

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).

## 宁夏强对流天气 FY-4A 卫星云物理参数特征<sup>\*</sup>

邵 建<sup>1,2,3</sup> 郑鹏徽<sup>3</sup> 裴晓蓉<sup>1,3</sup> 张肃诏<sup>1,4</sup> 程 瑶<sup>2</sup> 马贝贝<sup>5</sup> 陈豫英<sup>1,4</sup>

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室,银川 750002

3 宁夏气候中心,银川 750002

4 宁夏气象台,银川 750002

5 银川科技学院,银川 750003

**提 要:** 采用 2018—2020 年 FY-4A 多通道扫描成像辐射计观测资料和地面观测资料,利用正态分布检验和相关性分析等统计方法,研究卫星产品在宁夏地区短时强降水、雷电、冰雹三类强对流天气中的分布特征。结果表明:强对流天气对流性的差异导致 FY-4A 卫星产品表现出迥异的分布特征。短时强降水时云顶温度、相当黑体温度主要集中在 200~280 K,云状差异导致温度区间存在明显不同;雷电、冰雹时,主要区间位于 210~270 K;超过 50% 的短时强降水、75% 的雷电和 90% 以上的冰雹发生在对流层中层以上,即大致 5000 m(500 hPa)以上的高空;不同对流天气云滴半径有着明显的差别,短时强降水、雷电、冰雹分别对应着较小云滴、中等云滴和较大云滴;云中液水含量高于  $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  时易发生短时强降水,雷电介于  $250 \sim 400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,而冰雹则介于  $400 \sim 600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ;中等强度的对流层折叠最深深度有利于强降水和雷电发生维持,而冰雹则需要更深的折叠深度。除云顶温度及雷电、冰雹序列中的云顶高度表现为正态分布或准正态分布特征外,其余产品均呈现非正态分布特征。FY-4A 产品与短时强降水显著相关的有对流层折叠最深深度、相当黑体温度、云顶温度和云中液水含量;与雷电显著相关的有对流层折叠最深深度、相当黑体温度和云顶温度;与冰雹显著相关的有云顶高度、对流层折叠最深深度、云中液水含量、相当黑体温度和云顶温度,这些产品应在监测预警中予以重点关注。

**关键词:** FY-4A 卫星,强对流,云物理参数,分布特征

**中图分类号:** P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.011602

## Characteristics of FY-4A Satellite Cloud Physical Parameters in Severe Convective Weather in Ningxia

SHAO Jian<sup>1,2,3</sup> ZHENG Penghui<sup>3</sup> PEI Xiaorong<sup>1,3</sup> ZHANG Suzhao<sup>1,4</sup>

CHENG Yao<sup>2</sup> MA Beibei<sup>5</sup> CHEN Yuying<sup>1,4</sup>

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of  
Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002

2 Ningxia Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002

3 Ningxia Climate Center, Yinchuan 750002

4 Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002

5 Yinchuan University of Science and Technology, Yinchuan 750003

**Abstract:** Based on the observation data of FY-4A Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI) and surface observation data during 2018—2020, the distribution characteristics of satellite products in

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41965001)、宁夏回族自治区科技创新领军人才培养工程(2021GKLRX5)、宁夏回族自治区创新团队(2024CXTD006)和宁夏自然科学基金项目(2024AAC03414)共同资助

2024 年 2 月 2 日收稿; 2025 年 1 月 10 日收修定稿

第一作者:邵建,主要从事天气预报技术研究. E-mail:shaosdh@163.com

different severe convective weathers, including short-time heavy precipitation, lightning and hail, are studied by using statistical methods such as normal distribution test and correlation analysis. The results are as follows. The difference of convection in severe convective weather leads to different distribution characteristics of FY-4A satellite products. During short-time heavy precipitation, the cloud top temperature (CTT) and black body temperature (TBB) are mainly concentrated in the range of 200–280 K, and different cloud shapes lead to significant differences in temperature ranges. However, during lightning and hail processes, the main ranges of CTT and TBB are located between 210–270 K. More than 50% of short-time heavy precipitation, 75% of lightning, and more than 90% of hail occur at altitudes above 5000 m (500 hPa). The radii of cloud droplets in different convective weathers are obviously different. Short-time heavy precipitation, lightning and hail correspond to small, middle and large cloud droplets, respectively. When the liquid water content (LWC) in clouds exceeds  $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , short-time heavy precipitation is prone to occur. For lightning, the LWC ranges from 250 to  $400 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ , and for hail, it ranges from 400 to  $600 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Moderate intensity tropopause folding depth (TZD) is conducive to the occurrence and maintenance of heavy precipitation and lightning, while hail requires deeper folding depth. Except that the CTT and the cloud top height (CTH) in the lightning hail series show normal distribution or quasi-normal distribution characteristics, other FY-4A products do not conform to normal distribution. FY-4A products are significantly correlated to short-time heavy precipitation in CTT, TBB, LWC and TZD, lightning in CTT, TBB and TZD, as well as hail in CTT, CTH, TBB, LWC and TZD. These products need to be paid more attention to in monitoring and early warning operations.

**Key words:** FY-4A satellite, severe convection, cloud physical parameters, distribution characteristic

## 引 言

宁夏深居内陆,位于我国西北地区东部,处于黄土高原、蒙古高原和青藏高原的交汇地带,是我国夏季对流活动的热点区域之一(郑永光等,2010;李栋梁等,2013;刘红武等,2022;汪小康等,2022;许东蓓等,2015)。近年来,在全球气候变暖背景下,宁夏极端天气气候事件发生的频率总体提高,强度相对增强,应对难度越来越大,短时强降水、冰雹、雷电等灾害性天气影响更加广泛。据统计,宁夏气象灾害导致的直接经济损失可占全区 GDP 的 1.9%~6.5% (冯建民等,2012)。

近年来,国内外学者在利用气象卫星开展云观测和研究(范思睿和王维佳,2018;陈渭民,2003;江苏省气象科学研究所,2020;谭仲辉等,2019;王智敏等,2020;林琳等,2006;朱亚平等,2014;王根等,2021;黄晨然,2015)、深入了解各个气象卫星及其载荷的发展应用等方面取得了众多成果(Yang et al, 2017;董瑶海,2016;张鹏等,2016;傅云飞,2019;张晓虎等,2016;张志清等,2017)。基于 FY 系列气象卫星资料反演云和降水的多种宏观、微观物理特征

参数与地面降水的研究发现,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,云液水路径的大值区与地面强降水中心的位置基本一致(王磊等,2019;陈英英等,2007;2009;陈英英,2013;刘晓春等,2012;孙丽等,2020)。在降水发生前 2 小时,云顶温度、黑体亮温、云顶高度和过冷层厚度都处于不断增强的较高水平,且出现快速增强后又不不断减弱,对应后期可能要出现强降水(王颖,2019)。降水大,降水强度与云顶高度、有效粒子半径有较好的正相关,与云顶温度有较好的负相关;反之则不尽然,即云顶高度高、云顶温度低、有效粒子半径大不一定发生大降水(蔡森等,2010;2011)。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(张琪等,2021;张夕迪和孙军,2018)。当云顶高度大于 7.5 km、云粒子有效半径大于  $20 \mu\text{m}$  且云光学厚度大于 10 时,云降水概率普遍都在 30% 以上(尚博和刘建朝,2015)。崔林丽等(2020)比较 FY-4A 卫星的云顶高度、云顶温度和

