

李琦,姜舒婕,蔡森,等,2026.浙江夏季FY-4A卫星云参数和降水的相关性研究[J].气象,52(8):916-927. Li Q, Jiang S J, Cai M, et al, 2026. Research on the correlation between FY-4A Satellite cloud parameters and precipitation in summer in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 52(8):916-927(in Chinese).

浙江夏季 FY-4A 卫星云参数和降水的相关性研究^{*}

李 琦¹ 姜舒婕² 蔡 森¹ 段 婧¹ 周毓荃¹ 程 莹² 杨 帆¹

1 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室,北京 100081

2 浙江省人工影响天气中心,杭州 310051

提 要: 利用风云四号 A 星(FY-4A)云反演产品和浙江省地面雨滴谱数据,统计分析了 2020—2022 年浙江夏季降水特征及其与卫星云参数的关系。根据设定的降水强度阈值划分不同降水等级,发现浙江夏季降水以中雨出现频率最高,暴雨多出现在浙南山地,并且该地区对流云降水的出现频率也最高。降水特征同卫星云参数的关系表现为:云类型(CLT)为水云和卷云时小雨的出现频率最高,为过冷水云和混合云时对应的降水主要集中在中到大雨,为冰云时大雨特别是暴雨的出现频率最高,多层云则具有与水云近似的降水特征;平均降水强度随云顶温度(CTT)的降低、云光学厚度(COT)的增大而增大,但本文统计的云有效粒子半径(CER)与降水强度的相关性则不如前两者显著。双参数组合(CTT 和 COT),降水强度呈现规律性梯度变化并且对 COT 的变化有更高的敏感性,在低 CTT、高 COT 情况下更易产生强降水;三个参数组合(进一步引入 CER),则能反映云滴碰并效率对降水微物理过程的影响,从而更准确地判识降水。对流云降水较层状云降水具有 CTT 更低且 COT 更大的特点,但层状云降水中也时常伴有对流过程。

关键词: FY-4A 卫星,雨滴谱,降水特征,云参数,相关性分析

中图分类号: P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.050901

Research on the Correlation Between FY-4A Satellite Cloud Parameters and Precipitation in Summer in Zhejiang Province

LI Qi¹ JIANG Shujie² CAI Miao¹ DUAN Jing¹ ZHOU Yuquan¹ CHENG Ying² YANG Fan¹

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification, CMA, Beijing 100081

2 Zhejiang Weather Modification Center, Hangzhou 310051

Abstract: Based on the cloud products from FY-4A Satellite and the raindrop spectrometer data in Zhejiang Province, this paper analyzes the characteristics of summer precipitation and its relationship with cloud parameters from 2020 to 2022. The results show that, according to the precipitation intensity, the occurrence frequency of moderate rainfall is the highest in summer in Zhejiang, torrential rainfall mostly occurs in the mountainous areas of southern Zhejiang, and the occurrence frequency of convective cloud precipitation in this area is also the highest. The relationship between precipitation characteristics and cloud parameters is manifested as follows. The occurrence frequency of light rainfall is the highest for water cloud and cirrus cloud, supercooled water cloud and mixed cloud tend to result in moderate to heavy rainfall, ice cloud has the highest occurrence frequency to produce heavy rainfall, particularly torrential rainfall and

^{*} 风云卫星应用先行计划(FY-APP-2022.0111、FY-APP-2024.01.06)、中国气象局“揭榜挂帅”科技项目(CMAJBGS202215)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J033)共同资助

2025 年 1 月 22 日收稿; 2026 年 5 月 9 日收修定稿

第一作者:李琦,主要从事人工影响天气与卫星云遥感研究. E-mail:airforce1_q@163.com

通讯作者:蔡森,主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail:caibird133@163.com

overlap cloud has similar precipitation features to water cloud. The average precipitation intensity increases with the decrease of cloud top temperature (CTT) and with the increase of cloud optical thickness (COT), but its correlation with cloud effective particle radius (CER) is not significant in this study. The combination of two parameters (CTT and COT) demonstrates the gradient variation of precipitation intensity and its higher sensitivity to COT, with heavy precipitation more likely to occur under low CTT and high COT. Incorporating CER to construct a three-parameter combination further reflects the effect of cloud droplet coalescence efficiency on precipitation microphysical processes, leading to more precise precipitation estimation. Convective cloud precipitation has the characteristics of lower CTT and higher COT compared with stratiform precipitation, but the stratiform precipitation is often accompanied by convective processes.

Key words: FY-4A Satellite, raindrop spectrometer, precipitation characteristics, cloud parameter, correlation analysis

引言

云的结构特征与降水的发生发展紧密相关,不同的云结构特征对应不同的降水概率、降水类型和降水强度等,所以研究云结构与降水的关系,不仅可以了解降水形成的云微物理过程,也可以建立降水同云参数的定量关系,提高对地面降水特别是突发性极端降水的估测和预警能力(张夕迪和孙军,2018;邵建等,2025)。卫星作为观测云的一种重要手段,具有观测范围广、光谱信息丰富、不受地形条件限制等优点,特别是静止卫星能够提供高时空分辨率的观测数据,有助于了解云及对应降水的发展演变特征(王远谋和郁凡,2017;王明等,2022)。

针对卫星遥感云特性同降水的关系,国内外学者已开展了多项研究。Rosenfeld and Gutman (1994)、Rosenfeld and Lensky (1998)利用 NOAA/AVHRR 卫星资料,分析了可降水云的云微物理特征以及对流云中微物理过程同降水形成间的关系。Thies et al (2008)利用欧洲静止气象卫星(Meteosat)资料提出了一种区分对流云和平流层状云降水类型和降水强度的方法。蔡森等(2010)针对2008年我国北方一次层状云降水过程,将FY-2C/D静止气象卫星反演的云参量和地面同时段雨滴谱观测资料进行联合分析,发现云参量先于地面降水变化,同时云光学厚度同地面降水量的相关性最好。周毓荃等(2011)、王磊等(2019)和龚静等(2021)利用FY-2系列卫星反演的云特征参量,先后研究了安徽、华北和青海地区层状云和对流云在不同降水强度下的云参数频数分布特征,均认为云顶高度/温度和云光学厚度的组合对于分析判断地面降水落区和降水强度

更加有效,进而提出利用卫星云参量判别人工增雨潜力的方法。桂海林等(2019)基于日本静止气象卫星(Himawari-8)的云顶温度、云光学厚度和云有效粒子半径等三个参数,对中国中东部地区2017年夏季的降水资料进行了分析,发现单个云参数对降水强度的估计精度不如两个或三个云参数。Min et al (2019)和晏良锐等(2024)以全球降水测量卫星(GPM)的降水产品作为真值,分别利用Himawari-8和我国风云四号静止气象卫星A星(FY-4A)数据,基于随机森林算法建模进行定量估测降水并得到了不错的结果。孙绍辉等(2019)通过匹配Himawari-8红外亮温、亮温差同GPM近地面雨强产品,建立能够较好识别不同等级雨强的查算表。王根等(2020)在统计降水和非降水区Himawari-8红外亮温梯度变化的基础上,采用字典学习法构建匹配的亮温和GPM降水字典并利用K最近邻法进行降水和非降水信号识别,最后针对降水信号基于正则化约束法实现降水反演。关吉平等(2024)利用FY-4A多通道数据训练深度学习方法降水估计模型,其降水估计效果优于使用传统物理反演方法的卫星降水产品;在模型训练中加入地形数据,能在保持降水区域识别能力的同时减小对降水量的估计误差。上述研究增进了对卫星云观测同降水间关系的认识,也为更加深入的精细化研究奠定了基础。

