.91	1.58	1.13
相关系数	0.856654					

根据郑州站 18 日 19 时至 19 日 22 时的探空资料算出的假相当位温(θ_{se})和比湿(q)时间-高度剖面图(如图 2)也可以看出, 在整个天气系统发展过程中, 等假相当位温线和等比湿线的波动均比较大。可以看到, 19 日 04 时, 500 hPa 以下, 郑州站上空的等 θ_{se} 线明显下凹, 同时等比湿线上凸, 表明有明显上升运动使中上层的湿度增大, 有良好的水汽输送条件。

3 饱和水汽场及冰水转化区

通常, 将 $T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$ 的云区定义为人工增雨催化作业的准饱和区。由郑州站 18 日 19 时至 19

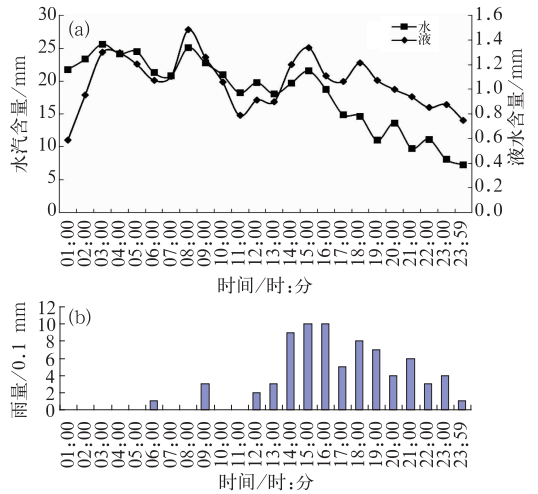


图 1 2002 年 10 月 19 日新乡站微波辐射计反演的云中积分水汽、液水含量分布变化(a), 新乡站 19 日 00 时至 20 日 00 时逐时雨量(b)

Fig. 1 The hourly distribution of integral water vapor content and cloud liquid water content retrieved from ground-based dual-wavelength microwave radiometer (a) and the histogram of precipitation (b) at Xinxiang Station on 19 October 2002

日 22 时的探空资料的加密探空资料分析所得的温度露点差等值线图(图 3)可知, 准饱和区和降水几乎同时出现(18 日 21 时左右), 雨强最大的时间与准饱和层最深厚的高饱和区相对应(19 日 15 时前后), 降水前温度露点差数值减小, 降水结束后准饱和区消失。

在冷云中, 当冰面饱和水汽压低于水面饱和水汽压, 水汽对水面未饱和而对冰面已过饱和时, 云中云滴不断蒸发, 使分散在大量云滴上的水汽转移到冰晶上, 冰晶不断凝华增长, 这就是云降水物理学中的贝吉龙过程(黄美元等, 1999)。冰水转化条件是大气水汽压大于冰面饱和水汽压, 即 $e - E_i > 0$ 的区域。在过冷的环境中, 云滴必须在相对湿度达到

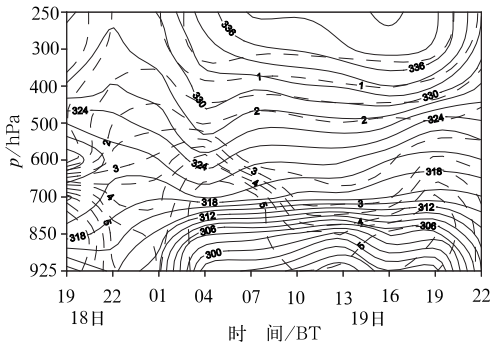


图 2 2002 年 10 月 18 日 19 时至 19 日 22 时
郑州站 θ_{sc} (实线, 单位: K)、 q (虚线,
单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时间-高度剖面图

Fig. 2 Vertical cross-section of θ_{sc} (solid line,
unit: K) and q (dashed line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
at Zhengzhou Station from 19:00 BT 18
October to 22:00 BT 19 October 2002

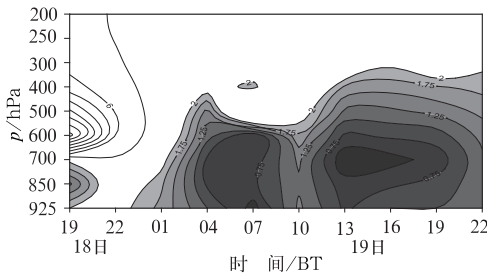


图 3 2002 年 10 月 18 日 19 时至 19 日 22 时
郑州站温度露点差时间-高度剖面图

Fig. 3 Vertical cross-section of $T - T_d$
at Zhengzhou Station from 19:00 BT 18
to 22:00 BT 19 October 2002

