

周毓荃,蔡淼,欧建军,等. 2011. 云特征参数与降水相关性的研究[J]. 大气科学学报, 34(6): 641-652.

Zhou Yu-quan, Cai Miao, Ou Jian-jun, et al. 2011. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation [J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 641-652.

云特征参数与降水相关性的研究

周毓荃¹, 蔡淼^{1,2}, 欧建军³, 蔡兆鑫², 石爱丽¹

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 3. 上海海洋气象台, 上海 201300)

摘要: 利用 FY2C 卫星和探空反演得到的云结构特征参数, 结合地面降水, 研究了云顶高度、光学厚度、云粒子有效半径和云厚度等云结构参数与降水的关系, 并分类研究了层状云和对流云在不同降水强度情况下, 云参数的频数分布规律及其与降水的关系。结果表明: 通常云厚大于 5 km、云底较低、云粒子有效半径较大时, 地面易出现降水, 若云顶高于 10 km、云光学厚度大于 20 且云中无夹层或夹层稀薄时, 地面雨强多大于 1 mm/h; 对于层状云降水, 当云光学厚度大于 17 时, 地面出现降水的概率较大, 随光学厚度值增加, 地面雨强呈增大趋势; 对于对流云降水, 云顶高度和光学厚度相关性较好, 云光学厚度大于 17 且云顶高于 7 km 时, 地面出现降水的概率较大, 当光学厚度大于 20 时, 地面雨强明显增大; 层状云和对流云的降水概率均随云顶高度和光学厚度的增加而增大, 降水概率与云光学厚度的相关性更为密切, 光学厚度小于 10 的云很难产生降水, 而云光学厚度大于 20 时, 层状云和对流云的降水概率都会显著增加; 综合云体的高度、厚度和云光学厚度等云参量的组合特征, 对分析判断地面降水落区和降水强度更加有效。

关键词: 云特征参数; 降水; 相关性

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2011)06-0641-12

Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation

ZHOU Yu-quan¹, CAI Miao^{1,2}, OU Jian-jun³, CAI Zhao-xin², SHI Ai-li¹

(1. China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. Shanghai Marine Observatory, Shanghai 201300, China)

Abstract: Based on the cloud structural characteristic parameters retrieved by FY2C satellite and radio sounding data, combined with precipitation on ground, the relationship between cloud parameters (including cloud top height, optical thickness, particle effective radius, depth of cloud, etc) and precipitation was studied. The relationship between frequency distribution of cloud parameters and precipitation during stratiform cloud precipitation process and convective cloud precipitation process was researched further. Results show that precipitation is usually easy on the ground when cloud depth is thicker than 5 km, cloud base is low, and effective cloud particle radius is large. When cloud top height is greater than 10 km, optical thickness exceeds 20, and there is no or very thin interlayer in cloud, the surface precipitation intensity is usually more than 1 mm/h. For the stratiform cloud precipitation, if cloud optical thickness value exceeds 17, the probability of precipitation on ground will be higher. With the increase of optical thickness, surface rainfall intensity shows an increase tendency. For the convective cloud precipitation, there is a good correlation between cloud top height and optical thickness. While optical thickness value exceeds 17

收稿日期: 2011-08-10; 改回日期: 2011-09-28

基金项目: 中国气象局关键技术集成与应用项目(CMAGJ2011M71); 中国气象科学研究院基本科研资金(2011Y005)

作者简介: 周毓荃(1962—), 女, 河南漯河人, 博士, 正研级高工, 研究方向为云降水物理、人工影响天气和遥感反演分析, zhouyq05@163.com.

and cloud top is higher than 7 km, the probability of precipitation on the ground is greater. If the cloud optical thickness exceeds 20, surface precipitation intensity will increase significantly. Both the precipitation probability of stratiform cloud and convective cloud increases with cloud top height and optical thickness. The probability of precipitation is more related to optical thickness. Clouds of optical thickness value less than 10 are difficult to precipitate. If cloud optical thickness exceeds 20, precipitation probability of stratiform clouds and convective clouds will increase evidently. Comprehensive analysis of cloud top height, cloud thickness, optical thickness and other cloud parameters could be more effective to determine precipitation region and intensity on the ground.

Key words: cloud characteristic parameters; precipitation; correlation

0 引言

云的结构特征与云辐射特性、云降水条件、降水机制、降水效率及人工增雨潜力等紧密相关。不同云系的云结构特征有很大的差别(黄美元等, 2003; 邱金恒等, 2003; 毛节泰和郑国光, 2006)。

国内外关于云特征参数与降水关系的研究, 已有一些进展。刘健等(2007)研究了 FY-4D 和 NO-AA 极轨卫星反演得到的云光学厚度和地面降水数据, 发现地面雨量基本与云光学厚度呈正相关关系, 即: 地面观测不到降水, 对应云的光学厚度很小; 地面雨量大, 对应的云光学厚度较大。张杰等(2006)分析了 MODIS 云参数与地面降雨量的关系, 结果表明, 祁连山区产生较大降水的云粒子有效半径在 $6 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间, 云光学厚度在 $8 \sim 20$ 之间。Rosenfeld and Gutman(1994)研究了 NOAA 卫星反演的云粒子有效半径与降水的关系, 提出有效半径大于 $14 \mu\text{m}$ 是云中产生降水的阈值。

降水的估测非常重要。郑媛媛等(2004)、王晨曦等(2010)研究了云顶温度与降水的关系; 卢乃锰和吴蓉璋(1997)统计了云顶温度与降水强度的对应关系, 并将卫星观测的云顶温度和地面雨量资料相结合, 优化了对降水区域的估测。兰红平等(2000)利用自动站网资料和 GMS-5 红外卫星资料, 得到小区域的对流云顶亮温与降水强度的统计关系, 建立了利用云顶亮温变化进行自动短时估测小区域对流云团降雨强度的方法。

为获得云系结构的连续变化, 周毓荃等(2008)利用风云静止卫星的观测资料, 融合其他多种观测资料, 反演了云顶高度、云顶温度、云光学厚度、云粒子有效半径等近 10 种云宏微观物理特征参数。陈英英等(2007, 2009)利用这些云参数产品, 对比分析了降水过程中雷达回波和小时雨量, 发现反演的云光学厚度与地面强降水中心能够较好地吻合, 云液水路径的大值区与地面强降水中心的位置基本一

致, 云液水路径的大小与地面雨量的大小呈正相关关系。蔡森等(2010, 2011)分析了层状云降水过程和对流云降水过程的云参数与降水的关系, 发现反演的云光学厚度与降水关系密切, 云光学厚度等云参数跃变先于地面降水 $1 \sim 2 \text{ h}$ 。廖向花和周毓荃(2010)分析了重庆一次冰雹强对流过程的云微物理参量变化, 发现降雹时云粒子有效半径普遍较大。除了卫星反演云参数以外, 周毓荃和欧建军(2010)提出了利用探空秒数据分析云层的方法, 并用 CloudSat 云卫星观测资料进行了对比验证, 从而获得云中垂直分层特征。

