

陈小敏,邹倩,李轲. 重庆地区夏季一次降水过程及增雨潜力的数值模拟分析[J]. 气象,2011,37(9):1070-1080.

重庆地区夏季一次降水过程及 增雨潜力的数值模拟分析^{* 1}

陈小敏¹ 邹倩² 李轲¹

1 重庆市人工影响天气办公室,重庆 401147
2 重庆市气象台,重庆 401147

提 要: 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。结果表明:本次降水天气过程中,重庆地区水汽含量极为丰富,水汽分布与地形分布呈明显的对应关系,低层水汽输送较大,整层水汽通量较高,有明显水汽辐合,云中液态水对地面降水影响很大。西南气流和地形共同作用为重庆地区液态水的形成提供了有利条件,在东北部山区迎风坡处大量水汽累积抬升,易形成丰富的液态水。重庆东北部地区水汽向云水转化较强,过冷液态水含量丰富,冰晶含量少,0℃层附近水汽垂直通量较大,降水效率较低,有较大的增雨潜力。

关键词: 数值模拟,云微物理,增雨潜力,水汽分布,降水过程

Numerical Simulation Analysis of Rainfall Characteristics and Artificial Precipitation Potentiality in a Summer Precipitation Process of Chongqing

CHEN Xiaomin¹ ZOU Qian² LI Ke¹

1 Weather Modification Office of Chongqing, Chongqing 401147
2 Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147

Abstract: By using the GRAPES artificial precipitation model, a precipitation process on July 4, 2008 in Chongqing is simulated. and the characteristics of vapor distribution, cloud microstructure, microphysical conversion and artificial potential are analyzed, the results show that: in this precipitation process, the water vapor is extremely rich in Chongqing, and the vapor distribution is corresponding to the topographic distribution. Meanwhile, the low-level water vapor transport is large, the whole layer of water vapor flux is relatively high; with a moisture convergence, the cloud liquid water has a great impact on ground rainfall. Southwest air flow and terrain together provide favorable conditions for the formation of liquid water in Chongqing. There is a large amount of water vapor accumulated in the windward slope of northeastern mountain area, and easy to form a wealth of liquid water. In this precipitation process, a plenty of water vapor converted into cloud water in northeast of Chongqing, then it is rich in supercool liquid water, less in ice number, low in precipitation efficiency, and the vapor vertical flux is large at 0℃ layer, therefore it has greater potential for precipitation enhancement.

Key words: numerical simulation, microphysics structure, artificial modification potential, water vapor distribution, precipitation process

^{*} 重庆市科技攻关项目(CSCT 2008AB0015)资助
2010 年 8 月 25 日收稿; 2011 年 2 月 22 日收修定稿
第一作者: 陈小敏,主要从事云降水物理数值模拟研究. Email: civillegend@163.com

引言

云和降水过程是大气全球水分循环中不可缺少的环节,云降水物理主要研究云和降水过程中的宏观结构特征和微观物理机制,研究大气中云滴、雨滴、冰晶、雪晶、冰雹等的生消演变规律。由于我国“南涝北旱”的气候特点,早期开展云降水物理研究多在北方地区,如“北方层状云人工降水试验研究”,南方地区开展的研究相对较少。西南地区受西南季风的影响,降水充沛,水资源丰富,开展云降水物理研究就更少了。近年来,随着全球气候变暖,天气异常现象突发,西南地区干旱频繁,2006年川渝大旱和2010年西南五省市大旱,给国家和人民造成巨大的经济和财产损失,因此,有必要加强这一地区的云降水物理研究。

重庆处于长江中上游,四川盆地东部,每年7—8月受副热带高压影响,易发生伏旱,汪宝国等^[1]早期专门进行了四川东部及重庆(川东)伏旱研究,发现19世纪以后,伏旱增加,10年中有6年出现伏旱。川东地区伏旱具有近100年的振荡周期,重庆及附近地区在21世纪初(2010年前后)为伏旱和严重伏旱的高发期^[2]。抓住有利时机开展人工增雨作业,是应对干旱的一个重要手段,而人工增雨是云降水物理的一个主要应用领域,开展夏季伏旱时期云和降水物理研究,为科学合理开展人工增雨作业提供坚实的理论基础。

数值模拟可以详细反映云体发展和降水过程,是研究云降水系统的重要手段之一,早期受计算条件影响,较多进行云模式研究,如Tripolli等^[3]和Cotton等^[4]的RAMS三维弹性非静力中尺度云模式,Tao和Simpson的GCEM(Goddard Cumulus Ensemble Model)模式^[5],中国气象科学研究院的CAMS三维对流云模式^[6-7]、孔凡铀等的完全弹性三维冷云模式^[8-9]、许焕斌等的三维可压缩云尺度模式^[10]等。随着观测手段和计算技术的不断进步,在天气尺度模式中加入详细的云降水微物理方案,使其不仅具有描述天气系统的能力,而且还能研究在不同天气系统下云降水演变过程,已经成为越来越多的从事云降水物理方面学者的选择。如Reisner等在MM5模式加入双参数的微物理方案,对上坡薄云和气旋性风暴中过冷水进行模拟研究^[11];Co-

hard等在MESONH中尺度模式中增加一个新体积水方案,对高地迎风面地形云和区域暴雨进行模拟^[12];刘奇俊等在HLAFS模式中建立了复杂混合相双参数云降水方案,对一次暴雨过程和伴随着的云物理进行模拟研究^[13-14];赵震等在MM5的Reisner 2方案基础上采用双变参数方案新增加一个可选显式方案,对一次层状云进行模拟分析^[15];陈小敏等在GRAPES模式中加入新双参数云物理方案,对祁连山地区夏季降水进行催化模拟研究^[16]。

本文利用国家气象中心GRAPES人工增雨云系模式,对重庆地区2008年7月4日一次降水过程进行数值模拟,分析了重庆地区一次降雨天气的水汽分布、云系宏微观分布和增雨潜力特征。

1 模式及资料情况

所用中尺度模式为国家气象中心基于GRAPRES的人工增雨云系模式,是由国家气象中心GRAPES模式和双参数显示云降水方案耦合而成的。通过与TRMM卫星测雨雷达探测的云微物理产品对比发现,模式能较好地预报云系系统云物理微观的垂直结构特征,所模拟的各种水凝物的分布形势、强中心位置与卫星监测一致,其大小也接近监测值,可作为云系人工增雨条件决策的重要依据^[17]。2007年推广到各省市后,北京、广西^[18]等都进行了模拟结果与实况资料的业务检验,得到较好的肯定。本次模拟的区域为 $24^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $100^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$,东西方向有100个格点,南北方向有80个格点,模式的水平分辨率为 $0.15^{\circ}\times 0.15^{\circ}$,模式垂直分辨率为31层,垂直方向采用 δ 坐标。时间步长为60 s,其中降水粒子的落速采用小步长计算。模式的初始场采用T213预报场资料,模拟时间从2008年7月4日08时(北京时,下同)至7月4日20时,侧边界每6小时更新一次。为了减少边界波动影响,侧边界采用松弛法进行处理,松弛缓冲区取4个格点。预报水凝物为水汽,云滴,雨滴,冰晶,雪和霰,模拟区域以重庆地区为中心包括周边一些地区。其他参数设置取模式原默认值。