浙江位于我国东南沿海地区,属于亚热带季风气候,地势东高西低,不同地区的降水差异较大,山区年降水量普遍较大,而平原地区年降水量相对较小。受东亚夏季风主导所带来的有利水汽输送条件和频发的不同类型降水天气系统影响,夏季是浙江一年中最主要的降水集中期,形成明显的雨热同期现象(曾秀娟等,2023)。本文利用FY-4A卫星和浙

江省多部地面雨滴谱观测资料,分析了浙江地区 2020—2022 年夏季(6—8 月)不同地形条件下的降水特征,并基于该分析结果研究了不同降水对应的卫星云参数特性,最后结合浙江地区夏季一次典型对流天气过程,对判识降水落区和强度的卫星云参数指标进行验证。本研究旨在为卫星资料在防灾减灾预警和人工影响天气中的应用提供参考。

1 资料和方法

1.1 使用资料

本文使用的卫星资料为 FY-4A 辐射成像仪(AGRI)的云特性反演产品,该产品来自风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/default.aspx>)。FY-4A AGRI 设计有覆盖可见光至长波红外共计 14 个通道,其反演的云产品包括云检测、云相态、云类型、云顶温度、云顶高度、云顶气压、云光学厚度和云有效粒子半径等,产品的空间分辨率为 4 km,时间分辨率最高可达约 5 min(Yang et al, 2017)。本文主要使用云类型(CLT)、云顶温度(CTT)、云光学厚度(COT)和云有效粒子半径(CER)。

降水资料则来源于 2020—2022 年夏季(6—8 月)浙江省约 58 部激光粒子谱测量仪(图 1)观测的雨滴谱信息。该仪器可从激光强度的衰减信号中提取粒子粒径、粒子末速度及粒子数目等信息。仪器

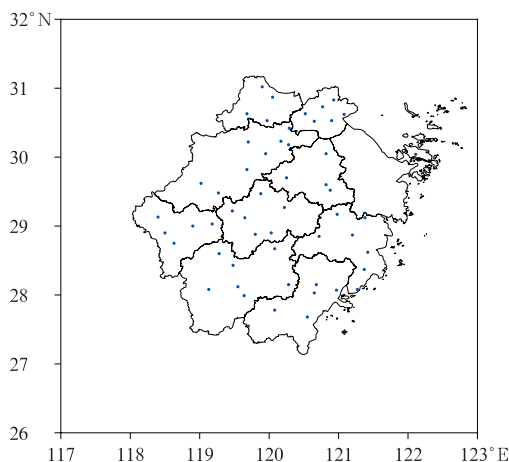


图 1 浙江省地面激光粒子谱测量仪分布

Fig. 1 Distribution of laser precipitation particle spectrometers in Zhejiang Province

的采样面积为 45.6 cm^2 ,雨滴谱观测的时间频次为 1 min,测量的粒子尺度范围为 $0.125 \sim 8 \text{ mm}$,速度范围为 $0.2 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。作为对降水量的直接观测,雨滴谱具有较高的观测精度。

1.2 数据处理

雨滴下落过程中发生的碰撞、重叠等会使粒子分布在直径-速度关系范围之外,因此为了提高数据的可用性,首先需对雨滴谱数据进行质量控制处理。根据粒子直径与粒子下落速度的经验曲线(Atlas et al, 1973),剔除偏离曲线 60% 以上的数据,同时剔除雨滴数量少于 10 个或者降水强度小于 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的样本(Chen et al, 2016; 2017),最后将持续时间超过 30 min 的降水过程定义为降水事件,并得到质量控制后的降水强度数据。

为了得到准确的分析结果,进一步对卫星数据和雨滴谱数据进行精细的时空匹配处理。空间上,采用距离雨滴谱位置不超过 1 个像元的最邻近匹配法,这样无论云是连续的还是分散的,获取的都是雨滴谱正上方的信息。时间上,查询发现当进行全圆盘扫描时, FY-4A AGRI 观测到浙江省的时间为起始观测时间后的第 2~3 分钟,当进行中国区域扫描时,观测到浙江省的时间为起始观测时间后的第 1~2 分钟。因此在进行时间匹配时,选取卫星观测浙江省结束时间的雨滴谱分钟数据,这样既能包含降水强度在短时间变化较小的层状云的降水特征,也能捕获降水强度变化较大的对流云的降水特征;当雨滴谱观测时间处在 FY-4A 全圆盘扫描时段内,仅选择第 3 分钟的数据及其对应的卫星数据,当雨滴谱观测时间处在 FY-4A 中国区域扫描时段内,仅选择第 2 分钟的数据及其对应的卫星数据。经过上述时空匹配方法,可确保卫星同雨滴谱观测的是同一位置的云及对应的降水特征,据此获得有效样本共计 53437 个。

2 降水特征及其同卫星云参量的关系

2.1 不同地形条件下的降水特征分析

根据地形差异将浙江划分为四个典型地区:浙北平原、浙中盆地、浙南山地和滨海岛屿。对于降水等级的划分,由于本文使用的是雨滴谱观测得到的降水强度(r),而非 24 h 累计降水量,无法直接采用

气象标准中的划分依据,因此考虑到不同等级降水对应的物理机制和降水强度变异性特征(例如,小雨和中雨多源于层状云降水,持续时间较长、降水强度变化较小;大雨和暴雨通常来自对流性降水,持续时间短、降水强度跨度大),本文设定了相应的降水强度阈值并划分降水等级,即: $r < 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为小雨, $0.5 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为中雨, $2.0 \sim 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为大雨, $r \geq 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 为暴雨。该划分方法既与气象业务中的降水等级划分概念相对应,也能确保每个降水等级中包含有足够的样本数(王磊等, 2019; 龚静等, 2021)。

据此统计得到不同地区不同降水等级的出现频率(表 1)。浙江夏季,中雨的出现频率最高(39.55%),平均降水强度为 $1.11 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,其次为大雨(23.11%),平均降水强度为 $3.18 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,小雨和暴雨则相当(均为 18.67%),平均降水强度分别为 $0.32 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $15.42 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。四个地区比较而言,浙南山地出现暴雨的频率较其他地区更高,滨海岛屿出现小到中雨的频率更高,而浙北平原和浙中盆地则是大雨的出现频率相对高。

表 1 2020—2022 年夏季浙江省不同地区
不同等级降水的出现频率(单位:%)

Table 1 The occurrence frequency of different precipitation intensities in different regions in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022 (unit: %)

地区	小雨	中雨	大雨	暴雨
浙北平原	18.66	39.58	24.81	16.95
浙中盆地	17.86	38.45	24.29	19.40
浙南山地	17.16	38.63	22.71	21.50
滨海岛屿	21.22	41.76	20.75	16.27
浙江全省	18.67	39.55	23.11	18.67