云顶气压三类产品的精度,发现其质量可靠,与实际观测结果具有很好的一致性。王明等(2022)通过对比分析一次极端暴雨过程中 FY-4A 卫星和 MODIS 卫星原始数据及三类云参数产品,初步评估了 FY-4A 卫星云参数的精度及其在不同雨强条件下的适用性和可靠性。此外,张琪等(2021)分析四川盆地中尺度对流复合体个例的初生和成熟阶段的卫星云图特征,初步得出特征较显著的多个物理量特征及其阈值;史小康等(2023)通过光流法检验云图亮温和不同尺度云团的外推可预报性,发现云团位置预报偏差是外推预报误差快速增长的主要原因,外推预报准确率随着云团空间尺度的减小而降低,为进一步基于人工智能技术开展卫星云图客观应用提供了技术基础。

宁夏因地形复杂,强对流天气主要的高发区集中在贺兰山沿山、六盘山区和中部丘陵区,具有明显的局地性、突发性、不均匀性特征。宁夏高海拔地区气象站点分布少且不均匀,针对强对流天气云团特征的研究受限,FY-4A 卫星资料在宁夏地区强对流天气的应用研究方面工作相对较少(邵建等,2023a;2023b)。本文利用正态分布检验和相关性分析等统计方法,采用多通道扫描成像辐射计观测数据和地面观测资料,针对 2018—2020 年宁夏三类强对流天气(短时强降水、雷电、冰雹),统计形成分类强对流天气下相应的云顶温度、云顶高度、云微物理和光学性质、大气水汽总量等六类卫星产品的观测序列,研究其在不同强对流天气中的分布特征,旨在为天气分析和预报技术研究提供参考,以促进预报预警准确率提升。

1 资料及方法

1.1 所用资料

1.1.1 强对流过程筛选

统计时段:2018—2020 年,每年的 5 月 1 日至 9 月 30 日。

短时强降水过程:以自动气象站小时降水量为统计标准,当宁夏境内至少 3 个相互间距不大于 10 km 的自动气象站小时降水量 $\geq 10$  mm 时,定义为一次短时强降水天气过程。按此标准,在统计时段内共出现 141 次短时强降水过程。

雷电过程:以闪电定位仪小时数据为统计标准,当宁夏境内至少 3 个相邻县(区)辖区内出现不少于 5 次云地闪观测记录时,定义为一次雷电天气过程。按此标准,在统计时段内共出现 462 次雷电过程。

冰雹过程:以观测报文和灾情直报数据为统计标准,当宁夏境内任 1 个县(区)辖区内观测到冰雹时,定义为一次冰雹天气过程。按此标准,在统计时段内共出现 36 次冰雹过程。

频数:针对某一类强对流天气过程,其某一次过程中,出现的总次数定义为过程的频数;所有过程中次数和为总频数。

1.1.2 FY-4A 卫星资料

FY-4A 卫星主要有 32 类定量产品,分别由搭载的多通道扫描成像辐射计、干涉式大气垂直探测仪、闪电成像仪和空间天气监测仪等四种探测器观测得到(表 1)。本文主要选取云顶温度、云顶高度、

表 1 FY-4A 部分产品简表  
Table 1 Brief description of parameters of FY-4A satellite products

产品中文名	英文名及缩写	产品描述	单位
云顶温度	cloud top temperature, CTT	卫星直接观测到的云层顶所具有的温度。设计观测区间为 160~320 K。	K
云顶高度	cloud top height, CTH	卫星直接观测到的云层顶所处的高度。设计观测区间为 1~20 km。	km
相当黑体温度	black body temperature, TBB	包含通道 07~14,即云顶亮温产品。设计有效探测区间 0~400 K。共 8 类,分别对应 3.72、3.72、6.25、7.1、8.5、10.8、12、13.5 $\mu\text{m}$ 不同波段。	K
云滴有效半径	cloud effective radius, CER	云微物理和光学反应观测给出云滴参数。该产品主要用于描述云滴粒子半径。	$\mu\text{m}$
云中液水含量	liquid water content, LWC	云微物理和光学反应观测给出云滴参数。该产品主要描述单位面积云滴粒子云中液水含量。	$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
对流层折叠最深深度	tropopause folding depth, TZD	用于描述平流层高位涡空气挤进对流层的过程,此产品为描述折叠层本身厚度。该产品表征的是平流层空气进入对流层的深度。	km

相当黑体温度、云微物理和光学性质中的云滴有效半径、云中液水含量和对流层顶折叠检测中的对流层折叠最深深度等六类产品进行分析。资料长度为 2018—2020 年每年 5 月 1 日 00 时至 9 月 30 日 23 时(北京时,下同)。

## 1.2 统计方法

### 1.2.1 正态分布检验

正态分布也称高斯分布,其分布态只依赖两个指标:样本的均值和方差。

通常用  $N(\mu, \sigma^2)$  来表示正态分布,其数学表达式为:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

式中: $\mu$  是数学期望, $\sigma$  是标准差,标准差越小,数据越集中。

本文采用“图示法”+“偏度-峰度检验法”对样本数据进行正态性检验。图示法是对样本数据进行分级统计,以直方图直观地展示数据分布,并结合正态曲线判断数据是否符合正态分布。偏度-峰度检验法即通过描述数据偏度( $S$ )和峰度( $K$ )检验数据的正态性;前者描述分布形态的偏斜方向和程度,后者描述分布形态的陡缓程度。若  $S < 0$ ,称序列分布具有负偏离或左偏态,此时左边的尾部相对于右边的尾部要长;当  $S > 0$ ,称分布具有正偏离或右偏态;当  $S = 0, K = 3$  时,为标准正态分布, $S, K$  越接近标准值,序列越符合正态分布。

### 1.2.2 相关性分析

相关性分析是指对两个或者多个具备相关性的变量元素进行分析,从而衡量两个因素的相关密切程度。常用的方法有皮尔逊相关系数法,该方法要求样本序列符合正态分布。由相关系数  $R$  判断相关性,其绝对值越大代表(正、负)相关性越好, $R = 0$  代表着无相关性。一般设定,当相关系数  $R$  的绝对值大于 0.5 时,具有显著的线性相关;处在 0.3~0.5 为低度线性相关。