2 天气实况及模拟

2.1 天气形势

2008年7月4日08时的天气形势(图1)显示,

500 hPa(图 1a)副热带高压维持在华南地区,重庆地区处于槽前西南气流控制下,温度槽落后于高度槽,与高度脊重合,低槽将继续发展,此时重庆站高空为西南风,位于槽前,模拟(图 1c)风速较实际风

速小。700 hPa(图 1b)在四川盆地附近有较强的冷低涡,重庆西部处于低涡前,受低涡前西南气流影响,风速较大,模拟结果(图 1d)与实况比较一致。

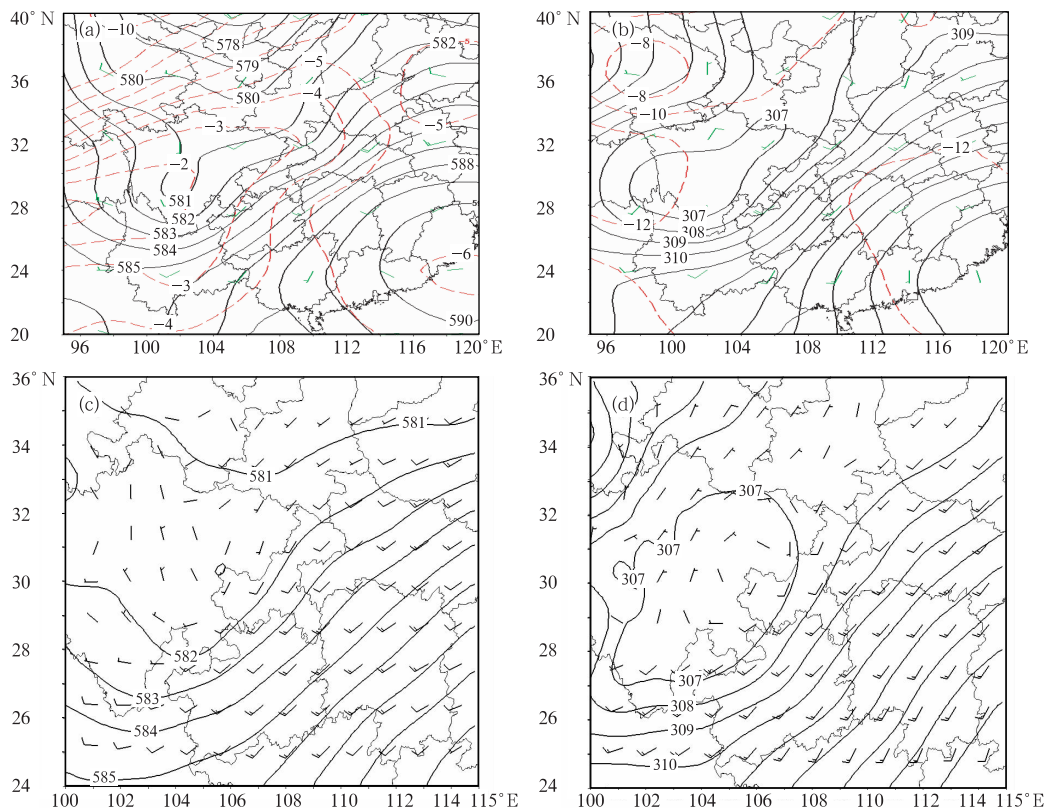


图 1 2008 年 7 月 4 日 08 时天气形势

(a) 500 hPa 实况, (b) 700 hPa 实况, (c) 500 hPa 模拟, (d) 700 hPa 模拟

Fig. 1 Synoptic situations at 08:00 BT 4 July 2008

(a) 500 hPa (observed), (b) 700 hPa (observed), (c) 500 hPa (simulated), (d) 700 hPa (simulated)

4 日 20 时(图略),500 hPa 副热带高压继续维持在华南地区,低槽移动到重庆中部地区,并向南加深,温度槽迅速调整,但仍落后高度槽较小距离,重庆地区处于槽线正下方,位势高度有所减少。700 hPa 冷低涡减弱并移动到重庆东北部,东北部地区由西南风转向西北风,风速迅速减弱。

5 日 08 时(图略),500 hPa 副热带高压西退,高空低槽移动到重庆东部边缘地区,重庆中西部和东北部受槽后西北气流影响,东南部仍处于冷槽西南气流控制。700 hPa 冷低涡消散,重庆地区受偏北气流影响。

随着高空槽的快速东移,这次降水过程在重庆地区可以分为三个阶段,7 月 3 日 20 时至 4 日 08 时,系统开始影响重庆地区,重庆西部地区有较深厚的云团,降水主要集中在四川盆地和重庆西部地区;

4 日 08—20 时,云团自西向东快速移动,系统降水自西向东覆盖整个重庆地区;4 日 20 时至 5 日 08 时,云团逐渐移出重庆地区,并开始减弱,降水主要在重庆东北部和东南部地区。在整个过程中,高空西南气流配合低空偏南暖湿气流源源不断地输入,为这次重庆地区降水的发生发展提供了有利的水汽条件。地面雨量都维持在中到大雨,模式模拟基本给出了正确的天气形势,较好地模拟了系统的发展过程,与实况比较吻合。

2.2 地面降水

7 月 4 日 08—20 时重庆地区 12 小时累计地面降水主要呈东北多西南少的形势(图 2),5 和 10 mm 的降水雨带基本覆盖整个重庆区域,其中,西部降水在 5~10 mm,中部地区降水在 10~25 mm,东

北部地区降水在 10~50 mm,东南部降水在 5~10 mm。模拟的雨带结构也呈西南—东北向,分布也是西南部少,东北部多,与实况比较吻合。模拟的降水强度在中部较实况要强,雨量在 25~40 mm,可