100%的条件下才能增长。当温度为 -12°C 时 $e - E_i$ 的差值最大, 为 0.269 hPa 。由计算可知, 在水面恰好饱和时, 实际上已是相对于冰面过饱和, 过饱和度达到 10%。在冷云中, 当 $e - E_i > 0$ 时冰晶可通过凝华过程增长。图 4 是根据郑州站加密探空资料得到的 $e - E_i$ 等值线分布图。由图可见, $e - E_i > 0$ 的区域在 19 日 04 时位于 400 hPa 以上区域, 07 时位于 600~500 hPa 及 400 hPa 以上区域, 10 时位于 300 hPa 以上区域, 13 和 16 时位于 600 hPa 以上区域。这表明, 冰水转化区首先在高层出现, 随着时间的推移冰水转化区向低层发展。从等值线的形状看, 降水前等值线基本呈水平分布, 随着降水的临近, 等值线由水平方向迅速向垂直方向转变。等值线的水平梯度在 400 hPa 以下明显加大, 即 $e - E_i$ 的数值在降水开始前有由负值急剧增加的过程。这

种增加主要是由于水汽压的增加而引起的。降水前 0°C 层以上水汽的积累和输送导致水汽压的增加, 有利于人工催化增雨作业。随着降水过程的发展, 降水所导致的水汽的消耗量大于水汽的补充量, 使得云中水汽压减小, $e - E_i$ 的数值变小, 冰水转化区将很快消失。

图 5 是距郑州站 18 日 21 时至 19 日 24 时的逐时降水量分布。从图中可看出, 地面降水与冰水转化区有良好的对应关系, 冰水转化区的最大值与雨量的最大值几乎同时出现。与温度露点差图比较, 正好对应着饱和度最高和最深厚的时段, 这样的环境是有利于降水粒子增长的。

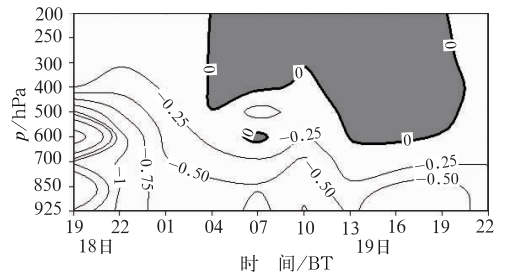


图 4 2002 年 10 月 18 日 19 时至 19 日 22 时
郑州站 $e - E_i$ 时间-高度剖面图

Fig. 4 Vertical cross-section of $e - E_i$ at
Zhengzhou Station from 19:00 BT 18
to 22:00 BT 19 October 2002

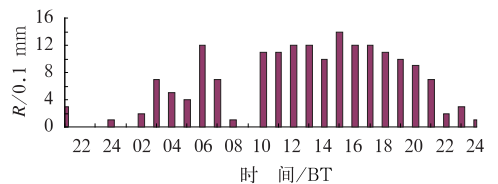


图 5 2002 年 10 月 18 日 21 时至 19 日 24 时
郑州站逐时降雨量

Fig. 5 The hourly precipitation distribution
at Zhengzhou Station from 21 BT 18 to
24 BT 19 October 2002

4 增雨潜力分析

通常, 降水效率是地面降水量与云系中凝结的水的比值。云中凝结水量与地面降水量的差值就称之为人工增雨潜力。根据冰水转化区的分布, 结合飞机能够上升的高度和云物理探测资料显示, 可以确定飞机人工增雨作业的可播区。对 1998 年河南

省秋季低冷锋天气过程的飞机云物理探测资料分析表明(李念童等,2000),河南省秋季主要降水云系云中粒子浓度偏低,云系结构松散,云水含水量偏小,云层降水不大,云中自然冰晶浓度低,低于 $10 \text{个} \cdot \text{L}^{-1}$,存在着人工引晶催化的潜力。层状云可催化宏观指标判据中催化高度为 $4 \sim 5 \text{ km}$ 。本文选