## 2 强对流云团的云物理参数分布特征

### 2.1 云顶温度

分段和分类统计云顶温度发现(图 1),在短时

强降水过程中,出现频数较高的区间为 200~285 K(约-73~-12℃,约占 98.9%),其中集中在两个区间,分别为 215~240 K(约-58~-33℃,约占 38.3%,对应云分类产品为固态云、混合云或过冷液态云,云状以积状云为主)和 250~270 K(约-23~-5℃,约占 44.8%,对应云分类产品为液态云或过冷液态云,云状为混合类为主),表明宁夏短时强降水云团主要由积状云或积层混合云构成,不同的云状对应不同区间的云顶温度,积状云云顶温度集中在 230 K(-43℃)左右、混合云集中在 260 K(-13℃)左右;这与我国华南、东南地区的海洋性对流云团(这种云团往往导致暖区暴雨)具有一定的不同,海洋性对流云团因其主要为积状云为主,使得其具有更加密集的云顶温度梯度和更加低的温度值(陈涛等,2020)。雷电过程中,出现频数较高的区间为 235~270 K(约-38~-5℃,约占 78.5%),对应云状以积状云为主,表明宁夏雷电云团主要由积状云构成,发生雷电时,云顶温度集中在 250 K(-23℃)左右。而冰雹过程中,出现频数较高的区间为 210~240 K(约-63~-33℃,约占 75%),对应云分类产品主要以固态和混合态为主,云状以积状云为主,表明宁夏冰雹云团主要由积状云构成。

绘制云顶温度的观测曲线和正态曲线的叠加图,用以分析数据的正态性特征。从图中可以看出,在短时强降水(图 1a)、雷电(图 1c)和冰雹(图 1e)过程中,观测数据曲线基本符合正态分布特征,进行多项式平滑后可以看出接近正态分布曲线。统计其观测序列正态性系数:短时强降水样本的偏度系数  $S$  为-0.71、峰度系数  $K$  为 1.12,为左偏态的平缓正态分布;雷电样本的  $S$  为-1.01、 $K$  为 6.03,为左偏态的准正态分布;冰雹样本的  $S$  为-1.37、 $K$  为 1.46,为左偏态的平缓正态分布。

### 2.2 云顶高度

图 2 为短时强降水(图 2a,2b)、雷电(图 2c,2d)和冰雹(图 2e,2f)过程中的云顶高度的统计特征分布。可以看出,短时强降水的观测值序列呈非正态分布,为三峰型分布特征;三个波峰,分别对应 1~3 km(占比 26.6%)、6~9 km(占比 25.0%)、11~12 km(占比 13.8%)三个区间,这基本对应着层状云(液态或过冷液态云)降水、混合型降水(混合态

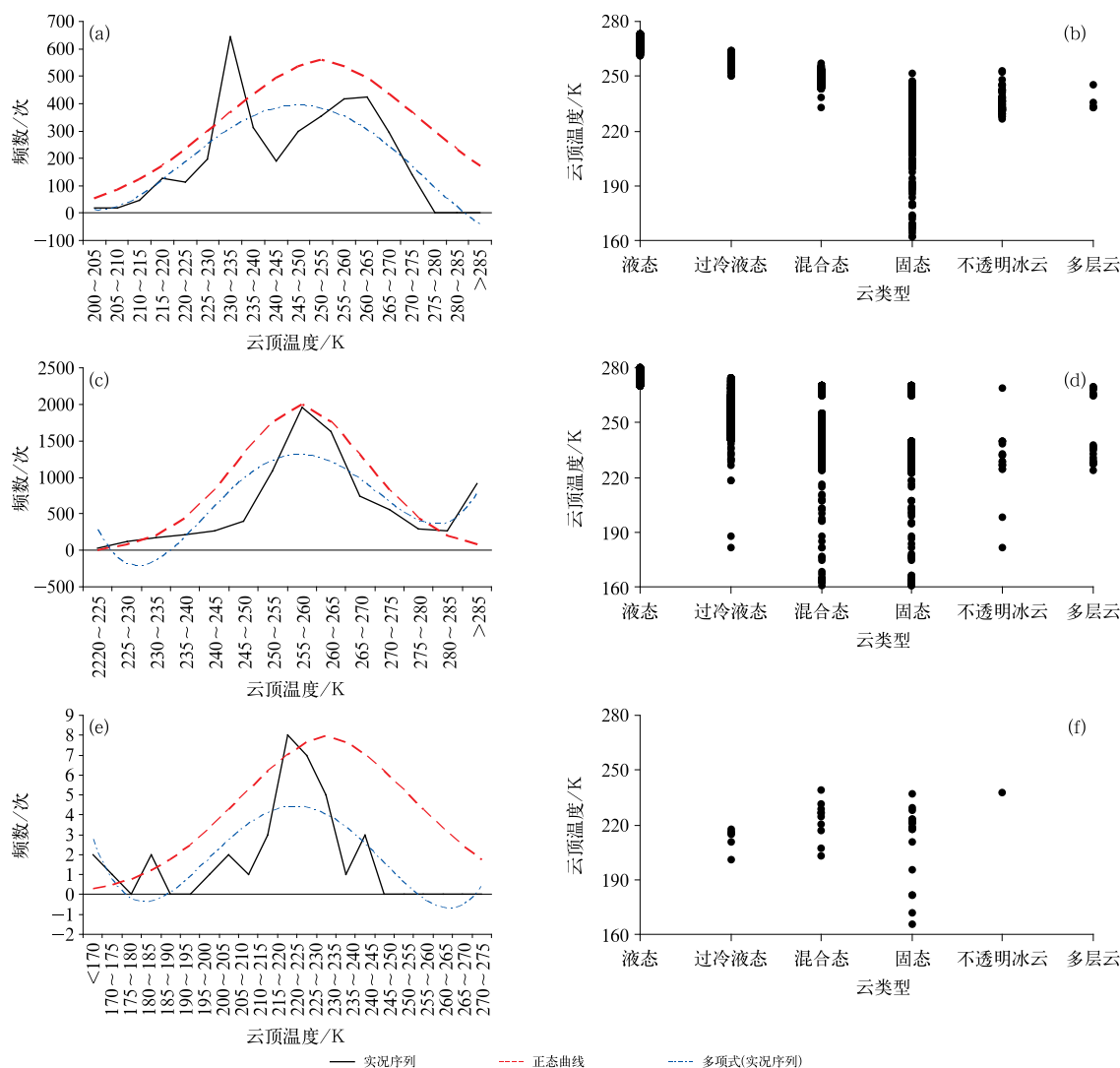


图1 2018—2020年5—9月(a,b)短时强降水、(c,d)雷电和(e,f)冰雹中的云顶温度分布特征  
(a,c,e)分温度区间统计,(b,d,f)分云类型统计

Fig. 1 Characteristics of cloud top temperature in (a, b) short-time heavy precipitation, (c, d) lightning and (e, f) hail from May to September during 2018—2020

云)和积状云(混合态或固态云)降水,这与造成宁夏强降水的云状相一致,与东北双峰型类似(辛悦等, 2023),但与华南、东南地区海洋性对流不同(周万福等, 2018; 崔林丽等, 2020)。统计其发生比率,发现约 56.1%的短时强降水发生在 5 km 以上高空,表明对流高度并不是西北地区短时强降水发生的必要条件,较低的混合型降水往往由于充沛的水汽也会产生较强雨强。雷电的观测值序列为双峰型分布特征,分别对应 2~3 km(占比 26.6%)、6~8 km(占比 25.0%)两个区间;其观测序列与多项式曲线,较接近正态分布特征;对于雷电来说,统计其发生比率,发现约 75.1%的雷暴发生在 5 km 以上高空,表

