

王磊,周毓荃,蔡森,等.华北云特征参数与降水相关性的研究[J].气象与环境科学 2019,42(3):9-16.
Wang Lei, Zhou Yuquan, Cai Miao, et al. Study on Correlation Between Cloud Characteristic Parameters and Precipitation in North China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2019, 42(3): 9-16.
doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.03.002

华北云特征参数与降水相关性的研究

王磊^{1,2}, 周毓荃³, 蔡森³, 申双和⁴

(1. 石家庄市气象局, 石家庄 050081; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044;
3. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4. 南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘 要: 利用河北省、河南省和山西省2013—2014年的每日10—15时逐时 FY2E 卫星反演得到的云结构特征参数和地面小时降水, 统计分析了云顶高度、云顶温度、云光学厚度和云粒子有效半径等 4 类云结构特征参数与地面降水的关系。主要结论有: 随着云光学厚度的增加, 降水概率呈增加趋势。云光学厚度比其他云参数对降水更具有指示意义, 当云光学厚度大于 20 时, 降水概率显著增大。双参数、多参数组合下, 对地面是否出现降水的判断和识别要优于单个云参数的判别结果。4 类云参数中, 云光学厚度与降水强度呈正相关关系, 对降水强度的影响最为显著; 云顶温度和云顶高度对降水强度的影响次之; 云粒子有效半径与降水强度的关系不明显。地面降水时, 当云光学厚度小于 20 或云光学厚度介于21—30、云顶温度大于 -15 ℃ 时, 出现小雨的概率最大; 当云光学厚度介于21—30、云顶温度小于 -15 ℃ 或云光学厚度大于 30、云顶温度大于 -30 ℃ 时, 出现中雨的概率最大; 当云光学厚度大于 30、云顶温度小于 -30 ℃ 时, 出现大雨或暴雨的可能性最大。云光学厚度、云顶温度、云顶高度和云粒子有效半径等云结构特征参数组合使用, 对判断降水概率和降水强度具有较好的指示作用。

关键词: 云特征参数; 地面降水; 光学厚度; 相关性

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-7148(2019)03-0009-08

引 言

云的结构特征与云降水条件、降水效率等关系密切。气象卫星作为目前重要的观测手段, 可以大范围监测云系的演变。利用卫星的多通道辐射特性反演的云参数, 不仅可以反映云中的宏、微观物理演变特征, 而且同降水的发生发展也有一定的关系。国内外关于云特征参数与降水关系的研究已有一些进展。张杰等^[1]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 6~12 μm, 云光学厚度在 8~20。刘健等^[2]研究了 FY-1D 和 NOAA 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。唐杰等^[3]利用水平分辨率为 1 km 的 MODIS 1B 产品, 对一次持续性暴雨过程的分析结果表明, 云粒子半径和云光学厚度的大值区分布与对应时次的强降水中心分布基本一致。Rosenfeld 等^[4]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 μm 是云中产生降水的阈值。

近年来随着卫星技术的不断发展, 我国的风云系列静止卫星资料得到了广泛的应用。周毓荃^[5-6]等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, 自 2006 年起相关云特性产品已陆续发布。陈英

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-08-08
基金项目: 国家重点研发计划(2016YF0601701); 河北省科技计划项目(17227001D、14227003D)
作者简介: 王磊(1982-), 男, 河北唐山人, 工程师, 硕士, 从事人工影响天气研究. E-mail: wanglei2012sjz@163.com
通讯作者: 周毓荃(1962-), 女, 河南漯河人, 正研级高工, 博士, 从事云降水物理、人工影响天气和遥感反演分析研究. E-mail: zhouyq05@163.com

英^[7-9]等利用风云卫星云参数产品,对比分析了降水过程中的小时雨量,发现 FY-2C 和 MODIS 资料能一致地反映云粒子有效半径分布的主要特征,云液水路径的大值区与地面强降水中心的位置基本一致,地面小时雨量与云光学厚度、云粒子有效半径呈正相关。宋薇等^[10]基于云参数反演产品,对天津地区 2009 年的首场降雪过程的分析结果表明,地面降水量和云粒子有效半径、云顶高度、云体过冷层厚度呈现正相关,与云顶温度呈现负相关。李静^[11]综合利用卫星、探空等资料深入分析两次冰雹强对流过程,发现云光学厚度与冰雹无直接对应关系。