进一步根据不同降水强度特征划分不同降水类型。利用 Chen et al(2013) 提出的方法,当连续 11 个样本 $r \geq 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且标准差 $> 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,中心样本定义为对流云降水(具体表现为强度变化大的短时强降水);当连续 11 个样本 $r \geq 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且标准差 $\leq 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,中心样本定义为层状云降水(具体表现为强度变化小的连续性均匀降水);不满足以上 2 个条件的样本定义为其他降水,据此统计得到不同地区不同降水类型的出现频率(表 2)。总体而言,浙江夏季对流云和层状云降水的出现频率累计约占 46%,二者间的比例约为 1:6;其中,浙南山地出现对流云降水的频率最高,浙北平原和浙中盆地出现层状云降水的频率较高,这与降

水等级的对应关系相似。

表 2 2020—2022 年夏季浙江省不同地区
不同降水类型的出现频率(单位:%)

Table 2 The occurrence frequency of different precipitation types in different regions in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022 (unit: %)

地区	对流云降水	层状云降水	其他降水
浙北平原	5.05	39.63	55.32
浙中盆地	7.07	40.31	52.62
浙南山地	7.67	38.93	53.40
滨海岛屿	5.51	38.35	56.14
浙江全省	6.42	39.32	54.26

2.2 卫星云参数同降水强度的相关性分析

降水作为云的产物,不同降水特征反映不同云的特性。为揭示云宏观、微观特性与降水强度的关系,首先基于卫星云参数统计不同地区降水样本的分布情况(图 2)。结果显示,云顶温度(CTT)高于 0°C 的纯暖云降水比例较小,当 CTT 介于 $-35 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 时,浙北平原和浙中盆地的降水出现频率较高,当 CTT 低于 -35°C 时,浙南山地和滨海岛屿的出现频率更高,并且浙南山地降水样本峰值对应的 CTT 较滨海岛屿更低(图 2a)。对于云光学厚度(COT)和云有效粒子半径(CER),不同地区降水出现频率最高的区间一致,分别为 COT 在 $30 \sim 40$ 和 CER 在 $20 \sim 25 \mu\text{m}$ 。在峰值处,浙北平原和滨海岛屿的 COT 大于浙中盆地和浙南山地,CER 则相对偏小。当 COT 大于 50 时,随着 COT 继续增大,浙中盆地和浙南山地的降水出现频率持续高于浙北平原和滨海岛屿(图 2b)。CER 则为除峰值区间外,浙北平原和滨海岛屿的降水出现频率在其余区间普遍高于浙中盆地和浙南山地(图 2c)。

进一步计算不同云参数各数值区间内降水强度样本的中值,可得降水强度随云参数的变化特征(图 3)。分析可见,当 CTT 高于 -60°C 时,不同地区的平均降水强度基本均小于 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 且表现出较为一致的分布特征;当 CTT 低于 -60°C 时,除滨海岛屿外,其他三个地区的平均降水强度均呈明显上升趋势,其中浙南山地的增幅最大,表明在山地地形抬升作用下发展的云更易产生强降水;并且,在夏季太阳辐射增强使大气不稳定性增加的背景下,由地形触发的暖对流也可导致短时强降水,由图可见,当 CTT 高于 10°C 时,浙南山地的平均降水强度明显升高(图 3a)。COT 的变化特征与 CTT 有所不

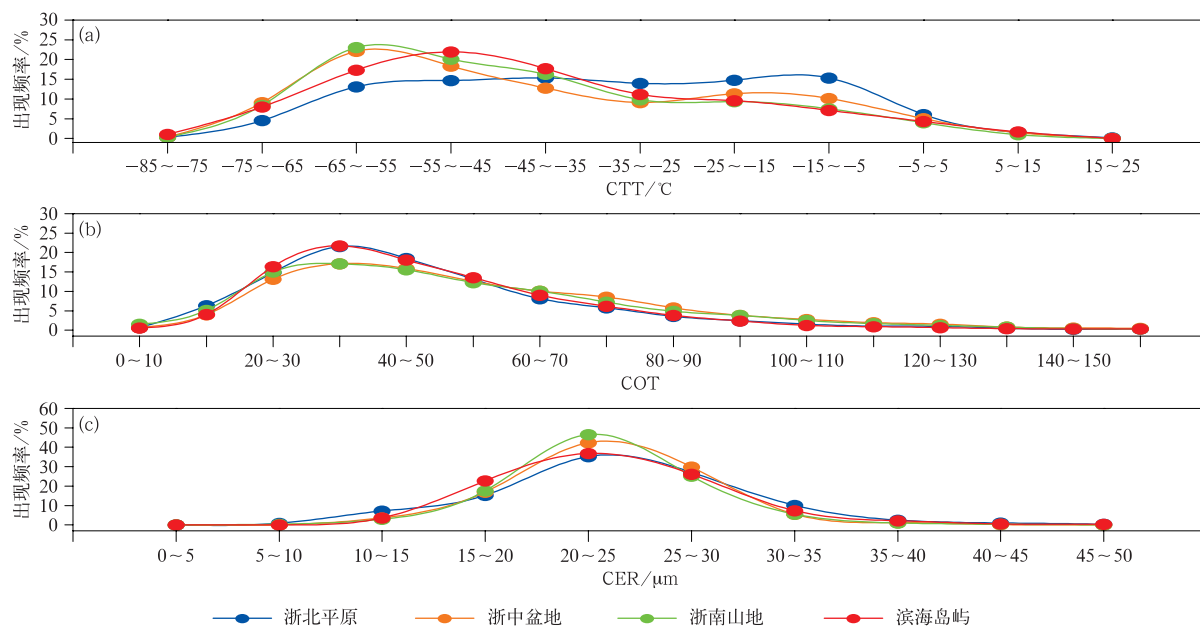


图 2 2020—2022 年夏季浙江省不同地区降水出现频率随 FY-4A 云参数的变化

(a)CTT,(b)COT,(c)CER

Fig. 2 Variation of precipitation occurrence frequency with FY-4A cloud parameters in different regions in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022

