

汪天怡,李德俊,陈英英,等.2024.基于云高仪探测数据的湖北省襄阳市云宏观特征分析[J].暴雨灾害,43(2):234–242. WANG Tianyi, LI Dejun, CHEN Yingying, et al. 2024. Analysis of cloud macro-physical characteristics in Xiangyang of Hubei Province based on ceilometer data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(2):234–242 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–188

基于云高仪探测数据的湖北省襄阳市云宏观特征分析

汪天怡¹,李德俊¹,陈英英¹,匡昕¹,高盛¹,欧阳威¹,袁正腾¹,赵羽佳²

(1. 湖北省气象服务中心,武汉 430205;2. 襄阳市人工影响天气办公室,襄阳 441021)

摘要:利用湖北省襄阳市2019—2021年3 a云高仪观测资料,统计云出现频率、云层数和云底高度等指标,对该地区云的宏观特征进行分析,结果表明:(1)襄阳市全年云系覆盖率较高,3 a平均云出现频率为61.3%。云出现频率呈现夏季高于冬季的季节变化特征,以及白天低、夜间高的日变化特征。(2)云层数以单层云为主(78.3%),尤其在冬季(80.1%)。多层云分布中,双层云所占比例最大(18.5%),且多层云出现频率随云层数增加而降低;多层云出现频率夏季高、冬季低,主要与夏季水汽相对充足、温度较高使得对流旺盛等因素有关。(3)云底高度在1.0 km以下的云,1月份出现频率为26%,云系分布较为分散,7月份达40%,云系相对集中;而云底高度在1.0~3.5 km之间的云,1月份出现频率达57%,云系分布较为集中,7月份为24%,云系相对分散。(4)所有的对流性降水云,出现在6—8月的占83.3%,傍晚前后出现对流性降水的概率最大;云底高度上,对流性降水云平均云底高度较所有降水云平均结果更低,低云所占比例更大。

关键词:云高仪;云出现频率;云层数;云底高度;对流性降水云

中图分类号: P426.5

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–188

Analysis of cloud macro-physical characteristics in Xiangyang of Hubei Province based on ceilometer data

WANG Tianyi¹, LI Dejun¹, CHEN Yingying¹, KUANG Xin¹, GAO Sheng¹,
OUYANG Wei¹, YUAN Zhengteng¹, ZHAO Yujia²

(1. *Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205*;2. *Weather Modification Office of Xiangyang, Xiangyang 441021*)

Abstract: In this study, the cloud macro-physical characteristics in Xiangyang of Hubei Province are statistically analyzed from the aspects of cloud occurrence frequency, number of cloud layers, and cloud base height by using the observation data of ceilometer from 2019 to 2021. The results are as follows. (1) The cloud coverage in Xiangyang is relatively high throughout the year, with an average cloud occurrence frequency of 61.3% in the three years. The frequency of cloud occurrence shows a seasonal variation of higher in summer but lower in winter, and a diurnal variation of higher level during nighttime but lower during daytime. (2) The cloud layer is dominated by single-layer clouds (78.3%), especially in winter (80.1%). In the multi-layer cloud system, two-layer clouds account for the largest proportion (18.5%). The occurrence frequency of multi-layer clouds decreases with the increase in the number of cloud layers, and it is usually high in summer but low in winter, which is mainly related to the relatively sufficient water vapor in summer and the strong convection caused by high temperatures. (3) For clouds with a cloud base height below 1.0 km, the occurrence frequency is 26% in January and 40% in July, indicating that the cloud distribution is relatively dispersed in January but relatively concentrated in July. However, for clouds with a cloud base height between 1.0 and 3.5 km, the occurrence frequency is 57% in January and 24% in July, that is, the cloud distribution is relatively concentrated in January, while relatively dispersed in July. (4) Convective precipitation clouds mainly occur from June to August, accounting for 83.3% of all convective precipitation clouds, and the probability of convective precipitation around the evening is the highest. In terms of cloud base height distribution, the average cloud base height of convective precipitation clouds is lower than that of all precipitation clouds, with a large occurrence frequency of low clouds.

Key words: ceilometer; cloud occurrence frequency; cloud layers; cloud base height; convective precipitation clouds

收稿日期: 2023–09–04;定稿日期:2024–03–18

资助项目: 湖北省自然科学基金气象联合基金重点项目(2022CFD019);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J036);湖北省气象局科技发展基金项目(2021Q07);湖北省自然科学基金创新发展联合基金项目(2022CFD132);2024年国网总部科技项目外委项目(5200–202440088A–1–1–ZN);武汉知识创新专项项目(2022022101015009)

第一作者: 汪天怡,主要从事气溶胶及人工影响天气技术研究。E-mail: tianyiwang@smail.nju.edu.cn

通信作者: 李德俊,主要从事云降水物理以及雷达和卫星资料分析应用。E-mail: esldj@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

引言

襄阳市地处华中地区、湖北省西北部,位于长江支流汉江的中游、秦岭大巴山余脉,是省域副中心城市。湖北省是全国13个粮食主产区之一,而襄阳市作为湖北省粮食生产以及烟叶种植的重要区域,频繁受到干旱、暴雨洪涝、冰雹等各类灾害性天气的影响,人工影响天气作业是避免或减轻灾害性天气对经济作物造成损失的有效方式。云是人工影响天气工作的主要对象和参考依据(高茜等,2011;刘雪梅等,2016)。云的宏观结构特征主要包括云出现频率、云顶高度、云底高度、云厚、云层数、多层云之间的夹层厚度等。云的垂直结构特征(云顶和云底高度、云层数和夹层厚度等)作为云重要的宏观特征之一(Wang et al., 1998; 周毓荃和欧建军,2010),直接决定了云的类型,与云辐射特性(Stephens and Webster, 1981; Stephens et al., 1990)、降水的物理过程、降水机制和降水效率以及人工增雨的条件等方面均有着密切的关系(尚博,2011)。因此,充分认识云的宏观特征,特别是垂直结构特征,是有效开展人工影响天气作业的前提,能够为作业部位和催化剂的选择等提供必要的参考,从而更加科学合理设计作业方案(李大山等,2002;尚博等,2012)。