用冰面过饱和可降水量 $w_i = -\frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} F(p) dp$ 来表示

人工增雨潜力大小,其中:

$$F(p) = \Delta q_i \quad \text{当 } \Delta q_i > 0$$

$$F(p) = 0 \quad \text{当 } \Delta q_i < 0$$

$$\Delta q_i = 0.622(e - E_i)/(p - e) \quad (3)$$

式中, p_1 和 p_2 为相邻两个高度的气压值。每个时次的 w_i 值大小对应不同的增雨潜力。本文利用郑州站 10 月 19 日 04—16 时每 3 h 一次的探空资料算出不同时刻的冰面过饱和可降水量和柱冰面过饱和和水汽总量(各层可降水量之和),如表 2 所示。

由表 2 可见,在可播时段中,07、13、16 和 20 时

表 2 2002 年 10 月 19 日郑州站冰面过饱和可降水量随时间的变化

Table 2 Temporal change of supersaturation precipitation at Zhengzhou Station on 19 October 2002

时间	气压层/hPa	不同高度层/m	厚度/m	w_i /mm	模拟值	柱冰面过饱和和水汽总量模拟值/mm
04 时	600~500	4322~5747	1425	0	0	0.316
	500~400	5747~7427	1680	0	0.121	
	400~300	7427~9479	2052	0.355	0.16	
	300~250	9479~10709	1230	0.139	0.03	
	250~200	10709~12144	1435	0.0965	0.005	
07 时	600~500	4326~5742	1416	0.84	0	0.399
	500~400	5742~7416	1673	0	0.179	
	400~300	7416~9471	2055	0.767	0.177	
	300~250	9471~10710	1239	0.273	0.038	
	250~200	10710~12154	1444	0.17	0.005	
10 时	600~500	4330~5747	1417	0	0	0.135
	500~400	5747~7424	1677	0	0	
	400~300	7424~9483	2059	0	0.104	
	300~250	9483~10725	1242	0.0718	0.025	
	250~200	10725~12170	1445	0.0801	0.006	
13 时	600~500	4312~5723	1411	0.142	0.235	0.789
	500~400	5723~7405	1682	0.7	0.316	
	400~300	7405~9472	2067	0.987	0.209	
	300~250	9472~10715	1243	0.211	0.029	
	250~200	10715~12160	1445	0.134	0	
16 时	600~500	4311~5720	1409	0.26	0.233	0.834
	500~400	5720~7400	1680	0.792	0.291	
	400~300	7400~9474	2074	1.078	0.242	
	300~250	9474~10722	1248	0.38	0.053	
	250~200	10722~12172	1450	0.24	0.015	
20 时	600~500	4319~5730	1421	0	0.228	0.654
	500~400	5730~7400	1670	0.53	0.213	
	400~300	7400~9470	2070	0.81	0.15	
	300~250	9470~10710	1310	0.21	0.043	
	250~200	10710~12160	1450	0.14	0.02	

的增雨潜力较大,04 时的增雨潜力次之,10 时的增雨潜力最小。因此,此次降水过程的人工催化作业时间应当选在 19 日 07、13、16 和 20 时,作业高度层应选在 $4207 \sim 9166 \text{ m}$ 之间。

本文采用美国宾夕法尼亚州立大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)所研制的中尺度数值模式 MM5V3 对该个例进行研究。模式采用 NCEP

的格点资料作为背景场,通过插值得到模式的初边值条件,三重套网格结构的格点数分别为 73×73 、 91×91 、 91×91 ,格距分别为 45、15 和 5 km,中心点为(34°N , 113.5°E),垂直方向分 26 层。模拟时间从 2002 年 10 月 18 日 20 时至 10 月 20 日 08 时。每小时输出一组结果。采用楼小凤(2002)新建的云物理方案, MRF 边界层方案,云辐射方案,第一层和

第二层网格结构分别采用 Kuo 和 KF 积云对流参数化方案,第三层网格结构不采用积云对流参数化方案。图 6 是第三层网格模拟的郑州站 18 日 23 时至 20 日 00 时的每小时降水结果,同图 5 实测降水相比,虽然模拟降水从 19 日 13 时开始增强,比实测偏晚 3 个小时,模拟雨强最大为 2.3 mm,比实测略偏强,但模式仍较好地模拟出了降水演变过程。