明雷暴对流高度高于短时强降水。而冰雹的观测值序列由于个例少而呈现为多峰型分布特征,主要的两个波峰分别对应 6~8 km(占比 55.6%)、9~10 km(占比 19.4%)两个区间;其多项式曲线,较接近正态分布特征;约 90%以上的冰雹发生在 5 km 以上高空,表明冰雹天气需要更加旺盛的对流。

统计短时强降水序列的  $S$  为 0.13、 $K$  为 -1.23,呈现非正态分布特征;雷电观测序列的  $S$  为 -0.12、 $K$  为 -3.37,为左偏态的准正态分布;冰雹观测序列的  $S$  为 0.93、 $K$  为 0.66,为右偏态的准正态分布。

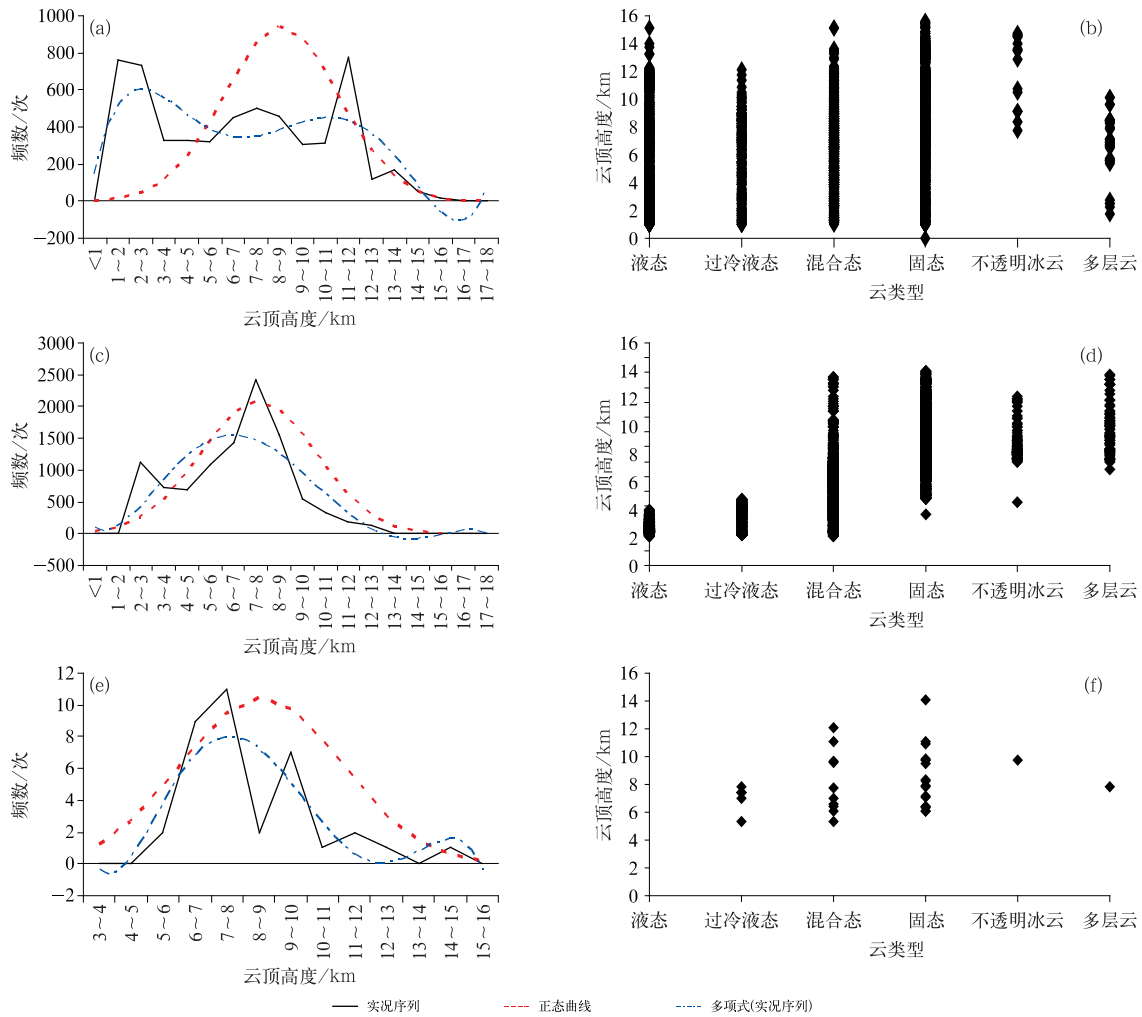


图 2 2018—2020 年(a,b)短时强降水、(c,d)雷电和(e,f)冰雹中的云顶高度统计特征  
(a,c,e)分高度区间统计,(b,d,f)分云类型

Fig. 2 Characteristics of cloud top height in (a, b) short-time heavy precipitation,  
(c, d) lightning and (e, f) hail from May to September during 2018—2020

### 2.3 相当黑体温度

图 3 为短时强降水(图 3a)、雷电(图 3b)和冰雹(图 3c)过程中的相当黑体温度的观测曲线和正态

曲线的叠加图。可以看出,短时强降水实况序列分布基本上为双峰型分布,但其平滑函数曲线为单峰形,且形似正态分布;这与我国华北、东北的短时强降水特征相一致,但与我国华南、东南地区短时强降

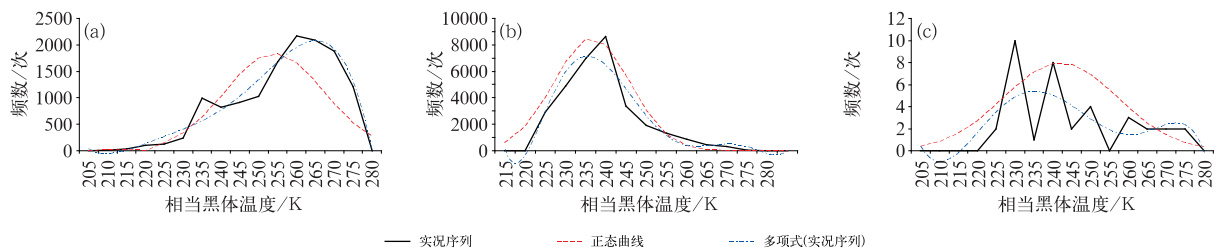


图 3 2018—2020 年 5—9 月(a)短时强降水、(b)雷电和(c)冰雹中的相当黑体温度正态性特征  
Fig. 3 Normal characteristics of black body temperature in (a) short-time heavy precipitation,  
(b) lightning and (c) hail from May to September during 2018—2020

