

孙丽,马嘉理,赵姝慧,等,2019. 基于 CloudSat 卫星观测资料的辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征[J]. 气象,45(7):958-967. Sun L, Ma J L, Zhao S H, et al, 2019. Characteristics of cloud vertical structure under different synoptic systems in Liaoning Province based on CloudSat observation[J]. Meteor Mon, 45(7):958-967(in Chinese).

基于 CloudSat 卫星观测资料的辽宁省不同天气系统影响下云系垂直结构特征*

孙 丽^{1,2} 马嘉理¹ 赵姝慧¹ 杨 磊³ 刘 旻¹
秦 鑫¹ 张晋广¹ 袁 健¹

1 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110166

2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

3 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

提 要: 为区分不同天气系统影响下云垂直结构的差异, 从而为人工增雨作业提供参考, 对 2004—2014 年辽宁省进行人工增雨作业期间, 500、850 hPa 以及地面的天气形势进行了统计, 利用 CloudSat 卫星观测资料对筛选的出现频率 ≥ 2 次 $\cdot a^{-1}$ 的系统配置下的云垂直结构进行分析, 并研究了典型系统影响下的作业云系垂直结构特征。根据系统配置差异, 2004—2014 年间影响辽宁省的共有 225 次过程, 可划分为 17 种配置类型, 其中典型天气系统四种, 分别为西风槽—切变线—冷锋(CF 型)、西风槽—低涡—蒙古气旋(MCW 型)、西风槽—低涡—南方气旋(SC 型)和低涡—低涡—蒙古气旋(MCV 型)。对四种典型天气系统影响下的云垂直结构分析发现, 不同天气系统影响下云层均以单层云为主。SC 影响下的云层发展较为旺盛, 云底较低而云顶较高, 云层深厚。MCW 影响下的云层云底高度较高, 云层较薄。不同天气系统影响下的云夹层厚度大多($>50\%$)在 1 km 以下, 而且随着云层数目增加, 低于 1 km 的云夹层所占的比例增加。将云底高度 ≤ 2 km 且云厚 ≥ 2 km 视为作业云系, 发现有云条件下, SC 型符合条件的作业云系最多(59.7%), 而 MCW 型影响下最少(14.5%)。作业云系以单层低冷云为主, 单层低冷云的云底高度低于 1 km 且云顶高度可达 7 km 以上, 作业云系的云夹层厚度对降水云催化效果影响较小。

关键词: CloudSat 卫星, 云垂直结构, 天气系统影响

中图分类号: P48, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.07.006

Characteristics of Cloud Vertical Structure Under Different Synoptic Systems in Liaoning Province Based on CloudSat Observation

SUN Li^{1,2} MA Jiali¹ ZHAO Shuhui¹ YANG Lei³ LIU Yang¹
QIN Xin¹ ZHANG Jinguang¹ YUAN Jian¹

1 Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166

2 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

3 Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Center, Shenyang 110166

Abstract: In order to distinguish the cloud vertical structure (CVS) under different synoptic systems and provide reference for artificial rainfall enhancement, the characteristics of 500—850 hPa surface circulation field during Liaoning artificial rainfall enhancement periods from 2004 to 2014 and the CVS observed by CloudSat under typical synoptic systems (occurrence frequency larger than twice per year) are analyzed.

* 国家自然科学基金项目(41705127)、辽宁省自然科学基金计划重点项目(20180540086)、辽宁省气象局科研课题(Y201502 和 201611)及中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-015)和气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M15)共同资助

2018 年 4 月 8 日收稿; 2019 年 4 月 12 日收修定稿

第一作者: 孙丽, 主要从事气溶胶及人工影响天气研究. Email: sunli_2006_abc@126.com

According to the configuration difference of circulation filed, about 225 episodes, namely 17 types of synoptic systems, are identified, of which 4 typical types are selected, including westerly trough-shear line-cold front (CF), westerly trough-vertex-Mongolia cyclone (MCW), westerly trough-vertex-southern cyclone (SC) and vertex-vertex-Mongolia cyclone (MCV). The analysis of CVS under typical systems shows that the dominated clouds are single-layer clouds. Under the influence of SC, the heights of cloud bases are lower and cloud thicknesses are thicker than that of other systems while that of MCW are opposite. More than 50% of cloud intervals' thicknesses are smaller than 1 km, and this proportion increases with the layer numbers. Taking the clouds with base height ≤ 2 km and thickness ≥ 2 km as the target clouds for artificial rainfall enhancement, we achieve the results that the proportion of qualified clouds under cloudy condition of SC is the highest (59.7%) and that of MCW is the lowest (14.5%). The target clouds are dominated by single-layer-low-cold clouds with base heights lower than 1 km and top heights higher than 7 km. Moreover, the thicknesses of cloud intervals have little effect on cold clouds seeding.