当前云的探测方法主要有地面观测、探空观测、机载设备观测和卫星资料反演等(周毓荃等,2008;赵增亮等,2010;崔延星等,2018),利用不同观测设备进行观测已经能够比较全面地获取云的水平和垂直结构特征。冯晓等(2021)利用CALIPSO激光雷达的云层产品对中国及周边地区进行统计分析后发现,多层云的出现频率夏季最大、冬季最小,且存在显著的区域差异。李琦等(2021)利用探空云识别方法分析云垂直结构,结果表明我国云垂直结构分布特征具有明显的纬向变化趋势,青藏高原地区主要为云底高度较高且云体较薄的云系,到东南沿海地区时,则以云底高度较低的云系为主。赵姝慧等(2014)利用卫星资料统计分析了沈阳地区云系的垂直结构特征,表明沈阳地区8、9月份出现的云系以单层云为主,占比超过60%,低云云底高度在0.5~1.5 km之间。激光云高仪属于地基观测方式,可实现对观测区域周边云实时在线高时间分辨率观测,对云底信息获取有着精确度高、时间连续性好的显著优势(Sharma et al., 2015; 乔晓燕等,2020)。郭婧晗等(2015)利用激光云高仪研究了北京地区夏季云宏观结构特征,结果显示北京地区夏季云出现频率约为12%,夜间的云出现频率高于下午,700 m高度附近为云底高度出现频率的峰值。Costa-Surós等(2013)利用云高仪观测西班牙赫罗纳地区云垂直结构特征,

结果表明云底高度分布有显著的季节变化,7月以低云为主,云底高度在1 400 m左右占比最大。

综上所述,目前有关云宏观特征已开展了许多研究,但这些研究大多针对我国一些特定区域,对于湖北地区的研究则较少。本文基于Costa-Surós等(2013)的研究方法,利用布设在襄阳市观象台的激光云高仪2019年1月—2021年12月的观测数据,对云出现频率、云层数和云底高度的分布特征与时间变化规律等云宏观特征进行分析。鉴于对流性降水云是含水量较为丰富的云类,也是湖北省开展人工增雨作业的主要云系(李德俊等,2021),文中还针对对流性降水云的出现频率和云底高度等特征进行了统计分析,旨在提高对襄阳市云宏观结构特征及演变规律的认识,并为设计有针对性的播云方案、提高人工影响天气作业水平等提供依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

采用的资料为2019年1月—2021年12月襄阳国家气象观测站(112.08°E, 32°N)DUJ4型激光云高仪观测资料。DUJ4型激光云高仪是由北京聚恒博联公司自主研发的基于米散射激光雷达技术的自动观测设备,可实现云的实时在线高时间分辨率观测。双轴收发,垂直指向,其中心波长为905 nm,激光发射重复频率2.5 kHz,云高的最小分辨率为5 m,垂直探测范围15 m~12 km,时间分辨率为1 min(赵静等,2023)。该型号的云高仪已通过中国气象局外场为期3个月的动态考核测试,参考标准为探空和毫米波云雷达的观测数据,因此其观测数据具备可信性。此观测时段内,云高仪观测的数据获取率(云高仪输出的观测数据样本与总样本的比值)超过92%,36个月中有22个月的数据获取率达100%,并且在大多数月份,有超过80%的数据可以进行统计分析。在此期间,由于仪器的维护和校准,或断电、仪器故障等原因导致个别月份部分数据丢失,但由于数据的时间分辨率较高,这些月份的可用数据量仍满足统计分析要求。

1.2 研究方法

1.2.1 云出现频率统计方法

本文对云出现频率的定义是所研究时段内云高仪观测到有云的次数与总观测次数的比值。云出现频率的日变化为各小时内有云出现的次数与观测到云出现总次数的比值(郭婧晗等,2015)。云出现频率在本文中被视作该地区云覆盖情况的估计量。

1.2.2 云底高度划分及频率分布统计方法

参照郭婧晗等(2015)的划分方法,将云底高度划分为121个区间,每个区间宽度为100 m,用于研究云底

高度的分布特征。其中第一个区间的高度范围为0~50 m,第二个区间为50~150 m,以此类推,第121个区间的高度范围为11 950~12 000 m。同时,根据云底高度将云分为低云(云底高度<2 500 m)、中云(2 500 m≤云底高度<6 000 m)和高云(6 000 m≤云底高度<18 000 m)三类。各个高度区间内的频率为云底高度在该高度范围内(该区间最小高度<云底高度≤该区间最大高度)出现的次数与所有高度出现总数的比值,各区间频率之和的值为1,由此获得云底高度的频率分布情况。累积频率采用的是向上累积方式,即云底高度小于或等于某一高度的频数与总频数的比值。

1.2.3 对流性降水云识别方法

利用降水数据识别对流性降水云,采用 Bringi 等(2003)和 Chen 等(2013)提出的方案,对流性降水的分类标准为降雨率 $R \geq 5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,且至少11个连续滑动样本的标准差 $\sigma_R > 1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。具体来说,对于某一时刻 t_i ,降雨率 R 的样本记为 $R(t_i)$,如果从 $t_i - t_N$ 到 $t_i + t_N$ 的 R 值均大于 $5.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,且标准差大于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,则将其归类为对流性降水云,这里 t_N 设置为5个样本。降水数据来自襄阳国家气象站相同时段的观测,时间分辨率为1 min。该方案识别2019—2021年襄阳市的对流性降水样本共3 992个,占有降水样本的20.7%。

2 云出现频率特征

2.1 月变化

襄阳市全年云系覆盖率较高,2019—2021年各年云出现频率分别为63.5%、60.7%和59.8%,三年平均值约61.3%。图1给出襄阳市近3 a云出现频率的月变化,可见,云出现频率在各年中的分布特征有所不同,其极值及所在月份也有所差异。各年云出现频率的最大值依次分布在2月、10月和3月,而最小值则分别出现在12月、8月和11月。就月出现频率的年变化情况看,1月、3月、4月、9月和12月云出现频率在3 a中变化相对较小,变化幅度小于15%,而其他月份则相对较高。就云出现频率3 a的月平均结果来看,1—8月相对平稳,2月份上升到一个次峰值,其他月份相差不大,9月份云出现频率较前几个月明显降低,10月份达到全年最大值(69.7%),随后逐渐降低,至12月出现最小值(52.9%)。总的来说,襄阳市云出现频率在在夏季(6—8月)要高于冬季(12月至次年2月),春季(3—5月)和秋季(9—11月)的云出现频率也较高。先前许多研究均发现,中国以及东亚大部地区云出现频率呈现夏季高、冬季低的变化规律,这种季节特征主要是由东亚夏季风环流造成的(Pan et al., 2015; 符传博等, 2019)。