图 7 是 2002 年 10 月 18 日 23 时至 19 日 24 时郑州站水汽通量散度垂直分布的模拟结果,阴影代表水汽辐合。郑州上空 850~750 hPa 为主要水汽辐合层,集中在 19 日 06 时至 20 日 00 时,对应降水

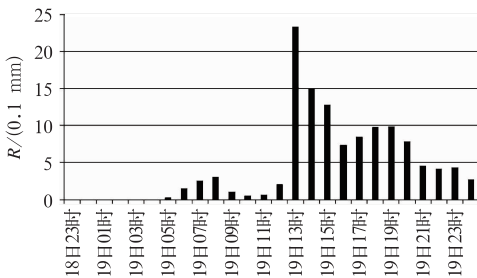


图 6 2002 年 10 月 18 日 23 时至 20 日 00 时模拟的郑州站逐时降雨量图

Fig. 6 Simulated hourly precipitation distribution at Zhengzhou Station from 23 BT 18 to 00 BT 20 October 2002

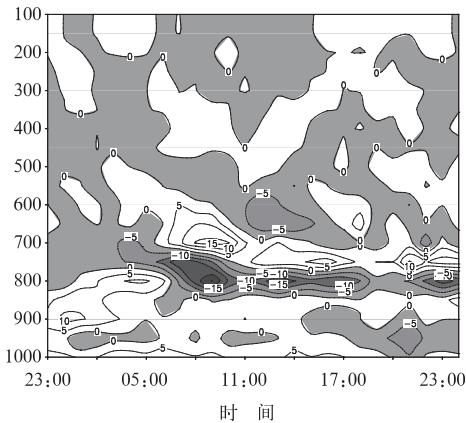


图 7 模拟的郑州站 18 日 23 时至 20 日 00 时水汽通量散度垂直分布随时间演变

(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 7 The vertical distribution of the simulated hourly water vapor flux divergence at Zhengzhou Station from 23 BT 18 to 00 BT 20 October 2002 (unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

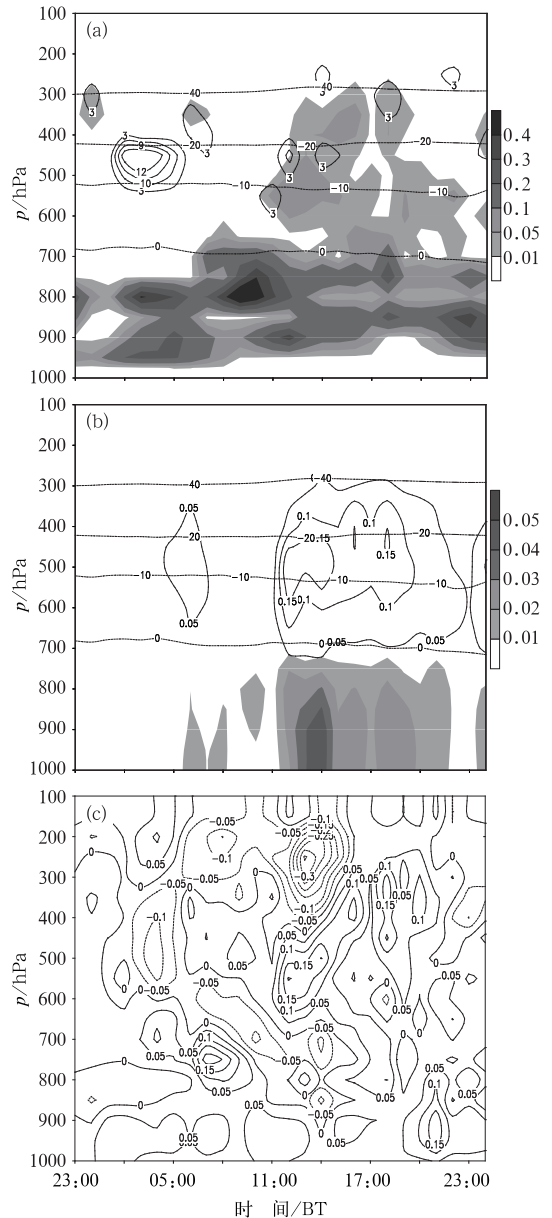


图 8 模拟的郑州站 18 日 23 时至 20 日 00 时物理量随时间演变, (a) 云水含水量(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、冰晶数浓度(实线, 单位: $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)、温度(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$), (b) 雪加霰的含水量(实线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、雨水含水量(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、温度(虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$), (c) 垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 实线: 上升, 虚线: 下沉)