以往的这些研究,多为利用极轨卫星反演的云参数研究云与降水的关系,或者是利用静止卫星反演的云参数与降水关系的个例分析,缺乏统计的认识。蔡森等^[12-13]先后以安徽省为例,开展了云结构参数与降水关系的研究,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;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,降水概率与云光学厚度的相关性更为密切,云参数先于地面降水变化,两者相差约 2 h。尚博等^①结合吉林省 55 个地面自动气象站降水观测资料,研究了吉林地区云参数在不同分档情况下与降水的关系,结果表明:FY 静止卫

星反演的云顶高度、云粒子有效半径和云光学厚度对降水都有一定的指示意义;当云顶高度大于 7.5 km、云粒子有效半径大于 20 μm 且云光学厚度大于 10 时,云降水概率普遍都在 30% 以上。我国地域辽阔,南、北方云系的结构特征差异较大,深入认识不同地域云降水特征及关系,无论对精细降水预报还是人工增雨作业条件选择都十分重要^[14-22]。华北三省地理位置接近,通过统计研究该地区的云和降水的特征及相互关系,对于认识我国云和降水的演变规律,识别人工增雨播云条件,分析作业效果等均非常有意义^[23-24]。

1 资料介绍

利用2013年9月—2014年8月每小时一次的河北、河南、山西 FY2E 卫星云特征参数反演的产品和地面小时雨量资料进行分析,反演方法参考周毓荃等撰写的文献^[5]。FY2E 卫星反演的云特征参数主要包括云顶高度(Ztop)、云顶温度(Ttop)、云光学厚度(Opth)和云粒子有效半径(Re)等。由于云光学厚度等云参数主要来自可见光通道的反演,而可见光通道只在白天有观测和反演产品,因此取白天卫星反演最优时段10—15时的云参数资料进行统计分析。各物理量的定义见表 1^[5]。

表 1 基于 FY2E 卫星反演的云特征参数

名称	定义	意义
云顶高度	云顶相对地面的距离,单位为 km	有助于了解云系的发展程度和演变趋势
云顶温度	云顶所在高度的温度,单位为℃	可用于了解冷暖云和冰相降水作用
云光学厚度	云系在整个路径上云消光的总和,为无量纲参数	可用于了解云系垂直方向云体厚实程度
云粒子有效半径	假设云层在水平均一条件下,云顶粒子的有效半径,单位为 μm	可用于进行云顶粒子大小的判断

2 资料处理和统计方法

2.1 云参数和地面降水数据时空匹配处理

风云卫星反演得出的云参数产品,空间分辨率为 5 km。为解决云参数与地面降水的时空匹配统计,采用周毓荃等撰写的文献^[6]中的方法:在空间上,以雨量站经纬度为中心,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,取某一时次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 降水分档

根据雨强(r ,每小时降水量;单位:mm/h)大小,将降水分为四档: $r < 0.5$ mm/h(小雨), 0.5 mm/h $\leq r < 2.0$ mm/h(中雨), 2.0 mm/h $\leq r < 5.0$ mm/h(大雨), $r \geq 5.0$ mm/h(暴雨)。

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(分档规定见表 2),以统计云参数在各档的出现频率及降水概率。

①尚博,刘建朝. 吉林省增雨潜力区的卫星云参数研究[C]//卫星遥感应用技术交流论文集. 2015.

表 2 FY2E 卫星反演云参数数值分档规定

分档	云顶高度 /km	云顶温度 /℃	云光学 厚度	云粒子有效 半径/ μm
1	0.0–2.5	>0	0–10	0–10
2	2.6–5.0	–15–0	11–20	11–20
3	5.1–7.5	–30––16	21–30	21–30
4	7.6–10.0	–45––31	31–40	31–40
5	>10.0	<–45	>40	>40

2.2.3 降水概率

规定某时次、某站点对应的数据集为一个统计样本,包括站点经纬度、卫星反演的各类云参数和小时雨量观测值。共取得华北三省降水样本 13399 个、无降水样本 273708 个,合计总样本数为 287107 个。为统计方便,定义降水概率为降水样本数在总样本中所占的比率。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。

3 云参数与降水概率的相关性

3.1 单参数下的各档降水概率分布

图 1(a)–(d)给出了华北三省有降水 and 无降水时 FY2E 卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚