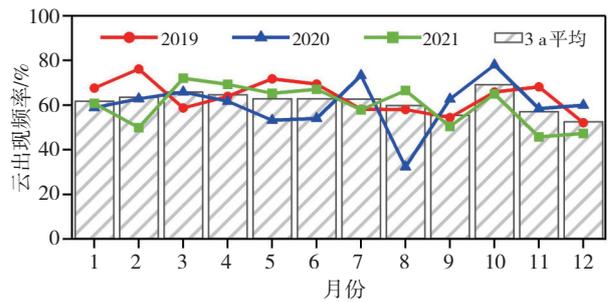


图1 2019—2021年襄阳市云出现频率的月变化
(灰色柱状表示3 a月平均云出现频率)

Fig.1 Monthly cloud occurrence frequency in Xiangyang during 2019–2021 (grey bars indicate the 3-year averaged value)

2.2 日变化

不同地区云的日变化特征也有差异。图2是襄阳市云出现频率的日变化曲线,可以看出,云出现频率呈双峰型日变化规律,但不同季节的日变化特征略有不同。除夏季外,云出现频率的峰值均出现在傍晚,分别为20:00(北京时,下同,春)、18:00(秋)和19:00(冬),而夏季的峰值则出现在00:00。随后,云出现频率先降低后升高,上午07:00—09:00出现次峰值。谷值的发生时间变化较大,各季节依次出现在06:00(春)、15:00(春)、12:00(秋)和09:00(冬),且夏季的变率最大、冬季最小。3 a平均日变化趋势为,傍晚时(19:00)达到最大,随后逐步降低,至清晨(06:00)达到次小值,而后又小幅上升至09:00达到次峰值,再逐步降低至中午12:00—13:00达到最小。总的来说,云在白天出现的频率相对较低,夜晚则相对较高,但整体比较平均,数值上相差不大。辐射加热的昼夜差异是导致云出现频率产生日变化规律的主要原因之一(李昉英等, 2003)。

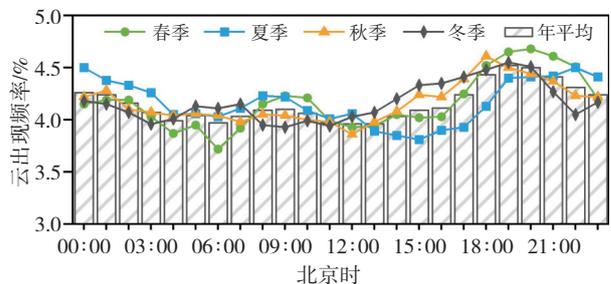


图2 2019—2021年襄阳市年平均与各季节云出现频率的日变化曲线

Fig.2 Diurnal variations of annual and seasonal cloud occurrence frequency in Xiangyang during 2019–2021

2.3 云层数

在云高仪观测到的一条有云廓线中,如果有云距离库之间的无云距离库数大于12个(即60 m),则认为该廓线中至少存在两层云,故而云高仪虽然不

能直接测量出云顶高度,但是可以获取云层数等信息(Costa-Surós et al., 2013)。表1列出2019—2021各年单层和多层云的出现比例,综合统计来看,襄阳市单层云出现频率为78.3%,双层云出现频率为18.5%,三层云占比约2.9%,三层以上云所占比例约0.3%。即多层云系统中双层云所占比例最大,并且多层云出现的频率随着云层数的增加而降低,这与冯晓等(2021)和唐钰寒等(2021)对于中国地区云层数的研究结果一致。但多层云出现的频率可能会被低估,因为存在低层云的遮盖效应,如果低层云足够厚,就可能使得高层云被遮挡,导致统计时高估了单层云的出现比例(Costa-Surós et al., 2013)。

表1 2019—2021 单层、双层、三层及以上云层数出现比例(单位:%)

Table 1 Proportion (unit:%) of single-layer, two-layer, three-layer, and other multi-layer clouds when clouds are detected during 2019–2021

云层数	2019	2020	2021	平均
单层	76.5	76.7	81.7	78.3
双层	19.7	19.7	16.0	18.5
三层	3.3	3.2	2.0	2.9
三层以上	0.5	0.4	0.3	0.3

图3给出研究时间段内襄阳市各月云层垂直分布,从中可见,单层云出现比例从2月开始呈现下降趋势,至6月份达到最低值,随后又逐渐升高,到12月达到最大值。多层云所占比例的变化趋势则与单层云相反,其出现频率夏季最大、冬季最小,双层和三层云比例高值均出现在6月。总体而言,襄阳市上空云层的垂直分布以单层云居多,尤其在冬季,约80.1%的云为单层云;6—8月,由于水汽充足、温度升高使得对流旺盛等

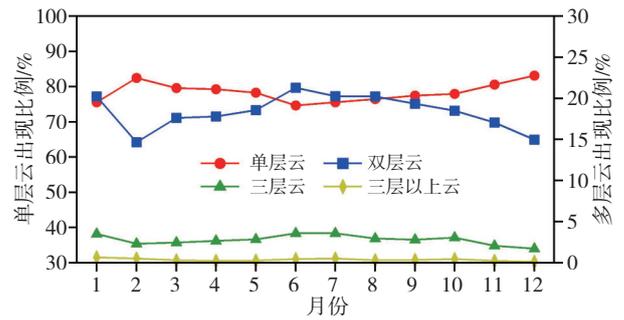


图3 2019—2021年襄阳市单层、双层、三层及以上云层分布比例的月变化

Fig.3 Monthly cloud occurrence frequencies of single-layer (red line), two-layer (blue line), three-layer (green line), and other multi-layer (yellow line) clouds in Xiangyang during 2019–2021

作用,导致云层分布和变化相对复杂(霍娟等,2020)。

3 云底高度分布特征

3.1 总体分布

图4为2019—2021年襄阳市探测到有云以及单层、双层和三层云时的云底高度频率分布。如图4a所示,有云出现时,峰值位于以200 m为中心的高度区间内,频率约占5.2%。随后在2 500—2 600 m高度附近出现一个小峰值。其中,低云、中云和高云所占比例依次为53.1%、33.9%和13.0%。云底高度的平均值为2 833 m,中位数为2 245 m。该分布的平均值与Wang等(2000)的研究结果较为一致,其研究得到全球平均云底高度为2.4 km,陆地站平均为2.8 km,要高于海洋站点(2.3 km)。但这一结果要高于西班牙赫罗纳地区(Costa-Surós et al., 2013)和夏季北京地区(郭婧晗等,2015)的平均云底高度值,这可能与云底高度对纬度的依赖性有关,Poore等(1995)结合1975—

