

FY2C/D 卫星反演云特性参数与地面雨滴谱降水观测初步分析

蔡 森^{1,2}, 周毓荃², 朱 彬¹

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要: 针对2008年4月11—12日一次北方层状云降水过程, 将 FY2C/D 静止卫星反演的云参数和地面同时段的雨滴谱仪的观测资料进行联合分析, 发现反演得到的一些特征云参数对地面降水有一定的指示意义: 一般降水发生前, 云系发展, 云顶抬升, 云顶温度和云黑体亮温都降低, 云光学厚度增大, 云参数先于地面降水变化, 两者大概相差2小时。其中, 云光学厚度与地面降水量和降水粒子数关系密切, 其相关性比云顶高度、云顶温度和云黑体亮温的相关性都好; 一般地面降水强, 光学厚度一定大, 若云层光学厚度较小, 即便云顶发展得很高, 地面几乎无降水或降水较小, 但云光学厚度大时, 地面降水强度并不一定都大, 可能降水粒子数浓度大, 地面多降毛毛雨。

关键词: 云参数; 光学厚度; 地面降水; 相关性

中图分类号: P456. 1; P412. 27

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 7148(2010)01 - 0001 - 06

引 言

云的宏微观物理结构对降水的形成发展过程起着重要的作用。FY - 2C 静止卫星是我国自主研制并于2005年6月1日正式投入运行的业务卫星, 该卫星获取的数据具有较高的时间频次, 通常1 h 一次资料, 6—9月的汛期加密至0. 5 h 一次, 2007年 FY - 2D 的发射使得卫星资料的时间间隔缩短至15 min, 十分有利于跟踪监测目标云系。

利用卫星的多通道辐射特性反演的云参数, 可以反映出云中微物理演变规律和热力学相态的变化。Rosenfeld 利用 NOAA - 11 卫星反演了云顶的有效粒子半径 (reff), 多次试验研究, 发现当 reff 为14 μm 时是产生降水的阈值^[1]。他还利用卫星反演的云粒子有效半径和热力学垂直廓线来探测强对流风暴, 研究播云促进降水和抑制冰雹的现象及微物理机制, 以及污染气溶胶对云降水的影响^[2-5]。周毓荃等^[6]利用我国 FY - 2C/D 静止卫星观测资料融合其他多种观测, 开发了一套包括云顶高度、云顶温度、过冷层厚度、云光学厚度、云粒子有效半径、云液水

路径等近10种云宏微观物理特征参数系列产品。陈英英等^[7-8]利用这些产品初步开展了同 MODIS 相关产品、雷达回波和地面降水等的初步研究, 发现光学厚度与地面降水强中心吻合较好。刘健等^[9]利用 NOAA 极轨卫星资料, 对中尺度强暴雨云团云光学厚度和地面小时雨量的对比分析表明, 地面雨量基本与云光学厚度呈正相关, 地面降水的大小与6 h 内云团光学厚度的大值区密切相关。

研究地面降水, 除常规的雨量观测外, 还可以使用雨滴谱仪等进行观测。Parsivel 雨滴谱仪使用以激光为基础的光学传感器测量降水, 传感器的发射部分产生一水平平直的光束, 接收部分把它转化成电子信号, 当降水粒子通过光束下落时信号将改变, 由 Parsivel 记录降水粒子的尺度和速度, 并通过一台装有配套软件 ASDO 的微机对降水粒子进行数据处理, 得出雨滴谱及雨滴特征量。国外的 Sandra^[10]利用 Parsivel 的观测资料, 对比分析了混合降水(雨和湿雪)、降雨和干雪3种情况下的粒子谱分布。Martin^[11]利用 Parsivel 测得的降雪粒子谱分布来估计实际的雷达反射率。宫福久等^[12]利用地面雨滴谱仪统

收稿日期: 2009 - 11 - 15; 修订日期: 2009 - 11 - 30
基金项目: 国家“十一五”科技支撑课题(2006BAC12B07); 中国气象局 2009 年新技术推广项目(CMATG2009MS09)资助
作者简介: 蔡森(1987—), 女, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 从事人工影响天气研究。E-mail: caibird133@163. com

计分析了东北冷涡天气系统下层状云、积层混合云和积雨云降雨的微物理特征、各微物理参数随时间的变化以及各参量间的相关性,发现3类云雨强主要决定于雨滴最大直径与数密度。班显秀等^[13]利用粒子激光探测仪和新一代天气雷达进行同步观测研究,建立了反射率因子和雷达回波强度与降雨强度和空中雨水含量的指数关系式。