度和云粒子有效半径在各档的降水概率分布情况,其中云参数分档下各档的总样本数及无降水概率均在图中标出。

由图可见,这一时段三省无降水样本所占比例很高。当云顶高度小于 2.5 km、云顶温度大于 0 ℃、云光学厚度小于 10 和云粒子有效半径小于 10 μm 时,降水概率都很小,但由于这 4 个档位下总样本数较多,依然存在一定数量的降水样本,其多为暖层降水。

从华北三省的样本统计可以看到,随着云顶高度的增高、云顶温度的下降、云光学厚度的增加,云参数各档总样本数和无降水概率呈单调递减趋势;与此同时,各档降水概率呈单调增加趋势,但云顶高度前三档降水概率增加并不显著。当云顶高度大于 10 km、云顶温度小于 –45 ℃、云光学厚度大于 40 时,降水概率达到最大,依次为 23%、38% 和 57%。由于大于 40 μm 的云粒子有效半径很少,该档未作统计。另外,统计样本中介于 31–40 μm 的云粒子有效半径也不多见。

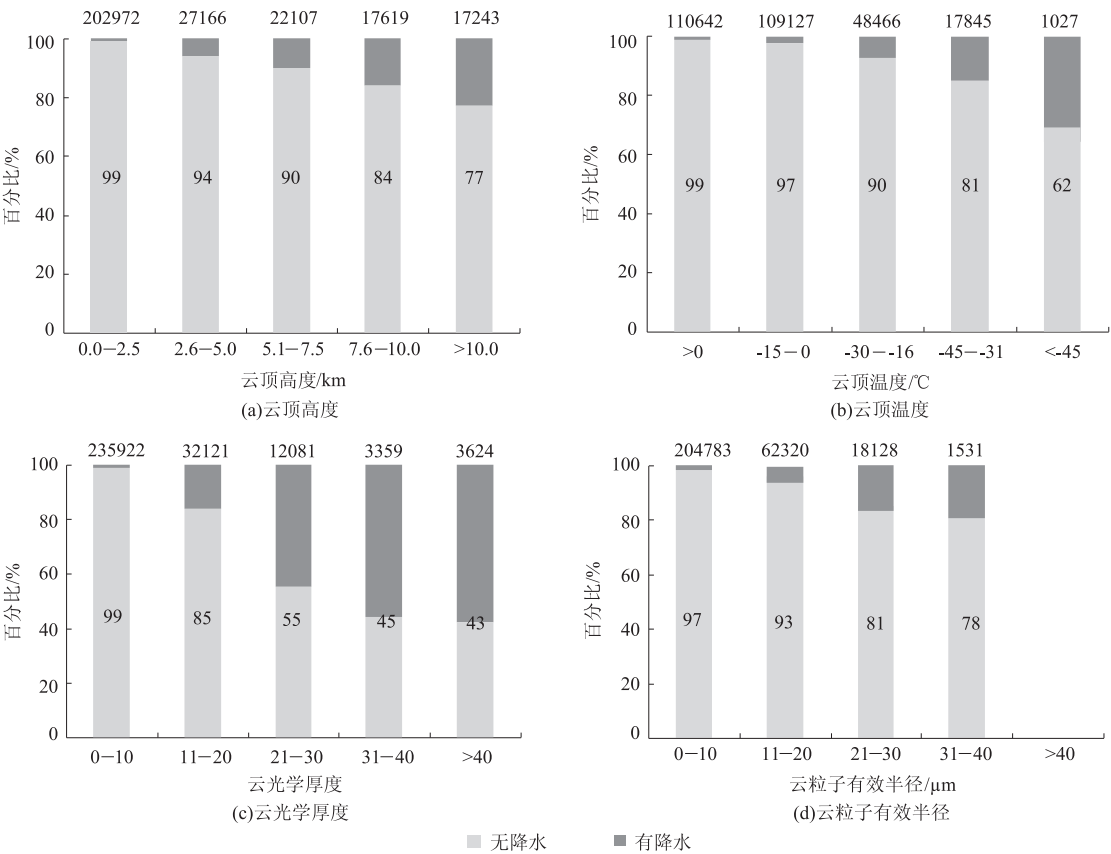


图 1 华北三省卫星反演云参数的各档降水分布

综合来看,4 类云参数中,云光学厚度对地面是否降水的指示作用最为明显。当云光学厚度大于

20 时,降水概率显著增加。云光学厚度介于11—20 时,降水概率为15%;云光学厚度介于21—30时,降水概率跃升为45%。当云光学厚度介于31—40时,降水概率继续增大;云光学厚度大于 40 时,降水概率达到最大。这与周毓荃等^[6]研究结论类似。云顶温度对降水的指示作用次于云光学厚度的,云顶高度和云粒子有效半径对降水的指示作用又次于云顶温度的。