这些研究, 或是利用极轨卫星反演的云参数研究云与降水的关系, 或是利用静止卫星反演的云参数进行云降水关系的个例分析。利用探空资料虽然可以获得云层垂直分层结构, 但云结构参数与降水的关系并不清楚。基于这些现状, 本文综合利用 FY2C 卫星反演云参数和探空云分析方法, 针对 2008 年 5 月 25 日—12 月 21 日期间安徽省区云综合观测资料, 统计分析不同云结构特征参数与降水的关系, 进而探讨不同降水云系的云参数与雨强的对应关系, 为认识云降水发展演变规律、优化定量估测降水技术、识别人工增雨播云条件和效果等提供帮助。

1 资料介绍

主要利用 2008 年 5 月 25 日—12 月 21 日安徽省区的云参数观测反演资料和地面小时加密雨量观测资料。其中, FY2C 卫星反演的云特征参数包括: 云顶高度 (Z_{top})、云顶温度 (T_{top})、云光学厚度 ($O_{\text{optical thickness}}$) 和云粒子有效半径 (R_e), 反演时段为每日 08—20 时, 反演方法见周毓荃等(2008); 加密探空观测分析云层垂直结构, 得到的云结构参数包括: 云顶高度 (C_{top})、云底到云顶的空间总厚度 (C_{thick} , 简称云厚) 和剔除夹层后的云层累积净厚度 (C_{thick} , 简称累积净云厚), 观测时间为每日 08 时、

14时、20时,方法见周毓荃和欧建军(2010)。各物理量的定义见表1。

表1 FY-2C 卫星和探空反演的云特征参数

Table 1 Cloud characteristic parameters retrieved by FY2C satellite and radio sounding

名称	定义
云顶高度	云顶相对地面的距离,单位为 km
云顶温度	云顶所在高度的温度,单位为℃
云光学厚度	云滴消光系数在整个路径上的总和,为无量纲参数
云粒子有效半径	云粒子的半径三次方总和同半径二次方之比,单位为 μm
云厚	云顶相对云底的距离,单位为 km
累积净云厚	剔除夹层之后的云层累加的厚度,单位为 km

2 数据处理和统计分类方法

2.1 云参数和地面降水数据时空匹配处理

风云卫星反演得到的云参数产品,是空间分辨率为 5 km 的格点数据。为了进行云参数与地面降水的时空匹配统计,在空间上,以观测点经纬度为中心,取其周边最近的 9 个格点上相应的云参数的算术平均值,作为该点对应的云参数值;在时间上,取同一时次的探空和卫星反演的云参数值,与其后一个时次的小时雨量观测值进行对比分析。

2.2 统计分类

2.2.1 降水分类

根据雨强(r ,每小时降水量;单位: mm/h)大小,将降水分为:无降水、弱降水、一般降水和强降水四类。文中规定:无降水, r 为 0 mm/h;弱降水, $r < 1$ mm/h;一般降水, $1 \text{ mm/h} \leq r < 10$ mm/h;强降水, $r \geq 10$ mm/h。

表2 各类云特征参数数值分档规定

Table 2 Bracket regulations of cloud characteristic parameters

分档	FY2C 卫星反演云参数				探空反演云参数		
	云顶高度/km	云顶温度/℃	云光学厚度	云粒子有效半径/ μm	云顶高度/km	云厚/km	累积净云厚/km
1	0~2.5	0以上	0~10	0~10	0~2.5	0~2	0~2
2	2.5~5	-15~0	10~20	10~20	2.5~5	2~4	2~4
3	5~7.5	-30~-15	20~30	20~30	5~7.5	4~6	4~6
4	7.5~10	-45~-30	30~40	30~40	7.5~10	6~8	6~8
5	10以上	-45以下	40以上	40以上	10以上	8以上	8以上

2.2.2 云特征参数分档

将各类云特征参数按数值大小范围进行分档,其分档规定见表2,以统计云参数在各档的出现频数。

2.2.3 统计样本及降水概率

为统计方便,规定某时次、某站点对应的数据集为一个统计样本,包括卫星和探空反演的各类云参数值和地面雨强观测值。定义降水概率为降水样本数在总样本中所占的比率。

2.2.4 降水分类

根据云系特征和地面降水特性分层状云降水过程和对流云降水过程两类分别进行统计。其中,层状云降水为大范围的层状云产生的稳定和持续性降水,降水均匀,水平分布范围广,持续时间长;对流云降水为对流云产生的阵性降水,降水不均匀,降水强度大。

3 各类云参数与降水的关系

利用2008年5月25日—12月21日安徽省寿县站点卫星和探空反演得到的各类云结构特征参量,结合地面降水观测,进行云结构特征参数和降水的统计分析。卫星观测时段内共有1231个样本,包括1143个无降水样本和88个降水样本;探空观测时段内共有541个样本,包括512个无降水样本和29个降水样本。

3.1 卫星反演云参数的频数分布特征及其与降水的关系

图1a—d分别给出了寿县FY2C卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚度和粒子有效半径的频数分布。为进一步了解各类云参数的不同数值大小与降水的关系,按照表2给出的云参数数值分档,计算得出各档云参数的降水概率,结果见表3。

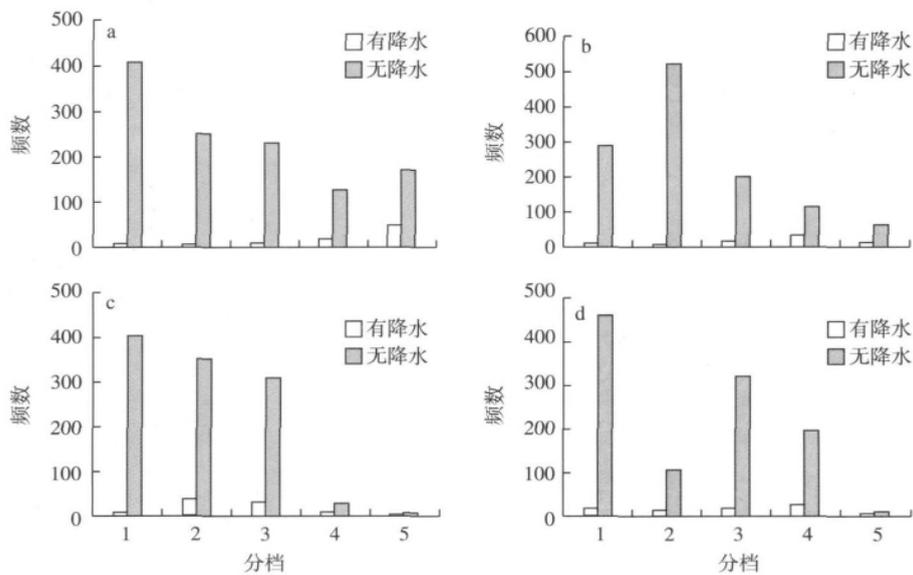


图 1 2008 年 5 月 25 日—12 月 21 日 08—20 时卫星反演云参数的频数分布 a. 云顶高度; b. 云顶温度; c. 云光学厚度; d. 粒子有效半径