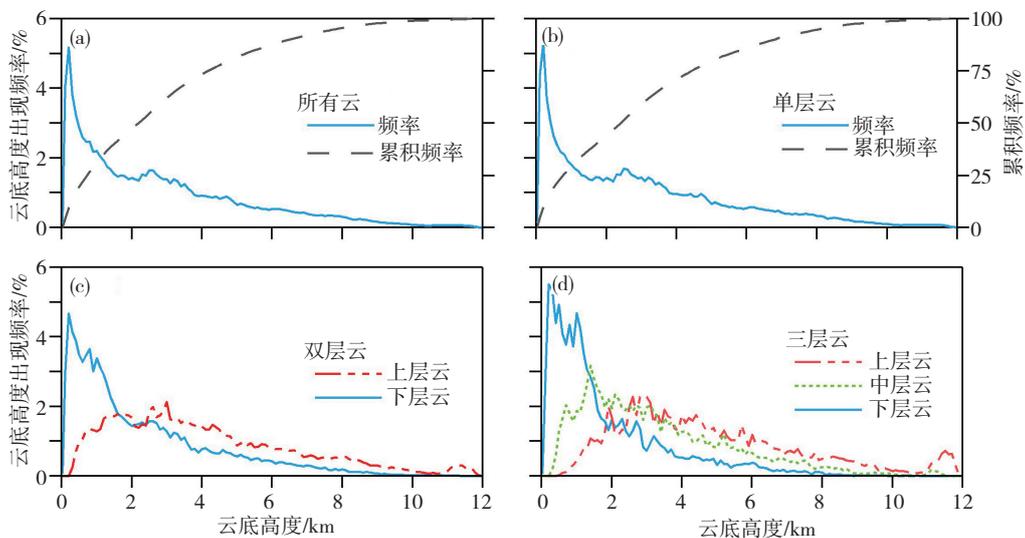


图4 2019—2021年襄阳市探测到所有云(a)以及单层(b)、双层(c)、三层(d)云时的云底高度频率分布

Fig.4 Frequency distribution of cloud base height for (a) all found layers aggregated, (b) the single layer when 1 layer is detected, (c) the lower and higher layers when 2 layers are detected, (d) the lower, middle and higher layers when 3 layers are detected

1988年北半球63个站点的探空仪观测数据发现,在没有任何分类的情况下,陆地和海洋上空平均云底高度基本随着纬度的增加而降低。

由于襄阳市单层云出现的频率为78.3%,因此单层云云底高度的频率分布与有云时的分布非常相似(图4b)。低云的出现频率最大,约为49.9%,中云和高云分别为35.5%和14.6%,平均云底高度为2 998 m。

双层云时的云底高度频率分布如图4c所示。对于下层云,60%的云底高度均在3 000 m以下,频率分布的最大值仍然是在以200 m为中心的高度区间内,平均云底高度为2 317 m。上层云的云底高度的频率分布大体上呈现单峰结构,在1 300 m以下频率快速上升,随后缓慢升高至3 000 m高度附近达到最大值,再开始缓慢下降。低云、中云和高云的出现频率分别为46.9%、38.2%和14.9%,平均云底高度为4 075 m。

当云高仪探测到有三层云存在时,下层云为双峰分布,在200±50和1 000±50 m处最大,平均云底高度为1 848 m;中层云在1 400 m左右达到频率最大值,平均云底高度为3 291 m;上层云在2 900 m左右有一个高峰,在11 500 m左右出现次高峰,平均云底高度为4 789 m。当有三层及以上的多层云存在时,低云、中云和高云的出现频率分别为44.3%、40.8%和14.9%。即多层云系统中,中云和高云的发展相对旺盛,出现频率增加(万霞等,2020)。

对于多层云结构,相邻云层云底高度之间距离以400 m左右的频率最大,随后云层间距发生的频率基本随距离的增大而减小(图4d)。

图5给出襄阳市不同云层的云底高度分布。从中可见,单层云云底高度的分布范围是介于多层云之间的。随着云层数的增加,云底高度向更低和更高处延伸。总的来说,不同云层的云底高度按照由高到低的

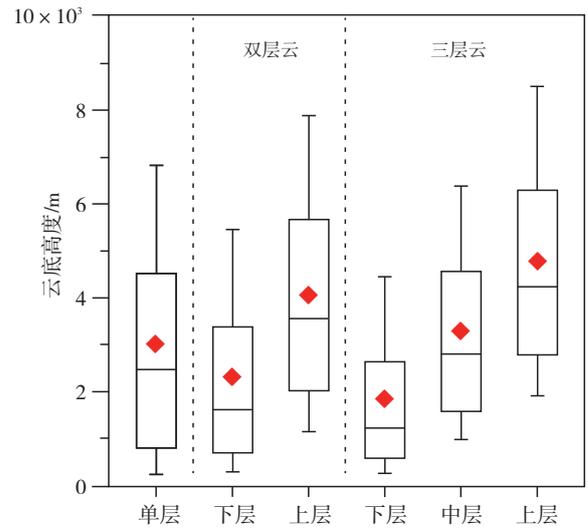


图5 2019—2021年襄阳市单层、双层和三层云的云底高度分布盒须图(最上方和最下方的短横线分别为第90和第10百分位,盒子的上下边缘分别对应上下四分位数,盒子中间的横线为中位数,菱形表示平均值)

Fig.5 Box diagram of cloud base height distribution of single-layer, two-layer, and three-layer clouds in Xiangyang during 2019–2021. Note that diamond-shaped markers and horizontal lines in the box present the average and median values, whiskers show the 25 ~ 75% data range and bars give the 10th and 90th percentiles

排列顺序依次为:三层云中最上层云、双层云中上层云、三层云中中层云、单层云、双层云中下层云和三层云中最下层云。这与李积明等(2009)利用星载激光雷达资料对于东亚地区的研究结果一致。

