

文章编号: 2096-1618(2021)04-0467-05

基于 NPP 卫星反演四川盆地夏季云降水微物理特征

范思睿^{1,2,3}, 王维佳^{2,4}, 刘贵华⁵, 刘平¹

(1. 四川省人工影响天气办公室, 四川 成都 610072; 2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081; 3. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 4. 成都市气象局, 四川 成都 611133; 5. 陕西省气象科学研究所, 陕西 西安 710016)

摘要:为研究四川盆地夏季云降水宏、微观特征以及内部降水机制,利用 NPP 卫星资料反演四川盆地云降水微物理特征参数,对比分析四川盆地夏季午后强降水云和非降水云的宏、微物理结构。结果表明,通过 NPP/VIIRS 卫星资料反演可以清晰看到四川盆地夏季午后云发展状况,了解云降水微物理特征。四川盆地夏季午后生成过冷水云、对流云、层积云和卷云等多种类型云,其中过冷水云云顶温度在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,粒子有效半径 Re 为 $7\sim15\text{ }\mu\text{m}$,粒子小且均匀;对流云云顶温度在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-37\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $15\sim40\text{ }\mu\text{m}$,粒子分布不均,主要发生混合相增长和冰化增长,约在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上为冰化增长带;层积云云顶温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $10\sim20\text{ }\mu\text{m}$;卷云稀薄,云顶温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $10\sim15\text{ }\mu\text{m}$ 。四川盆地能否产生强降水主要取决于高低云配置情况和过冷水云面积,当高低云配置不好时,同时对流云下没有大面积过冷水云供应水汽,或者低云中的水滴不足,会造成地面降水较小或者无降水;当高云主要是从中低云发展而来时,过冷水云成片分布说明此区域过冷水丰富,为粒子发展成雨滴提供有利条件。

关键词:大气物理;云降水;NPP 卫星反演;云微物理反演;四川盆地;过冷水云

中图分类号:P421.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.04.017

0 引言

四川盆地具有独特的地形特征,是中国最典型、海拔最低的盆地,由对世界气候影响重大的青藏高原和云贵高原环绕而成,高原和盆地地形差异较大,特殊的地理位置和下垫面让四川盆地成为中国云量最多的地区,盆地内云系主要以层状云、层积云为主的中低云系^[1]。

对云的观测主要为人工观测、地基观测、天基观测、飞机机载探测。人工观测是以人目测为主,夜间观测误差较大,人为因素较多。地基观测主要使用雷达^[2-4]、云高仪^[5]、L 波段探空观测^[6],能实现对云和降水垂直结构以及微物理的连续监测,但探测范围有限。飞机穿云探测能够探测云内云滴、雨滴、雪晶、冰晶等云中水成物质粒子的尺度、浓度、含水量、谱分布等微观特征参量,针对不同类型云采取不同的穿云观测模式,但是受到空域和天气限制,探测时间有限^[7-8]。卫星的发展为云降水研究提供了新思路,卫星能够提供多时次、大范围、连续性的云微物理探测信息。在过去几十年中,研发了卫星反演云微物理参数方法,利用卫星资料反演云和降水的多种宏微观物理特征参数,如云粒子相态、粒子有效半径、光学厚度等。

刘贵华等^[9]、叶晶等^[10]利用 MODIS 卫星资料反演云系的微物理特征,分析云降水内部结构,给出基于卫星的层状云增雨判别条件。汪会等^[11]利用 CloudSat 等多源卫星观测资料对比分析青藏高原深厚强对流云和弱对流云的宏微观物理参量,揭示了青藏高原对流云的垂直结构特征。刘建军等^[12]利用 CloudSat 卫星资料分析青藏高原不同高度和不同季节的发生频率,研究了高原地区云的水平分布特征及其物理成因。孙鸿娉等^[13]和范思睿等^[14-15]利用风云卫星资料反演山西、四川盆地积层混合云的微物理特征。