Fig. 1 Frequency distribution of cloud parameters retrieved by satellite during 08:00—20:00 BST from 25 May to 21 December 2008 a. cloud top height; b. cloud top temperature; c. cloud optical thickness; d. particles effective radius

表 3 卫星反演云参数的各档降水概率

Table 3 Probability of precipitation in different brackets of cloud parameters retrieved by satellite %

	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
云顶高度	1	3	4	12	22
云顶温度	3	2	9	23	18
云光学厚度	2	9	9	26	33
粒子有效半径	4	12	5	12	29

由图 1 和表 3 可知,在整个观测时段内,寿县上空有云的样本较多,但降水样本非常少。

无降水时,云顶高度和云顶温度值在 5 个分档段的出现频数基本随云顶高度增加和云顶温度降低,呈递减趋势,但在云顶高度大于 10 km 时频数较大(可能与该档取值太宽有关)。无降水样本数随云光学厚度增大呈单调递减分布,大于 30(第 4、5 两档)的样本极少。粒子有效半径呈双峰型分布,峰值分别处于 0~10 μm 和 20~30 μm 范围档。

降水时,各云参数的分布有明显变化。降水样本数和降水概率随云顶高度增加和云顶温度降低,均呈增大趋势,在云顶高度大于 7.5 km 和云顶温度小于 -30°C 时(第 4 档),降水概率跃增。降水样本数随云光学厚度增大呈单峰型分布,峰值在 10~20 之间(第 2 档),降水概率随云光学厚度值增加而增大,在光学厚度值为 10 和 30 两处变化显著,小于

10 时地面几乎观测不到降水,而大于 30 时降水概率明显增大。降水云的粒子有效半径在 0~40 μm 之间分布较均匀,降水概率随粒子有效半径数值增大总体呈增加趋势,大于 40 μm 的样本虽少,但该档降水概率最高。

3.2 探空分析云厚度频数分布特征及其同降水的关系

图 2a—c 分别给出了由寿县探空云分析得到的有降水 and 无降水时云顶高度(C_{top})、云厚(C_{thick})和累积净云厚(C_{thick})的频数分布。表 4 给出了各类云参数在不同分档下的降水概率。

表 4 探空反演云空间厚度的各档降水概率

Table 4 Probability of precipitation in different brackets of cloud physical thickness retrieved by radio sounding %

	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
云顶高度	1	3	7	6	8
云底到云顶的厚度	1	2	3	7	9
去除夹层的净云厚	1	1	10	13	31

由图 2 和表 4 可知,无降水时,3 个云厚参量的特征值在第 1 档所占比例均较多,说明薄云不容易产生降水;云顶很高(云顶高度大于 7.5 km),云层空间很厚(云厚大于 6 km)时,地面无降水的样本数也很多。去除夹层后的累积净云厚与其余两个参量

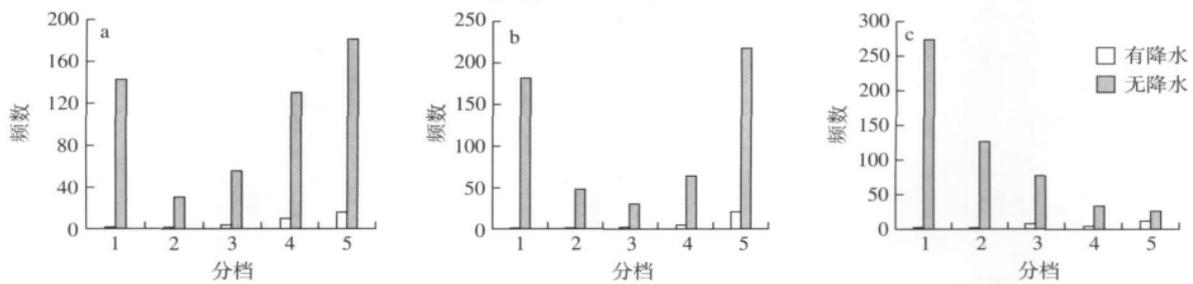


图2 2008年5月25日—12月21日08—20时(包括08时、14时、20时)探空反演的云特征参数频数分布 a. 云顶高度; b. 云厚; c. 累积净云厚

Fig. 2 Frequency distribution of cloud parameters retrieved by radio sounding during 08:00—20:00 BST from 25 May to 21 December 2008 a. cloud top height; b. cloud thickness; c. cumulated cloud net thickness

分布明显不同(图2c),净云厚在2 km以下的频数较高,但无降水样本数随厚度增加而迅速减少。

有降水时,样本数及降水概率随3类云厚度参数的增加,均呈增大趋势;其中,降水概率与净云厚关系密切,净云厚小于4 km(第1、2档)时,地面几乎观测不到降水,净云厚大于8 km(第5档)时,降水概率跃增,可达31%;但云顶高度和云底到云顶的厚度在各档下的降水概率都较小,即便在最高的云顶和最大的云厚下(第5档),降水概率也不到10%。说明云垂直结构及云中夹层的厚度对降水影响很大,云顶发展很高时,若云中有较厚的夹层,也不容易形成降水;相反,密实无夹层的云里可能有降水形成。

3.3 不同云空间厚度、云光学厚度与降水的相关性

不同降水强度下,不同云顶高度、云厚度与云光学厚度的分布见图3a—d(图的横坐标均为卫星反演的云光学厚度,纵坐标分别为卫星反演的云顶高度,探空云分析得到的云顶高度、云厚和累积净云厚;不同符号代表不同强度降水)。

探空观测时段内,寿县共有541个样本,包括512个无降水样本和29个降水样本。其中: $r < 1$ mm/h的弱降水样本数为19, $1 \text{ mm/h} \leq r < 10$ mm/h的一般降水样本数为7, $r \geq 10$ mm/h的强降水样本数为3。

由图3可见,绝大部分降水样本的云顶高度和云层厚度大于5 km,云光学厚度大于10。出现强降水时,云光学厚度均大于20,卫星反演的云顶高度(图3a)均大于10 km,探空反演的云顶高度(图3b)和云厚(图3c)较为接近,累积净云厚(图3d)比前两者略小,表明强降水时云底较低,云中夹层较薄,云光学厚度较大。对于一般降水,光学厚度在15~

35之间,卫星反演的云顶高度在7~12 km范围内,探空观测的云顶高度和云空间厚度相差很小,说明降水时云底也很低。对于 $r < 1$ mm/h的弱降水,卫星反演的云顶高度小于3 km的低云也能产生,很可能是暖雨降水。值得注意的是,云顶很高时,如果光学厚度较小,则地面通常观测不到降水,或者降水很弱。