Key words: CloudSat, vertical structure of cloud, influence of synoptic systems

引 言

云是影响辐射和降水的重要因素,它不仅分别产生冷却和加热两种截然相反的辐射强迫效应从而影响地气系统的能量收集,还可以通过降水影响全球的水汽循环过程(汪会等, 2011; 王帅辉等, 2011; 张华和荆现文, 2016; 朱士超等, 2017; 刘柏鑫和李栋梁, 2018)。对云垂直结构的准确描述不仅可以提高气候模式预测的准确性和可靠性,还可以为人工影响天气作业中作业部位和催化剂的选择提供参考,是开展有效的人工增雨作业的前提(赵姝慧等, 2014; 孙晶等, 2015)。

云垂直结构参数包括云顶高度、云底高度、云层厚度、云层数以及云夹层厚度等(孙丽等, 2017)。云垂直结构参数的获取可以通过地面观测、探空和卫星观测等多种手段。地面云观测可以追溯到 20 世纪 50 年代甚至更早的时期(Sun et al, 2014),为云的气候学研究提供了长期的观测数据,但当多层云同时存在时,地面观测仅能给出云底信息。地基主动遥感的发展为云垂直结构的探测带来了较为可靠的信息获取手段,激光雷达、云雷达等可以不间断地对云层进行自动观测(黄兴友等, 2013),但目前站点较少,无法得到覆盖整个区域甚至全球的云分布信息(汪会等, 2011)。卫星观测由于其覆盖范围广、数据来源可靠等优点,在云研究中发挥着越来越重要的作用(刘瑞霞等, 2004; 丁守国等, 2004; 卢乃锰等, 2017; 高洋和方翔, 2018)。2006 年发射的 CloudSat 卫星为云三维结构的研究提供了一种

全新的信息渠道,其上装载的 W 波段(94 GHz)毫米波云雷达首次实现自上而下对云垂直结构的探测(王帅辉等, 2011)。目前该资料已被广泛应用于云垂直结构的研究。王帅辉等(2011)利用 CloudSat 资料对中国及周边地区的云垂直分布进行了研究,发现云层以单层云为主,多层云中以双层云为主,平均云顶高度、云底高度分别为 8.2 和 2.8 km。彭杰等(2013)利用 CloudSat 与 CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)观测的数据,对东亚地区云垂直分布进行了统计,发现单层云的出现概率在春季最高,而多层云在夏季的出现频率最高,云层厚度在 1~3 km,且夏季最厚而冬季最薄。尚博等(2012)对华北和江淮地区降水云和非降水云的垂直结构差异进行了对比,发现降水云云底高度都在 2 km 以下,云厚以高于 2 km 为主,而非降水云的则相反。刘旸等(2017b)则对东北地区的降水云与非降水云进行了对比,发现东北地区以单层降水云为主,云底高度较低、云层较厚且夹层厚度更薄的云易产生降水。由此可知,学者们针对云层的垂直分布特征进行了大量的研究,但针对不同天气系统下,云系垂直结构特征的研究较少。

为建立适合辽宁省的人工增雨概念模型,本文利用 EC-Interim 再分析数据针对 2004—2014 年辽宁省进行人工增雨作业期间的所有天气系统进行了分析,筛选其中较为典型的天气系统,利用 CloudSat 过境期间的云廓线产品对不同典型系统影响下的云垂直结构进行了研究,并建立了云垂直结构模型。

1 数据和方法

2004—2014 年辽宁省人工增雨作业的对象为冷云,受地面温度及碘化银(AgI)催化剂成核阈温的影响,增雨作业时段主要为 3—11 月。由于人工增雨作业开展与否还受过程降水量的影响,为了建立适于增雨作业的概念模型,本文仅对辽宁省进行人工增雨作业期间的天气系统及云垂直结构进行了分析。