能是因为模拟区域恰好是武陵山脉地区,雨带范围与山脉走向一致,实况资料中此处山脉地区观测站点较少,而且山区降水一般较平地要多,模拟情况应该更符合降水的实际情况。

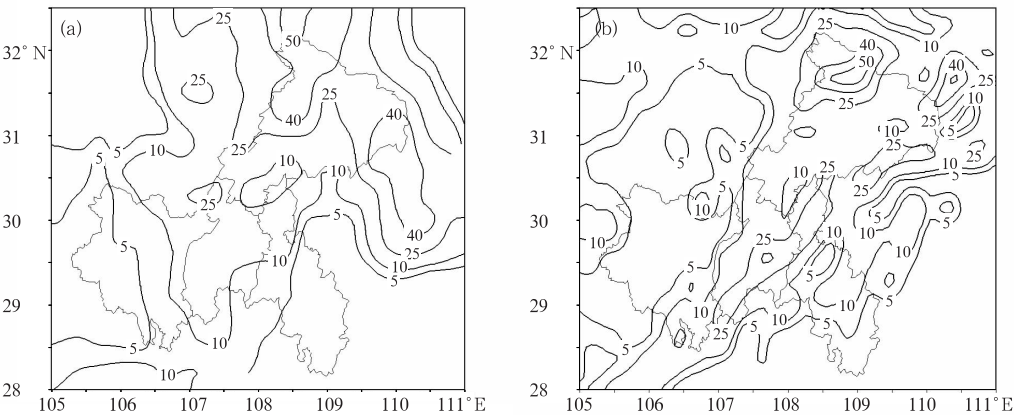


图 2 2008 年 7 月 4 日 20 时 12 小时累计地面降水量
(a) 实况, (b) 模拟(单位:mm)
Fig. 2 The 12 h accumulated rainfall (unit:mm) at 20:00 BT 4 July 2008
(a) observed; (b) simulated

3 云中水资源特征

3.1 总量特征

将空中云水和雨水等以液相存在的水凝物称为

液相水,将冰晶、雪和霰等以固相存在的水凝物称为固相水,研究重庆地区水汽、液相水和固相水总量随时间变化特征,有利于了解重庆地区空中水资源变化特点。图 3 给出了模式模拟的重庆区域(以重庆边界为底的矩形区域)水汽、液相水和固相水总量随时间变化,可以看出,在本次降水过程中,重庆地区

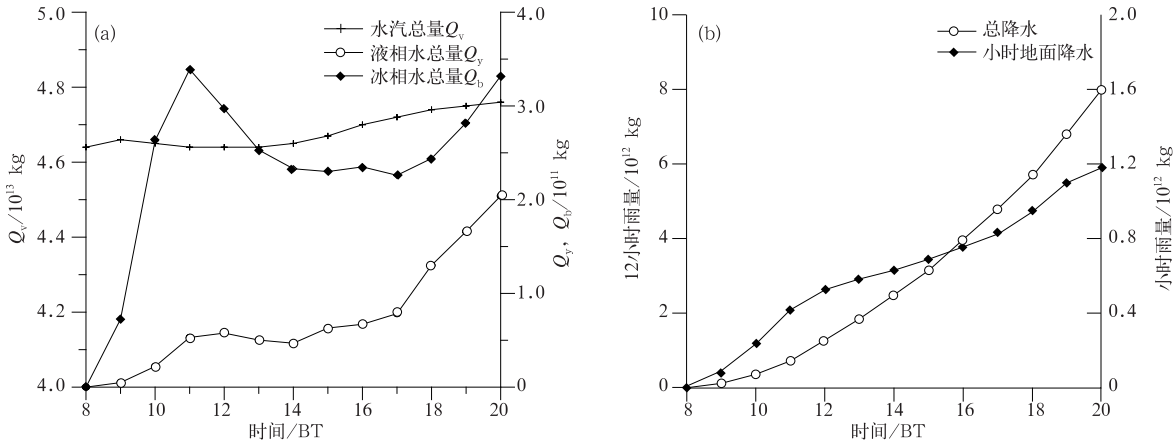


图 3 区域内水资源总量随时间变化
(a) 水汽 Q_v (左侧刻度,单位: 10^{13} kg)、液相水 Q_l 和固态水 Q_s 总量(右侧刻度,单位: 10^{11} kg),
(b) 12 小时地面累计降水总量(左侧刻度,单位: 10^{12} kg)和小时地面降水(右侧刻度,单位: 10^{12} kg)

Fig. 3 The hourly changes of total water resources in Chongqing region

(a) water vapor Q_v (left calibration,unit: 10^{13} kg), liquid water Q_l and solid water Q_s (right calibration,unit: 10^{11} kg),
(b) 12 h total precipitation (left calibration,unit: 10^{12} kg) and hourly precipitation (right calibration,unit: 10^{12} kg)

水汽含量极为丰富,平均为 4.7×10^{13} kg,水汽总量在前 6 h 变化不大,后 6 h 有增加,但增量有限。固相水含量明显大于液相水,呈现出先增加后减少再增加的变化趋势,最大值在 11 时,达 3.5×10^{11} kg; 17 时达到一个低值,为 2.2×10^{11} kg,随后又逐渐增加,到 20 时,固态水总量恢复到 3.4×10^{11} kg。液相水总量随时间逐渐增加,在 11—17 时变化较小,在 17 时后增加最明显,总量从 0.8×10^{11} kg 增加到 2.0×10^{11} kg。随着降雨过程的持续,地面累积降水(图 3b)总量不断增加,12 小时累积降水总量为 8×10^{12} kg。从每小时地面降水量来看,雨量逐渐增大,在 11—17 时增长平缓,17 时后有明显增加,到 20 时达到最大,为 1.2×10^{12} kg。

分析区域内各物质总量随时间变化,可以发现,在这次降水过程中,水汽总量增长有限,空中水凝物(液相水和固相水之和)总量平均不到水汽的 1%,这可能是由于重庆地区夏季水汽含量一直较高,水汽随气流入后又很快地流出,只有极少的水汽向水凝物转化,而且由于固相水明显大于液相水,这说

明重庆地区冷云过程较强,水汽主要是向固相物质转化,本文后面章节将会对重庆地区水汽水平和垂直输送以及不同区域水凝物转化做进一步研究。小时地面降水随时间变化曲线与液相水随时间变化曲线的相似程度较好,液相水明显增加对应着小时地面降水明显增加,这说明在这次降水过程中,云中液相水对地面降水影响较大,加大空中水汽的凝结,有利于地面降水的增加。

3.2 水汽分布特征

图 4a 给出了重庆地区平均柱水汽的水平分布,可以看出,在整个降水过程中,柱水汽分布随时间变化不大,空间分布与地势分布极为吻合,地势高的地方(重庆东北部和东南部)水汽含量较少,地势低的地方(重庆西部)水汽含量较高。西部地区平均柱水汽含量最大,超过 $70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,并自西向东随地势逐渐减少,中部地区平均柱水汽含量为 $60 \sim 70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,东北部地区平均柱水汽含量较少,为 $55 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,东南部地区平均柱水汽含量为 $50 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