按雨强分布对图3a—d进行分区。在图3a中,将所有样本划分为3个区域,分别计算每个区域内的降水概率。可得,卫星反演的云顶高度在10~16 km范围,光学厚度值在20~34范围时(即实线框内区域),降水概率较大,约为38%,以雨强大于等于1 mm/h的降水为主。云顶高度在5~10 km之间,光学厚度在8~30的范围内时(虚线框内区域),降水概率略小,约为13%,在该区域内,雨强大于1 mm/h的样本明显减少,弱降水较多。图中其他区域的降水概率比前两个区域显著偏小,仅为4%,且地面只能观测到弱降水。

将图3b、c和d也划分为3个区域,分别计算各区域内的降水概率。其中,实线框内的降水概率均较大,数值分别为37%、32%和47%,发生较强降水的可能性也较大。虚线框区域内的降水概率和较强降水发生概率都小于实线框区域,降水概率数值分别为13%、13%和11%。其他区域内,降水概率最低,分别为3%、3%和4%,雨强均小于1 mm/h。在图3a—d中,不同区域的云光学厚度取值范围基本相同,云厚度的参量取值范围略有不同。综上所述,地面降水时,云底通常较低,云顶和云厚通常大于5 km,云光学厚度多大于10。发生强降水时,云顶高度、云空间厚度和累积净云厚等云厚度参量均大于10 km,光学厚度都大于20,云层密实。

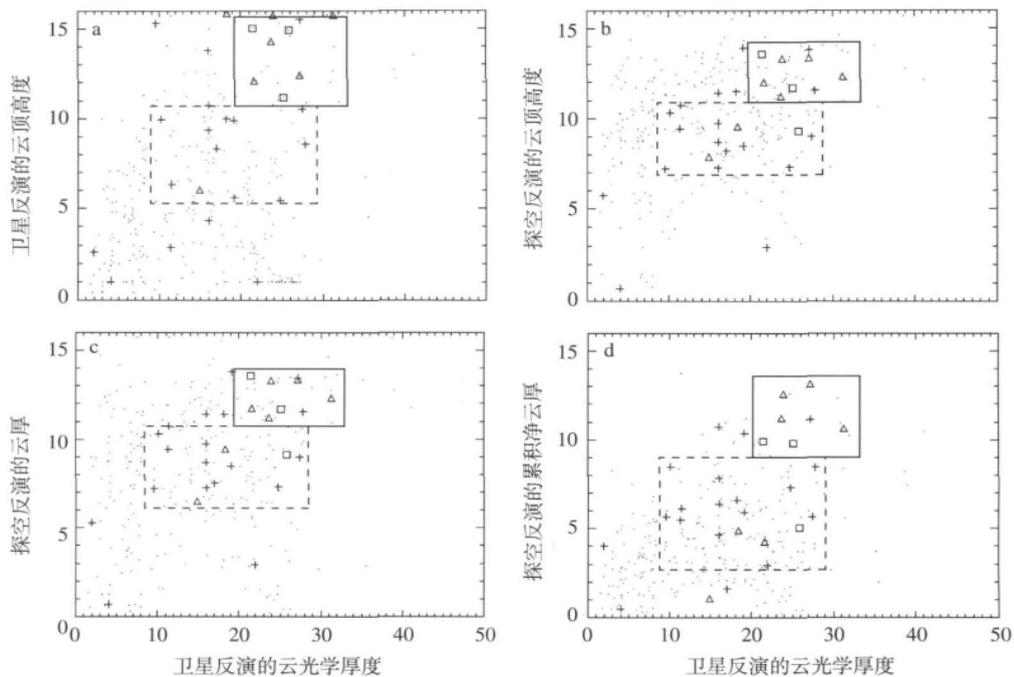


图 3 不同云参数组合时,各类雨强的样本分布(图 a、b、c、d 的横坐标均为卫星反演的云光学厚度,纵坐标分别为卫星反演的云顶高度、探空云反演的云顶高度、云厚和累积净云厚;•表示无降水,+表示 $r < 1$ mm/h, Δ 表示 $1 \text{ mm/h} \leq r < 10 \text{ mm/h}$, \square 表示 $r \geq 10 \text{ mm/h}$;实线框和虚线框表示降水区域边界)

Fig. 3 Distribution of various precipitation intensity samples in different cloud parameters combination (In Fig. 3a, b, c, and d, the horizontal axis is all optical thickness retrieved by FY2C satellite, and the vertical axis is cloud top height retrieved by FY2C, cloud top height, cloud thickness and cumulated cloud net thickness retrieved by radio sounding, respectively. • stands for no precipitation, + $r < 1$ mm/h, Δ $1 \text{ mm/h} \leq r < 10 \text{ mm/h}$, and \square $r \geq 10 \text{ mm/h}$. The solid and dotted boxes stand for different precipitation regions)

4 层状云和对流云的云参数和降水的相关性分析

为了系统研究层状云和对流云不同降水过程中,云特性参数与降水关系的差异,根据前面的降水分类,选取安徽省的几次层状云降水过程(时间分别为 2008 年 6 月 21 日、7 月 29—31 日、8 月 15—17 日、10 月 21 日、11 月 6—7 日和 11 月 23 日,全省有 192 个雨量站点,共 5 734 个降水样本和 10 444 个无降水样本),同时选取安徽省的几次对流云降水过程(时间分别为 2008 年 6 月 17 日、7 月 6 日、7 月 11 日、7 月 22 日和 7 月 23 日,共 1 574 个降水样本和 3 905 个无降水样本)。云光学厚度参数主要利用卫星可见光通道数据进行反演,受可见光通道的限制,主要在白天有观测数据,为此取白天卫星反演最优时段(11—14 时)的云参数值进行区域的统计和对比分析。

4.1 层状云降水的云参数频数分布特征及其同降水的关系

对层状云降水过程,分别统计有降水 and 无降水时 FY2C 卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚度和粒子有效半径的频数分布,结果见图 4a—d。可见,地面无降水时,云顶高度在 0 ~ 10 km(第 1—4 档)之间分布较均匀(图 4a),高于 10 km(第 5 档)的样本数略多;云顶温度和光学厚度的频数呈单峰型分布,峰值在第 2 档;无降水样本数随粒子有效半径数值增大迅速减少,大于 40 μm 的样本数极少。有降水时,降水样本数随云顶高度增加递增,云顶高度普遍大于 2.5 km(第 2—4 档);云顶温度和光学厚度仍呈单峰型分布,其中云顶温度的峰值位于 $-30 \sim -45$ $^{\circ}\text{C}$ 范围(第 4 档),云光学厚度的峰值位于 10 ~ 20(第 2 档)之间;降水样本数随粒子有效半径值增大仍单调递减,大于 40 μm 的降水样本数极少。