水中往往以单峰型为主(周万福等,2018;崔林丽等,2020)的特征不一致。两个波峰分别对应 235~240 K(约 $-38\sim-33^{\circ}\text{C}$ ,占比 13.7%)、250~275 K(约 $-23\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,约占 75.6%)两个区间;对短时强降水而言,相当黑体温度在 235~275 K(约 $-38\sim 0^{\circ}\text{C}$ )是发生短时强降水概率最大的区间(比率约占 96.2%),并不是相当黑体温度越低越有利于降水。雷电实况序列为单峰型分布,形似正态分布,但曲线凹凸程度异于正态分布;相当黑体温度主要集中在 230~250 K(约 $-43\sim-23^{\circ}\text{C}$ ,约占 94.7%),表明相较于短时强降水而言,雷电由于其更高的对流,表现出相当黑体温度更低的特点。冰雹实况序列为多峰型分布,相当黑体温度主要集中在 225~240 K(约 $-48\sim-33^{\circ}\text{C}$ ,约占 69.4%)。

统计分布系数,短时强降水样本的  $S$  为 $-0.68$ 、 $K$ 为 $-0.21$ ;雷电样本的  $S$ 为 $-0.92$ 、 $K$ 为 $0.94$ ;冰雹样本的  $S$ 为 $0.69$ 、 $K$ 为 $-0.72$ ,呈现非正态分布特征。

## 2.4 云滴有效半径

在短时强降水(图 4a)、雷电(图 4b)和冰雹(图 4c)过程中,云滴有效半径显著不同。可以看到,短时强降水为双峰型分布,雷电和冰雹为单峰型。短时强降水序列大致分为两个波峰,分别对应  $10\sim 40\ \mu\text{m}$ (占比约 63.7%)、 $50\sim 60\ \mu\text{m}$ (占比约 30.2%)两个区间。有研究表明(王磊等,2019;孙丽等,2020),层状云降水、混合型降水和积状云降水,由于其对流高度的不同,导致云滴碰撞合并的程度不同,其云滴半径有着明显的差别。对于宁夏来说,强降水时云滴以较小云滴或中云滴为主,云滴有效半径主要以小于  $65\ \mu\text{m}$  为主(占比约 96.5%);而华南、东南沿海因其水汽输送条件明显强于西北地区尤其是宁夏地区,其云滴往往呈现大水滴为主的特征(崔林丽等,

2020)。雷电观测序列的峰区对应  $35\sim 60\ \mu\text{m}$ (占比约 87.7%),表明宁夏雷电发生时,云滴有效半径主要以中等云滴为主。冰雹序列的峰区位于  $85\sim 100\ \mu\text{m}$ (占比约 77.3%),也即宁夏冰雹发生时,其云体中绝大多数都是大云滴,大于  $85\ \mu\text{m}$  的比率约占 82.5%。

统计分布系数,短时强降水样本的  $S$  为 $8.7$ 、 $K$ 为 $-0.52$ ;雷电序列的  $S$ 为 $0.9$ 、 $K$ 为 $0.19$ ;冰雹样本的  $S$ 为 $-1.7$ 、 $K$ 为 $0.03$ ,均呈现非正态分布特征。

## 2.5 云中液水含量

图 5 为短时强降水和雷电、冰雹过程中,云中液水含量的观测曲线。可以看到,短时强降水序列呈单峰分布特征,峰区主要位于  $500\sim 850\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (占比约为 86.7%),峰值位于  $700\sim 750\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (占比约为 27.7%),表明降水时,当云中液水含量高于  $500\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,发生短时强降水的概率更大。雷电序列分布趋势大致为单峰型,主要对应  $200\sim 450\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (占比约 76.9%),也即峰值位于  $250\sim 400\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,雷电发生的概率最大。冰雹序列分布趋势分为两个波峰,分别对应  $400\sim 600\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (占比约 77.8%,对应小冰雹)、 $900\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  以上(占比约 16.7%,对应大冰雹)两个区间;当云中液水含量峰值位于  $450\sim 550\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ (占比约 61.1%),发生小冰雹的概率较大,当云中液水含量大于  $850\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  时,发生大冰雹的概率更大。从分布比率来看,约 94.1%的短时强降水发生在云中液水含量为  $500\sim 900\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  情况下,81.3%的雷电发生在云中液水含量为  $150\sim 450\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  情况下,61.1%的冰雹发生时,云中液水含量在  $450\sim 550\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,这一特点在监测预警时应予以重点关注。

统计分布系数,短时强降水样本的  $S$  为 $1.15$ 、

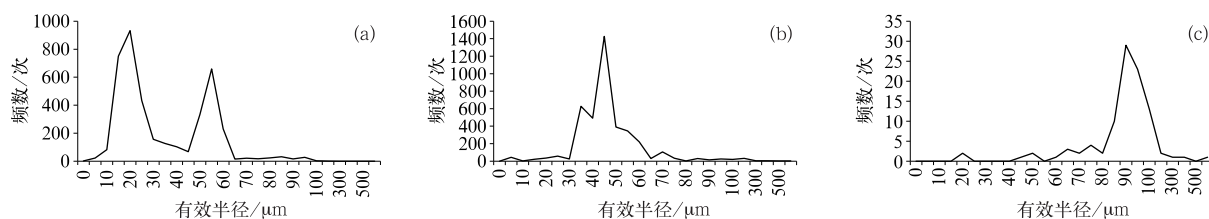


图 4 2018—2020 年 5—9 月(a)短时强降水、(b)雷电和(c)冰雹的云滴有效半径

Fig. 4 Effective radius of cloud droplets of (a) short-time heavy precipitation, (b) lightning and (c) hail from May to September during 2018—2020



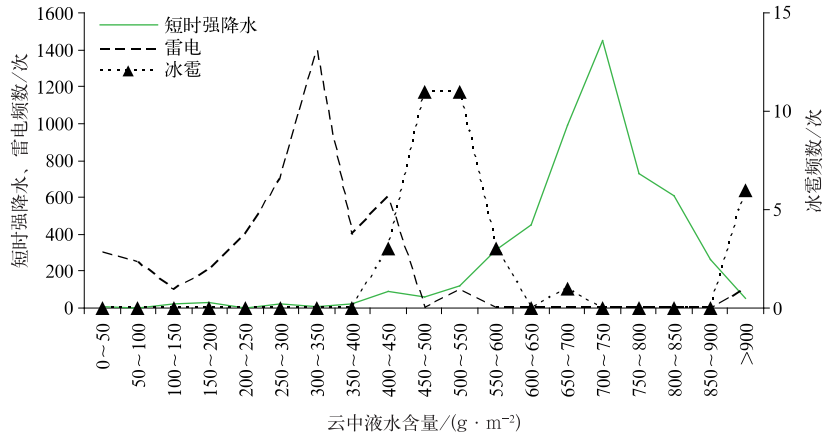


图 5 2018—2020 年 5—9 月短时强降水、雷电和冰雹的云中液水含量

Fig. 5 Cloud liquid water content of short-time heavy precipitation, lightning and hail from May to September during 2018—2020

$K$  为 1.26;雷电样本的  $S$  为 2.41、 $K$  为 5.088;冰雹样本的  $S$  为 2.65、 $K$  为 7.32,呈现非正态分布特征。