(a) CTT, (b) COT, (c) CER

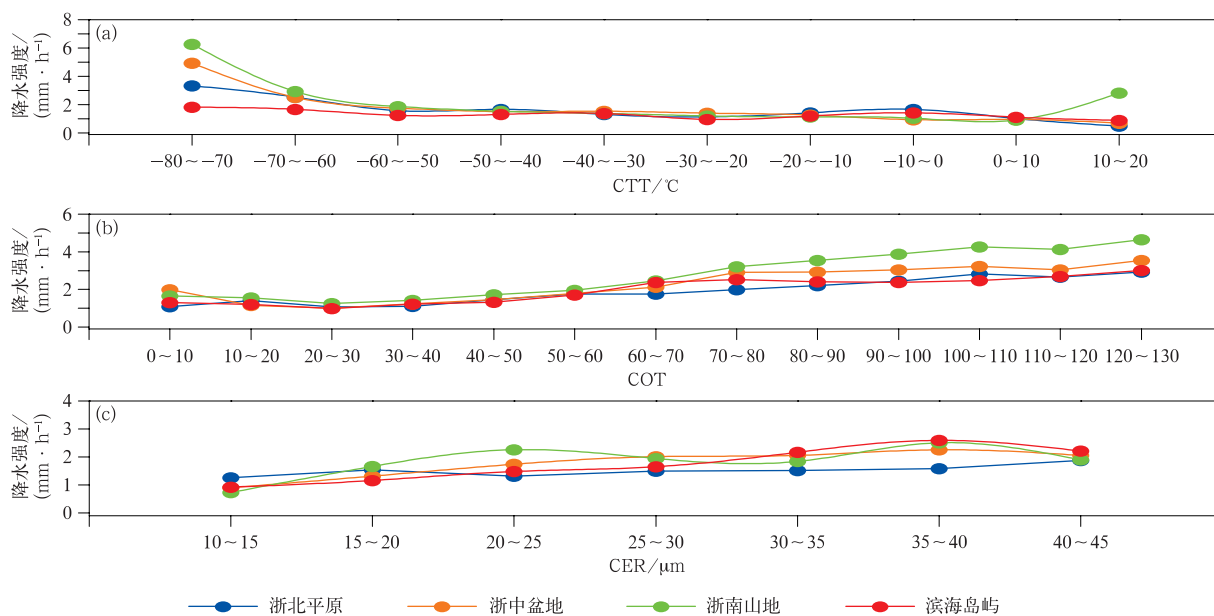


图 3 2020—2022 年夏季浙江省不同地区降水强度随 FY-4A 云参数的变化

(a)CTT,(b)COT,(c)CER

Fig. 3 Variation of precipitation intensity with FY-4A cloud parameters in different regions in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022

(a) CTT, (b) COT, (c) CER

同(图 3b),当 COT 大于 30 时,平均降水强度随着 COT 增大而持续上升,表明 COT 与降水的相关性

较 CTT 更高,当 COT 大于 60 时,平均降水强度的增幅更加明显且不同地区间差异逐渐增大。值得注

意的是,当 COT 小于 20 时,平均降水强度也有一定程度的升高,表明对于反演为小光学厚度的云(如积雨云云砧或上薄下厚的多层云),其仍可能伴随有较强降水的产生,这增加了对于较小 COT 云降水强度判断的不确定性。降水强度随 CER 的变化特征(图 3c)不如前两个云参量显著,整体表现为随着 CER 的增大而略有升高,并且不同地区在不同 CER 区间内的平均降水强度差异也不大,这是由于本文统计得到的 CER 样本多集中于较小数值区间,无法

体现更大云滴粒径所对应的降水特征。

除了上述云参量外,云的热力学相态即云类型(CLT)对地面降水也具有一定的指征作用,不同类型云具有不同的微物理过程和降水效率。表 3 统计了浙江不同地区不同云类型的出现频率。总体而言,冰云是浙江夏季出现最多的云类型(61.7%),其次为过冷水云(13.75%)和混合云(12.67%),而水云(3.16%)、多层云(8.06%)和卷云(0.66%)的出现频率则较低。

表 3 2020—2022 年夏季浙江省不同地区不同云类型的出现频率(单位:%)
Table 3 The occurrence frequency of different cloud types in different regions in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022 (unit: %)

地区	水云	过冷水云	混合云	冰云	卷云	多层云
浙北平原	3.67	20.98	16.50	49.46	0.48	8.91
浙中盆地	3.09	14.72	12.21	62.60	0.28	7.10
浙南山地	2.38	9.07	10.46	67.82	0.51	9.76
滨海岛屿	3.66	11.88	11.90	65.42	1.40	5.74
浙江全省	3.16	13.75	12.67	61.70	0.66	8.06

从不同地区分布来看,浙北平原出现过冷水云和混合云的频率均显著高于其他地区,表明该地区存在更多的过冷液态水云,其云顶温度多集中于冰晶有效核化的温度区间。浙南山地出现冰云的频率最高,水云、过冷水云和混合云则为最低,表明浙南山地的云系发展更为深厚,云顶高度更高,山地的复杂地形作用有助于冰相过程的发展。浙中盆地除卷云外,其余各云类型的出现频率在四个地区中均处于居中水平,这是由于该地区介于浙北平原和浙南山地之间,云类型体现了从平原向山地过渡的特征。滨海岛屿的冰云出现频率较高且卷云出现频率显著高于其他地区,而多层云的出现频率则为四个地区最低,表明滨海岛屿同样以深厚云系为主,并且在海

洋性大气环境背景下,对流系统消散后残留的砧状卷云更易于维持,而单一的海洋下垫面可能使得多层云结构相对不易形成。

不同云类型不仅分布存在地区差异,其自身的云参数特征和降水效率也并不相同。表 4 统计了浙江省不同云类型下的 CTT、COT 和 CER 高频值。可得当云类型从水云、过冷水云、混合云到冰云时,CTT 显著降低,COT 和 CER 则逐渐增大。卷云和多层云两者的 COT 均为最小,CER 均较大,CTT 则介于混合云和冰云之间,这是由于卷云和多层云中上层云的光学厚度较小,导致卫星接收到的辐射能量包含较多云下信息,易造成反演的 CTT 较实际偏高(赵渊明等,2024)。

表 4 2020—2022 年夏季浙江省不同云类型下 CTT、COT 和 CER 的高频值
Table 4 Modal values of CTT, COT and CER for different cloud types in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022

参数	水云	过冷水云	混合云	冰云	卷云	多层云
CTT/℃	3	-9	-21	-55	-40	-31
COT	31	31	34	45	27	27
CER/ μm	17	19	21	25	27	23

表 5 进一步统计了不同云类型所对应的降水特征。结果显示,不同云类型对降水事件的贡献差异显著。其中,冰云的降水出现频率最高,约占总降水样本的 2/3,且其降水强度中值也显著高于其他云类型,表明浙江夏季降水主要来自于具有一定厚度

的冰云,且冰相过程主导的云降水强度更大。其余 1/3 的降水样本中,大多数来自过冷水云和混合云,两者的降水强度中值相近,而降水出现频率较少的多层云、卷云和水云则对浙江夏季降水的贡献较小,且三者的降水强度中值呈依次递减趋势。从降水等

级分布来看,中雨在不同云类型导致的降水中出现频率均为最高,表明这是浙江夏季发生频率最高的降水等级。水云产生小到中雨的频率相对较高,过冷水云和混合云降水主要集中在中到大雨,冰云的大雨特别是暴雨的频率为所有云类型中最高。卷云的降水出现频率最低,其降水特征表现为除小雨出

现频率较高外,暴雨也相对较高,这可能是由于卷云有时作为积雨云的砧状云会伴随有强降水,多层云则表现出与水云近似的降水特征,由于其反演是针对上层冰相卷云、下层液相水云的云结构,因此其降水过程主要由下层的水云部分主导。

综上,将云类型(CLT)作为判识降水及其强度

表 5 2020—2022 年夏季浙江省不同云类型下降水出现频率、降水强度中值及不同等级降水出现频率

Table 5 Frequency of precipitation occurrence, median precipitation intensity, and frequency of precipitation levels under different cloud types in Zhejiang Province during the summer from 2020 to 2022

参数	水云	过冷水云	混合云	冰云	卷云	多层云
降水出现频率/%	2.83	15.17	10.51	63.81	0.61	7.07
降水强度中值/(mm·h ⁻¹)	0.97	1.28	1.33	1.73	1.05	1.21
小雨出现频率/%	22.59	19.14	18.68	14.22	26.26	24.52
中雨出现频率/%	42.76	42.94	45.08	36.83	29.30	43.78
大雨出现频率/%	19.08	23.31	22.22	26.38	23.23	18.04
暴雨出现频率/%	15.57	14.61	14.02	22.57	21.21	13.66