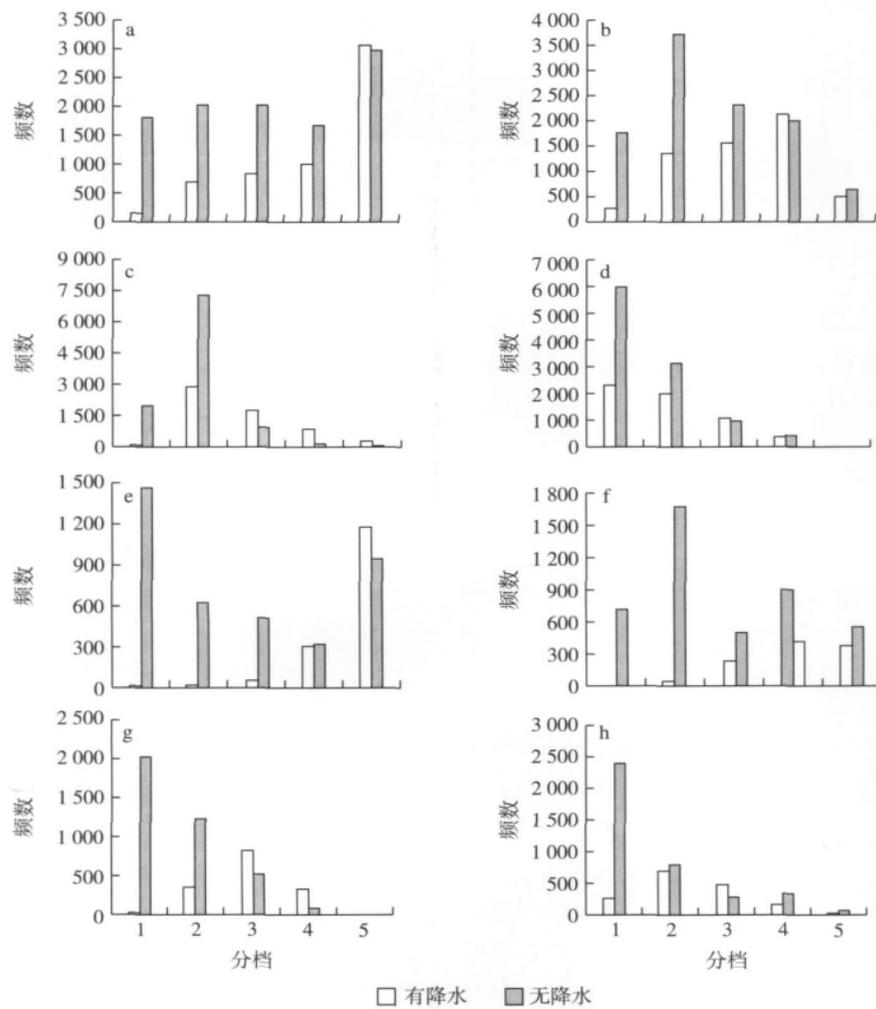


图 4 层状云降水(a,b,c,d)和对流云降水(e,f,g,h)的卫星反演云参数频数分布
a,e. 云顶高度; b,f. 云顶温度; c,g. 云光学厚度; d,h. 粒子有效半径

Fig. 4 Frequency distribution of cloud parameters of stratiform cloud and convective cloud precipitation retrieved by satellite a, d. cloud top height; b, e. cloud top temperature; c, f. cloud optical thickness; d, h. particles effective radius

为进一步了解各类云参数不同数值大小与降水的关系,统计了各档云参数的降水概率,见表 5。由表 5 可见,降水概率随着云顶高度和光学厚度增大而单调递增;云顶温度变低时,降水概率总体呈增加趋势;层状云中暖雨过程(第 1—2 档云顶温度)和冰相过程(第 3—5 档云顶温度)都能形成降水,但冰相过程的降水概率高于暖雨过程;云顶低于 2.5 km 时,降水概率仅为 8%,若云顶高于 10 km,降水概率可达 51%;云光学厚度与降水的关系更为密切,小于 10 时几乎无降水,若云光学厚度超过 20 (第 3—5 档),则降水概率可增加到 60% 以上,大于 40 (第 5 档)时可达 91%;降水概率随粒子有效半径

表 5 层状云降水的各类云参数在不同分档的降水概率

Table 5 Probability of precipitation in different brackets of cloud parameters during stratiform cloud precipitation

	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
云顶高度	8	26	29	38	51
云顶温度	13	26	40	51	44
云光学厚度	1	29	64	82	91
粒子有效半径	28	39	53	45	67

增大总体呈增加趋势,其中在 20 ~ 30 μm 和大于 40 μm 时降水概率可分别达 53% 和 67%。

由此可知,层状云降水过程中,云顶发展得越

高,粒子有效半径和云光学厚度越大,地面观测到降水的可能性越大。

4.2 对流云降水的云参数频数分布特征及其同降水的关系

分别统计对流云降水过程中,有降水 and 无降水时 FY2C 卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚度和粒子有效半径的频数分布及其与降水的关系,见图 4e—h。

由图 4 可见,无降水时,云顶低于 2.5 km 和高于 10 km 的样本数最多;样本数随云顶温度降低呈单峰型分布,峰值位于 0 ~ -15 °C 范围内;样本数随云光学厚度和粒子有效半径值增大呈减小趋势。有降水时,云顶抬升非常明显,云顶普遍高于 7.5 km (第 4、5 两档),且云顶高于 10 km 的样本数最多;样本数随云顶温度降低、云光学厚度和粒子有效半径增大均呈单峰分布,峰值分别位于 -30 ~ -45 °C 的温度范围、20 ~ 30 的光学厚度数值档和 10 ~ 20 μm 的粒子有效半径范围内。

进一步统计各类云参数不同分档的降水概率(表 6)可见,对流云降水中,随着云顶高度和光学厚度的增大,降水概率单调递增;若云顶低于 2.5 km,云光学厚度小于 10,地面几乎观测不到降水;云顶高于 7.5 km 和光学厚度大于 20 时,降水概率值均跃增。云顶温度低于 -15 °C (第 3—5 档)的冰相降水过程产生降水的概率较大,暖雨过程(第 1、2 档)产生的降水极少;当云粒子超过 10 μm 时,降水概率显著增大,当粒子增长至 20 ~ 30 μm 时,降水概率达到最大值(64%),云粒子大于 30 μm 时,降水概率降低。

表 6 对流云降水的各类云参数在不同分档的降水概率

	%				
	1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
云顶高度	1	4	8	49	55
云顶温度	1	3	32	68	40
云光学厚度	1	23	61	81	无样本
粒子有效半径	9	46	64	30	21

综上所述,若云顶小于 7.5 km,层状云比对流云更容易形成降水。云光学厚度小于 10 时,层状云和对流云都很难形成降水;大于 20 时,层状云和对流云的降水概率都较大。对流云云顶粒子在 20 ~