## 2.6 对流层折叠最深度

对流层折叠最深度描述的是平流层空气进入对流层的深度,侧面表征了对流云团外侧下沉气流输送的程度,一般来说,对流层折叠最深度越大,表明相应垂直运动越强。

图 6 为短时强降水和雷电、冰雹过程中,对流层折叠最深度的观测曲线叠加图。可以看到,短时强降水、雷电和冰雹的观测值序列虽然均为多峰型分布特征,但却具有截然不同的特征。短时强降水序列大致分为四个波峰,分别对应 0.03~0.06 km (占比约为 13.9%)、0.18~0.21 km (占比约 20.9%)、

0.24~0.27 km (占比约 26.1%)、0.30~0.33 km (占比约 22.6%)四个区间,基本上对应了不同类型降水所需的对流强度。强降水时对流层折叠最深度大部分位于 0.18~0.33 km (占比约 69.6%),即维持着相对中等强度的下沉气流,使得垂直次级环流维持,进一步维持强降水的发生发展。雷电序列分为两个波峰,分别对应 0.12~0.18 km (占比约 34.7%)、0.21~0.30 km (占比约 44.1%)两个区间。与短时强降水类似,雷电时对流层折叠最深度大部分位于 0.12~0.30 km (占比约 78.9%),折叠深度相对不算太深,意味着相对中等强度的下沉气流,即可维持垂直次级环流,导致雷电发生。冰雹序列为双峰分布,对流层折叠最深度峰区位于 0.09~0.15 km (占比约 27.7%)、0.33~0.45 km (占比约 67.7%)两个区间。初步认为这与对流深度

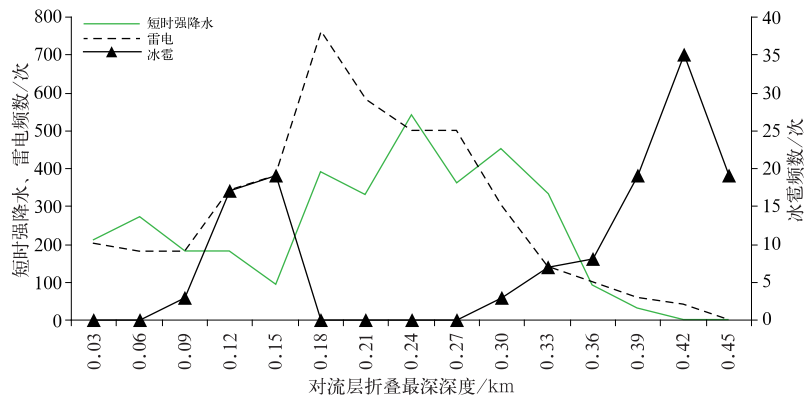


图 6 2018—2020 年 5—9 月短时强降水、雷电和冰雹的对流层折叠最深度

Fig. 6 Tropopause folding depth of short-time heavy precipitation, lightning and hail from May to September during 2018—2020



(强度)有关,较浅的对流产生小冰雹,较深的对流有利于形成大冰雹;定量来看,冰雹发生时,大部分个例的对流层折叠深度深于 0.33 km,在冰雹监测预警中可以重点关注此阈值。

统计分布系数,短时强降水样本的  $S$  为  $-0.47$ 、 $K$  为  $-0.76$ ;雷电序列的  $S$  为  $-0.02$ 、 $K$  为  $-0.22$ ;冰雹样本的  $S$  为  $-0.73$ 、 $K$  为  $-1.26$ ,呈现非正态分布特征。

### 3 FY-4A 卫星数据与强对流天气的相关性

针对三类强对流天气,在  $\alpha=0.05$  显著性水平下,针对云顶高度、云滴有效半径、对流层折叠最深度、云中液水含量、相当黑体温度、云顶温度等六类卫星产品,进行相关性分析(图 7)。

对于短时强降水来说,对流层折叠最深度、相当黑体温度和云顶温度和云中液水含量四类产品达到显著相关;云滴有效半径和云顶高度两类产品为低度线性相关;这可能与云顶高度观测数据的质量参差不齐和离散度高有关。表明短时强降水发生

时,反映最显著的有四类产品:对流层折叠最深度、相当黑体温度、云顶温度和云中液水含量,分别表征大气中层下沉气流(上升气流)强度、对流强度和云水含量。

对于雷电来说,对流层折叠最深度、相当黑体温度和云顶温度三类产品达到显著相关;云顶高度和云中液水含量两类产品为一般线性相关;而云滴有效半径相关系数为 0.24,相关性较差。表明雷电发生时,反映最显著的有三类产品:对流层折叠最深度、相当黑体温度和云顶温度,表征中层下沉气流(上升气流)强度和对流高度,而云水含量(即大气水汽含量)不是雷暴产生的必要条件。

对于冰雹来说,云顶高度、对流层折叠最深度、云中液水含量、相当黑体温度和云顶温度共五类产品,达到显著相关;云滴有效半径相关系数为 0.38,为一般性相关。表明冰雹发生时,由于对流程度最为剧烈,上述五类产品反应显著,对应表征着大气水汽条件、对流高度和中层下沉气流(上升气流)强度,而对于云滴大小,则反应不显著。

### 4 结论与讨论

本文针对 2018—2020 年宁夏短时强降水、雷电、冰雹三类强对流天气,统计对比分析了 FY-4A 云产品数据和地面观测资料,得到了分类强对流天气下六类卫星产品的观测序列及其分布特征,得出如下结论:

(1)发生短时强降水时,对流层折叠最深度、相当黑体温度、云顶温度和云中液水含量共四类产品呈显著相关,但不同云状的云顶温度、相当黑体温度、云顶高度与雨强的关系存在明显差异。统计来看,云顶温度或相当黑体温度越低或云顶高度越高,并不一定越有利于强降水发生,雨强还与云中液水含量的多寡(高于  $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  时有利于出现短时强降水)、云滴有效半径大小(较小云滴或中云滴为主,约 96.5% 的短时强降水时云滴有效半径小于  $65 \mu\text{m}$ )有关,同时对流层顶需维持着相对中等强度的下沉气流,使得垂直次级环流维持。

(2)发生雷电、冰雹时,分别有三类、五类产品达到显著相关。由于对流高度更高,其云顶温度和相当黑体温度往往较强降水时更低,云顶高度更高,统计表明约 75.1% 的雷暴和 90% 以上的冰雹发生在 5 km 以上高空;但雷电、冰雹发生与云滴有效半径、

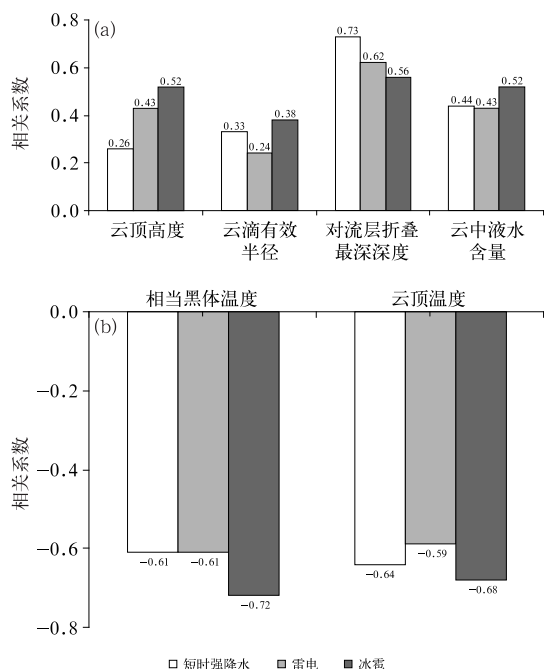


图 7 FY-4A 部分产品与强对流天气的相关关系  
(a)正相关,(b)负相关

Fig. 7 Correlation between some FY-4A products and severe convective weather  
(a) positive correlation, (b) negative correlation