1.1 天气形势分析

利用每日 4 次(02、08、14 和 20 时,世界时)的 EC-Interim 再分析资料及 6 h 累计降水资料,对 2004—2014 年辽宁省进行人工增雨作业期间的天气形势进行划分。每次过程以降水开始时间作为过程开始时间,以降水结束作为过程结束时间,逐个分析降水过程中的中层(500 hPa)、低层(850 hPa)和地面的天气形势。根据影响降水的天气类型,对天气过程进行归类,并将出现频率 ≥ 2 次 $\cdot a^{-1}$ 的天气类型作为典型天气系统进行云垂直结构分析。

1.2 云垂直结构分析

典型天气系统影响下的云垂直结构分析是基于 CloudSat 过境辽宁(38.5°~43.5°N、118.5°~126°E)期间的 2 级数据产品 2B-GEOPROF 数据以及 ECMWF-AUX 数据展开(数据来自 ftp.cloudsat.cira.colostate.edu)。

在判断星下点是否存在云时,使用的 2B-GEOPROF 产品中的 CPR_Cloud_mask(数据说明见表 1)和 Radar_Reflectivity 数据。Radar_Reflectivity 中所含的信息是雷达的反射率因子的对数表现值,单位为 dBz, CPR 的最小可探测信号约为 -30 dBz

表 1 CloudSat CPR_Cloud_mask 数据值说明及误判率(Marchand et al, 2008)

Table 1 Description of CloudSat cloud mask values and false detection rates (Marchand et al, 2008)

mask 值	含义	误判率/%
-9	雷达数据缺失	
5	强回波但可能为地物杂波	
6~10	较弱回波	50
20	弱回波	16
30	回波较强	<2
40	强回波	<0.2

(Marchand et al, 2008)。综合以上,本文识别云的方法是当扫描数据格点上 CPR_Cloud_mask ≥ 20 且 Radar_Reflectivity ≥ -30 dBz 时认为该扫描格点有云存在。

2 影响辽宁省的主要天气系统

通过分类,将 2004—2014 年间进行的所有作业过程按照天气系统的不同分为 225 次过程。500 hPa 的影响系统主要有三种:西风槽型,共 130 次(58%);低涡型,共 91 次(40%);台风型,共 4 次(2%)。西风槽型和低涡型是影响辽宁省的两大主要类型。而对于这两类,在低层的影响系统又有不同。因此,根据 500、850 hPa 和地面天气配置的差异,影响辽宁省人工影响天气作业期间的天气类型共可分为 17 种,具体见表 2。

表 2 2004—2014 年辽宁省人工影响天气作业期间的天气类型分类及其出现频率(单位:%)

Table 2 Synoptic system classification and its occurrence frequencies (unit: %) during artificial rainfall enhancement in Liaoning Province in 2004—2014

序号	500 hPa	850 hPa	地面	简称
1		低槽(冷切变线)	冷锋(12.8)	CF
2		(19.1)	辐合线(5.7)	
3			倒槽(0.6)	
4			蒙古气旋(13.5)	MCW
5	西风槽型	低涡	华北及东北气旋(7.3)	
6	(58)	(33)	倒槽(2.3)	
7			南方气旋(9.9)	SC
8		暖切变线	辐合线(4.5)	
9		(5.8)	倒槽(1.3)	
10			蒙古气旋(19.6)	MCV
11			冷锋(1.2)	
12		低涡	华北及东北气旋(5.6)	
13	低涡型	(31)	倒槽(1.2)	
14	(40)		南方气旋(3.4)	
15		低槽(5.2)	辐合线(5.2)	
16		暖切变线(3.6)	辐合线(3.6)	
17	台风型(2)			

鉴于部分天气系统的出现频率较低,本文选取出现频率 ≥ 2 次 $\cdot a^{-1}$ 的天气系统进行云垂直结构分析。由表 2 可知,符合条件的共有四种天气类型,分别为西风槽—冷锋(CF 型)、西风槽—低涡—蒙古气旋(MCW 型)、西风槽—低涡—南方气旋(SC 型)和低涡—低涡—蒙古气旋型(MCV 型)。

3 不同系统影响下云层垂直结构特征分析

由于 CloudSat 卫星的地面覆盖宽度较窄(沿轨分辨率为 2.5 km,横轨分辨率为 1.4 km),轨道重访周期较长(16 d),因此在 2006—2014 年典型天气系统影响辽宁期间,共有 95 条有效轨道经过该地区(图 1),不同天气系统下分别为 14(CF 型),23(MCW 型),20(SC 型)和 38(MCV 型)条,对应的廓线数分别为 4269、9221、7620 和 12463 条。对云廓线进行分析,发现不同系统影响下云层的出现频率差别较大。由于四层以上的云层出现频率较低(低于1%),因此本文仅对四层及以下的云层进行分析。