的重要特征参量,再结合卫星云参数的数值特征,能够更准确地描述卫星云特性与降水间的关系。

单一卫星云参数往往仅能反映云的某一方面特征,组合多个云参数则有助于构建更准确的云和降水间的关系。首先选取表征云发展高度和云中含水量的两个参数,即 CTT 和 COT,分析二者对降水强度的协同影响,由 CTT 和 COT 二维参数空间内降水强度中值的热力图,可以发现降水强度的分布呈现出梯度差异(图 4)。当 CTT 高于-35℃且 COT 小于 35 时,平均降水强度小于 1 mm·h⁻¹;当 CTT

介于-65~0℃且 COT 介于 35~55 时,平均降水强度约为 1~2 mm·h⁻¹;当 CTT 低于-35℃且 COT 大于 55 时,平均降水强度大于 2 mm·h⁻¹且随着 COT 的增大呈现显著增强趋势。并且,当降水发生时,COT 的主导作用较 CTT 更强,表现为当 COT 小于 55 时,即使 CTT 较低,降水强度仍维持在较弱水平,而当 COT 大于 55 时,降水强度随 CTT 降低而显著增强,进一步通过敏感性量化对比发现,在相同 COT 区间内,最大与最小 CTT 区间对应的降水强度差值平均为 0.75 mm·h⁻¹,而在相同 CTT 区间内,最大与最小 COT 区间对应的降水强度差值平均为 1.63 mm·h⁻¹,表明降水强度对 COT 变化的敏感性高于 CTT。CTT 和 COT 双参数的协同效应体现了云垂直结构对降水过程的重要作用:较大的 COT 意味着云内含有更多的气且云垂直厚度更大,为降水粒子的形成创造了更好的水汽条件和足够长的碰并增长路径;而 CTT 则指示了云的发展高度,在较大 COT 基础上,CTT 越低通常伴随越强烈的上升运动,有利于云粒子的快速增长,二者的不同组合解释了降水强度的梯度差异。

在此基础上,进一步引入表征云粒子尺度的 CER,分析三个参数组合下的降水强度分布特征(图 5)。本研究统计的降水云样本中,CER 主要集中在 10~40 μm。由图 5 可见,随着 CER 的增大,由云发展不高且降水强度整体偏弱逐渐向强降水覆盖范围扩大转变,即使在 COT 较小时,平均降水强

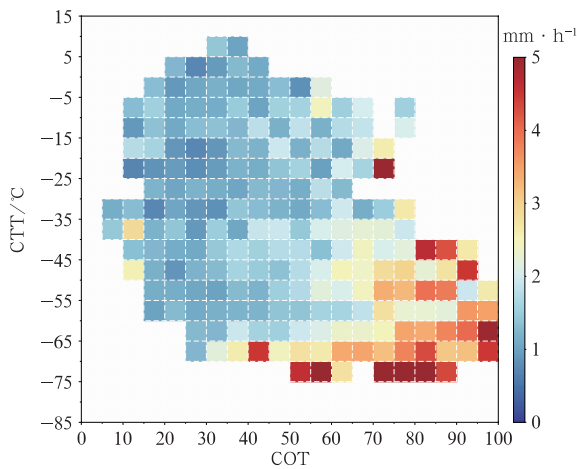


图 4 不同 CTT、COT 下的降水强度中值分布
Fig. 4 Distribution of median precipitation intensity under the collaborative influence of CTT and COT

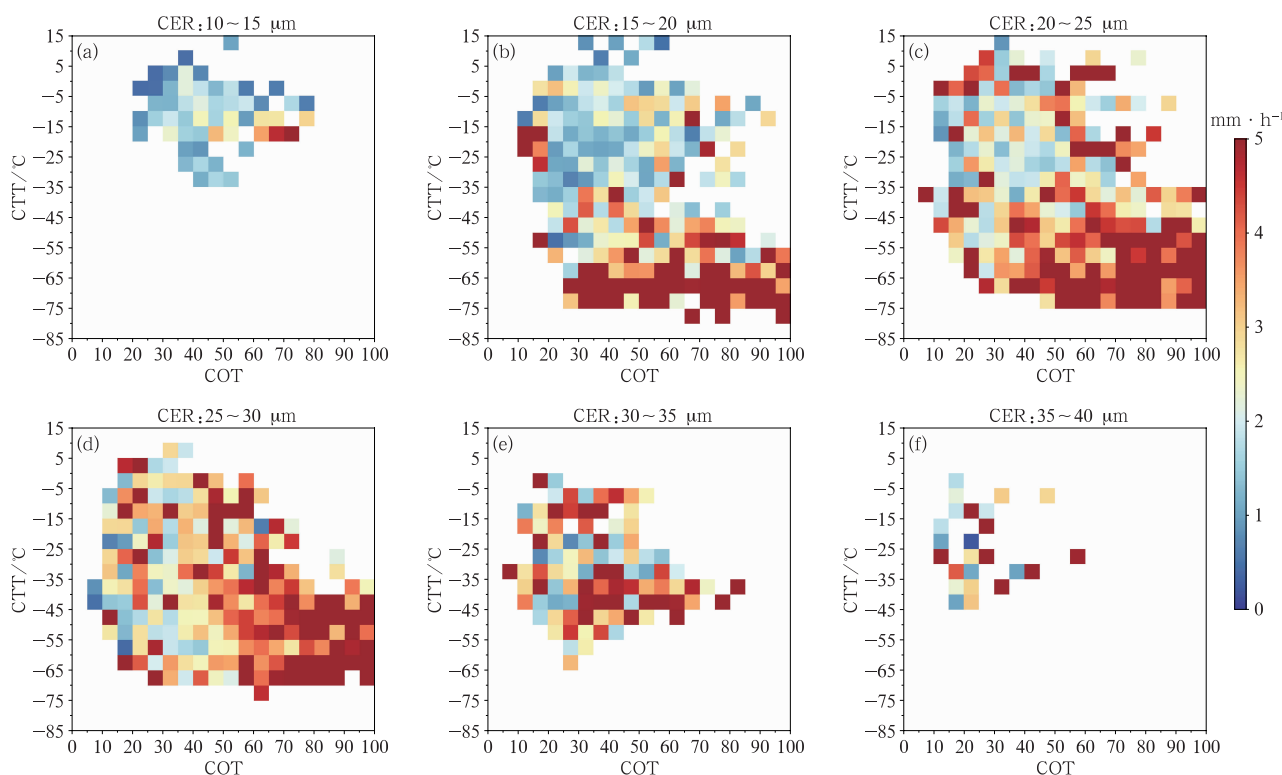


图 5 不同 CTT、COT、CER 下的降水强度中值分布

Fig. 5 Distribution of median precipitation intensity under the collaborative influence of CTT, COT and CER