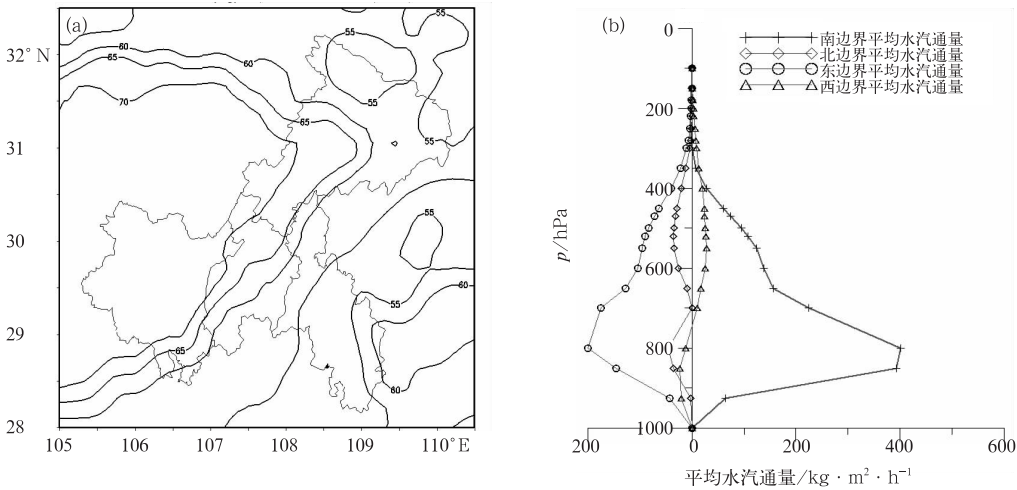


图 4 水汽分布
(a) 平均柱水汽水平分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), (b) 各边界平均水汽通量随高度变化(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)
Fig. 4 Water vapor distribution
(a) The average column water vapor horizontal distribution (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$);
(b) The changes with height of average vapor flux at each boundary (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)

图 4b 给出了各边界平均水汽通量随高度变化,可以看出,流入、流出量相差较小,流入量略大于流出量,这与前一节中总量特征分析结果一致。东边界和北边界为净流出边界,南边界为净流入边界,西边界在 700 hPa 以下为净流出,在 700 hPa 以上为净流入。这主要是由于在低层以南风气流为主,使

得南边界为主要流入边界,而在中层随着西风气流增强,水汽在西边界由流出转为流入,整个天气过程中,低槽是自西向东移动,使得东边界为主要水汽流出边界。西边界和北边界水汽流量较少,随高度变化不大,最大流量都小于 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 。东边界和南边界水汽流量较大,随高度先增加后减少,在

800~850 hPa 高度层边界水汽流量最大,南边界最大流入量为 $400\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$,东边界最大流出量为 $200\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ 。四个边界在 600 hPa 以下以净流入为主,在 600 hPa 以上流入、流出基本平衡。这表明整个重庆地区低层水汽输送较大,整层水汽水平通量较高,低层水汽的辐合有利于云团的发展,产生更多的降水。

4 云系宏微观结构

4.1 云场模拟

受高空槽影响,云系沿槽线方向呈带状分布,重庆西部云团自西向东移动,与东北部地势较高地区云团合并,同时东南部也有云团向东北部地区汇集,

使得此处云团迅速发展壮大。为了便于与卫星云图做比较,把模拟的整层水凝物垂直积分相加,作为模拟的云带分布,以含水量大于 $0.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 作为云区。图 5a 和 5b 分别为 18 时红外卫星云图和模拟云带分布,从图 5a 可以看出,整个云系从重庆东北部到西部呈倾斜 U 型带状分布,东北部和东南部云团面积较大,发展强盛,中部和西北部有少量小云团,发展较弱。模拟的云区(图 5b)也呈带状分布,在重庆东北部地区城口、奉节和巫山一带,云团发展较强盛,柱水凝物含量最大,最大值达到 $2.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,模拟云带分布与卫星云图云系分布比较一致。同时在卫星云图上,重庆西南方向四川境内有较强云团向东移动,模拟结果也显示此处有较强云团发展,水凝物含量较大。总之,模拟云带的走向、位置和发展变化等特征与卫星云图分布基本吻合。

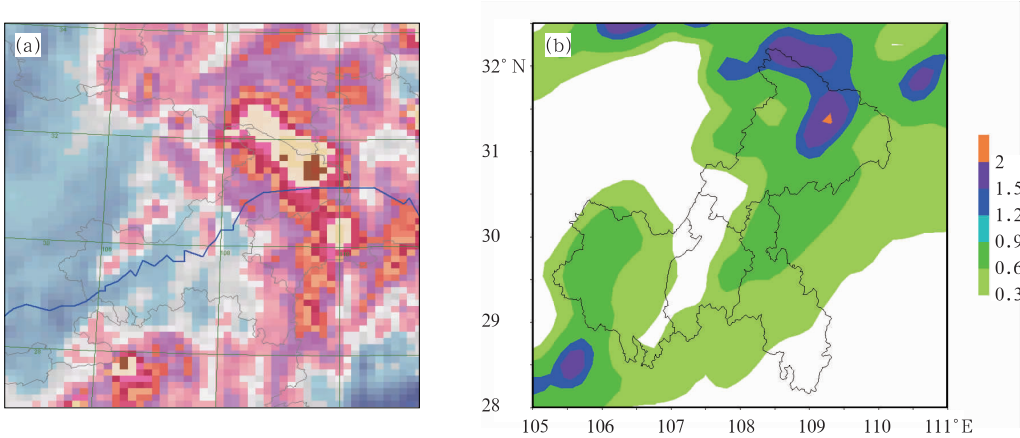


图 5 2008 年 7 月 4 日 18 时云场分布
(a) 卫星红外云图, (b) 模拟云带 (单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
Fig. 5 Cloud field distribution at 18:00 BT 4 July 2008
(a) satellite infrared image; (b) simulated cloud band (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

4.2 云系水平结构

图 6 给出了 18 时 500 hPa 上云中云水,雪、霰和 700 hPa 上雨水的水平分布,可以看出,在重庆东北部液相过程明显,云水和雨水比较集中,且液态水以云水为主,含量在 $0.1\sim0.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,雨水含量为 $0.01\sim0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在重庆中西部地区冰相过程较强,以雪晶为主,含量为 $0.1\sim0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;霰的分布在东北部与云水配合较好,在西部与云水配合较好,其原因可能是在东北部上升速度较强,雨滴冻结形成大量霰粒子,在西部地区冰雪晶向霰的转化较多,其含量为 $0.05\sim0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。分析重庆

地区各层水凝物分布可以发现,东北部云团液相过程较强,且含有大量的过冷云水,对霰和雨水形成起重要作用,若增强云上层的冰相过程,消耗过多的过冷水,增加云下层的温度,使更多的霰粒子融化成雨水,将明显提高云团的降雨量。

4.3 云系垂直结构

图 7 给出了 7 月 4 日 18 时云系垂直结构(速度场采用 50 倍垂直速度与水平速度合成),可以看出,沿 31°N 剖面(图 7a)低层风速较小,随高度增加而增加,随着地势的不断升高,低层风速逐渐增大,风速随高度变化不大。在迎风坡附近有较小的垂直上