以往的这些研究多基于极轨卫星的观测分析或地面降水的粒子谱特性,鲜有从云系发展变化到形成降水的时空演变方面分析云参数和地面降水特征的关系。本文试图通过一次层状云降水过程中的云参数演变特征和地面雨滴谱仪观测降水数据变化特征的研究,得出云和降水的时空演变规律,给精细的降水分析预测及人工影响天气条件的分析提供依据。

1 所用资料

1.1 云特性参数产品

本文利用周毓荃^[6]等研发的 FY-2C/D 卫星云参数反演系统,对2008年4月11日12时至12日12时山西一次降水过程的 FY2C/D 静止卫星资料进行反演,得到云黑体亮温、云顶高度、云顶温度和云光学厚度4个参数。反演产品的分辨率为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$,双星反演的时间间隔为 0.5 h 。其中,光学厚度是指沿辐射传输路径、单位截面上吸收和散射物质产生的总削弱,在数值上等于单位体积中所有颗粒的消光截面之和,在某种意义上很好地反映了云体的密实程度和含水量的多少。

1.2 雨滴谱观测

文中用的是安装在山西汾阳的 Parsivel 雨滴谱仪获得的 2008 年 4 月 11 日 12 时至 12 日 12 时雨强和粒子总数的观测数据。仪器的采样时间间隔为 10 s ,采样面积 52 cm^2 。

2 资料的时空对应选择

雨滴谱是间隔 10 s 的一个站点的观测信息,而卫星反演得到的云参数为 0.5 h 一次、间隔 5 km 的格点信息,雨滴谱观测点经纬度为 37.25°N 、 111.78°E ,与卫星反演像素点位置(37.25°N 、 111.80°E)最为接近。为了研究两者的相互关系,需要对两类资料进行时空匹配,时间以卫星观测资料为对比时间,空间对应的转换选择如图 1 所示,以

雨滴谱所在点为中心,取其周边最近的 9 个格点的各个云参数的算术平均值为该点上方的云参数值。

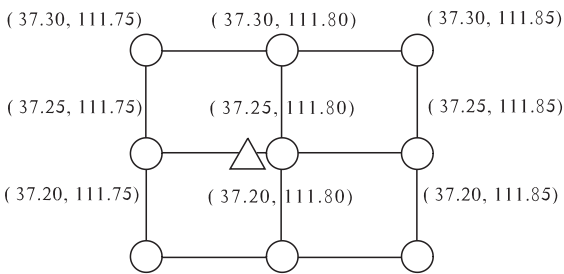


图 1 地面雨滴谱观测点与卫星反演云参数格点数据对应分析取值关系图
△代表雨滴谱位置,○代表卫星格点

3 云参数和地面雨滴谱观测演变特征分析

3.1 降水云团和地面雨量的演变趋势

从 FY2C/D 卫星云图上可以看出(图略),4 月 11 日 12 时起,有云团自西北向东南方向移向山西。13 时云团的边缘移至汾阳,随后云团不断发展东移。20 时前后分裂形成两个强中心,分别位于汾阳和临汾上空。23 时云团的大值区移至山西的东部。12 日 02 时云团的强中心完全移出山西,到河北境内。12 日 03 时起,又有一条狭长的云带自西向东往山西移动发展,云带呈东北西南走向。05 时云带进入临汾市,06 时到 08 时云带依次移过吕梁、汾阳、太原和阳泉市。09 时该狭长的云带完全移至山西境内,但此时已经开始衰弱,并于 12 时消亡。

图2给出4月11日12时—12日12时汾阳站逐小时降水量。

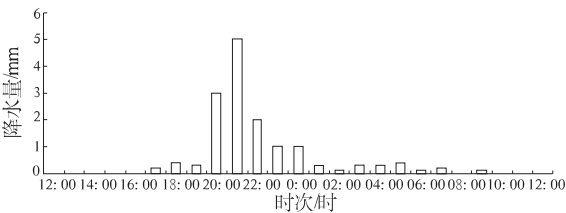


图 2 2008年4月11日12时—12日12时汾阳站逐小时降水量分布图

从图 2 可以看出,云团移至山西境内后,汾阳站 4 月 11 日 16 时起开始有降水,但雨量较小,小时雨量不到 1 mm 。19 时汾阳上空的云团充分发展成熟,地面降水也突然增强,20 到 21 时降水达到峰值,与其上空的云黑体亮温强中心相对应。随后强中心东移,地面降水也开始减弱,受较弱云团边缘的影响,12 日夜间汾阳持续弱降水,并于 12 日 06 时