3.2 双参数组合的降水概率分布

上述分析表明,单个云参数对应的降水概率并不高。为了进一步提高云参数对降水概率的指示作用,将两类云参数组合起来分析。4 类云参数中,云光学厚度与降水的关系最为密切,而云顶温度同冰相降水机制有关,对云光学厚度和云顶温度这两类云参数分档组合,进行降水概率计算,结果见表 3。

由表 3 可见,在云光学厚度与云顶温度组合使用时,华北三省的降水概率均同时随云光学厚度的

增加、云顶温度的下降呈单调增加趋势。当云顶温度小于 - 45 ℃ 且云光学厚度大于 40 时,三省降水概率均达到最大,河北、河南、山西的依次为 75%、70%、84%。对比三省双参数下共计 25 档的降水概率,总的来看,三省中双参数与地面降水的相关性河北省的最好,山西、河南的次之。

与三省单参数降水概率对比来看,对地面是否产生降水的判断和识别结果,双参数的明显优于单参数的,并且随着云光学厚度的增加和云顶温度的下降,这种优势更加明显。值得注意的是,当云光学厚度大于 20、云顶温度小于 - 15 ℃ 时,三省降水概率均有明显增加。以河北省为例,当云光学厚度介于11—20、云顶温度介于 - 15—0 ℃ 时,地面出现降水的概率为20%;若云光学厚度介于21—30、云顶温度介于 - 30— - 16 ℃ 时,这时地面出现降水的概率跃增到 59%。

表 3 华北三省双参数组合的降水概率分布 %

省份	云顶温度/℃	云光学厚度				
		0—10	11—20	21—30	31—40	> 40
河北省	> 0	1	7	19	—	—
	- 15—0	1	20	46	47	49
	- 30— - 16	1	22	59	65	69
	- 45— - 31	1	24	60	67	70
	< - 45	—	—	63	69	75
河南省	> 0	1	4	15	22	24
	- 15—0	1	15	35	39	39
	- 30— - 16	1	19	39	48	56
	- 45— - 31	1	21	40	51	64
	< - 45	—	25	45	63	70
山西省	> 0	1	7	14	—	—
	- 15—0	1	14	35	41	43
	- 30— - 16	1	17	52	52	59
	- 45— - 31	1	19	54	56	68
	< - 45	—	26	60	80	84

3.3 3 参数组合的降水概率分布

在云光学厚度和云顶温度双参数的基础上,进一步加入云粒子有效半径第三类云参数,将三省资料汇总起来分档组合,进行降水概率计算,探讨其规律(见表 4)。

由表 4 可见,3 参数组合下,当云光学厚度小于 10 时,降水概率都很小,各档位均不足 2%;当云光学厚度为11—20时,各档降水概率有所增加,随云顶温度的下降降水概率呈单调增加趋势,而随粒子半径的增加,降水概率变化规律并不明显;当云光学厚度为21—30时,各档组合降水概率继续增大,随云顶

温度的下降降水概率总体呈增加趋势,若云顶温度大于 - 15 ℃ 时,降水概率随云粒子有效半径的增加呈单峰型,峰值在21—30 μm;若云顶温度小于 - 15 ℃ 时,降水概率随云粒子有效半径的增加呈减小趋势;当云光学厚度为31—40时,组合降水概率进一步增加,但降水概率随云顶温度的下降、云粒子有效半径的增加变化规律并不明显;若云光学厚度大于 40 时,各档降水概率达到最大,降水概率随云顶温度的下降呈单峰型,峰值在 - 30— - 16 ℃,而随云粒子有效半径的增加呈单调增加趋势。当云光学厚度大于 40、云顶温度为 - 30— - 16 ℃、云粒子半径大于 40