3.2 季节变化

分别选取1月、4月、7月和10月代表冬、春、夏、秋四个季节,分析襄阳市不同季节云底高度的分布情况。总的来说,不同季节的云底高度频率呈现出的共同特征为:分布结构是多峰值的,高云所占比例降低。1月份为冬季云底高度频率分布的代表,可以看到3.0 km以下的分布相对均匀,呈现两个峰值,分别

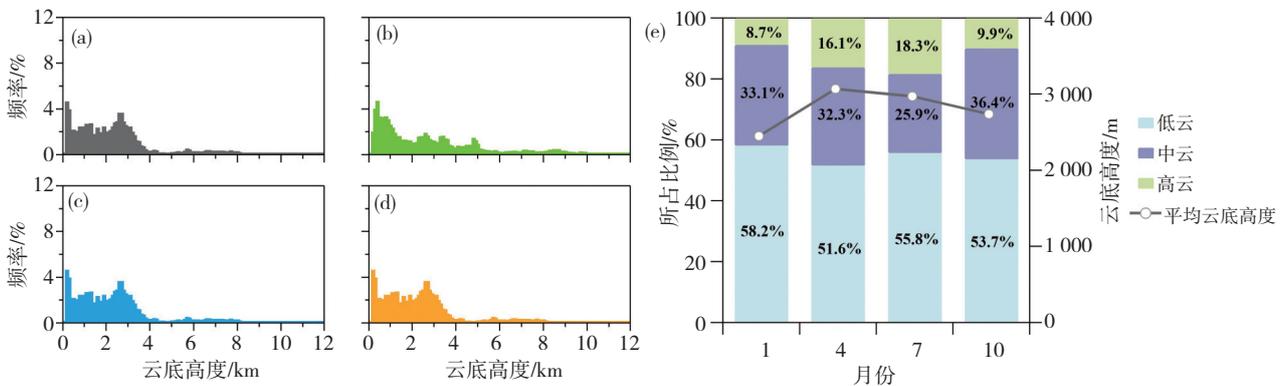


图6 2019—2021年1月(a)、4月(b)、7月(c)、10月(d)襄阳市单层云云底高度频率分布以及不同季节代表性月份中低云、中云和高云出现比例和云底高度平均值 (e)

Fig.6 Standardized single-layer cloud base height frequencies in (a) January, (b) April, (c) July, (d) October, and (e) the proportion of low, middle, and high clouds and the averaged cloud base heights in representative months of different seasons in Xiangyang during 2019–2021

出现在 100 m 和 2 500~2 600 m 附近,主要为低云(58.2%)和中云(33.1%),高云只占 8.7%,8.0 km 高度以上云量分布极少。4 月份和 10 月份的分布十分相似,最大频率分别出现在 300 m 和 200 m 高度附近,2.0—5.0 km 的频率分布较为平均,低云和中云均有分布。但 10 月份的云底高度 99.5% 分布在 9.5 km 以内,高云仅占 9.9%;而 4 月份的云底高度则向更高处延伸,大约至 11.0 km 处,故而高云占比更大,达到 16.1%。到了 7 月份,低云占主导地位(55.8%),频率峰值出现在 200 m 附近,云底高度延伸至 12.0 km,高云所占比例为四季最大(18.3%),呈现出较大的峰度与不对称性,这可能与夏季对流云的出现频率更高有关,有利于云底高度低值的累积。

图 7 以累积频率的形式展示了不同季节代表月份云底高度的分布情况,可以发现,相比于其他月份,1 月份云底高度在 1.0 km 以下分布比较分散,累积频率为 26%,但有 83% 的云底高度位于 3.5 km 以下。而 7 月则相反,云底高度在 1.0 km 以下分布相对集中,占比为 40%,64% 的云底高度位于 3.5 km 以下。冬、夏两季差异较大,而春季和秋季为过渡季节,频率分布特征介于冬、夏两季之间。

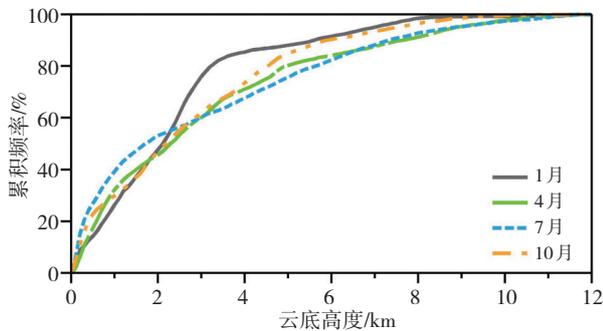


图7 2019—2021年不同月份襄阳市单层云云底高度累积频率分布

Fig.7 Mean cumulative frequencies for the cloud base height of single-layer cases in January, April, July, and October in Xiangyang during 2019-2021

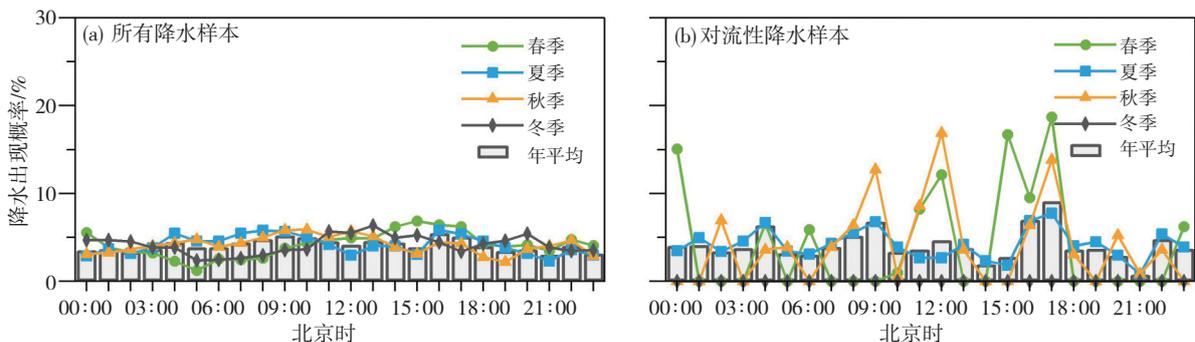


图8 2019—2021年襄阳市所有降水样本(a)与对流性降水样本(b)在不同季节出现频率的日变化曲线

Fig.8 Diurnal variations of annual and seasonal precipitation occurrence frequency in Xiangyang during 2019-2021 for (a) all precipitation samples, and (b) convective precipitation samples