渐止。08 时,另一条自西向东的狭长云带移至汾阳上空,但已经开始减弱,对应着又有一个很弱的降水过程,小时雨量仅为 0.1 mm。随后云带减弱,降水过程趋于结束。

3.2 云参数的演变特征

按照前面所述 9 点平均法,提取地面雨滴谱仪所在地上空的卫星反演云参数资料,做整个降水过程的各参数时间序列变化图(图 3)。

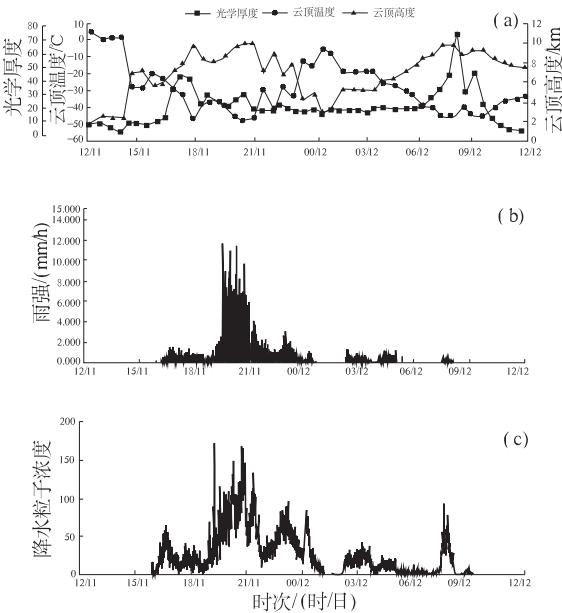


图 3 2008—04—11 过程卫星反演云参数和雨滴谱观测的雨强和粒子总数的时间序列

(a) 为 FY2C/D 卫星反演云参数折线图,(b) 为雨滴谱探测的雨强分布,(c) 为 10 s 的采样时间间隔内探测到的粒子总数时间序列;12 日夜间 00:30 和 01 时无卫星观测数据

从图 3(a) 上可以看出,降水发生前,云顶高度总体呈现抬升趋势。4 月 11 日 12 时起云顶开始升高,14 时达到 6.975 km,15 时云顶又降至 6 km,随即又继续抬升,并于 17 时左右达到 9.85 km。18 时云顶下降至 8 km,18:30 起云顶高度又继续增加,20 时增至 10 km 左右,并维持了一段时间。21:30 开始起云顶不断变化,但总体呈下降趋势,并于 12 日 00:30 降到最低值 2.8 km。此后云顶又缓慢抬升,于 07 时再次发展到 10 km 左右,且维持了 3 h 后略减至 7.4 km。云顶温度的变化趋势与云顶高度变化趋势相反,即云顶发展得越高,云顶温度越低。由图 3(a) 可以看到,14 时开始云光学厚度不断增加,并于 17:00 达到最大值,接下来的几个时次直至 12 日凌晨,光学厚度始终维持在 20 以上,略有波动。12 日 08 时左右光学厚度再次达到一个极值,此后

光学厚度不断减小。

3.3 降水观测的演变特征

这次降水过程从 2008 年 4 月 11 日 14:00 持续到 4 月 12 日 11:00,总降水量为 14.43 mm,在 10 s 间隔的采样时间段内,54 cm² 的采样面积上,最大降水强度为 11.651 mm/h,雨滴浓度最大值 0.3185 个/cm²·s。降水刚开始时是小雨,在 19 时后雨强和探测粒子总数都突然增大,两者都于 19:18 前后达到最大值。较强的降水持续了 2 个多小时,21 时左右开始减小,在 11 日 23 时和 12 日 00:30 左右又有一个雨强和雨滴数浓度的峰值出现。12 日 01—03 时降水强度变得很微弱并渐止。03 时起,又有阵性降水发生,但是雨强和雨滴数浓度都相对较小。而 12 日 07:26 至 08:13,降水粒子浓度较大,降水强度却很小(见图 3b、c)。