μm 时,3 参数组合降水概率最大,达到 75.3%。降水概率的指示作用并不明显,但其对降水的指示作用要明显优于单个云参数的。

可以看到,与云光学厚度、云顶温度的双参数组合相比,在增加云粒子有效半径的 3 参数组合诊断

表 4 华北三省多参数组合的降水概率分布 %

云光学 厚度	云粒子有效半径/ μm	云顶温度/ $^{\circ}\text{C}$				
		> 0	- 15-0	- 30- - 16	- 45- - 31	< - 45
0-10	0-10	0.3	0.3	0.4	-	-
	11-20	0.5	0.7	0.6	-	-
	21-30	0.2	0.5	1.6	0.9	-
	31-40	-	0.4	0.6	-	-
	>40	-	0.6	-	-	-
11-20	0-10	4.9	13.0	-	-	-
	11-20	12.9	23.7	24.2	34.9	-
	21-30	17.1	17.3	17.9	24.0	-
	31-40	8.8	10.1	10.3	9.6	11.0
	>40	-	-	-	6.6	6.9
21-30	0-10	19.4	45.5	-	-	-
	11-20	33.3	46.3	53.3	-	-
	21-30	48.2	47.7	47.9	48.6	-
	31-40	34.5	33.4	38.6	38.3	35.0
	>40	-	11.4	34.7	33.3	34.8
31-40	0-10	18.7	-	-	-	-
	11-20	41.1	54.9	56.0	-	-
	21-30	51.5	51.4	46.8	44.9	-
	31-40	-	38.1	55.1	58.5	-
	>40	-	21.4	66.4	63.6	51.2
>40	0-10	21.1	-	-	-	-
	11-20	42.8	47.1	-	-	-
	21-30	54.0	55.1	57.5	50.0	-
	31-40	-	58.3	62.9	59.2	59.0
	>40	-	58.9	75.3	68.0	61.1

4 云参数与降水强度的相关性

4.1 单参数分档下,不同雨强样本占总降水样本的比率

华北三省地面出现降水时,不同雨强样本占总

降水样本的比率见表 5。由表 5 可知:河北、河南两省降水主要为小雨量级,中雨次之;山西省降水以小雨和中雨降水为主,其中,中雨降水概率略高于小雨的。三省区大雨、暴雨降水发生概率均较小。

表 5 降水时,不同雨强样本占总降水样本的比率

雨强/(mm/h)	河北		河南		山西	
	样本数	比率/%	样本数	比率/%	样本数	比率/%
$r < 5.0$	1764	46.6	2894	50.1	1427	37.2
$0.5 \leq r < 2.0$	1371	36.2	2145	37.1	1473	38.4
$2.0 \leq r < 5.0$	437	11.5	527	9.1	688	18.0
$r \geq 5.0$	215	5.7	214	3.7	244	6.4

为进一步了解华北地区地面降水时,各类云参数与降水强度的关系,统计不同降水强度时各类云参数各档的降水概率。

华北三省不同强度降水在各档云参数的发生概率见图 2(a)-(d)。其中云粒子有效半径大于 $40\mu\text{m}$ 时,由于样本数太少,未作统计。由图可见,云光学厚度与降水强度关系最为显著。小雨所占比率

随云光学厚度增大而不断减小;中雨、大雨所占比率随云光学厚度增大呈单峰型,峰值均在 30% ~ 40%;暴雨所占比率也随云光学厚度的增大呈增加趋势。当云光学厚度小于 20 时,地面出现小雨的概率最大。其中,云光学厚度介于 0-10 时,小雨概率为 76%;云光学厚度介于 11-20 时,小雨概率为 54%。若云光学厚度为 31-40 时,地面出现中雨的概

率最大,为 47%,大雨发生概率增加明显,达到 21%;当云光学厚度大于 40 时,地面出现暴雨的概率最大,为 41%。也就是说随着云光学厚度的增大,地面产生较强级别降水的可能性不断增加,并且趋势明显,云光学厚度与降水强度呈正相关关系,这与刘健等^[2]研究结论类似。