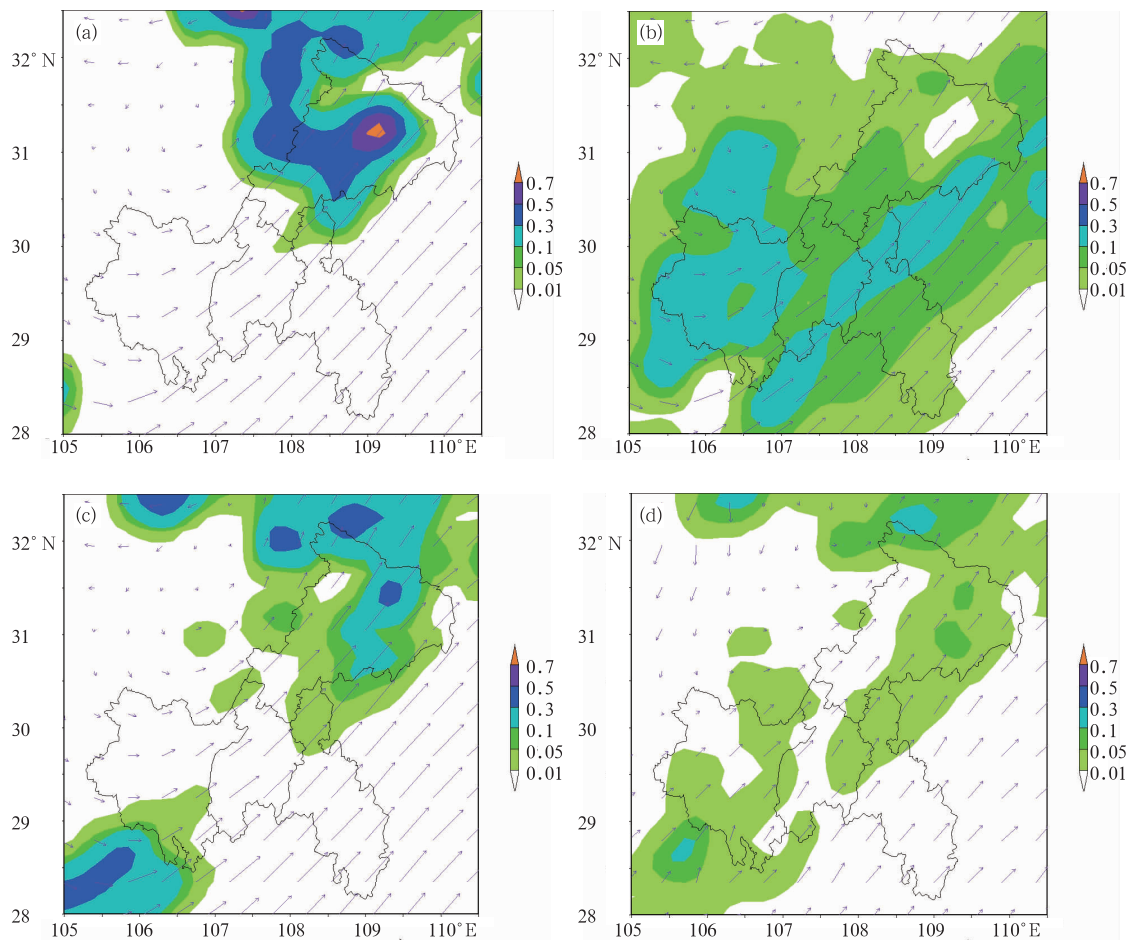


图 6 2008 年 7 月 4 日 18 时云系水平结构和流场分布

(a) 500 hPa 云水, (b) 500 hPa 雪晶, (c) 500 hPa 霰, (d) 700 hPa 雨水(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 6 Horizontal structure of cloud system and flow field distribution at 18:00 BT 4 July 2008

(a) 500 hPa cloud water Q_c ; (b) 500 hPa snow Q_s ; (c) 700 hPa graupel Q_g ;

(d) 700 hPa rain water Q_r (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

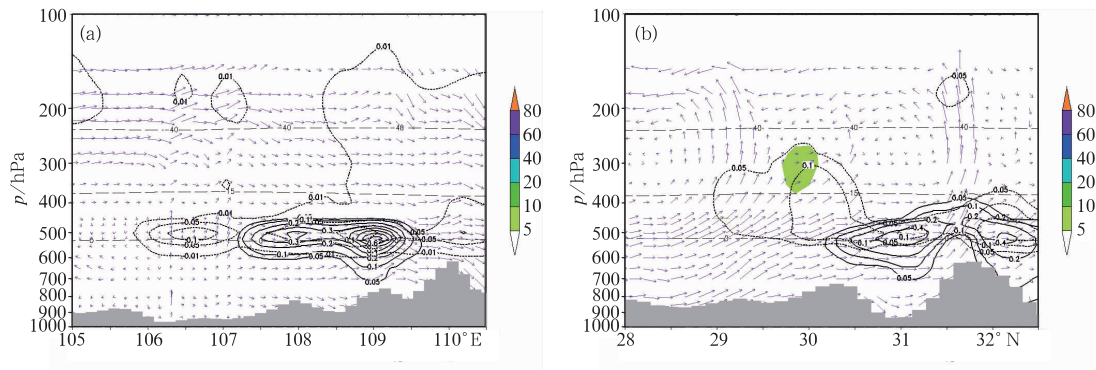


图 7 2008 年 7 月 4 日 18 时冰晶(填色图 L^{-1})、液态水(实线 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和固态水(点线 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分布

(a) 沿 31°N 剖面, (b) 沿 108.8°E 剖面

Fig. 7 The vertical distributions at 18:00 BT 4 July 2008 for ice Q_i (color filling, unit: L^{-1}),

liquid water Q_l (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and solid water Q_s (point line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(a) along 31°N profile, (b) along 108.8°E profile

升运动,且液态水含量丰富,主要分布在 400~700 hPa,最大值为 $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,位于 500 hPa(0°C 层)附近。冰晶数浓度很小,低于 5 个/L。固态水分分布范围较大,在 200~600 hPa,最大值为 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沿 108.8°E 剖面(图 7b),低层风速较大,随高度增加而减小,在两个地势较高处都有较强的上升运动,形成两个环流,其中,在 31.5°N 附近地势最高处,上升运动最强。整个云中固态水基本上集中于左边上升运动处,在 300~500 hPa,冰晶数浓度含量较少,在 5~10 个/L。液态水主要集中在地势最高的山峰两侧,在 400~700 hPa,最大值为 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,位于 500 hPa(0°C 层)以上。对比两种图可以看出,沿纬向方向,低层水汽输送较小,云团位于迎风坡一侧,云中固态水和液态水分布都比较均匀。而沿经向方向,低层水汽输送明显较大,并随着地形起伏变化,云团是由地势最高处的迎风坡和背风坡处的两个云团合并组成,迎风坡云团中液态水含量较多,处于两个山峰的峡谷处,背风坡云团中液态水含量较少。迎风坡云团中固态水丰富区和液态水丰富区相差一个纬度,背风坡云团中固态水丰富区和液态水丰富区重合。主要原因是由于沿经向方向是西南气流输送的主要通道,地形出现明显的起伏变化,迎风坡位于两个山峰的峡谷区,上升运动较强,水汽输送到这里累积抬升,使得液态水含量丰富。