3.4 云参数和地面降水演变特征的对比分析

将降水特征曲线和云参数的演变曲线对比分析发现,从 11 日 14 时起,云顶温度一直低于 0 ℃,该降水过程是一次冷云降水过程。雨强和雨滴浓度的几个大值的时次分别为:4 月 11 日 16:30、19:00—21:00、23:00、12 日 00:30 和 02:30。分析云参数变化,发现云光学厚度、云顶高度和云顶温度等参量在 11 日 14:30、17:00—19:00、21:00、22:30 和 12 日 00:00 等时次的转折变化趋势与降水有很好的对应关系;每次降水增强之前,总有云顶高度、云光学厚度的不断增加和云顶温度降低。光学厚度还和雨滴数浓度密切相关,15:30 和 16:30 两个时次光学厚度的大值也对应着其后 17:30 和 18:30 雨滴数浓度的增大。值得注意的是,在 12 日 07 时左右,云顶高度和光学厚度再次达到一个极值,但是雨强却很小,而此时雨滴数浓度是一个峰值,说明地面降的可能为毛毛雨。此后云顶高度和光学厚度不断减小,云顶温度升高,地面降水也趋于结束。由此也可以看出,反演的云参数都是先于地面降水而变化,先是有云顶的抬升、光学厚度的增加,再有地面降水的产生,从时间上看地面降水发展变化一般较云参数的变化有 2 h 的滞后。

4 云参数和地面雨滴谱的统计特征分析

从以上分析可以初步看出,卫星反演的云参数与地面降水有一定的对应关系,即云参数的变化对地面降水的变化具有指示意义。为了进一步研究不同云参数同地面降水的关系,将此次降水过程分为几个阶段(见图 4),来讨论云参数和地面雨量的相

关性。

从前面的云场分析可知,本次过程中,云系从2008年4月11日12时到12日12时影响观测区域,地面雨滴谱取得的降水也经历了从无降水到降水发生和结束的3个阶段,在雨滴数浓度曲线上将降水细分,可分为降水发生前白天无降水时段(4月11日12:00—16:00),降水发展阶段(4月11日16:00—22:00),夜间降水减弱阶段(4月11日22:00—12日10:00),白天降水结束阶段(4月12日10:00—12:00)。由于卫星反演的云参数,其算法主要依赖卫星拥有的通道特性,对于FY2C云光学厚度主要是用0.65 μm的可见光通道来反演的,反演数据比较可靠,在夜间没有可见光通道时采用了亮温差替代方法反演得到云光学厚度,反演结果还有待检验。本研究主要讨论云参数同地面降水的关系,前面分析得知云参数演变较地面降水演变提前约2个时次,因此分别讨论白天精度较高时某时次的云参数特征及其与2个小时以后的地面降水之间的相关性。

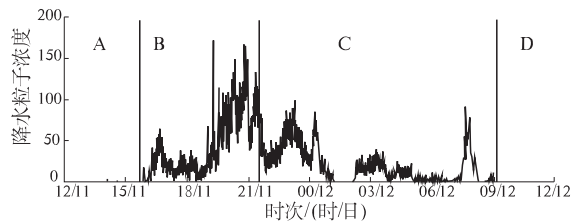


图 4 2008—04—11降水过程地面降水分段示意图
A 为降水发生前白天无降水时段,B 为白天降水发展阶段,
C 为夜间降水减弱阶段,D 为白天降水结束阶段

4.1 云发展但地面无降水发生时云参数特征

表1列出了降水发生前白天无降水时段和白天降水结束阶段卫星反演的云特性参数数值。从表1可以看出:4月12日09—10时降水前,反演的云顶低于3 km,云顶温度高于0℃。降水结束后,反演的云顶为7—8 km,云顶温度低于-30℃。降水前后的云黑体亮温比同一时次的云顶温度略低1℃左右。降水前云顶较低,云顶较暖。但值得注意的是,降水结束后,云顶还较高,仍然保持在8 km左右,相应的云黑体亮温和云顶温度都较低,但是地面却没有降水发生。分析发现,降水结束后云光学厚度与降水前一样,均小于11。可见,光学厚度对地面降水有更好的指示意义,光学厚度达到11可能是产生降水的阈值。即便云顶发展得较高,如果云光学厚度较小,地面也没有降水。