图 2 给出了四类典型天气系统影响下云层的平均分布特征及不同层数的云层出现频率(有云的廓线数占各天气系统下总廓线数的比例)。可以看出,SC 型控制时,辽宁地区云的出现频率最高,达到 81.46%,其次分别为 MCV,MCW 和 CF 型,其中

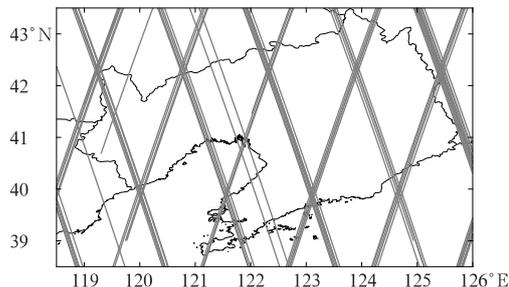


图 1 所选轨道的星下点轨迹

Fig. 1 Location of qualified CloudSat granules

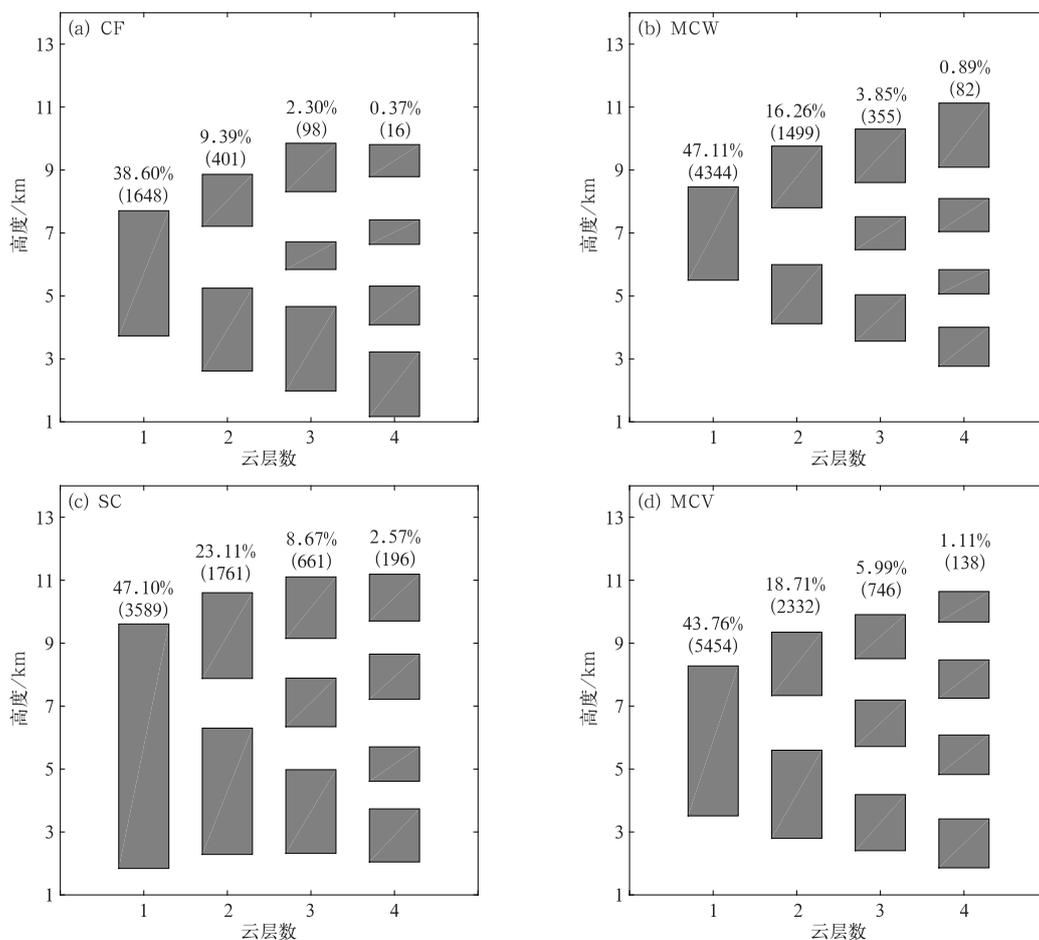


图 2 典型天气系统影响下不同层数云层的平均分布(灰色柱状)