云中液水含量并非线性相关。统计来看,雷电发生时以中等云滴为主,云中液水含量无明显分布特征,伴随着对流层顶相对中等强度的下沉气流,即可维持垂直次级环流;而冰雹发生时则以大云滴为主,云中需要有较高的云中液水含量,但对流折叠最深度存在两种情况,较浅的对流往往产生小冰雹,较深的对流(超过 0.33 km)则更有利于形成大冰雹,在冰雹监测预警中可以重点关注此阈值。

(3)除云顶温度、雷电冰雹序列中的云顶高度表现为正态分布或准正态分布特征外,其余产品均呈非正态分布。通过正态分布特征分析,可以了解数据的稳定性、重点区(即占 68.27%的基区)和极端性,为进一步应用提出支撑。

不同强对流天气的差异导致 FY-4A 卫星产品表现出不同的分布特征,这对于短时强降水、雷电、冰雹的监测具有重要指示意义。本文针对宁夏地区不同强对流天气中不同物理量的特征,以及不同云类型、不同高度的云物理特征进行分析,可为人工影响天气业务、对流云团的三维立体结构研究、卫星资料同化等工作提供数值参考;同时,研究结论还可以为强对流天气的智能监测预警提供技术思路,补充监测指标。研究过程中也存在一些不足,如冰雹个例较少,数据序列样本有限,个别结论可能存在一定的局限性;所用的统计分析方法相对单一,且主要是对其统计特征进行分析,并未涉及机理方面的研究;这些都有待于未来进一步深入研究。

## 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 FY-2C/D satellite and the Parsivel observation on surface[J]. Meteor Environ Sci, 33(1):1-6(in Chinese).
- 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. Cai M, Zhou Y Q, Zhu B, 2011. Comprehensive analysis of satellite and other observations from a convective clouds merging event[J]. Trans Atmos Sci, 34(2):170-179(in Chinese).
- 陈涛,陈博宇,于超,等,2020. 华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统的多尺度特征和集合预报敏感性对比分析[J]. 气象,46(9):1129-1142. Chen T, Chen B Y, Yu C, et al, 2020. Analysis of multiscale features and ensemble forecast sensitivity for MCSs in front-zone and warm sector during pre-summer rainy season in South China[J]. Meteor Mon, 46(9):1129-1142(in Chinese).
- 陈渭民,2003. 卫星气象学[M]. 北京:气象出版社:112-133, 419.
- Chen W M, 2003. Satellite Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press:112-133, 419(in Chinese).
- 陈英英,2013. 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,32(1):24-31. Chen Y Y, 2013. Analysis on characteristic cloud parameters of a heavy rain event based on satellite cloud images from FY-3A[J]. Torr Rain Dis, 32(1):24-31(in Chinese).
- 陈英英,唐仁茂,周毓荃,等,2009. 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,35(2):15-18. Chen Y Y, Tang R M, Zhou Y Q, et al, 2009. Microphysical characteristic parameters product retrieved by FY-2C/D satellite and its application in the precipitation analysis[J]. Meteor Mon, 35(2):15-18(in Chinese).
- 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. Chen Y Y, Zhou Y Q, Mao J T, et al, 2007. Experimental research of the retrieval of cloud effective particle radius by FY-2C geostationary satellite data[J]. Meteor Mon, 33(4):29-34(in Chinese).
- 崔林丽,郭巍,葛伟强,等,2020. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J]. 高原气象,39(1):196-203. Cui L L, Guo W, Ge W Q, et al, 2020. Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research[J]. Plateau Meteor, 39(1):196-203(in Chinese).
- 董瑶海,2016. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天,33(2):1-8. Dong Y H, 2016. FY-4 meteorological satellite and its application prospect[J]. Aeros Shanghai, 33(2):1-8(in Chinese).
- 范思睿,王维佳,2018. 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,38(4):60-66, 84. Fan S R, Wang W J, 2018. A case analysis of FY-4A satellite-retrieved of artificial precipitation enhancement operation[J]. Plateau Mt Meteor Res, 38(4):60-66, 84(in Chinese).
- 冯建民,胡文东,陈楠,等,2012. 宁夏天气预报手册[M]. 北京:气象出版社. Feng J M, Hu W D, Chen N, et al, 2012. Ningxia Weather Forecast Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 傅云飞,2019. 卫星主被动仪器遥感中国暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害,38(5):554-563. Fu Y F, 2019. Satellite-borne active and passive instruments for remote sensing of heavy rain in China: a review[J]. Torr Rain Dis, 38(5):554-563(in Chinese).
- 黄晨然,2015. 中国西北地区极端降水研究和风云卫星资料在短时强降水中的应用[D]. 兰州:兰州大学. Huang C R, 2015. Analysis of extreme precipitation in Northwest China and the application of FY satellite data in short-time heavy rainfall[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 江苏省气象科学研究所,2020-02-04. 适用于静止卫星资料同化的晴空通道检测质量控制方法:201911101928. 8[P]. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, 2020-02-04. Clear-air channel detection quality control method suitable for assimilation of geostationary satellite data:201911101928. 8[P](in Chinese).
- 李栋梁,邵鹏程,王慧,等,2013. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研