Fig. 8 The simulated hourly variables at Zhengzhou Station from 23 BT 18 to 00 BT 20 October 2002 (a) cloud-water content (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), ice crystal concentration (solid, unit: L^{-1}), temperature (dashed, unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) water content of snow plus graupel (solid, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), rain water content (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), temperature (dashed, unit: $^{\circ}\text{C}$), (c) vertical velocity (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, solid: ascending, dashed: descending)

时段,最大水汽辐合量为 $2 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$;其次,19日11—16时在650~550 hPa高度出现第二水汽辐合层,对应降水最强时段。低层和中层的水汽辐合为降水的形成提供了很好的条件。

从模式模拟的10月18日23时至20日00时郑州站水成物和垂直运动随时间演变(图8)可以看出,19日10时前出现较弱降水,云水和上升运动主要集中在暖区,冰相粒子含量较少,降水为暖云降水特征;19日11时后降水增强,云体向上伸展,550 hPa出现 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动大值中心,冷区出现大量过冷云水和冰相粒子,为混合相降水特征,冰晶主要分布在500~200 hPa之间,最大含水量为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,冰晶的数浓度最大为 $6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,雪和霰的含水量之和最大达到 $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在高层和低层有几个云水含水量中心,高层云水含水量最大为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低层云水含水量较大,为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从水成物和垂直运动的时间演变可以看出,19日11时后,郑州地区在 $-40 \sim -5^\circ\text{C}$ 温度层内,即4000~8000 m的高度内,云系中含有比较丰富的过冷水,冰晶粒子浓度不是很多,并且对应上升运动区,这种配置存在引晶催化的增雨潜力,有利于降水的形成。

5 结 论

(1)这次降水过程的潜力的时间和高度分布从温度-露点差来看,主要在7、13和16时,高度在700~500(400) hPa;从 $e - E_i$ 看,主要在07、13和16时,高度在600~300 hPa。这些时间对应地面有较强降水。

(2)从数值模拟结果看,过冷水主要出现在11—20时,高度在650~400(300) hPa,对应模拟的主要降水时段。增雨潜力的时空分布同探空分析大体上一致。

(3)资料分析和数值模拟结果表明,这次过程存在人工引晶催化的潜力。

参考文献

- 陈进强,张纪淮,李一平,等. 2000. 一次有利于人工增雨作业的锋面降水过程分析. 气象, 26(9): 51-54.
- 陈小敏,邹倩,李轲. 2011. 重庆地区夏季一次降水过程及增雨潜力的数值模拟分析. 气象, 37(9): 1070-1080.
- 胡志晋. 2001. 层状云人工增雨机制条件和方法的探讨. 应用气象学报, 12(增刊): 10-13.
- 胡志晋,秦瑜,王玉彬. 1983. 层状冷云数值模式. 气象学报, 41(2): 194-203.
- 黄美元,徐华英. 1999. 云和降水物理. 北京: 科学出版社, 219.
- 雷恒池,魏重,沈志来,等. 2001. 微波辐射计探测降雨前水汽和云液水. 应用气象学报, 12(增刊): 73-78.
- 李念童,李铁林,郑宏伟. 2000. 1998年秋季飞机人工增雨试验PMS探测资料分析. 人工影响天气优化技术研究, 北京: 气象出版社, 103-105.
- 李铁林,郑宏伟. 2000. 利用双波段地基微波辐射计遥测大气中汽态、液态含水量. 人工影响天气优化技术研究, 北京: 气象出版社, 110-113.
- 楼小凤. 2002. MM5模式的新显式云物理方案的建立和耦合及原物理方案的对比分析. 北京: 北京大学物理学院.
- 王以琳,刘文,王广河. 2002. 冷云人工增雨催化区的探空判据. 气象学报, 60(1): 117-121.
- 徐祥德,等. 2002. 农业气象防灾调控工程与技术系统. 北京: 气象出版社, 322.
- 杨景梅,邱金桓. 1996. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式. 大气科学, 20(5): 620-626.