NPP(national polar-orbiting partnership)卫星 2011 年 10 月 28 日成功发射。作为一颗极轨卫星携带有 VIIRS 等 5 个观测仪器^[16],与 MODIS 等传感器相比,NPP 卫星 VIIRS 传感器热红外通道分辨率(375 m)提高了 3 倍,为研究云微物理提供了更精细化的数据,特别是在精确反演初始及发展阶段的小对流云方面显示出独特的优势^[17]。岳治国等^[17]利用 NPP/VIIRS 卫星资料反演了青藏高原对流云微物理特征,指出 NPP/VIIRS 卫星资料分辨率高,在反演对流云方面有独特的优势。周敏强等^[18]利用 NPP 卫星资料分析青藏高原积雪,分析得到 NPP 积雪产品积雪分类精度高,精度稳定,适合用于监测高原积雪范围。除此之外,NPP 卫星资料还可用于反演气溶胶光学厚度^[19]。

本文采用 Rosenfeld 等^[20]的卫星反演方法,利用陕西省气象科学研究所自主研发的 NPP 卫星反演软件,对四川盆地云降水多种物理特征参数进行反演,选

收稿日期:2020-06-03

基金项目:四川省科技计划资助项目(2019YJ0621);中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题资助项目(2019Z01602);高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室科技发展基金资助项目(SC-QXKJQN2019025,2018-青年-19,2017-青年-15);中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题资助项目(2021KLAS04M)

取四川盆地夏季午后强降水云和非降水云典型个例,分析对比两种云的宏、微物理特征。

1 资料和方法

1.1 资料

使用 NPP 极轨卫星的 VIIRS L1B 资料,由 NOAA 数据服务网站 (CLASS) 提供,为对比分析盆地夏季降水云和非降水云的特点,选择一个盆地非降水典型个例和一个盆地强降水典型个例,使用 2017 年 8 月 12 日 06UTC 资料 (无降水) 和 2020 年 7 月 25 日 06UTC 资料 (强降水)。

1.2 方法

Rosenfeld 等^[20]建立了基于卫星反演云微物理的方法,分析云垂直结构,并用飞机探测资料对反演的云微物理进行验证,Lensky 等^[21]和 Freud 等^[22]进一步利用飞机探测资料和卫星资料进行了验证,证明这种基于卫星反演云微物理方法的可靠性。将可见光反射率赋予红色,3.7 μm 通道反射率赋予绿色,11 μm 通道赋予蓝色,这 3 种颜色组合编码,这就是 RGB 合成图,组合编码后由多种不同颜色来表示云的状态,从而达到显示云物理特征^[20,23]。本文采用 Rosenfeld 等建立的基于卫星反演云微物理的方法,利用陕西省气象科学研究所自主研发的 NPP 卫星反演软件,对四川盆地云降水多种物理特征参数进行反演。

2 分析结果

2.1 非降水典型个例

图 1 为 2017 年 8 月 12 日 NPP 极轨卫星轨道图,四川盆地区域为 14:10 和 2:30 过境,但因为夜间缺乏可见光信息,可用信息较少,仅选用午后 14:07 做分析。图 2 为 2017 年 8 月 12 日 14:07 NPP 极轨卫星轨道过境图,其中的蓝色方框为四川盆地中部云降水典型个例重点关注区域,从图 2 看出夏季午后四川盆地上空云顶颜色不同,说明有不同高度的云同时存在。根据颜色推断为对流云和层积云,对流云云体不够密实而且较为分散,推测为午后气温升高对流增强后才发展起来的新云体。盆地北部主要为分散性对流云,有部分对流云发展旺盛,云顶已经变红,说明云顶较高。盆地南部主要为积层混合云,有黄色的过冷水低云,也存在弱对流云,当高云和低云配置较好时,则雨量较大,当只有低云存在时,只能产生微量降水或者无降水,从实测地面降水图上 (图略) 看盆地南部仅为小雨,盆地中部分散性对流云和云层较薄的高云,没有产生地面降水。