另外,随着云顶高度的增加和云顶温度的下降,小雨样本在总降水中的比率呈减小趋势,中雨、大

雨、暴雨发生概率单调增加。云粒子有效半径与降水强度的关系最不明显,除小雨发生概率随云粒子有效半径的增加略有下降外,中雨、大雨、暴雨概率均无明显规律。

综上所述,4 类云参数中,云光学厚度与降水强度的关系最密切,云顶温度、云顶高度与降水强度的关系次之,云粒子有效半径与降水强度之间关系不明显。

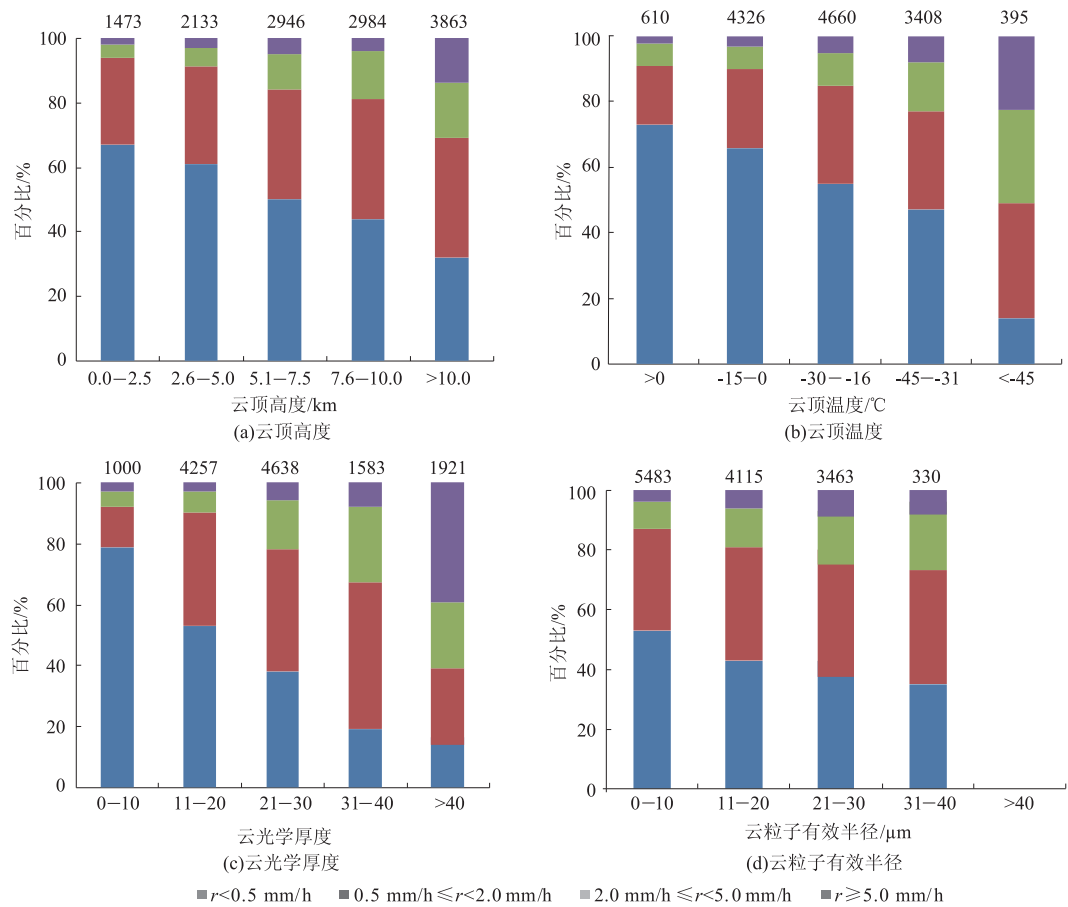


图 2 华北三省不同云参数分档的各类降水强度的比率分布

4.2 双参数分档下,不同雨强样本占总降水样本的比率

为进一步讨论云参数与降水强度的关系,把云参数组合起来,讨论其对降水强度的影响。由于单个云参数情况下,云光学厚度、云顶温度与降水强度关系较密切,这里将这两类云参数组合起来进行讨论。

当地面出现降水时,云顶温度与云光学厚度双参数组合下,华北三省不同雨强样本占总降水样本的比率分布见表 6。由表 6 可见:随着云光学厚度的增加和云顶温度的下降,出现小雨的概率不断变小;中雨雨强随着云光学厚度的增加和云顶温度的