4 对流性降水云分布特征

对流云具有生消快、局地性强、增雨潜力大等特点,也是人工增雨作业的主要对象。因此,本节利用降水数据识别对流性降水云的方法,进一步分析襄阳市对流性降水云的分布特征。

4.1 对流性降水云出现频率

2019—2021年襄阳市的对流性降水云主要出现在6—8月,各月份3 a 累积对流性降水样本数量均超过 1 000 个。每年 11 月至次年 3 月,基本无对流性降水过程发生。对流性降水云在不同季节出现的频率,夏季最大(83.3%),其次是秋季(9.1%)和春季(7.6%),其中 8 月份的占比最高,为 30.0%。夏季地面水汽充沛,辐射产生大气不稳定,使得气团极易上升到达抬升凝结高度,因此相比于其他季节,夏季更易出现对流性降水云。李德俊等(2021)研究表明 8 月盛夏季节,湖北省受副热带高压外围天气系统和地面热力的共同作用,对流性天气明显增多,而 11 月至次年 5 月,受高空槽、大陆高压等影响,对流性天气出现频率明显降低。

图 8a 为所有降水样本出现频率的日变化曲线,可以看出,夏、秋两季在上午出现降水的频率稍大一些,冬季多发生在中午前后,春季则是在下午更易出现降水。各季节降水频率的峰值分别出现在 15:00 (春)、16:00 (夏)、10:00 (秋)和 13:00 (冬)。根据 3 a 平均结果可以发现,日变化大致呈现双峰型规律,16:00 达到最大值(5.5%)后开始降低,至 19:00 最小(3.0%),随后逐步升高,在 09:00 出现次峰值(5.3%)。

对于对流性降水样本来说(图 8b),夏季最易发生对流性降水事件,故而样本数量较多,日变化规律相对平滑,而春、秋两季因为样本数量相对较少,所以曲线波动较大。春季和秋季易在中午 11:00—12:00 以及下午 15:00—17:00 发生对流性降水。夏季对流性降水的峰值出现在 17:00。总的来说,襄阳市对流性降水多出现在傍晚。

4.2 对流性降水云底高度分布规律

图9为云底高度频率分布情况,对于所有降水样本(图9a),云底高度频率分布的最大值在以200 m为中心的高度区间内,频率约为22.2%。低云、中云和高云的出现频率分别为93.0%、6.5%和0.5%,平均云底高度为852 m。而对流性降水样本中(图9b),云底高度分布的峰值所对应的高度要更低,为 100 ± 50 m,此高度处

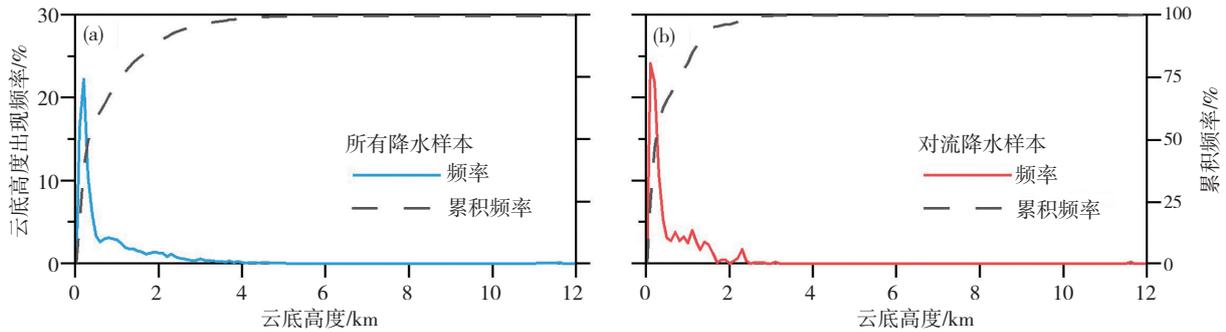


图9 2019—2021年襄阳市所有降水样本(a)和对流性降水样本(b)的云底高度频率分布和向上累积频率分布
Fig.9 Frequency distribution of cloud base height and upward cumulative frequency distribution under (a) all precipitation samples, and (b) convective precipitation samples in Xiangyang during 2019–2021

4.3 对流性降水云底高度季节演变规律

图10以累积频率的形式展示了所有降水样本和对流性降水样本在不同季节代表月份下云底高度的分布情况,可以发现,每年4月和10月,对流性降水样本中的低层云十分集中,分别有100%和99.4%的云底高度小于1.0 km,而对应所有降水样本的比例依次为67.8%和81.7%。在7月份,所有降水样本和对流性

的频率约为24.2%,至2.3 km高度附近出现一个次峰值。其中,低云的占比高达99.2%,中云和高云分别占0.5%和0.3%,平均云底高度更低,为580 m。在对流性降水云发展过程中,霰、冰雹等降水性水成物的下落会增强低层的下沉气流。这与卢志贤等(2016)对于中国地区对流云的研究结果一致,其研究发现对流云(包括积云和深对流云)云底高度大于2.5 km的分布概率不足2%。

降水样本中云底高度在1.0 km以下的比例分别为66.0%和63.0%,但此后对流性降水的累积速度更快,到2.5 km高度处,累积频率已达到99.4%,而所有降水样本云底高度的累积频率在5.0 km高度以上才达到99.4%。这可能与夏季易发生对流,且对流性降水云在垂直方向上的发展更为旺盛有关,下沉气流使得云体容易向下发展(陈广超等,2021)。

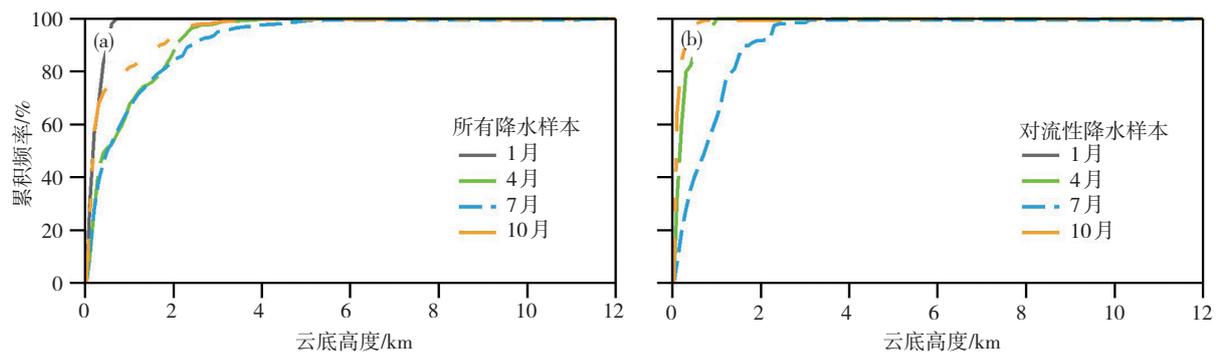


图10 2019—2021年襄阳市所有降水样本(a)和对流性降水样本(b)在不同季节代表月份的云底高度累积频率分布
Fig.10 Mean cumulative frequencies for the cloud base height of (a) all precipitation samples, and (b) convective precipitation samples in January, April, July, and October in Xiangyang during 2019–2021