度也有所增大。这是由于 CER 增大提升了云滴间的碰并效率,加速了云粒子的增长和降水粒子的形成,进而使降水强度也有所增大。但当 CER 过大时,云中大粒子较多,云滴接近雨滴尺度,会快速通过碰并增长形成降水并下落,导致云内难以维持大量大粒子,云粒子过大可能指示云内降水过程已较为充分,云系多处于降水过程后期、云体趋于消散阶段,难以维持强降水强度,因此也呈现出了降水样本数量减少的趋势。因此,CER 大小决定了云内粒子的碰并效率,是影响云降水微物理过程的重要参数;CER 过小时,粒子尺度不足限制了降水效率,CER 过大时,粒子快速下落导致云系难以维持。三个参数协同为卫星反演降水提供了更精细的物理依据,有助于构建更为精准的云降水关系模型,提升卫星估测降水的精度。

2.3 卫星云参数同降水类型的相关性分析

重点对比分析对流云降水和层状云降水的卫星云参数特征。图 6 为两类降水中不同云类型(CLT)的占比,可见对流云降水样本中冰云占比为 79.49%,高于层状云降水中的 67.41%,而其他云类型占比

均低于层状云降水,表明对流云降水大多以冰云为主。从两类降水对应的 CTT、COT 和 CER 统计分布(图 7)可见,对流云降水通常具有更低的 CTT 和更大的 COT,而二者的 CER 则无显著差异,表明 CTT 和 COT 是区分对流云和层状云降水的主要参数。其中,对流云降水的 CTT 主要集中在 $-62 \sim -39^{\circ}\text{C}$,低于层状云降水的 $-58 \sim -27^{\circ}\text{C}$;对流云降水的 COT 则主要集中在 $40 \sim 83$,大于层状云降水的 $35 \sim 70$ 。

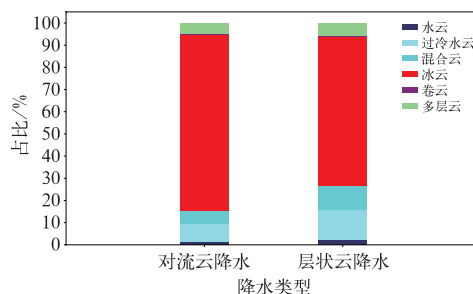
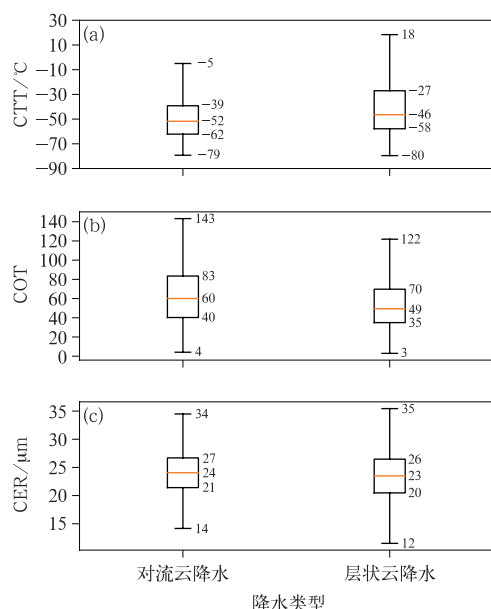


图 6 对流云和层状云降水的不同云类型占比
Fig. 6 Proportion of different cloud types for convective and stratiform precipitations



注:触须上下端及分别代表最大和最小值,
箱体三条线自下而上分别代表
第 25%、50% 和 75% 分位值。

图 7 对流云和层状云降水的(a)CTT,
(b)COT,(c)CER 分布箱线图

Fig. 7 Box plots of (a) CTT, (b) COT and
(c) CER distributions for convective
and stratiform precipitations

进一步对比对流云和层状云降水在 CTT 和 COT 组合下的统计特征。热力图显示两类降水在双参数空间出现频率的差值分布(图 8),其中,正值表示对流云降水出现频率更高,负值则表示层状云降水出现频率更高。由图可见,对流云降水更多出现在 CTT 较低且 COT 较大时,但这两类降水在卫星云参数特征上也并未表现出明显的区分界限,这是由于在一些复杂的天气系统中,可能会出现层状云背景中嵌有对流云团发展的情况,导致该云系同时具备两类降水的特征,从而使其样本在卫星云参数分布上存在部分重叠。

3 个例分析

基于上文的分析结果,本节通过 2023 年 6 月 5 日浙江地区出现的一次对流天气过程,分析卫星云参数对降水的指示特征。大气背景条件显示浙江位于副热带高压边缘,500 hPa 以偏西气流为主,浙北存在干区,850 hPa 受低涡切变南侧的西南气流控

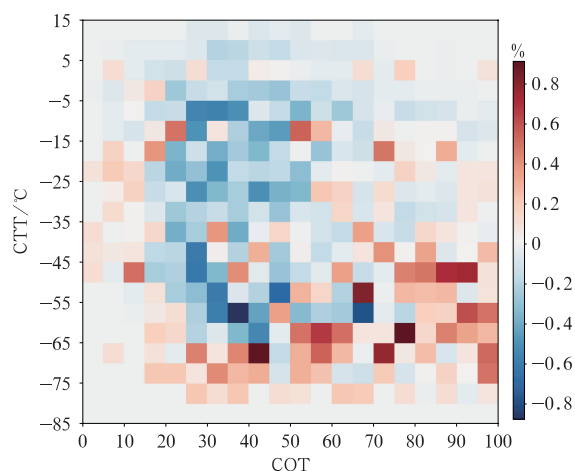


图 8 不同 CTT、COT 下的对流云和
层状云降水出现频率的差值分布

Fig. 8 Distribution of occurrence frequency
differences between convective and
stratiform precipitation under the
collaborative influence of CTT and COT

制,有较好的湿度条件。副热带高压边缘的不稳定条件、中低层的湿度条件和上干下湿的配置的共同作用,有利于对流天气的产生。

6 月 5 日午后浙江中部有降水云团自西向东移动,雷达回波显示云团的组合反射率整体在 15~45 dBz,强中心达到 50 dBz(图略)。云团移动过程中伴随着新生、发展、成熟和消亡,单体维持时间在 0.5~3 h,回波具有簇状对流云的特征,具体表现为多个对流成簇状同时发生发展(朱士超等,2017)。选取典型时刻(16 时,北京时,下同)FY-4A 云参量及 16—17 时降水量分别列于图 9 和图 10。由图可得,CLT 为冰云类型、CTT 低于约 -50°C 或 COT 大于约 50 时,对应地面有降水产生的概率更高,CER 则无明显划分。CTT 低于约 -50°C 且 COT 大于约 50 时,对应的地面区域小时降水量大于 5 mm,同时相较于孤立生消的对流单体,发展过程中同其他单体合并形成更大范围的对流云系更易产生短时强降水,表明 CLT、CTT 和 COT 均能在一定程度上定量反映降水的落区和强度,但由于传统物理方法反演的 COT 和 CER 依赖于可见光—近红外波段的太阳反射特性,因此该云参量仅适用于白天,夜间仅用 CLT 和 CTT 来判断地面降水,可能增大降水估测误差。