下降呈单峰型分布,其中,25 档降水概率中,中雨出现概率大时,云光学厚度峰值一般介于 21—30 或者介于 31—40,而云顶温度峰值一般介于 -45—-31 °C 或者介于 -30—-16 °C;另外,大雨、暴雨雨强分布规律基本相同,均随着云光学厚度的增加和云顶温度的下降,其发生概率单调增加。

将小雨、中雨、大雨、暴雨出现概率最大的区域依次用蓝色、黄色、橙色和红色标出。由表 6 可见:华北地区地面出现降水时,当云光学厚度小于 20 时或介于 21—30、云顶温度大于 -15 °C 时,小雨出现的概率最大;当云光学厚度介于 21—30、云顶温度小于 -15 °C 时或云光学厚度大于 30、云顶温度大于 -30

℃时,中雨出现的概率最大;当云光学厚度大于 30、云顶温度小于 −30 ℃时,大雨或暴雨出现的可能性最大。与单个云参数相比,双参数组合下对降水强度的指示性更强,诊断更精准。

表 6 降水时双参数组合下华北三省各类雨强降水比率分布 %

雨强	云顶温度/℃	云光学厚度				
		0—10	11—20	21—30	31—40	>40
小雨	> 0	75	64	57	38	31
	− 15—0	72	61	50	34	29
	− 30— − 16	65	53	35	30	27
	− 45— − 31	53	49	34	20	7
	< − 45	53	41	20	19	2
中雨	> 0	20	26	27	42	35
	− 15—0	22	26	34	45	36
	− 30— − 16	25	32	46	42	34
	− 45— − 31	30	30	40	25	14
	< − 45	24	26	32	19	2
大雨	> 0	4	4	6	6	15
	− 15—0	5	6	6	7	16
	− 30— − 16	7	8	9	11	16
	− 45— − 31	11	12	13	32	33
	< − 45	12	17	26	37	37
暴雨	> 0	1	6	10	14	19
	− 15—0	1	7	10	14	19
	− 30— − 16	3	7	10	17	23
	− 45— − 31	6	9	13	23	46
	< − 45	11	16	22	25	59

5 结论和讨论

本文研究了华北地区不同云特征参数(FY2E 卫星反演的云顶高度、云顶温度、云光学厚度、云粒子有效半径)与地面降水之间的关系,发现:

(1)降水概率随云光学厚度的增大,呈增加趋势。4 类云参数中,云光学厚度对降水的指示意义最为明显,其次为云顶温度,再次为云顶高度和云粒子有效半径。双参数、多参数组合下,对地面是否出现降水的判断和识别要优于单个云参数的判断和识别。

(2)随着云光学厚度的增大,地面产生较强级别降水强度的可能性增加,云光学厚度与降水强度呈正相关关系。云光学厚度对降水强度的指示作用最优,云顶温度和云顶高度对降水的指示作用次之,云粒子有效半径的指示作用不明显。

(3)在云顶温度与云光学厚度双参数组合下,华北地区各类雨强降水概率分布规律明显。地面出现降水时,若云光学厚度小于 20 或云光学厚度介于 21—30、云顶温度大于 −15 ℃时,出现小雨的概率最大;若云光学厚度介于 21—30、云顶温度小于 −15 ℃或云光学厚度大于 30、云顶温度大于 −30 ℃时,出现中雨的概率最大;若云光学厚度大于 30、云顶温度小于 −30 ℃,出现大雨或暴雨的可能性最大。

(4)将云光学厚度、云顶温度、云顶高度和云粒子有效半径等云特征参数组合使用,对诊断华北地区降水概率和降水强度具有较好的指示作用。

致谢:感谢中国气象科学院人工影响天气中心胡志晋研究员对本文提供的帮助。

参考文献

[1] 张杰,张强,田文寿,等. 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,2006,28(5):722−727.

[2] 刘健,张文建,朱元竞,等. 中尺度强暴雨云团云特征的多重卫星资料综合分析[J]. 应用气象学报,2007,18(2):158−164.

[3] 唐杰,曾向红,段丽洁. 基于 MODIS 资料的一次南方夏季暴雨过程分析[J]. 气象与减灾研究,2012,35(4):47−53.

[4] 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(1):259−283.

[5] 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.

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

[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 卫星微物理特征参数产品在地面降水分析中的应用[J]. 气象,2009,35(2):15−18.