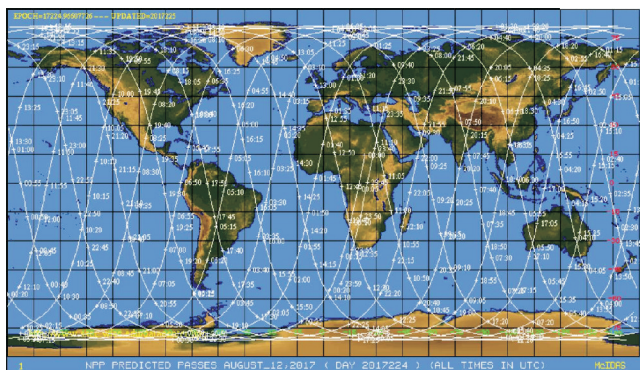


图 1 2017 年 8 月 12 日 NPP 极轨卫星轨道图

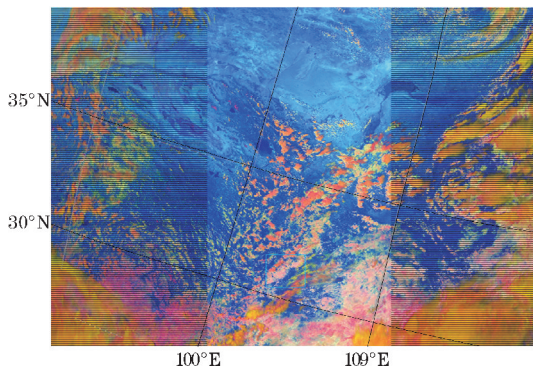


图 2 2017 年 8 月 12 日 14:07 NPP/VIIIRS 多光谱 RGB 合成过境图 (蓝色方框为重点关注区域)

图 3 为 2017 年 8 月 12 日 6:07 UTC 重点关注区域的 RGB 反演图,地面为四川盆地中东部。从图 3 看出盆地中东部上空主要为分散性积云,云顶温度颜色深浅不一,代表云顶高度不同,说明盆地中部上空同时存在不同高度云,地面没有产生降水。从图 3 看出盆地中东部既有红色云 (区域 1)、黄绿色 (区域 2)、粉色云 (区域 3)、黄色云 (区域 4),每种颜色云的云顶高度和云厚不同,代表不同类型云,在图 3 中部粉色云受到地形影响出现了波纹状。区域 1 为红色云,发展密实,云顶温度为 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,粒子有效半径 Re 为 $20\sim40\text{ }\mu\text{m}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上存在一个深厚的冰相增长带,说明红色云主要为粒子半径较大的深厚冰云,但是高云几乎是独立存在,高云周边可见蓝色地表,且有灰暗阴影,说明高低云配置不好,低层没有大面积过冷水云存在,这种高云产生的地面降水较少或者雨滴在达到地面前已经蒸发。刘贵华等^[24]指出如果高云下的中低云云底高、云底温度低、云厚小、云水含量低时,地面降水很小。区域 2 为大面积黄绿色云,云层稀薄,依稀可见地面,云顶温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $10\sim15\text{ }\mu\text{m}$,说明黄绿色云为粒径较小的高云,推断为粒径较小的薄卷云。区域 3 为粉色云,云顶温度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $11\sim17\text{ }\mu\text{m}$,说明粉色云为粒子半径较小的低云,推断为层积云,云内主要是液相粒子。区域 4 位黄色云,云顶温度为 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$,云底温度为 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $8\sim15\text{ }\mu\text{m}$,粒径随着高度升高而增长,主要发生凝结和碰并增长, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下发

生碰并增长,0℃以上发生凝结增长,根据云顶温度和粒径判断为过冷水云。过冷水云缺乏冰晶,云滴仅仅靠凝结和碰并增长,当液态粒子半径达到8~15 μm及以上时,才会有部分大滴降到地面,所以黄色云只能造

成地面微量降水或者没有降水。由此可见,四川盆地夏季午后会产生多种类型云,因为午后对流加强,生成对流云和卷云,同时也存在层积云和过冷水云,当高低云系配置不好,不容易产生降水。