(a)CF, (b)MCW, (c)SC, (d) MCV

(百分比为不同层数云层的出现频率,括号内为样本数)

Fig. 2 Variation of cloud vertical distribution (gray bar) with number of cloud layers under typical synoptic systems

(a) CF, (b) MCW, (c) SC, (d) MCV

(Data on gray bars stand for the occurrence frequencies of clouds with various layer numbers under four typical synoptic systems and the data in brackets stand for the number of qualified cloud profiles)

CF 型影响下的云出现频率仅为 50.67%。而且,单层云的出现频率较多层云高,其中受 MCW 和 SC 型控制时,单层云的出现频率均较高(约为 47.1%),其次为 MCV 型(为 43.76%),同样 CF 型最低,仅为 38.60%。而多层云中主要以双层云为主,其中 SC 型控制下,双层云的出现频率最高,为 23.11%,CF 型控制下,双层云的出现频率最小,仅为 9.39%。

由不同天气系统下云层的垂直分布可以看出,就单层云而言,除 SC 型的云底高度较低外(1.84 km),其他系统影响下的云底高度均在 3 km 以上,尤其是 MCW 型的平均云底高度高达 5.50 km。单层云的平均云顶高度均较高,SC 型影响下单层云的云顶高可以达到 9.61 km,其次分别为 MCW,MCV

和 CF 型,云顶高度值分别为 8.46、8.28 和 7.71 km,由此可知 SC 型影响下单层云最为深厚,平均值高达 7.77 km,而 MCW 型最小,仅为 2.96 km。

为了全面分析四种天气类型下云层的垂直分布情况,本文对不同云层数目的云层出现频率随高度的变化进行了计算,公式如下:

$$F_{n,L_i}(h) = N_{n,L_i}(h) / \sum_h N_{n,L_i}(h) \times 100\% \quad (1)$$

式中, h 为高度(单位:km), $F_{n,L_i}(h)$ 为 $n(n=1,2,3,4)$ 层云中自下而上的第 i 层云 $L_i(i=1,2,\dots,n)$ 在不同高度层上出现的频率, $N_{n,L_i}(h)$ 为 n 层云中第 i 层云 L_i 在 $h \pm 0.5$ 高度层内出现的次数, h 取值分别为 1,2, \dots ,20 km(孙丽等,2017)。