5 云中微物理转化

云中水凝物的相互转化是形成降水的重要物理

过程,因此,有必要对云降水过程中个微物理量的时空变化进行分析。按降水区域把重庆分为 4 个部分(图 8a):1 为渝西地区,2 为渝中地区,3 为渝东南地区,4 为渝东北地区,分析降水过程中各个区域中云微物理量的转化。图 8b 给出了 4 个区域中平均水凝物含量(云水、雨水、冰晶、雪晶和霰的总和)随时间变化,在渝西(区域 1)地区,平均柱水凝物含量先增加后急剧减少,最大值在 11 时,为 $1.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,14 时后,含量变化不大,基本维持在 $0.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右。在渝中(区域 2)地区,平均柱水凝物含量呈先增加后减少再增加趋势,在 12 时达到第一个峰值 $0.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,17 时减少为 $0.35\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,20 时增加并达到最大值 $0.9\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;在渝东南(区域 3)地区,平均柱水凝物含量一直较少,呈缓慢增加趋势,最大值为 $0.7\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;在渝东北(区域 4)地区,平均柱水凝物含量呈显著增加趋势,在 17 时以后增加最为明显,20 时最大为 $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。对比四个区域变化可以看出,最开始,云系自西向东移动,渝东北(区域 3)和渝东南(区域 4)水汽向水凝物转化明显,渝西(区域 1)水汽转化较少,在 17 时后,云系有向偏南方向移动趋势,使得渝中(区域 2)水汽向水凝物转化由减少转为增加。未来随着云系向东南移动,渝东南(区域 4)水汽向水凝物转化增加,地面降水也随之增加。

云系移动过程中,由于各地区地理环境以及云移动过程中自身变化因素,使得不同地区上空云中水凝物组成有明显差别,重庆地处四川盆地边缘,地形自西向东起伏较大,云系在自西向东移动过程中,

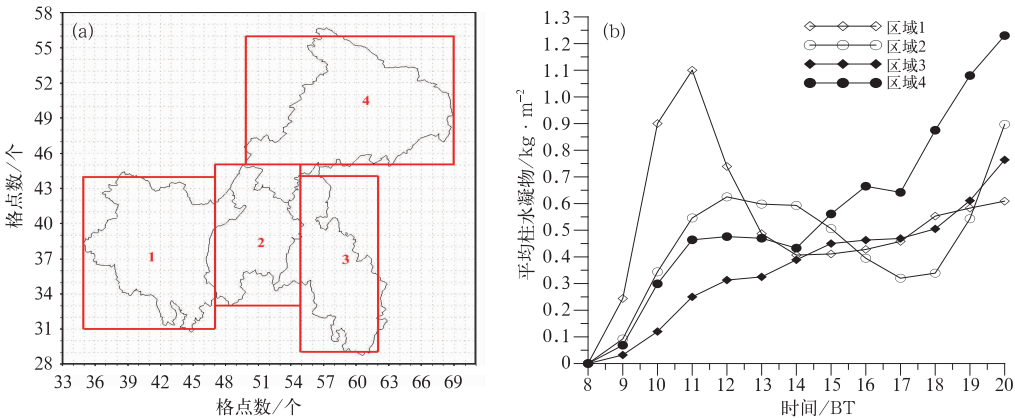


图 8 (a) 区域分布:1:渝西地区;2:渝中地区;3:渝东南地区;4:渝东北地区,
(b) 各区域平均柱水凝物随时间变化(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

Fig. 8 (a) Region division: 1 western Chongqing; 2 middle Chongqing;
3 southeastern Chongqing; 4 northeastern Chongqing;

(b) The hourly changes of average column hydrometeors in each sub-region (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

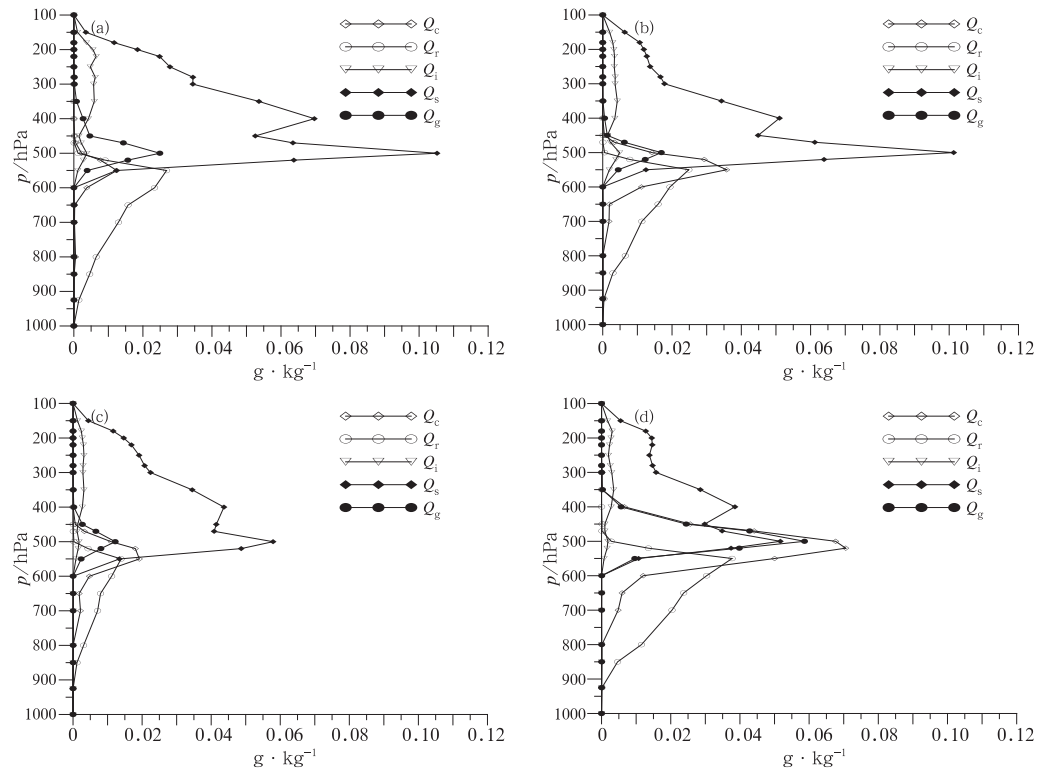


图 9 各区域平均水凝物 12 小时平均垂直分布

(a) 区域 1, (b) 区域 2, (c) 区域 3, (d) 区域 4

(云水: Q_c ; 雨水: Q_r ; 冰晶: Q_i ; 雪: Q_s ; 霰: Q_g ; 单位: $g \cdot kg^{-1}$)

Fig. 9 The average distribution of hydrometeors in each sub-region with height

(a) sub-region 1; (b) sub-region 2; (c) sub-region 3; (d) sub-region 4;