5 结论与讨论

本文利用湖北省襄阳市2019—2021年云高仪观测数据,对云出现频率、云层数、云底高度以及对流性降水云的分布特征及变化规律进行了研究,得出以下主要结论:

(1) 襄阳市全年云系覆盖率较高,2019—2021年云出现频率分别为63.5%、60.7%和59.8%,3 a平均频

率为61.3%。云出现频率在夏季要高于冬季,春季和秋季的云出现频率也较高。10月份云出现频率达到最大值69.7%,12月最小,约为52.9%。日变化规律呈现白天相对较低,夜晚相对较高的特点,但数值上相差不大。

(2) 襄阳市云层分布以单层云居多(78.3%),尤其在冬季(80.1%);多层云系统中双层云所占比例最大(18.5%),并且云层发生频率随着云层数的增多而减

小,三层云占比约2.9%,三层以上云仅占0.3%。多层云季节变化规律与单层云相反,其出现频率夏季最大、冬季最小,这可能与夏季水汽相对充足、温度升高使得对流旺盛等因素有关。对于多层云系统,中云和高云的出现频率增加,云层间距以400 m左右的频率最大,随后云层间距发生的频率基本随距离的增大而减小。

(3) 云底高度在1.0 km以下的云,1月份(冬季)出现频率为26%,云系分布比较分散;7月份(夏季)出现频率达40%,云系分布相对集中;而云底高度在1.0~3.5 km之间的云,1月份出现频率达57%,云系分布比较集中,7月份出现频率为24%,云系分布相对分散。

(4) 襄阳市对流性降水云主要出现在6—8月,占观测对流个例的83.3%,傍晚前后出现对流性降水的概率最大。云底高度分布上,对流性降水云频率分布最大值所对应的高度更低,出现在 100 ± 50 m,低云的占比高达99.2%,平均云底高度为580 m。云底高度季节演变上,4月(春季)和10月(秋季)在1.0 km高度内的分布较为集中,7月(夏季)则在0~2.5 km范围内分布相对均匀。

本文所得到的结果是基于云高仪较高时空分辨率观测资料,因此能够更为清晰地探究云的宏观特征和演变规律。但由于仪器观测的水平范围有限,且不同区域云的变化可能较大,难以得到区域范围内云的宏观结构特征。未来可将云高仪与其他遥感设备相结合,在更多地区开展联合观测,加强对不同地区、不同性质云结构的认识,这对于提高气候预测精度、降水精细化预报能力以及人工催化播云的科学水平等都具有十分重要的意义。

参考文献(References):

陈广超. 2021. 基于星载雷达资料的南海深对流云垂直结构特征分析[D]. 长沙:国防科技大学. Chen G C. 2021. Analysis of the vertical structure characteristics of deep convective clouds in the South China Sea based on spaceborne radar data [D]. Changsha: National University of Defense Technology (in Chinese)

崔延星,刘黎平,何建新,等. 2018. 基于云雷达、C波段连续波雷达和激光云高仪融合数据的华南夏季云参数统计分析[J]. 成都信息工程大学学报, 33(3):242-249. Cui Y X, Liu L P, He J X, et al. 2018. Statistical analysis of South China summer cloud parameters based on cloud radar, C-band continuous wave radar and ceilometer fusion data [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 33(3): 242-249. doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.03.004

冯晓,蔡宏珂,衡志伟. 2021. 中国及周边地区多层云垂直结构时空分布特征[J]. 高原山地气象研究, 41(3):9-16. Feng X, Cai H K, Heng Z W. 2021. Spatial and temporal distribution characteristics of vertical structure of multilayer clouds in China and surrounding areas [J]. Pla-

teau and Mountain Meteorology Research, 41(3):9-16. doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2021.03.002

符传博,丹利,冯锦明,等. 2019. 1960—2012年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系[J]. 大气科学, 43(1):87-98. Fu C B, Dan L, Feng J M, et al. 2019. Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 43(1):87-98. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17235

高茜,王广河,史月琴. 2011. 华北层状云系人工增雨个例数值研究[J]. 气象, 37(10):1241-1251. Gao Q, Wang G H, Shi Y Q. 2011. Numerical simulation and seeding test on the stratiform precipitation around Beijing [J]. Meteorological Monthly, 37(10):1241-1251. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.10.007

郭婧晗,薛惠文,刘晓阳. 2015. 北京地区夏季云出现概率及云底高度分布的特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 51(4):718-724. Guo J H, Xue H W, Liu X Y. 2015. Characteristics of cloud occurrence frequency and cloud base height in summer over Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 51(4):718-724. doi:10.13209/j.0479-8023.2015.002

霍娟,吕达仁,段树,等. 2020. 基于2014—2017年Ka毫米波雷达数据分析北京地区云宏观分布特征[J]. 气候与环境研究, 25(1):45-54. Huo J, Lü D R, Duan S, et al. 2020. Cloud macro-physical characteristics in Beijing based on Ka radar data during 2014-2017 [J]. Climatic and Environmental Research, 25(1):45-54. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18084

李德俊,袁正腾,陈英英. 2021. 湖北对流云结构特征及人工增雨技术[M]. 北京:气象出版社:1-3. Li D J, Yuan Z T, Chen Y Y, et al. 2021. Characteristics of convective cloud structure and technologies for artificial precipitation enhancement in Hubei region [M]. Beijing:China Meteorological Press:1-3 (in Chinese)

李大山,章澄昌,许焕斌,等. 2002. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社:303-309. Li D S, Zhang C C, Xu H B, et al. 2002. The current situation and prospects of weather modification [M]. Beijing:China Meteorological Press:303-309 (in Chinese)