表 1 降水前后卫星反演的云参数数值

时次/ (时/日)	云光学厚度	云顶高度 /km	云顶温度 /℃	云黑体亮温 /℃
12:00/11	12.19	1.941667	5.019867	4.252967
12:30/11	11.17	2.616667	0.5548	-0.87843
13:00/11	8.175	2.416667	1.877767	1.084633
13:30/11	4.247	2.466667	1.547033	0.6621
14:00/11	10.84637	6.975	-28.2756	-29.7366
11:00/12	9.371167	8.033333	-35.4555	-36.683
11:30/12	7.2039	7.608333	-34.952	-36.5459
12:00/12	5.73585	7.416667	-33.7781	-34.7043

4.2 云发展地面有降水发生时云参数与地面降水的相关性分析

根据前面的分析,云参数的演变比地面降水提前两小时,所以对某时次的云参数值对应着2个时次以后的雨量来划分讨论。利用Qstat统计软件,对2008年4月11日14:30—19:30期间FY2C/D静止卫星反演的云参数与2 h后Parsivel测得的0.5 h降水量之间做一个简单相关性统计,根据相关系数的假设检验原则,如果相关系数的假设检验统计量 $P < 0.001$,则认为通过检验。

表2计算了0.5 h降水量与2个时次以前的各个云参数之间的相关系数,并给出了相关系数的假设检验统计量。光学厚度和两小时以后的0.5 h雨量的相关曲线如图5所示。

表 2 白天0.5 h降水量与2个小时前各云参数之间的统计关系

云参数	光学厚度	云顶高度	云顶温度	云黑体亮温
相关系数	0.8630	0.5431	-0.5632	-0.5663
假设检验概率	0.0006	0.0843	0.0712	0.0693

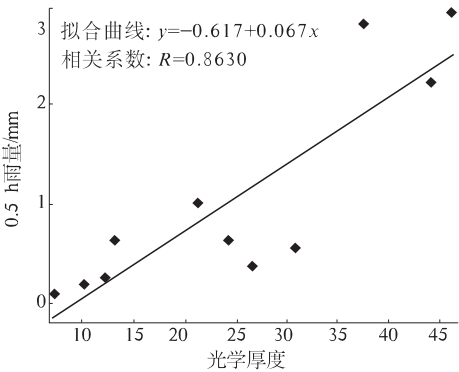


图 5 白天降水发展时反演的光学厚度与2 h后Parsivel测得的0.5 h雨量的相关曲线

从表2可以看出,2 h后的0.5 h雨量和与云光学厚度和云顶高度呈正相关,与云顶温度和云黑体

亮温呈负相关。但是云黑体亮温、云顶温度和云顶高度与降雨量的相关性较差,没有通过检验。光学厚度和 0.5 h 雨量的关系最为密切($r=0.8630$, $P<0.001$)。从光学厚度和两个小时以后的 0.5 h 雨量的相关曲线图上(图 5)可以看到,光学厚度与地面降水几乎呈线性相关,即光学厚度越大,地面降水越多。

前面没有讨论 4 月 12 日 08—10 时期间的云参数和雨量的对应关系。我们发现,08 时反演的光学厚度也是一个极大值,但是因为白天用可见光通道数据反演的光学厚度受到太阳高度角的影响,08 时实际的光学厚度可能要略小一些。对应的探测粒子总数也是一个峰值,但是雨强却很小。

5 总结和讨论

本文针对我国北方 2008 年 4 月 11—12 日的一次层状云降水过程,利用 FY2C/D 卫星反演的云参数和雨滴谱观测,研究了云参数和地面降水的关系,发现:

(1) 反演得到的各云参数对地面降水有一定的指示意义,一般降水发生前,云顶不断抬升,云顶温度和云黑体亮温都较低,云光学厚度增大。强降水发生前,云顶超过 10 km,云顶温度和云黑体亮温都低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。云参数先于地面降水变化,两者大概相差 2 小时。

(2) 云光学厚度与地面降水粒子数浓度关系密切,呈正相关。一般云光学厚度数值变化,地面降水粒子数也相应增大或减小。光学厚度达到峰值两个小时以后,地面雨滴数浓度也会达到峰值。云的光学厚度与地面降水的相关性比云顶高度、云顶温度和云黑体亮温更好。

(3) 一般地面降水强,云光学厚度也大。若云层光学厚度较小(低于 10),即便云顶发展得很高,地面也几乎无降水或降水较小;但云光学厚度大时,地面降水强度并不一定大,有可能降水粒子数浓度大,地面多降毛毛雨。云光学厚度和地面降水的关系还同云体的其他结构有关。