(cloud water: Q_c ; rain water: Q_r ; ice crystal: Q_i ; snow: Q_s ; graupel: Q_g ; unit: $g \cdot kg^{-1}$)

易受地形因素影响,区域水凝物相互转化明显,为了研究不同区域上空水凝物转化特点,对比分析重庆 4 个区域云水、雨水、冰晶、雪和霰等水凝物 12 小时平均垂直分布,可以看出,4 个区域中各水凝物随高度分布比较一致,这说明云系在移动到不同区域的过程中各水凝物层次结构变化不大,量级有明显变化。其中,冰晶主要分布在最上层,基本上都在 200~400 hPa,500 hPa 附近有少量分布;雪晶主要在 200~600 hPa 分布,在 500 hPa 附近含量最大;霰主要在 450~600 hPa 分布,在 500 hPa 附近含量最大;云水主要在 400~800 hPa 分布,在 550 hPa 附近含量最大,雨水主要在 500~900 hPa 分布,在 550 hPa 附近含量最大。

从云系的特征结构可以看出,云系从层云向积层混合云发展明显,在渝西(区域 1)、渝中(区域 2)和渝东南(区域 3)地区云系中水凝物以冰相粒子(包括冰晶、雪和霰粒子)为主,在渝东北(区域 4)地区,云系中嵌入对流云,水凝物以液相粒子为主。在

云系移动过程中,从渝西(区域 1)到渝中(区域 2),云水含量增加明显,最大值从 $0.01 g \cdot kg^{-1}$ 增加到 $0.035 g \cdot kg^{-1}$,雨水含量变化不大,雨水最大值为 $0.025 g \cdot kg^{-1}$,冰晶含量、霰含量和雪含量略有减少,冰晶最大值从 $0.01 g \cdot kg^{-1}$ 减少到 $0.005 g \cdot kg^{-1}$,霰最大值从 $0.025 g \cdot kg^{-1}$ 减少到 $0.015 g \cdot kg^{-1}$,雪最大值从 $0.15 g \cdot kg^{-1}$ 减少到 $0.1 g \cdot kg^{-1}$ 。这说明在渝中(区域 2)地区,低层水汽输送加大,水汽向云水转化明显,冰晶、雪和霰等冰相粒子有所消耗,但没有向雨水转化,区域内雨量变化不大。由于中低层为西南气流,云系先在渝东北(区域 4)地区发展,再随着系统往东向渝东南(区域 3)地区移动,云系在渝东北(区域 4)受地形抬升作用辐合加强,大量水汽向云水转化,云水含量迅速增加,最大值达到 $0.07 g \cdot kg^{-1}$,含水量丰富区从 550 hPa 上升到 500 hPa($0^{\circ}C$ 层附近),雨水含量和霰含量也明显增加,雨水最大值上升到 $0.04 g \cdot kg^{-1}$,霰最大值上升到 $0.06 g \cdot kg^{-1}$,雪含量明显减少,

最大值下降到 $0.05\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,冰晶略有减少,最大值下降到 $0.002\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

6 增雨潜力分析

降水云(系)的增雨潜力,是进行合理播云增雨的前提,也是判断增雨潜力区的关键指标,而云中过冷水分布、垂直方向上水汽通量特征、冰晶数浓度分布和降水效率的高低则是反映增雨潜力的主要因子。从 18 时的柱过冷水分布(图 10a)和 18 时 520

hPa(0°C 层附近)的垂直水汽通量分布(图 10b)可以看出,在重庆东北部过冷水含量丰富,垂直水汽通量较大,垂直水汽通量最大的层面位于 0°C 层附近,过冷水丰富区与垂直水汽通量大区相重合,有利于播撒后的冰晶迅速增长。图 10c 给出了重合区其中点(31°N 、 108.8°E)处冰晶数浓度与液态水含水量随高度和时间变化,可以看出,此处前期冰晶数浓度在 10 个/L,液态水含量较少,在 17 时以后,液态水含量增加,冰晶数浓度很少,播撒冰晶有利于过冷水的凝结增长,产生更多的降水。

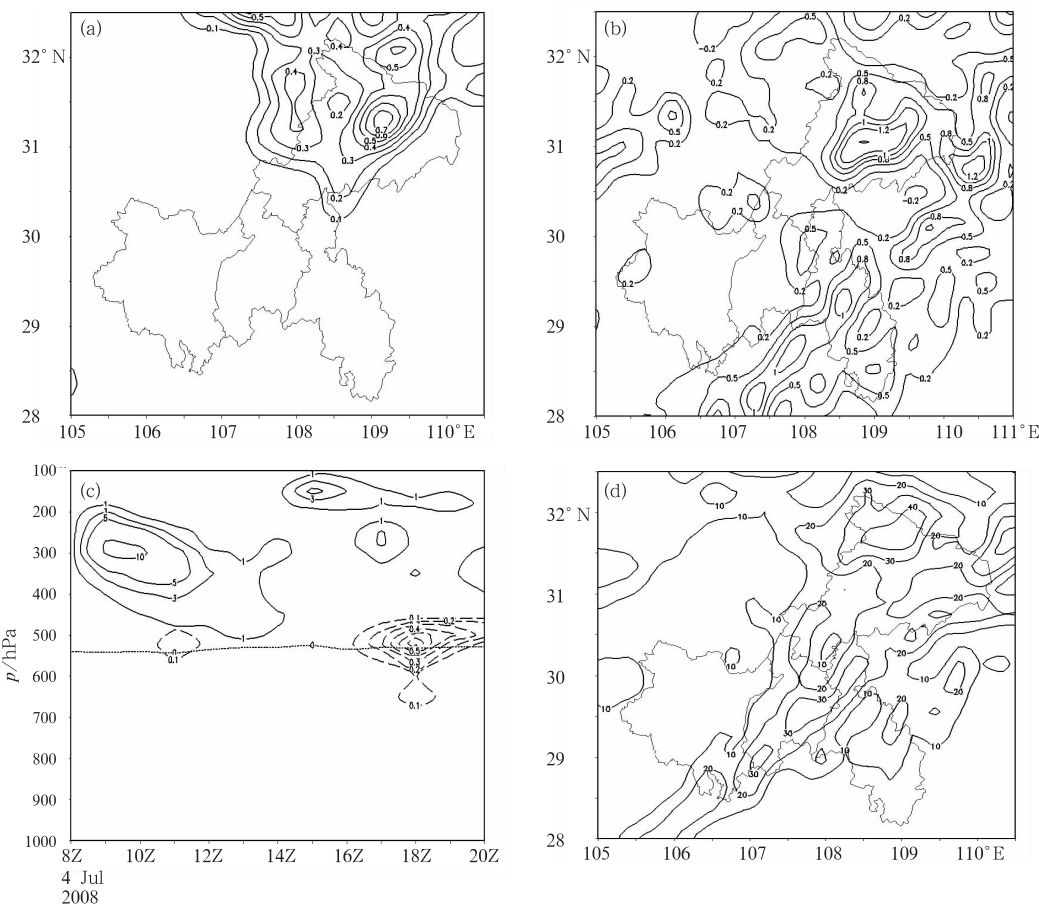


图 10 增雨潜力分析:(a) 18 时柱过冷水的分布(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$), (b) 18 时 520 hPa 垂直水汽通量(单位: $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), (c) 点(31°N 、 108.8°E)处冰晶(实线:个/L)和液态水(虚线: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)随时间变化, (d) 总降水效率(单位:%)