- 究进展[J]. 高原气象, 32(1):305-314. Li D L, Shao P C, Wang H, et al, 2013. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China[J]. Plateau Meteor, 32(1):305-314(in Chinese).
- 林琳, 黄思训, 杜华栋, 2006. MODIS 数据的云顶高度反演[J]. 地球信息科学, 8(2):106-109. Lin L, Huang S X, Du H D, 2006. Retrieval of cloudtop properties from MODIS data[J]. Geo-Inform Sci, 8(2):106-109(in Chinese).
- 刘红武, 胡燕, 张海, 等, 2022. 2020 年“6.9”湖南致灾暴雨预报偏差及成因分析[J]. 灾害学, 37(2):117-124, 155. Liu H W, Hu Y, Zhang H, et al, 2022. Forecast deviation and cause analysis of disastrous rainstorm in Hunan on 9 June 2020[J]. J Catastr, 37(2):117-124, 155(in Chinese).
- 刘晓春, 范水勇, 毛节泰, 2012. 云顶参数与降水间关系的统计分析和数值模拟[J]. 气候与环境研究, 17(2):125-138. Liu X C, Fan S Y, Mao J T, 2012. Statistic analysis and numerical simulation on the relationship between cloud top parameters and precipitation[J]. Climatic Environ Res, 17(2):125-138(in Chinese).
- 尚博, 刘建朝, 2015. 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. Shang B, Liu J C, 2015. Study on satellite cloud parameters of rainfall enhancement potential areas in Jilin Province[C]// Collected Papers on Satellite Remote Sensing Application Technology(in Chinese).
- 邵建, 任小芳, 王勇, 等, 2023a. 一次雨转暴雪天气过程卫星云图中尺度特征分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 44(2):181-187. Shao J, Ren X F, Wang Y, et al, 2023a. Analysis on mesoscale characteristics of satellite cloud images for a rain to blizzard weather process[J]. J Ningxia Univ (Nat Sci Edit), 44(2):181-187(in Chinese).
- 邵建, 张肃诏, 陈敏, 等, 2023b. FY-4A 卫星在宁夏短时强降水中的适用性研究[J]. 干旱区研究, 40(2):163-172. Shao J, Zhang S Z, Chen M, et al, 2023b. Application of FY-4A satellite data in short-time severe precipitation of Ningxia[J]. Arid Zone Res, 40(2):163-172(in Chinese).
- 史小康, 程文聪, 张文军, 等, 2023. 基于 FY-4 红外资料和光流法的不同空间尺度云团的外推可预报性研究[J]. 气象, 49(5):563-573. Shi X K, Chen W C, Zhang W J, et al, 2023. Study on extrapolation predictability of cloud clusters in different space scales based on FY-4 infrared data and optical flow method[J]. Meteor Mon, 49(5):563-573(in Chinese).
- 孙丽, 张晋广, 杨磊, 等, 2020. 基于 Aqua/CERES 数据的辽宁省云宏观特征及其与降水的相关性研究[J]. 干旱气象, 38(4):612-618. Sun L, Zhang J G, Yang L, et al, 2020. Micro- and macro-features of cloud in Liaoning Province and its correlation with precipitation based on Aqua/CERES data[J]. J Arid Meteor, 38(4):612-618(in Chinese).
- 谭仲辉, 马烁, 韩丁, 等, 2019. 基于随机森林算法的 FY-4A 云底高度估计方法[J]. 红外与毫米波学报, 38(3):381-388. Tan Z H, Ma S, Han D, et al, 2019. Estimation of cloud base height for FY-4A satellite based on random forest algorithm[J]. J Infrared Millim W, 38(3):381-388(in Chinese).
- 王根, 邵立瑛, 丁卫东, 等, 2021. 高光谱 GIIRS 中波通道的最优选择及其对云检测的影响[J]. 红外, 42(7):36-42. Wang G, Shao L Y, Ding W D, et al, 2021. Optimal selection of medium-wave channels in hyperspectral GIIRS and its influence on cloud detection[J]. Infrared, 42(7):36-42(in Chinese).
- 汪小康, 杨浩, 崔春光, 等, 2022. 2021 年中国降水异常气候特征及 4 次典型极端天气过程分析[J]. 暴雨灾害, 41(5):489-500. Wang X K, Yang H, Cui C G, et al, 2022. Analysis of unusual climatic characteristics of precipitation and four typical extreme weather processes in China in 2021[J]. Torr Rain Dis, 41(5):489-500(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).
- 王颖, 2019. 祁连山地区云参数的时空特征及其与降水间关系的分析[D]. 兰州: 兰州大学. Wang Y, 2019. Study of temporal and spatial characteristics of cloud parameters and the relationship to the precipitation in Qilian Mountains Area [D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 王智敏, 冯婉悦, 李圆圆, 等, 2020. FY-2E 卫星反演云特性参数产品在乌鲁木齐暴雪天气分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(3):53-60. Wang Z M, Feng W Y, Li Y Y, et al, 2020. Micro-physical characteristic parameters product retrieved by FY-2E satellite and its application in the Urumqi snowstorm weather analysis[J]. Desert Oasis Meteor, 14(3):53-60(in Chinese).
- 辛悦, 毕力格, 包山虎, 等, 2023. 基于 CloudSat-CALIPSO 数据的大兴安岭地区云宏观物理量的垂直结构特征分析[J]. 气象, 49(4):427-438. Xin Y, Bi L G, Bao S H, et al, 2023. Vertical structure characteristics of cloud macro and micro physical quantities in the Greater Khingan Mountains based on CloudSat-CALIPSO satellite data[J]. Meteor Mon, 49(4):427-438(in Chinese).
- 许东蓓, 许爱华, 肖玮, 等, 2015. 中国西北四省区强对流天气形势配置及特殊性综合分析[J]. 高原气象, 34(4):973-981. Xu D B, Xu A H, Xiao W, et al, 2015. Comprehensive analysis on the severe convective weather situation configuration and its particularity in Northwest China[J]. Plateau Meteor, 34(4):973-981(in Chinese).
- 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等, 2016. 我国风云四号气象卫星与日本 himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展, 6(1):72-75. Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al, 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological Satellite FY-4 compared with the Japanese Himawari-8/9 satellites[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1):72-75(in Chinese).
- 张琪, 任景轩, 肖红茹, 等, 2021. 基于 FY-4A 卫星资料的四川盆地

- MCC 初生和成熟阶段特征[J]. 大气科学, 45(4): 863-873.
- Zhang Q, Ren J X, Xiao H R, et al, 2021. Characteristics of MCC from convective initiation to mature stage over the Sichuan Basin based on FY-4A satellite data[J]. Chin J Atmos Sci, 45(4): 863-873(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).
- 张晓虎, 陆风, 窦芳丽, 等, 2016. 国外地球同步轨道气象卫星成像观测模式发展分析[J]. 气象科技进展, 6(1): 124-128. Zhang X H, Lu F, Dou F L, et al, 2016. Analysis on the observation model of foreign geostationary meteorological satellite[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1): 124-128(in Chinese).
- 张志清, 陆风, 方翔, 等, 2017. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 34(4): 8-19. Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al, 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 34(4): 8-19(in Chinese).
- 郑永光, 王颖, 寿绍文, 2010. 我国副热带地区夏季深对流活动气候分布特征[J]. 北京大学学报(自然科学版), 46(5): 793-804. Zheng Y G, Wang Y, Shou S W, 2010. Climatology of deep convection over the subtropics of China during summer[J]. Acta Sci Nat Univ Pekin, 46(5): 793-804(in Chinese).
- 周万福, 田建兵, 康小燕, 等, 2018. 基于 FY-2 卫星数据的青海东部春季不同类型降水过程云参数特征[J]. 干旱气象, 36(3): 431-437, 446. Zhou W F, Tian J B, Kang X Y, et al, 2018. Characteristics of retrieved cloud parameters during precipitation processes with different types in spring in eastern Qinghai Province based on FY-2 satellite data[J]. J Arid Meteor, 36(3): 431-437, 446(in Chinese).
- 朱亚平, 程周杰, 刘健文, 等, 2014. FY-2C 静止气象卫星资料对不透明云云顶气压的反演研究[J]. 热带气象学报, 30(3): 463-472. Zhu Y P, Cheng Z J, Liu J W, et al, 2014. A study of cloud top pressure for the opaque clouds retrieval from geo-stationary satellite FY-2C[J]. J Trop Meteor, 30(3): 463-472(in Chinese).
- 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)