[9] 陈英英. 利用 FY−3A 卫星云图对一次暴雨过程的特征云参数分析[J]. 暴雨灾害,2013,32(1):24−31.

[10] 宋薇,靳瑞军,孟辉,等. 2009 年天津地区首场降雪过程分析

- [J]. 气象科技, 2012, 40(6): 996–1001.
- [11] 李静. 冰雹云结构及其演变特征的卫星和雷达等综合观测分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [12] 蔡森, 周毓荃, 朱彬. 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, 2010, 33(1): 1–6.
- [13] 蔡森, 周毓荃, 朱彬. 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, 2011, 34(2): 170–179.
- [14] 周亦凌, 姚展予. 一次积层混合云增雨作业天气条件分析和雷达回波效果检验[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 11–20.
- [15] 张雨芳, 刘卫国, 周毓荃. 一次对流云团过程结构特征的观测和模拟研究[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 9–18.
- [16] 赵桂香, 王思慙, 邱贵强, 等. 孤立云团造成的一次强对流天气分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 98–109.
- [17] 周晓丽, 杨昌军. 基于 FY-2D 的新疆区域强对流云识别[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(2): 82–87.
- [18] 马艳, 顾瑜, 陈尚, 等. WRF 中不同积云对流参数化方案对青岛降水预报影响的对比分析[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 19–26.
- [19] 邵元亭, 刘奇俊, 荆志娟. 祁连山夏季地形云和降水宏微观结构的数值模拟[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 18–23.
- [20] 庞朝云, 张丰伟, 张建辉. 西北干旱地区一次降水性层状云的飞机观测分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 272–277.
- [21] 陈茂强, 顾清源, 汪延波, 等. 一次西南低涡特大暴雨的中尺度对流云团特征[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(4): 66–71.
- [22] 何光碧. MM5 模式中积云参数化方案在西南地区适应性的进一步试验分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(3): 12–19.
- [23] 秦彦硕, 刘世玺, 范根昌, 等. 华北地区春季一次层状云的微物理特征及可溶性分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(3): 481–489.
- [24] 张琪, 李跃清, 杨云芸. 我国云量及其与降水关系的研究进展综述[J]. 高原山地气象研究, 2011, 31(1): 79–83.

Study on Correlation Between Cloud Characteristic Parameters and Precipitation in North China

Wang Lei^{1,2}, Zhou Yuquan³, Cai Miao³, Shen Shuanghe⁴

(1. Shijiazhuang Meteorological Office, Shijiazhuang 050081, China;

2. College of Applied Meteorology, NUIST, Nanjing 210044, China;

3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

4. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the hourly cloud structural characteristic parameters retrieved by FY2E satellite and hourly rain gauge data from 10:00 to 15:00 every day in Hebei, Henan and Shanxi provinces during 2013–2014, the relationship between cloud parameters, such as cloud top height, cloud top temperature, optical thickness and particle effective radius, and hourly rainfall was analyzed. The main conclusions are as follows. When the optical thickness increases, the precipitation probability increases. Moreover, the optical thickness has more indicative significance to the precipitation probability than other cloud parameters. Once the optical thickness exceeds 20, the precipitation probability would increase obviously. In addition, double cloud parameters or multiple parameters are superior to single cloud parameter in the identification of precipitation. Among the 4 cloud parameters, there is a positive correlation between optical thickness and precipitation intensity. The key influence in precipitation intensity is optical thickness, and the next is cloud top temperature or cloud top height. However the correlation between particle effective radius and the precipitation intensity is not obvious. In the period of precipitation, if cloud optical thickness is lesser than 20 or between 21–30 and cloud top temperature exceeds -15°C , the probability of light rainfall on the ground will be maximum; if cloud optical thickness is between 21–30 and cloud top temperature is lower than -15°C , or cloud optical thickness exceeds 30 and cloud top temperature is higher than -30°C , the probability of moderate rainfall on the ground will be maximum; if cloud optical thickness exceeds 30 and cloud top temperature is lower than -30°C , the probability of heavy rainfall or storm rainfall on the ground will be the maximum. Therefore, comprehensive analysis of optical thickness, cloud top temperature, cloud top height and particle effective radius are more effective to determine precipitation probability and precipitation intensity.

Key words: cloud characteristic parameters; precipitation; optical thickness; correlation