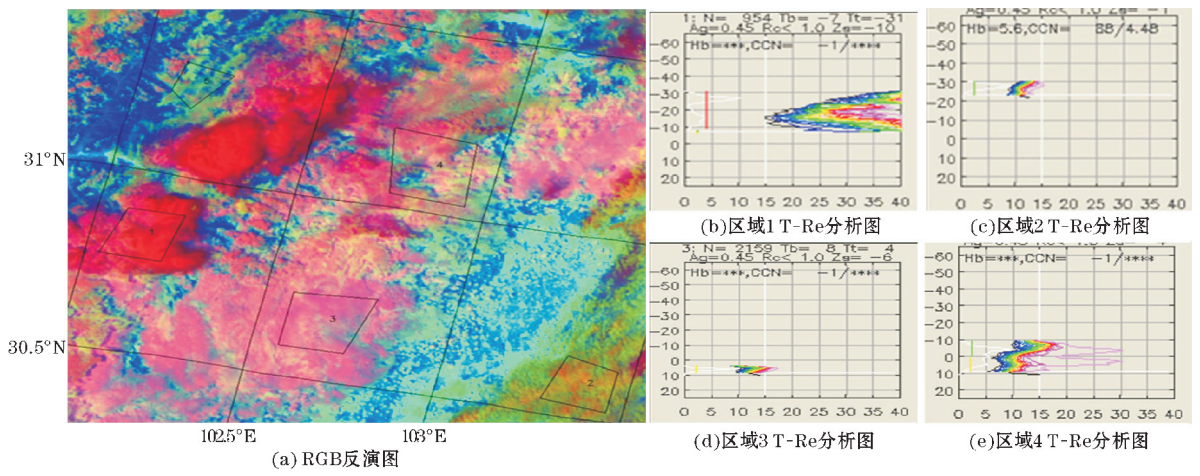


图3 2017年8月12日14:07 NPP极轨卫星过境时RGB反演图与数字区对应的T-Re分布图

2.2 强降水典型个例

图4为2020年7月25日13:53 NPP/VIIRS多光谱RGB合成过境图,地面为四川盆地东部、陕西、甘肃、宁夏。从图4中看出四川、陕西、甘肃有面积粉色和黄色云系覆盖,主要为中低云系,盆地东北部有橙黄色深厚降水云覆盖,降水云发展密实,说明此次降水云为低、中、高云组成,与地面降水区域一致(图5),盆地北部有强降水,大部分地区小时雨量达到2 mm以上,降水持续10 h以上。

图6为强降水典型个例重点关注区域(图4蓝色方框),对其进行云微物理特征分析,蓝色方框地面为四川盆地和甘肃、陕西3省交接处,交界地主要为红色和粉色、黄色云覆盖。黄色云(区域3)云顶温度为-5℃~-10℃,云底温度为2℃~7℃,Re为7~15 μm,粒子较小且均匀,说明黄色云为粒子半径较小的低云,根据云顶温度和粒径大小判断为过冷水云,从图6(d)看出随着云顶升高粒径增长,主要发生凝结和碰并增长,过冷水云成片分布说明此区域过冷水丰富,为降水粒子发展提供有利条件。粉色云(区域1和区域4)云顶温度为-10℃~-15℃,云底温度约为0℃,Re为10~20 μm,相对黄色云温度更低同时粒子有效半径更大,从图6(b,e)看出随着云顶升高粒径增长,主要发生凝结和碰并增长、混合相增长。红色云(区域2)主要是从粉色云发展而来,云顶不均匀,云体发展密实,说明云内对流强烈,云顶温度为-30℃~-37℃,云底温度为-4℃,Re在15~40 μm,粒子分布不均,最大粒径可达40 μm,从图6(c)看出主要发生混合相增长、冰化增长,根据云顶温度和粒径大小判断云内主要粒径较大的冰相粒子,-15℃以上为冰化增长带,-5℃~-15℃为混合相增长带,说明红色云为冰晶化的对流云。由此可见,本次降水为典型的高低云作用的降水过程,高云在低云上发展起来,两层云连在一起,中间无干层,高云以冰晶化粒子为主,提供大量的冰晶,降落到含有丰富的过冷水低云中,相当于为低云增加了凝结核,形成“播种-供应”的降水机制,能够产生较大的降水,说明高云的引晶作用对降水产生重要作用。刘贵华等^[24]指出在中低云系配合高云的引晶作用有助于降水增加,降水更充分。洪延超等^[25]在数值模拟中也得到类似的结论,冰相粒子在过冷云区经过凝华和撞冻增长,降落到暖区融化后通过收集液态水而进一步增长,通过实验发现收集液态水对促进粒子增长有10%的贡献。