图 3 给出了四种典型天气系统影响下不同层次

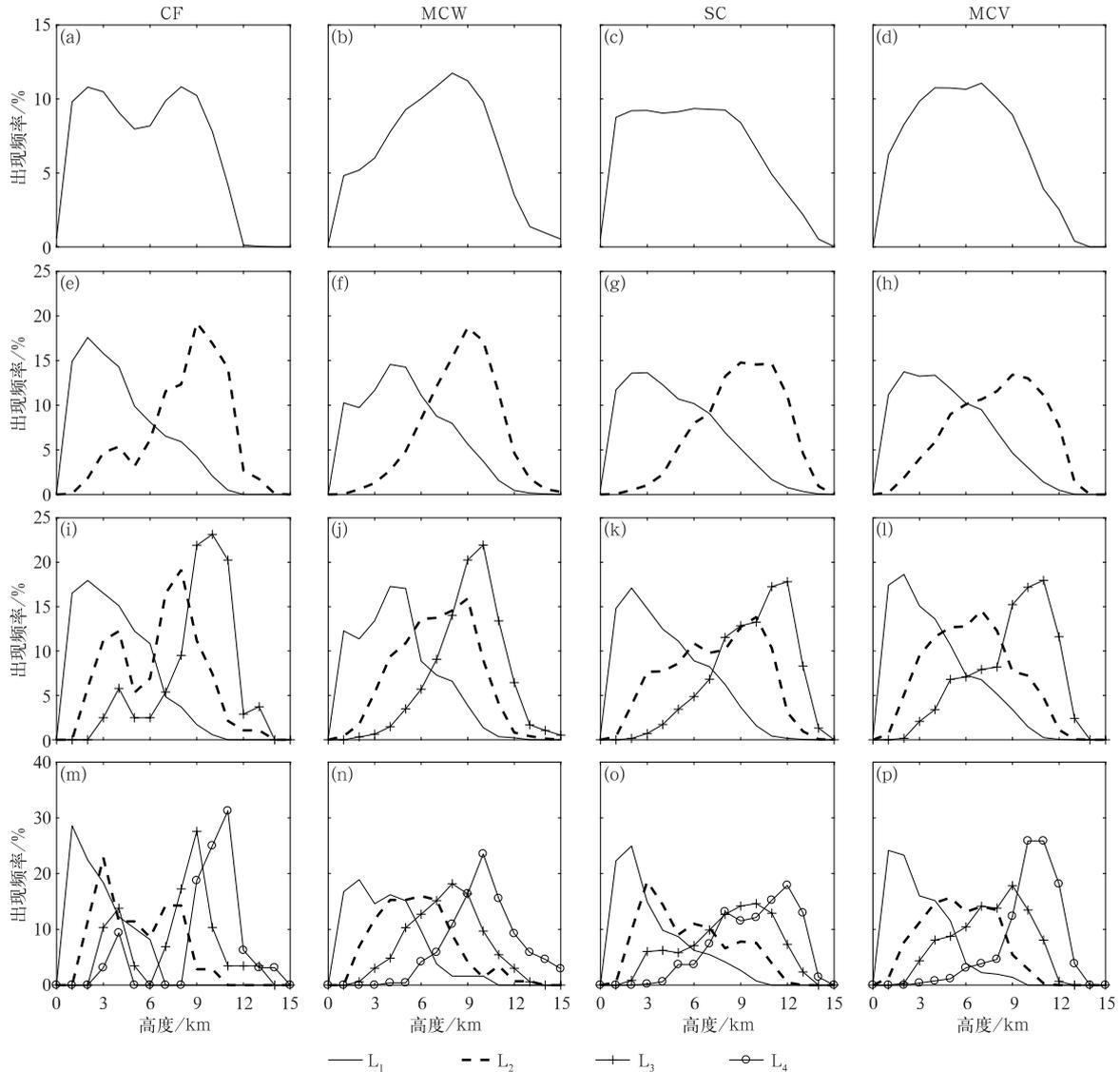


图 3 典型天气系统影响下不同层次云层的出现频率随高度的分布
(a~d)单层云,(e~f)双层云,(g~l)三层云,(m~p)四层云

Fig. 3 Distribution of cloud occurrence frequencies at different levels with height under typical synoptic systems
(a-d) single-layer cloud, (e-f) double-layer cloud, (g-l) three-layer cloud, (m-p) four-layer cloud

云层的出现频率随高度的分布,可以看出多数云层出现在 15 km 以下。就单层云而言(图 3a~3d),CF 型影响下的单层云出现频率呈双峰分布,峰值高度分别为 2 km 和 8 km,对应的峰值频率基本在 10.8% 左右。MCW 型影响下的单层云呈单峰分布,峰值高度和峰值频率分别为 8 km 和 11.7%。而 SC 型在 1~8 km,MCV 型在 3~8 km 的云层出现频率随高度的变化不大,分别为 9% 和 10%~11%。多层云(图 3e~3p)中不同层次云层的出现频率基本上为单峰分布,但随着云层数目的增加,相同层次的云层在低层出现的概率增大,峰值高度则保持不变或者降低。

除此之外,本文还对四类天气系统下所有云层的出现频率随高度的变化进行了计算。由于单层云的出现频率较高,因此四类不同天气系统影响下所有云层出现频率随高度的变化同单层云类似,只是峰值高度和频率稍有变化(图 4)。CF 型影响下所有云层的分布依旧为双峰分布,峰值高度分别为 2 和 9 km,峰值频率为 10.8% 和 10.3%,其中在 5~6 km 存在一低值区;MCW 型影响下的云层依旧为单峰分布,峰值高度为 9 km,峰值频率最高(11.7%)。而且相比其他系统,5 km 以下 MCW 型影响下的云层出现频率普遍低于其他系统,与图 2 给出的 MCW 型云底高度普遍偏高相一致;SC 型影响下的云层分布则在 1~9 km 变化不大,均在 8.5%~9.5%,这与前文所述的 SC 型云层普遍较厚较为一致;MCV 型影响下云层在 4~7 km 变化不大,基本在 10% 左右。