Fig. 10 The analysis of artificial precipitation potentiality

(a) column supercool water distribution at 18:00 BT (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$); (b) vertical water vapor flux in 500 hPa at 18:00 BT (unit: $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); (c) the hourly changes of INC (solid line, unit: L^{-1}) and liquid water (dashed line, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); (d) precipitation efficiency (unit: %)

考虑到输入计算域内的总水汽量主要存在三个汇,一部分转化为云中各种湿物质,一部分成为地面累积降水,还有一部分仍以水汽形式滞留于空中,因

此,可以把上述三项水分累计作为输入到计算域的总水资源量,再根据降水效率的定义,得到在整个计算时间内平均降水效率,即:

$$\bar{\eta} = \frac{R_{\text{sum}}}{\bar{Q}_{\text{susp}} + \bar{Q}_{\text{conv}} + R_{\text{sum}}}$$

其中, $\bar{\eta}$ 为降水效率, R_{sum} 为地面累积降水, $\bar{Q}_{\text{susp}}$ 为计算域内平均悬滞水汽总量, $\bar{Q}_{\text{conv}}$ 为平均水凝物总量。在整个降水过程中, 重庆地区降水效率(图 10d) 较低, 大部分地区在 20%~30% 之间, 只有东北角强降水区域达到 40%, 总降水量占整个计算区域内总水分的很小部分, 其余大部分的水资源未被充分利用而有效地转化为地面降水。

7 结 论

通过利用 GRAPES 人工增雨云系模式对 2008 年 7 月 4 日发生在重庆地区的大范围降水天气过程进行数值模拟, 研究了这次降水过程的云系宏观和微观结构特征, 水汽特征和增雨潜力大小。分析表明:

(1) 此次降水过程中, 高空西南气流配合低空偏南暖湿气流, 为重庆地区降水发展提供了有利条件, 模式能较好地模拟系统的发生发展, 与实况比较吻合。

(2) 重庆地区夏季水汽含量极为丰富, 降水过程中水汽含量变化较小, 水汽分布与地面对应关系为: 地势较高则水汽较少, 地势较低则水汽较多。

(3) 降水过程中, 低层水汽输送较大, 整层水汽水平通量较高, 有明显的水汽辐合, 云中液态水对地面降水影响很大。

(4) 西南气流和地形共同作用为重庆地区液态水的形成提供了有利条件, 在重庆东北部山区迎风坡处易产生上升运动, 大量水汽迅速累积抬升, 形成丰富的液态水。

(5) 云系在移动过程中, 水凝物随高度分布变化不大, 但量级变化明显, 在渝西、渝中和渝东南地区, 云中水凝物以雪为主, 在渝东北地区水汽向云水转化较强, 云水在上升气流作用下, 消耗大量冰晶和雪粒子, 转化成雨水和霰粒子。

(6) 在重庆的东北部, 过冷水含量丰富, 在 0℃ 层附近有较大的垂直水汽通量, 冰晶数浓度很少, 降水效率较低, 有利于播撒冰晶产生降水, 具有很高的增雨潜力。

参考文献

- [1] 汪宝山, 刘富明, 赵森. 川东伏旱历史变化规律及未来气候展望[G]//川东伏旱研究文集, 1981: 43-54.
- [2] 江玉华, 程炳岩, 邓承之, 等. 重庆市严重伏旱气候特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1): 31-38.
- [3] Tripoli G J, Cotton W R. The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model-1982, Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments[J]. *Rech Atmos*, 1982: 185-220.
- [4] Cotton W R, Stephens M A, Nehr Korn T, et al. Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model-1982, Part II, Ice phase parameterization[J]. *Rech Atmos*, 1982, 295-320.
- [5] Tao W K, Simpson J. The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1993: 19-54.
- [6] 邹光源. 三维准弹性对流云模式[C]. 北京: 中国气象科学研究院, 1991.
- [7] 李淑日, 胡志晋, 王广河. CAMS 三维对流云催化模式的改进及个例模拟[J]. *应用气象学报*, 2003, 14 (增刊): 78-91.
- [8] 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值预报(I), 模式建立及冷云参数化[J]. *大气科学*, 1990, 14(4): 441-453.
- [9] 孔凡铀, 黄美元, 徐华英. 对流云中冰相过程的三维数值预报(II), 繁生过程作用[J]. *大气科学*, 1991, 15(6): 78-88.
- [10] 许焕斌, 王思薇. 三维可压缩大气中的云尺度模式[J]. *气象学报*, 1990, 48(1): 80-90.
- [11] 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.
- [12] Cohard J M, Pinty J P. A comprehensive two-moment warm microphysical bulk scheme. I: Description and tests[J]. *Q J R Meteor Soc*, 2000, 126, 1815-1842.
- [13] 刘奇俊, 胡志晋, 周秀骥. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(I)云降水显式方案[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(增刊): 60-67.
- [14] 刘奇俊, 胡志晋, 周秀骥. HLAFS 显式云降水方案及其对暴雨和云的模拟(II)暴雨和云的模拟[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(增刊): 68-77.
- [15] 赵震, 雷恒池, 吴玉霞. MM5 中新显式云物理方案的建立和数值模拟[J]. *大气科学*, 2005, 29(4): 609-619.
- [16] 陈小敏, 刘奇俊, 章建成. 祁连山云系云微物理结构和人工增雨催化个例模拟研究[J]. *气象*, 2007, 33(7): 37-43.
- [17] 马占山, 刘奇俊, 秦琰琰, 等. 利用 TRMM 卫星资料对人工增雨云系模式云微现场预报能力的检验[J]. *气象学报*, 2009, 67(2): 260-271.
- [18] 刘丽君, 张瑞波, 张正国. 广西人工影响天气云系模式预报效果检验[J]. *气象研究与应用*, 2009, 30(4): 49-51.
- [19] 章建成, 刘奇俊. GRAPES 模式不同物理方案对短期、气候模拟的影响[J]. *气象*, 2006, 32(7): 3-12.
- [20] 李淑日. 西北地区云和降水微物理特征个例分析[J]. *气象*, 2006, 32(8): 59-63.
- [21] 李淑日, 王广河, 刘卫国. 降水性层状云微物理结构个例分析[J]. *气象*, 2001, 27(11): 17-21.
- [22] 杨茜, 李轲, 高阳华. 重庆地区空中水资源的时空分布特征[J]. *气象*, 2010, 36(8): 100-105.