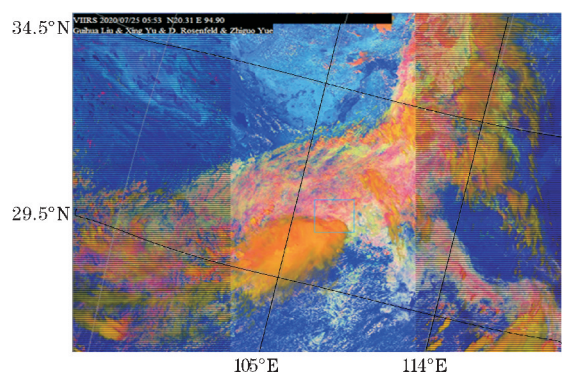


图4 2020年7月25日13:53 NPP/VIIRS多光谱RGB合成过境图(蓝色方框为重点关注区域)

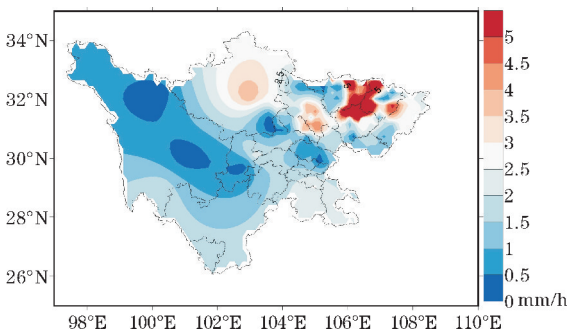


图5 2020年7月25日13:00-14:00降水实况图

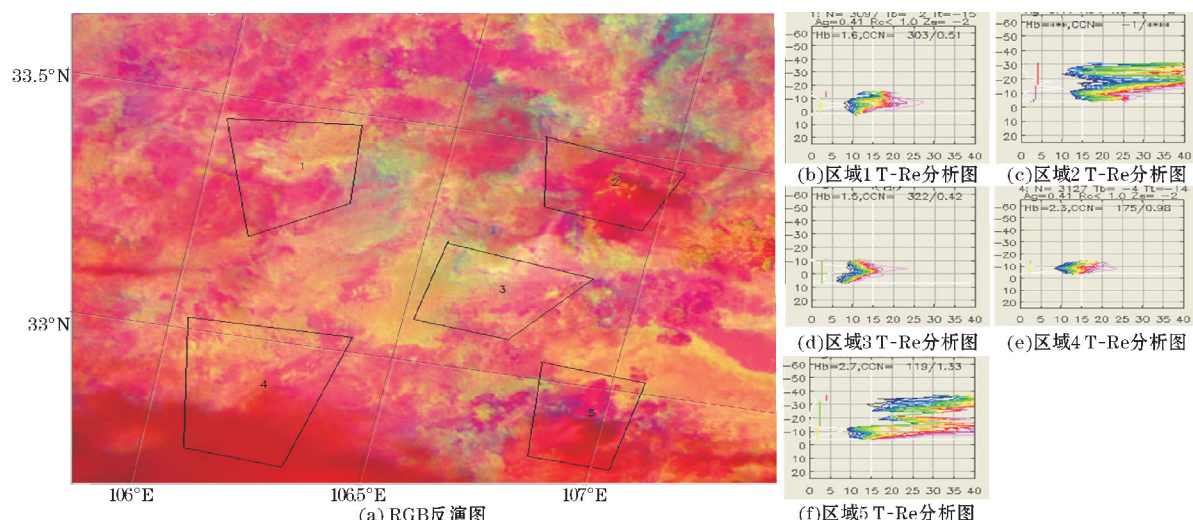


图6 2020年7月25日13:53 NPP极轨卫星过境时RGB反演图与数字区对应的T-Re分布图

3 结束语

采用 Rosenfeld 等提出的卫星反演方法,利用 NPP 卫星资料反演四川盆地夏季午后降水云的微物理特征。结果表明:通过 NPP/VIIRS 卫星资料反演可以清晰看到四川盆地夏季午后云发展状况,通过反演和多光谱分析,可以了解云降水微物理特征。四川盆地夏季午后产生强降水的云主要为对流云和大面积过冷水云、层积云,高低云配置较好,中间无干层,云顶温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -37\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $15 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$, 粒子分布不均,主要发生混合相增长和冰化增长, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上为冰化增长带;其中的层积云云顶温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $10 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$, 主要发生凝结和碰并增长、混合相增长;大面积过冷水云顶温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $7 \sim 15\text{ }\mu\text{m}$, 粒子小且均匀,过冷水云成片分布说明此区域过冷水丰富,为降水粒子发展提供有利条件。而夏季午后无降水发生时,会产生对流云、卷云、层积云、过冷水云等多种类型云,其中对流云发展密实但为独立存在,云顶温度为 $-31\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $20 \sim 40\text{ }\mu\text{m}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上存在一个深厚的冰相增长带;过冷水低云面积较小,云顶温度为 $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, Re 为 $8 \sim 17\text{ }\mu\text{m}$, 粒径随着高度升高而增长, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以上发生碰并增长, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以下发生凝结增长;高低云配置不好,对流云下没有大面积过冷水供应水汽,低云大滴和冰晶不足,造成地面降水较小或者无降水。