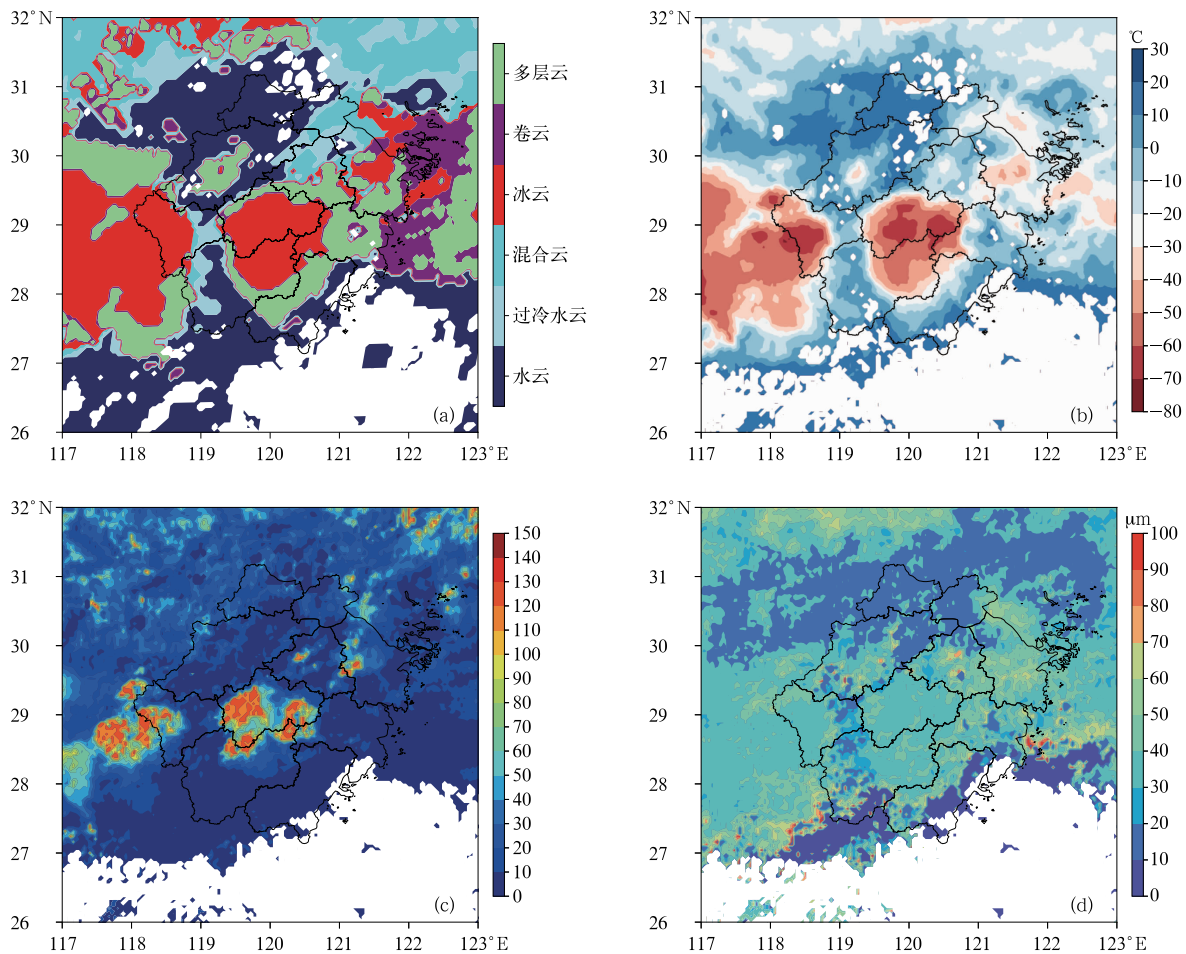
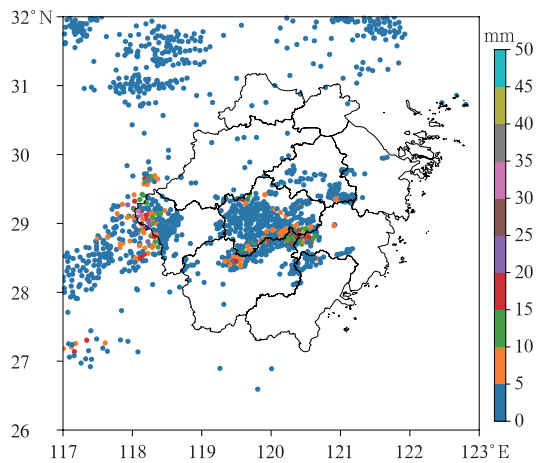


图 9 2023 年 6 月 5 日 16 时浙江省 (a)CLT, (b)CTT, (c)COT, (d)CER

Fig. 9 (a) CLT, (b) CTT, (c) COT and (d) CER of Zhejiang Province at 16:00 BT 5 June 2023

图 10 2023 年 6 月 5 日 16—17 时
浙江省降水量Fig. 10 Accumulated precipitation
in Zhejiang Province
from 16:00 BT to 17:00 BT 5 June 2023

4 总结与讨论

本文利用我国风云四号静止气象卫星 A 星 (FY-4A) 云反演产品和浙江省多部地面雨滴谱观测数据, 统计分析了浙江地区 2020—2022 年夏季 (6—8 月) 的降水特征, 并基于该结果分析了不同降水特征对应的卫星云参数特性, 表明 FY-4A 云参数对降水有一定的指示意义, 最后通过个例分析对判识降水的云参数指标进行验证。主要结论如下:

(1) 根据降水强度划分, 得到浙江夏季不同降水等级的出现频率由大到小依次为: 中雨 ($0.5 \sim 2.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 39.55%)、大雨 ($2.0 \sim 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 23.11%)、小雨 ($< 0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 18.67%) 和暴雨 ($\geq 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 18.67%)。其中, 暴雨多出现在浙南山地, 滨海岛屿小到中雨的出现频率更高,

浙北平原和浙中盆地则大雨的出现频率更高。区分不同降水类型来看,浙南山地对流云降水的出现频率最高,浙北平原和浙中盆地层状云降水的出现频率较高。

(2)云参数 CLT 为水云和卷云时,浙江夏季小雨的出现频率最高,为过冷水云和混合云时降水主要集中在中到大雨,为冰云时不仅降水出现频率最高,且大雨、特别是暴雨的出现频率最高,为多层云时具有同水云近似的降水特征。

(3)对于降水强度,从单个云参数来看,当 CTT 低于 -60°C 时,除滨海岛屿外,其他地区平均降水强度均呈明显上升趋势,其中浙南山地增幅最大;当 COT 大于 30 时,平均降水强度随 COT 的增大而持续上升;本文统计的 CER 样本主要集中在 $10\sim 40\mu\text{m}$ 区间,区域间降水强度差异较小,且 CER 随参数变化的响应特征不如 CTT 和 COT 显著。双参数(CTT 和 COT)组合时,降水强度在其组合空间内呈现有规律的梯度变化,并对 COT 变化的敏感性高于 CTT,且低 CTT、高 COT 情况下更易产生强降水;引入 CER 构成三个参数组合,则可进一步反映云滴碰并效率对降水微物理过程的影响。

(4)对于降水类型,相较于层状云降水,浙江夏季的对流云降水多出现在 CTT 更低且 COT 更大的(云)条件下,但总体上这两类降水在卫星云参数特征上并没有明显区分,这是因为有些层云系统中也包含有对流过程。此外,本文使用的卫星资料来源于 FY-4A 卫星,现阶段其已降级运行,后续可根据需要,建立关注地区其他同类卫星云产品与降水的统计关系及具体指标,为指导开展更为科学和精准的人工影响天气作业提供依据和参考。