30 μm 范围时,降水概率达到最大值;而层状云云顶粒子大于 40 μm 时,降水概率达到最大值,说明对流云中粒子增长更快,在云发展阶段就可超过降水阈值,降落到地面。

4.3 各类云参数频数分布特征及其同雨强的关系

地面观测到降水时,层状云和对流云的云参数频数分布特征及其与雨强的关系见图 5。

由图 5a 和 5b 可见,层状云降水时,不同雨强的样本数均随云顶高度增高而增多;云顶小于 10 km 时以弱降水($r < 1 \text{ mm/h}$)为主,当云顶高于 10 km 时,弱降水样本所占比率降低。对流云降水时,各种雨强降水样本都随云顶高度增高而增多,云顶高于 7.5 km (第 4、5 两档)的降水明显增多。

由图 5c 和 5d 可见,对于层状云和对流云降水,光学厚度小于 10 (第 1 档)的样本很少,且随光学厚度值增大,层状云弱降水数不断减小,较强降水数增多,层状云弱降水的峰值为 10 ~ 20 范围档。对流云不同降水强度频数随云光学厚度增大均呈单峰型分布,峰值都处于 20 ~ 30 范围档。

由图 5e 和 5f 可见,对于层状云降水,粒子有效半径总体偏小,大于 20 μm 的样本数较少;弱降水样本数随粒子有效半径增大不断减小;一般降水和强降水样本数呈单峰型分布,峰值均在 10 ~ 20 μm (第 2 档)范围。对于对流云降水,3 种强度的降水样本数均随粒子有效半径呈单峰型分布,峰值也都在 10 ~ 20 μm 范围内,但粒子有效半径值大于层状云,有效半径小于 10 μm 的很少,通常在 10 ~ 30 μm 范围内,可观测到较多大于 40 μm 的降水云。

4.4 层状云和对流云各类云参数分档下同强度降水的概率

层状云和对流云降水时,不同强度降水在各档云参数的发生概率见表 7—9。其中在个别云参数分档内,由于样本数太少,统计结果不具有代表性,在表中用“—”表示。

表 7 降水时,层状云和对流云不同雨强样本占总样本的比率

降水性质	降水强度		
	$r < 1 \text{ mm/h}$	$1 \text{ mm/h} \leq r < 10 \text{ mm/h}$	$r \geq 10 \text{ mm/h}$
层状云降水	54.8	42.0	3.2
对流云降水	35.5	59.2	5.3

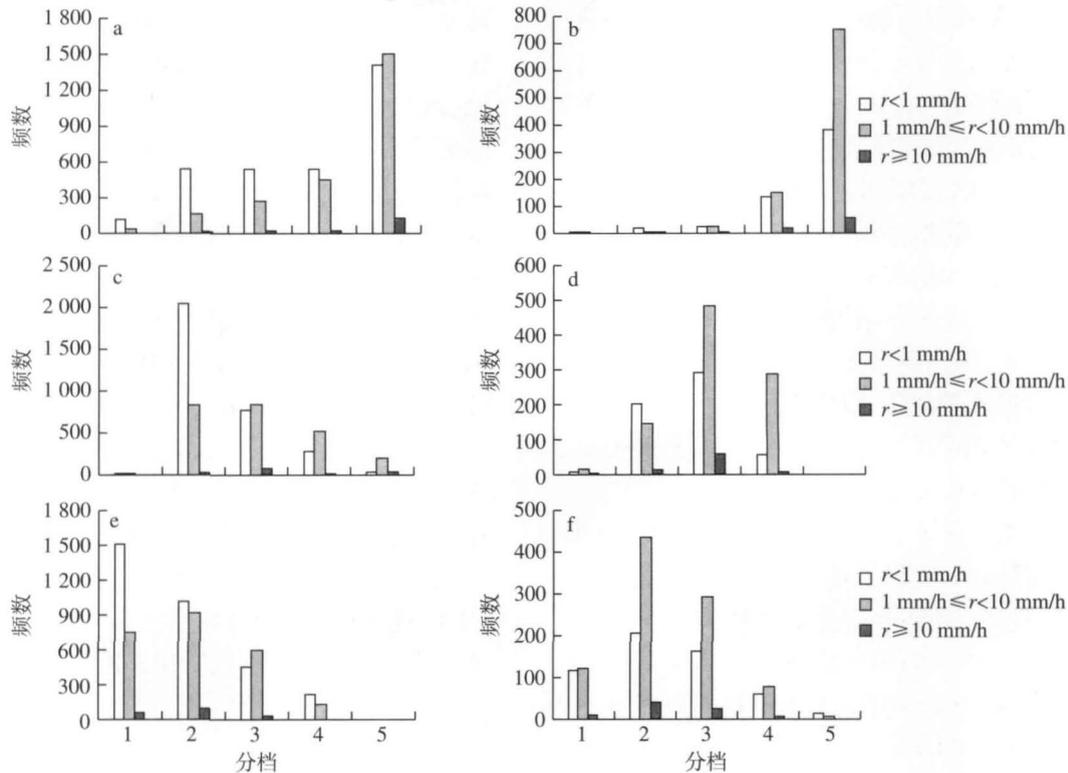


图 5 层状云 (a,c,e) 和对流云 (b,d,f) 降水时不同云参数分档的各类降水强度的频数分布
a,b. 云顶高度; c,d. 云光学厚度; e,f. 粒子有效半径

Fig. 5 Frequency distribution of various precipitation intensity in different cloud parameters brackets during (a,c,e) stratiform and (b,d,f) convective cloud precipitation a,b. cloud top height; c,d. cloud optical thickness; e,f. particles effective radius

表 8 层状云降水时,各类云参数分档下,不同雨强样本占总样本的比率

Table 8 Rate of different precipitation intensity samples to all rainfall samples in different cloud parameters brackets during stratiform cloud precipitation %

	雨强/ (mm · h ⁻¹)	不同分档下各类雨强的比率				
		1 档	2 档	3 档	4 档	5 档
云顶 高度	$r < 1$	—	77.0	64.4	53.3	46.4
	$1 \leq r < 10$	—	22.1	32.9	44.1	49.4
	$r \geq 10$	—	0.9	2.7	2.6	4.2
云光学 厚度	$r < 1$	—	64.4	51.5	42.2	18.4
	$1 \leq r < 10$	—	34.2	42.3	56.6	55.3
	$r \geq 10$	—	1.4	6.1	1.2	26.3
云粒子 有效 半径	$r < 1$	64.9	50.1	41.3	59.4	—
	$1 \leq r < 10$	32.6	45.4	55.7	40.0	—
	$r \geq 10$	2.5	4.5	3.0	0.6	—