本文的研究尚很初步,一方面,云参数的反演还需不断完善;另一方面,实际云降水过程受到云系整体演变趋势和各层风速风向的影响,本文云和地面

降水分析时采用的时空匹配 9 点平均法是否最合适,还需进一步验证。总之,不同天气背景、不同云系云状条件下,云参数与地面降水的相关关系是一个很有意义的问题,进一步深入研究,对利用卫星云参数进行降水的临近精细预报将十分有益。

致谢:感谢山西省人影办提供了雨滴谱观测数据,感谢解放军理工大学的濮江平教授在雨滴谱资料处理分析方面的指导!

参考文献

- [1] Rosenfeld D, Gutman G. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. *Atmospheric Research*, 1994, 34: 259–283.
- [2] Rosenfeld D, Woodley W L, Lerner A, et al. Satellite detection of severe convective storms by their retrieved vertical profiles of cloud particle effective radius and thermodynamic phase[J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, D04208, doi:10.1029/2007JD008600.
- [3] Rosenfeld D. New insights to cloud seeding for enhancing precipitation and for hail suppression[J]. *The Journal of Weather Modification*, 2007, 39: 61–69.
- [4] Rosenfeld D, Lensky I M, Peterson J, et al. Potential impacts of air pollution aerosols on precipitation in Australia[J]. *Clean Air and Environmental Quality*, 2006, 40(2): 43–49.
- [5] Rosenfeld D, Woodley W L, Krauss T W, et al. The Structure of Severe Convective Storms in Mendoza, Argentina[J]. *J. Appl. Meteor.*, 2006, 45: 1261–1281.
- [6] 周毓荃, 陈英英, 李娟, 等. 用 FY-2C/D 卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验[J]. *气象*, 2008, 34(12): 27–35.
- [7] 陈英英, 周毓荃, 毛节泰, 等. 利用 FY-2C 静止卫星资料反演云粒子有效半径的试验研究[J]. *气象*, 2007, 33(4): 29–34.
- [8] 陈英英, 唐仁茂, 周毓荃, 等. FY-2C/D 卫星微物理特性参数产品在地面降水分析中的应用[J]. *气象*, 2009, 35(2): 15–18.
- [9] 刘健, 张文建, 朱元竞, 等. 中尺度强暴雨云团云特征的多种卫星资料综合分析[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(2): 158–164.
- [10] Sandra E Y. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow[J]. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2006, 45: 1450–1464.
- [11] Martin L M. Estimation of the equivalent radar reflectivity factor from measured snow size spectra[J]. *American meteorological society*, 2001(4): 843–849.
- [12] 宫福久, 何友江. 东北冷涡天气系统的雨滴谱特征[J]. *气象科学*, 2007, 27(4): 365–373.
- [13] 班显秀, 袁健, 王永亮. 沈阳一次西风槽降水过程的雨滴谱特征分析[J]. *沈阳农业大学学报*, 2008, 39(2): 145–151.

Analysis of Cloud Characteristic Parameters Retrieved by FY2C/D Satellite and the Parsivel Observation on Surface

Cai Miao^{1,2}, Zhou Yuquan², Zhu Bin¹

(1. School of Atmospheric Physics, NUIST, Nanjing 210044, China

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: For the process of stratocumulus precipitation in north China from 11 to 12 April, 2008, the cloud parameters products retrieved by FY2C/D are combined with the Parsivel observation at the same period. We found that, the cloud characteristic parameters product retrieved indicated the precipitation on the surface. Generally speaking, before the rainfall, the cloud developed well, the top of cloud rose, both the temperature near the top of cloud and t_{bb} reduced, and cloud optical thickness got larger. Cloud optical thickness changed about two hours earlier than precipitation. Cloud optical thickness was more related to surface precipitation and the number of precipitation particles. Compared to the top of cloud, the temperature near the top of cloud and t_{bb} , cloud optical thickness had a better relationship with surface precipitation. Where surface precipitation is strong, cloud optical thickness must be large. Surface precipitation didn't occur or occurred small if cloud optical thickness was very small, although cloud rose high enough. However, cloud optical thickness was large, surface precipitation is not always strong. The concentration of precipitation particles number may be big and drizzle often occurs.

Key words: cloud parameter; optical thickness; surface precipitation; relationship