参考文献:

[1] 范思睿,王维佳. 四川盆地云和降水观测科学试验设计与实践[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 191-200.
[2] Liu Liping, Zhang Zhiqiang, Yu Danru, et al. Comparison of precipitation observations between principle prototype space-based cloud radar and ground-based radars[J]. Adv. Atmos. Sci., 2012,

29(6): 1318-1329.

[3] 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等. 云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 64-71.
[4] 吴举秀,魏鸣,周杰. 94 GHz 云雷达回波及测云能力分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 402-416.
[5] 吴翀,刘黎平,翟晓春. Ka 波段固态发射机体制云雷达和激光云高仪探测青藏高原夏季云底能力和效果对比分析[J]. 大气科学, 2017, 41(4): 659-672.
[6] 蔡森,欧建军,周毓荃,等. L 波段探空判别云区方法的研究[J]. 大气科学, 2014, 38(2): 213-222.
[7] 元鹏,郭学良,卢广献,等. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征征[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1365-1384.
[8] 张佃国,郭学良,付丹红,等. 2003 年 8-9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究[J]. 大气科学, 2007, 31: 597-610.
[9] 刘贵华,余兴,贾玲,等. 2009 年陕西春季层状云增雨卫星观测分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 699-704.
[10] 叶晶,李万彪,严卫. 利用 MODIS 数据反演多层云光学厚度和有效粒子半径[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 613-622.
[11] 汪会,郭学良. 青藏高原那曲地区一次深对流云垂直结构多源卫星和地基雷达观测对比分析[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 996-1012.
[12] 刘建军,陈葆德. 基于 CloudSat 卫星资料的青藏高原云系发生频率及其结构[J]. 高原气象, 2017, 36(3): 632-642.
[13] 孙鸿娉,李培仁,申东东,等. 夏季积层混合云降水的云特征参数演变及人工增雨可播性研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(3): 126-134.
[14] 范思睿,王维佳. 利用 FY-4A 卫星反演产品对