表 9 对流云降水时,各类云参数分档下,不同雨强样本占总样本的比率

Table 9 Rate of different precipitation intensity samples to all rainfall samples in different cloud parameters brackets during convective cloud precipitation %

	雨强/ (mm · h ⁻¹)	不同分档下降水发生的比率				
		1	2	3	4	5
云顶 高度	$r < 1$	—	75.0	47.8	44.6	31.7
	$1 \leq r < 10$	—	16.7	47.8	49.5	63.1
	$r \geq 10$	—	8.3	4.3	5.9	5.2
云光学 厚度	$r < 1$	—	56.3	34.6	15.5	—
	$1 \leq r < 10$	—	39.8	58.0	82.8	—
	$r \geq 10$	—	3.9	7.4	1.7	—
云粒子 有效 半径	$r < 1$	47.0	30.5	33.6	41.1	66.7
	$1 \leq r < 10$	49.0	63.6	61.0	53.4	33.3
	$r \geq 10$	4.0	5.9	5.4	5.5	0

由表 7 可知,降水时,层状云以弱降水为主,强降水发生概率很小;而对流降水以大于 1 mm/h 的雨强为主,弱降水发生概率相对较小,地面产生强降

水的概率略大于层状云。具体特征如下:

对于层状云降水(表 8),云顶小于 7.5 km 时产生弱降水的可能性较大(大于 60%),且随着云顶增

加,弱降水在总降水中的比率呈减小趋势,但一般降水和强降水所占比率呈增大趋势,且强降水所占比率在各分档时均较小。云光学厚度与降水强度关系更为显著,随光学厚度增大,弱降水所占比率不断减小,强降水比率呈增加趋势;当光学厚度在 10~30 时,地面出现弱降水的概率较高,光学厚度在大于 30 时,地面发生一般降水概率更大,超过 50%,若光学厚度大于 40,地面产生强降水($r \geq 10$ mm/h)的可能性也较大,可达 26.3%。云粒子有效半径在 20~30 μm 时形成一般降水的可能性较大,其他情况下地面均以弱降水观测为主;但总体来说,粒子有效半径与雨强的对应关系不显著。

对于对流云降水(表 9),云顶高于 2.5 km 时,随着云顶高度和云光学厚度的增加,弱降水所占比率递减,一般降水所占比率递增,强降水所占比率变化不大,均小于 10%;但云光学厚度小于 20 时,以弱降水为主,云光学厚度大于 30 时,一般降水发生概率极大,可达 82.8%。粒子有效半径在 10~40 μm 时,地面产生一般降水的可能性较大;若粒子半径大于 40 μm ,地面以弱降水为主;但粒子有效半径与雨强的对应关系不如光学厚度和云顶高度显著。

4.5 层状云和对流云云顶高度和光学厚度同降水的关系

将卫星反演的云顶高度和光学厚度结合,研究层状云和对流云的降水概率分布,结果见图 6a—d(图中横坐标均为卫星反演的云光学厚度;图 6a、b 的纵坐标分别为层状云降水过程,无降水和有降水时卫星反演的云顶高度;图 6c、d 的纵坐标分别为对流云降水过程,无降水和有降水时卫星反演的云顶高度)。

由图 6 可见,对于层状云降水,地面降水受光学厚度的影响较为显著,在光学厚度值 17 附近有一条清晰的分界线(图 6a、b 中直线所示)。云光学厚度小于 17 的区域,即便云顶发展得很高,无降水样本数仍表现为多而密集,降水概率约为 17%;云光学厚度大于 17 的区域,降水样本数明显增多,降水概率约为 61%。图 6b 中还分布着一些云顶在 5 km 以下、光学厚度小于 20 的降水样本,可能是由暖雨过程形成的。

对于对流云降水,云顶高度和光学厚度的相关性较好,通常云顶越高,云光学厚度越大。无降水时,二者的相关系数可达 0.84,二者的拟合曲线如图 6c 中斜线所示;有降水时,二者的相关系数为 0.5,比无降水时明显偏小,说明对流云降水时,云中

液水分布极不均匀。对流云的云顶发展得很高,但光学厚度最大只到 40,这可能是受可见光观测限制,因此光学厚度未达到最高值。无降水时,云光学厚度大多数小于 30,没有明显的分界线。有降水时,云光学厚度大多数大于 17;云顶高度普遍大于 7 km,且降水强度类型多样(图 6d 中虚线框右上角所示区域),该区域的降水概率约为 67%;从物理机制上分析,更大的云顶高度和光学厚度值更可能降水,但很少观测到,这可能与观测时间截止到 14 时有关。其余区域的降水概率仅为 5%。

总的来说,两类降水云,云特征参数与降水的关系有一定差异。发生降水时,层状云光学厚度有明显的阈值(为 17),且光学厚度大值可达 60;对流云的光学厚度大多集中于 17~30 之间,云顶大多高于 7 km,且降水强度类型多样。粒子有效半径与降水的对应关系不如光学厚度和云顶高度显著。

5 结论和讨论

本文研究了不同云特征参数(卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚度、粒子有效半径和探空反演的云顶高度、云底到云顶之间的厚度、去除夹层的累积净云厚)与降水的关系,并在此基础上分别讨论了层状云和对流云不同降水强度情况下,各类云参数的频数分布规律及与降水的关系。主要结论如下:

1) 通常云厚大于 5 km,且云底较低,云粒子有效半径较大时,地面易观测到降水。若云顶高于 10 km,云光学厚度大于 20,且云中无夹层或夹层较薄时,地面易出现较强降水,云中夹层厚度对降水影响较大。

2) 层状云降水过程中,随云顶温度降低和云光学厚度增大,有降水样本数和无降水样本数均呈单峰型分布;降水可由暖雨过程和冰相过程形成,但冰相过程的降水概率明显高于暖雨过程;云光学厚度值 17 为降水区域的分界线,小于 17 时,降水概率约为 17%,大于 17 时,降水概率跃增,可达 61%;云顶高度在 2.5~7.5 km 时,地面若降水,则毛毛雨的概率较大;随云光学厚度值增大,地面降水中弱降水比率不断减小,较强降水比率呈增大趋势;随云粒子有效半径增大,降水和无降水的样本数均不断减小,但降水概率总体呈增大趋势,云粒子有效半径值与雨强无显著的对应关系。