李积明,黄建平,衣育红,等. 2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. 大气科学, 33(4):698-707. Li J M, Huang J P, Yi Y H, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based lidar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 33(4):698-707. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.04

李琦,蔡森,周毓荃,等. 2021. 基于探空云识别方法的云垂直结构分布特征[J]. 大气科学, 45(6):1161-1172. Li Q, Cai M, Zhou Y Q, et al. 2021. Characteristics of cloud vertical distribution based on cloud identification by radiosonde [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(6): 1161-1172. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2105.19246

李昉英,宇如聪,徐幼平,等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和日变化特征分析[J]. 气象学报, 61(6):733-743. Li Y Y, Yu R C, Xu Y P, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 61(6):733-743. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.010

刘雪梅,张明军,王圣杰,等. 2016. 中国降水云云底高度的估算和分析[J]. 气象, 42(9):1135-1145. Liu X M, Zhang M J, Wang S J, et al. 2016. Estimation and analysis of precipitation cloud base height in

- China [J]. *Meteorological Monthly*,42(9):1135–1145. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.011
- 乔晓燕,张子曰,李林,等. 2020. 基于激光云高仪的雾霾光学特性研究[J]. *沙漠与绿洲气象*, 14(3):137–143. Qiao X Y, Zhang Z Y, Li L, et al. 2020. Study of distinction between haze and fog based on ceilometer [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,14(3):137–143. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2020.03.017
- 尚博. 2011. 利用Cloudsat对华北、江淮云垂直结构及降水云特征的研究[D].南京:南京信息工程大学. Shang B. 2011. Research on vertical structure of cloud and precipitation feature of cloudsat data in Hua-Bei and JiangHuai [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)
- 尚博,周毓荃,刘建朝,等. 2012. 基于Cloudsat的降水云和非降水云垂直特征[J]. *应用气象学报*,23(1):1–9. Shang B, Zhou Y Q, Liu J Z, et al. 2012. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using cloudsat [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*,23(1):1–9. doi:10.11898/1001-7313.20120101
- 唐钰寒. 2021. 中国东部地区云底高度研究[D].兰州:兰州大学. Tang Y H. 2021. Research on the cloud base height over eastern China [D]. Lanzhou: Lanzhou University (in Chinese)
- 万霞,徐桂荣,万蓉,等. 2020. 青藏高原东侧甘孜云雷达观测的非降水云垂直结构特征分析[J]. *暴雨灾害*,39(5):442–450. Wan X, Xu G R, Wan R, et al. 2020. Vertical structure of non-precipitation cloud obtained from cloud radar observation at Ganzi in the eastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Torrential Rain and Disasters*,39(5):442–450. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.002
- 赵静,顾桃峰,吴宜等. 2023. 激光云高仪云底高度对比及边界分析[J]. *气象水文海洋仪器*, 40(4):1–4. Zhao J, Gu T F, Wu Y, et al. 2023. Comparison of cloud base heights and boundary analysis of laser ceilometer [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*,40(4):1–4. doi:10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2023.04.002
- 赵姝慧,班显秀,袁健,等. 2014. 8、9月沈阳地区卫星观测云垂直结构的气候特征分析[J]. *高原气象*,33(6):1640–1647. Zhao S H, Ban X X, Yuan J, et al. 2014. Statistical analysis on climate characteristics of the cloud vertical structure using satellite in Shenyang region during August and September [J]. *Plateau Meteorology*,33(6):1640–1647. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00113
- 赵增亮,毛节泰,魏强,等. 2010. 西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析[J]. *气象*,36(5):71–77. Zhao Z L, Mao J T, Wei Q, et al. 2010. A study of vertical structure of spring stratiform clouds in Northwest China [J]. *Meteorological Monthly*,36(5):71–77. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.5.010
- 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. Zhou Y Q, Chen Y Y, Li J, et al. 2008. Retrieval and preliminary test of cloud physical parameters from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data [J]. *Meteorological Monthly*,34(12):27–35. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.12.004
- 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. Zhou Y Q, Ou J J. 2010. The method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research [J]. *Meteorological Monthly*,36(11):50–58. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.11.008
- Bringi V N, Chandrasekar V, Hubbert J, et al. 2003. Raindrop size distribution in different climatic regimes from disdrometer and dual-polarized radar analysis [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,60(2):354–365. doi:10.1175/1520-0469(2003)060<0354:RSDIDC>2.0.CO;2
- Chen B J, Yang J, Pu J P, et al. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*,91(2):215–227. doi:10.2151/jmsj.2013-208
- Costa-Surós M, Calbó J, González J A, et al. 2013. Behavior of cloud base height from ceilometer measurements [J]. *Atmospheric Research*,127:64–76. doi:10.1016/j.atmosres.2013.02.005
- Pan Z, Gong W, Mao F, et al. 2015. Macrophysical and optical properties of clouds over East Asia measured by CALIPSO [J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*,120(22):11,653–611,668. doi:10.1002/2015JD023735
- Poore K, Wang J, Rossow W. 1995. Cloud layer thicknesses from a combination of surface and upper-air observations [J]. *Journal of Climate*,8(3):550–568. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0550:CLTFAC>2.0.CO;2
- Sharma S, Vaishnav R, Shukla M, et al. 2015. Evaluation of cloud base height measurements from Ceilometer CL31 and MODIS satellite over Ahmedabad, India [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*,8(2):11729–11752. doi:10.5194/amt-9-711-2016
- Stephens G L, Tsay S C, Jr P W S, et al. 1990. The relevance of the microphysical and radiative properties of cirrus clouds to climate and climatic feedback [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,47(14):1742–1754. doi:10.1175/1520-0469(1990)0472.0.CO;2
- Stephens G L, Webster P J. 1981. Clouds and climate: sensitivity of simple systems [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,38(2):235–247. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<0235:cacos>2.0.CO;2
- Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *Journal of Climate*,11(11):3010–3029. doi:10.1175/1520-0442(1998)011<3010:EOCVSO>2.0.CO;2
- Wang J H, Rossow W B, Zhang Y C. 2000. Cloud vertical structure and its variations from a 20Yr global rawinsonde dataset [J]. *Journal of Climate*,13(17):3041–3056. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<3041:CVSAIV>2.0.CO;2

(责任编辑 何明琼)