参考文献

- 蔡森,周毓荃,朱彬,2010. 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[J]. 气象与环境科学,33(1):1-6. Cai M, Zhou Y Q, Zhu B, 2010. Analysis of cloud characteristic parameters retrieved by FY2C/D Satellite and the parsivel observation on surface[J]. Meteor Environ Sci, 33(1):1-6(in Chinese).
- 龚静,朱世珍,张鹏亮,等,2021. 青海省东部地区云特征参量与降水相关性分析[J]. 干旱气象,39(6):948-956. Gong J, Zhu S Z, Zhang P L, et al, 2021. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation in the eastern region of Qinghai[J]. J Arid Meteor, 39(6):948-956(in Chinese).
- 关吉平,高延波,黄从雷,等,2024. 基于 Attention-Unet 网络的 FY-4A 卫星降水估计[J]. 气象学报,82(3):398-410. Guan J P, Gao

- Y B, Huang C L, et al, 2024. Estimating FY-4A Satellite precipitation based on a deep learning model Attention-Unet[J]. Acta Meteor Sin, 82(3):398-410(in Chinese).
- 桂海林,诸葛小勇,韦晓澄,等,2019. 基于 Himawari-8 卫星的云参数和降水关系研究[J]. 气象,45(11):1579-1588. Gui H L, Zhuge X Y, Wei X C, et al, 2019. Study on the relationship between Himawari-8-based cloud parameters and precipitation[J]. Meteor Mon, 45(11):1579-1588(in Chinese).
- 邵建,郑鹏徽,裴晓蓉,等,2025. 宁夏强对流天气 FY-4A 卫星云物理参数特征[J]. 气象,51(3):337-348. Shao J, Zheng P H, Pei X R, et al, 2025. Characteristics of FY-4A satellite cloud physical parameters in severe convective weather in Ningxia[J]. Meteor Mon, 51(3):337-348(in Chinese).
- 孙绍辉,李万彪,黄亦鹏,2019. 利用 Himawari-8 卫星红外图像反演降雨[J]. 北京大学学报(自然科学版),55(2):215-226. Sun S H, Li W B, Huang Y P, 2019. Retrieval of precipitation by using Himawari-8 infrared images[J]. Acta Sci Nat Univ Pek, 55(2):215-226(in Chinese).
- 王根,王东勇,吴蓉,2020. Himawari-8/AHI 红外光谱资料降水信号识别与反演初步应用研究[J]. 红外与毫米波学报,39(2):251-262. Wang G, Wang D Y, Wu R, 2020. Application study of Himawari-8/AHI infrared spectral data on precipitation signal recognition and retrieval[J]. J Infrared Millim Waves, 39(2):251-262(in Chinese).
- 王磊,周毓荃,蔡森,等,2019. 华北云特征参数与降水相关性的研究[J]. 气象与环境科学,42(3):9-16. Wang L, Zhou Y Q, Cai M, et al, 2019. Study on correlation between cloud characteristic parameters and precipitation in North China[J]. Meteor Environ Sci, 42(3):9-16(in Chinese).
- 王明,陈英英,周毓荃,等,2022. 基于一次暴雨过程的风云四号 A 星三种云参数应用效果对比分析[J]. 暴雨灾害,41(4):396-404. Wang M, Chen Y Y, Zhou Y Q, et al, 2022. Comparative analysis of application effects of three cloud parameters of FY-4A in a rainstorm case[J]. Torr Rain Dis, 41(4):396-404(in Chinese).
- 王远谋,郁凡,2017. 主要降水与非降水云类的全天时反演试验研究[J]. 气象学报,75(4):618-631. Wang Y M, Yu F, 2017. A retrieval experiment of the entire day classification for precipitation and non precipitation clouds[J]. Acta Meteor Sin, 75(4):618-631(in Chinese).
- 晏良锐,李琦,周毓荃,2024. 基于 FY-4A 和 GPM 的定量降水估测[J]. 气象科学,44(6):1111-1121. Yan L R, Li Q, Zhou Y Q, 2024. Quantitative precipitation estimation based on FY-4A and GPM[J]. J Meteor Sci, 44(6):1111-1121(in Chinese).
- 曾秀娟,李亚东,舒守娟,等,2023. 复杂地形下浙江省夏季午后降水的空间估算及其影响因素[J]. 气象,49(5):574-587. Zeng X J, Li Y D, Shu S J, et al, 2023. Spatial estimation and impact factors of summer afternoon precipitation in Zhejiang Province under complex terrain[J]. Meteor Mon, 49(5):574-587(in Chinese).
- 张夕迪,孙军,2018. 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. 气象,44(10):1245-1254. Zhang X D, Sun J, 2018. Application

- analysis of Himawari-8 in monitoring heavy rain convective clouds[J]. Meteor Mon, 44(10):1245-1254(in Chinese).
- 赵渊明, 孙静, 漆梁波, 等, 2024. 基于L波段探空观测的FY-4A云顶温度产品评估及其在冬季降水相态判识中的应用[J]. 气象, 50(1):59-70. Zhao Y M, Sun J, Qi L B, et al, 2024. Evaluation of FY-4A cloud top temperature product based on L-band radiosonde data and its application in winter precipitation type identification[J]. Meteor Mon, 50(1):59-70(in Chinese).
- 周毓荃, 蔡森, 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 Y Q, Cai M, Ou J J, et al, 2011. Correlation between cloud characteristic parameters and precipitation[J]. Trans Atmos Sci, 34(6):641-652(in Chinese).
- 朱士超, 袁野, 吴林林, 等, 2017. 江淮对流云发生规律及其垂直结构分析[J]. 气象, 43(6):696-704. Zhu S C, Yuan Y, Wu L L, et al, 2017. Analysis on characteristics and vertical structure of convective clouds over the area between Yangtze River and Huaihe River[J]. Meteor Mon, 43(6):696-704(in Chinese).
- Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Rev Geophys, 11(1):1-35.
- Chen B J, Yang J, Pu J P, 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China[J]. J Meteor Soc Japan Ser II, 91(2):215-227.
- Chen B J, Wang J, Gong D L, 2016. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by Thies optical disdrometers over East China[J]. J Appl Meteor Climatol, 55(3):621-634.
- Chen B J, Hu Z Q, Liu L P, et al, 2017. Raindrop size distribution measurements at 4500 m on the Tibetan Plateau during TIPEX-III[J]. J Geophys Res Atmos, 122:11092-11106.
- Min M, Bai C, Guo J P, et al, 2019. Estimating summertime precipitation from Himawari-8 and global forecast system based on machine learning[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 57(5):2557-2570.
- 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(1-4):259-283.
- Rosenfeld D, Lensky I M, 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds[J]. Bull Amer Meteor Soc, 79(11):2457-2476.
- Thies B, Nauß T, Bendix J, 2008. Precipitation process and rainfall intensity differentiation using Meteosat Second Generation Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager data[J]. J Geophys Res Atmos, 113:1-19.
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al, 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(8):1637-1658.

(本文责编:戴洋)