3) 对流云降水过程中,云顶高度与光学厚度的相关性较好;无降水样本数随云顶温度降低呈单峰

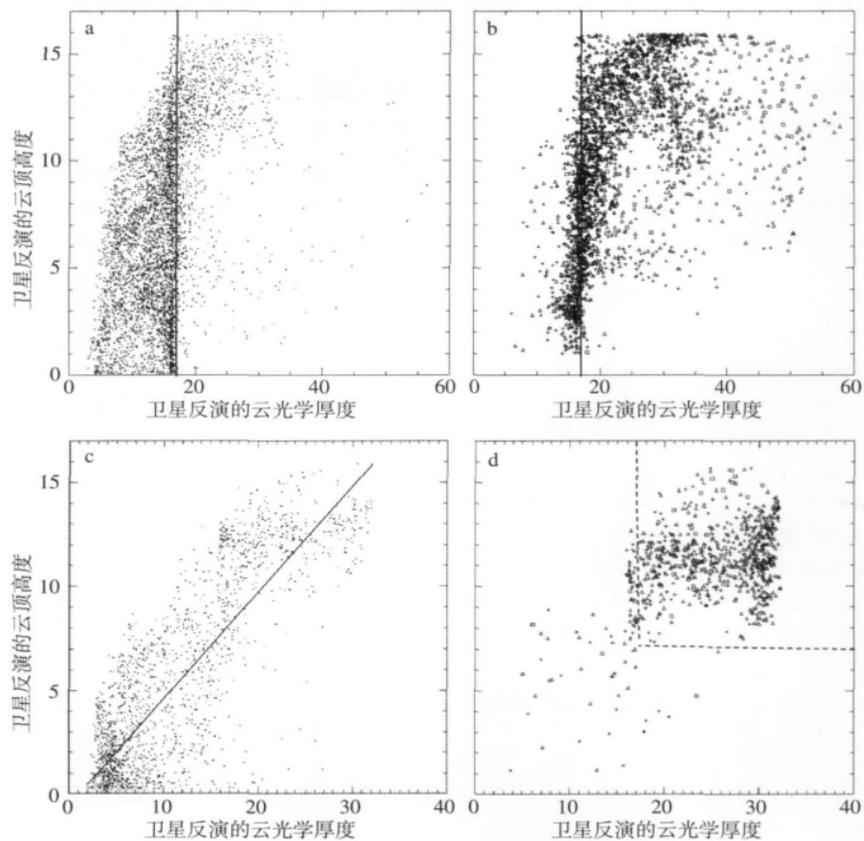


图 6 层状云和对流云的降水区域分布(图 a、b、c、d 的横坐标均为卫星反演的云光学厚度,图 a、b 的纵坐标分别为层状云无降水和有降水时卫星反演的云顶高度,直线为划分降水区域的光学厚度阈值线;图 c、d 的纵坐标分别为对流云无降水和有降水时卫星反演的云顶高度,斜线为光学厚度和云顶高度的拟合曲线;虚线框为降水集中分布区域边界线;●表示无降水,+表示 $r < 1 \text{ mm/h}$, Δ 表示 $1 \text{ mm/h} \leq r < 10 \text{ mm/h}$, \square 表示 $r \geq 10 \text{ mm/h}$)

Fig. 6 Precipitation region distribution of stratiform cloud and convective cloud(In Fig. 6a, b, c, and d, the horizontal axis is all optical thickness retrieved by FY2C satellite. The vertical axis of Fig. 6a and 6b is cloud top height retrieved by FY2C satellite when there is or not stratiform cloud precipitation. The straight line stands for optical thickness threshold to divide precipitation region. The vertical axis of Fig. 6c and 6d is cloud top height retrieved by FY2C satellite when there is or not convective cloud precipitation. The oblique line is a fitted curve of optical thickness and cloud top height; and the dotted line is the boundary of centralized precipitation region. • stands for no precipitation, + $r < 1 \text{ mm/h}$, Δ $1 \text{ mm/h} \leq r < 10 \text{ mm/h}$, and \square $r \geq 10 \text{ mm/h}$)

型分布,随云光学厚度和粒子有效半径值增大而减小;有降水时,云顶普遍高于 7.5 km,降水样本数随云顶温度降低、云光学厚度和粒子有效半径增大均呈单峰分布;降水基本由冰相过程产生,暖雨过程产生的降水极少;若云光学厚度大于 17,云顶高度大于 7 km,降水概率较大;云光学厚度小于 20 时,地面降水以弱降水为主,云光学厚度大于 30 时,一般降水发生概率极大。

4) 云顶小于 2.5 km,云光学厚度小于 10 时,层状云和对流云都很难形成降水;若云顶小于 7.5 km,层状云比对流云更容易形成降水;通常层状云的降水强度小于对流云。

5) 层状云和对流云的降水概率均随云顶高度和云光学厚度的增加而增大,但降水概率与云光学厚度关系更为密切,云光学厚度大于 20 时,层状云和对流云的降水概率跃增,其值均大于 60%。

6) 云高、云厚和云光学厚度等云特征参量的组合分析,对识别降水落区和判断降水量级更加有效。

参考文献:

- 蔡森,周毓荃,朱彬. 2010. FY2C/D 卫星反演云特征参数与地面雨滴谱降水观测初步分析[J]. 气象与环境科学,33(1):1-6.
- 蔡森,周毓荃,朱彬. 2011. 一次对流云团合并的卫星等综合观测分析[J]. 大气科学学报,34(2):170-179.
- 陈英英,周毓荃,毛节泰,等. 2007. 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,33(4):29-34.
- 陈英英,唐仁茂,周毓荃,等. 2009. FY-2C/D 卫星微物理特征参数产品在降水分析中的应用[J]. 气象,35(2):15-18.
- 黄美元,沈志来,洪延超. 2003. 半个世纪的云雾、降水和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学,27(4):536-551.
- 兰红平,张儒林,江崑. 2000. 用红外云图估测小区域雨强及其在短时预报中的应用[J]. 热带气象学报,16(4):366-373.
- 刘健,张文健,朱元竞,等. 2007. 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,18(2):158-164.
- 廖向花,周毓荃. 2010. 重庆一次超级单体风暴的综合分析[J]. 高原气象,29(6):1556-1564.
- 卢乃锰,吴蓉璋. 1997. 强对流降水云团的云图特征分析[J]. 应用气象学报,8(3):269-275.
- 毛节泰,郑国光. 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨[J]. 应用气象学报,17(5):643-646.
- 邱金恒,吕达仁,陈洪斌,等. 2003. 现代大气物理学研究进展[J]. 大气科学,27(4):628-652.
- 王晨曦,郁凡,张成伟. 2010. 基于 MTSAT 多光谱卫星图像监测全天时我国华东地区的梅雨期降水[J]. 南京大学学报:自然科学,46(3):305-316.
- 张杰,张强,田文寿,等. 2006. 祁连山区云光学特征的遥感反演与云水资源的分布特征分析[J]. 冰川冻土,28(5):722-727.
- 郑媛媛,傅云飞,刘勇,等. 2004. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究[J]. 气象学报,62(6):790-802.
- 周毓荃,欧建军. 2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象,36(11):50-58.
- 周毓荃,陈英英,李娟,等. 2008. 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,34(12):27-35.
- Rosenfeld D, Gutman G. 1994. Retrieving microphysical properties near the tops of potential rain clouds by multispectral analysis of AVHRR data[J]. Atmos Res,34:259-283.

(责任编辑:倪东鸿)