- 飞机增雨作业的分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(4): 60–66.
- [15] 范思睿, 王维佳. 一次增雨作业的 FY-4A 卫星反演分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 41–48.
- [16] Miller S D, Hawkins J D, Kent J, et al. NexSat: Previewing NPOESS /VIIRS Imagery Capabilities [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 7(4): 433–446.
- [17] 岳治国, 余兴, 刘贵华, 等. NPP/VIIRS 卫星反演青藏高原夏季对流云微物理特征[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 968–982.
- [18] 周敏强, 王云龙, 梁慧, 等. 青藏高原 Soumi-NPP 和 MODIS 积雪范围产品的对比分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 36–44.
- [19] 苏城林, 苏林, 陈良富, 等. NPPVIIRS 数据反演气溶胶光学厚度[J]. 遥感学报, 2015, 19(6): 977–982.
- [20] Rosenfeld D, Lensky I M. Spaceborne sensed insights into precipitation formation processes in continental and maritime cloud [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(11): 2457–2476.
- [21] Lensky I M, Rosenfeld D. The time-space exchangeability of satellite retrieved relations between cloud top temperature and particle effective radius [J]. AtmosChemPhys, 2006, 6(10): 2887–2894.
- [22] Freud E, Rosenfeld D, Andreae M O, et al. Robust relations between CCN and the vertical evolution of cloud drop size distribution in deep convective clouds [J]. AtmosChemPhys, 2008, 8(6): 1661–1675.
- [23] 刘贵华, 余兴, 戴进. 不同积云云微物理特征的卫星反演分析[J]. 南京信息工程大学学报, 2009, 32(1): 101–107.
- [24] 刘贵华, 余兴, 贾玲, 等. 2009 年陕西春季层状云增雨卫星观测分析[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 699–704.
- [25] 洪延超, 周非非. 层状云系人工增雨潜力评估研究[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 913–926.

Retrieval of Microphysical Properties of Summer Cloud Precipitation in Sichuan Basin based on NPP Satellitedata

FAN Sirui^{1,2,3}, WANG Weijia^{2,4}, LIU Guihua⁵, LIU Ping¹

(1. Weather Modification Office of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Atmosphere Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China; 4. Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 611133, China; 5. Meteorological Institute of Shanxi Province, Xian 710016, China)

Abstract: For studying the macro and micro characteristics of cloud precipitation in summer in the Sichuan Basin and the internal precipitation mechanism, the NPP satellite data was used to retrieve the microphysical characteristics of cloud precipitation in the Sichuan Basin, and the macro and microphysical characteristics of heavy and non-precipitation clouds in the summer afternoon in the Sichuan Basin were compared structure. The results show that the NPP/VIIRS satellite can clearly see development condition of summer afternoon clouds in the Sichuan Basin, which can understand cloud microphysical properties. Various types of clouds such as supercooled water clouds, convective clouds, stratocumulus clouds and cirrus clouds are generated in the Sichuan Basin in the summer afternoon. The temperature of the supercooled water cloud top is $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the particle radius R_e is $7\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$, and the particles are small and uniform; the temperature of the cloud top of the convective cloud is $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$, the particle radius R_e is $15\text{--}40\text{ }\mu\text{m}$, the particle distribution is uneven, and the mixed phase growth and glacial growth mainly occur. Above about $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, the glacial growth zone; stratification The cloud top temperature is $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, the particle effective radius R_e is $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$; the cirrus cloud is thin, the cloud top temperature is $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the cloud bottom temperature is $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the particle R_e is $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$. Whether the Sichuan Basin can produce heavy precipitation mainly depends on the configuration of high and low clouds and the area of supercooled water clouds. When the configuration of high and low clouds is not good, there is no large area of supercooled water clouds under convective clouds to supply water vapor, or there are insufficient large droplets in low clouds, which will cause little or no precipitation on the ground. When high clouds are mainly developed from middle and low clouds, the distribution of supercooled water clouds in patches indicates that the area is rich in supercooled water, which provides favorable conditions for particles to develop into raindrops.

Keywords: atmospheric physics; clouds and precipitation; NPP satellite retrieval; cloud microphysical retrieval; Sichuan basin; super-cooled liquid cloud