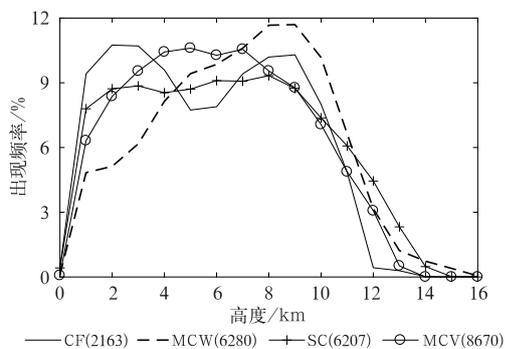


图 4 典型天气系统影响下不同高度云层的平均出现频率
(括号内为样本数)

Fig. 4 Distribution of cloud occurrence frequencies with height under typical synoptic systems
(Data in brackets stand for the number of qualified profiles)

根据中纬度地区高、中、低云的划分标准,即高云云底高度在 6 km 以上,中云云底高度介于 2.5~6 km,低云云底高度在 2.5 km 以下(赵姝慧等, 2014),对四类天气系统影响下高、中、低云的出现频率进行分析(表 3),可以看出 CF 型影响下低云和高云的比例均较高,而中云的出现频率仅为 10.79%,这可能是由于干侵入导致的;MCW 型影响下的中、高云出现频率均最高,分别为 30.69% 和 48.91%,而低云的出现频率最低,这可能是由于近地面蒙古气旋影响下较差的水汽条件导致低云较少引起的;而相比其他系统,SC 型影响下低云的出现频率最高(50.37%),中云的出现比例较高云低,结合图 4 可知,SC 型云层发展较为旺盛,云层较厚,这是由于南方气旋输送的较为充沛的水汽导致的;而 MCV 型影响下除中云比例稍低外(26.32%),低云和高云的出现比例相差不大,分别为 39.15% 和 34.53%。造成 MCW 和 MCV 型云层结构出现差异的主要原因可能是由于云内上升运动的差别所导致的。

表 3 典型天气系统影响下低、中、高云的出现频率(单位:%)

Table 3 Occurrence frequencies of low, middle and high clouds under typical synoptic systems (unit: %)

云类型	天气系统			
	CF	MCW	SC	MCV
低云	48.68	20.40	50.37	39.15
中云	10.79	30.69	19.08	26.32
高云	40.53	48.91	30.55	34.53

Wang and Rossow(1998)在分析云垂直结构对大气环流的影响时指出,云的垂直结构参数,包括最上层云顶的高度、多层云中云层之间的距离即云夹层的厚度以及云是否重叠,是影响大气环流的重要因素。而且,由于云夹层内相对湿度较低,会导致降落下来的雨滴或冰晶在云夹层中蒸发或升华,不利于降水云的发展,因此云夹层的厚度也是人工增雨作业需要考虑的因素(赵姝慧等, 2014)。表 4 给出了典型天气系统影响下云夹层厚度的统计特征。可以看出,双层云中,云夹层的平均厚度主要在 1.58~1.96 km,其中 CF 型的云夹层厚度最大,而 SC 型的云夹层厚度最小。三层云的云夹层厚度较双层厚度要小,均值在 1.09~1.60 km,而四层云的云夹层厚度更小,均值在 0.86~1.51 km。可以看出,随着云层数目的增加,云夹层的平均厚度减小。

统计发现,不同天气系统下云夹层厚度 < 2 km 的均达到 80% 以上,其中 50% 以上的云夹层厚度 <

1 km,而且随着云层数目的增加,低于 1 km 的云夹层厚度所占的比例也有所增加。尤其是 CF 型影响下三层及四层云中云夹层厚度 < 1 km 的比例达到 70% 以上。其他天气系统影响下这一比例均在 50%~70%。

表 4 典型天气系统影响下的云夹层厚度(单位:km)

Table 4 Thicknesses of cloud intervals under typical synoptic systems (unit: km)

云类型	夹层位置	天气系统			
		CF	MCW	SC	MCV
双层云	L_2-L_1	1.96	1.81	1.58	1.74
三层云	L_2-L_1	1.18	1.43	1.37	1.53
	L_3-L_2	1.60	1.09	1.26	1.32
四层云	L_2-L_1	0.86	1.06	0.88	1.41
	L_3-L_2	1.33	1.21	1.51	1.17
	L_4-L_3	1.37	0.99	1.05	1.20

注: L_j-L_i 代表第 j 层云 L_j 与第 i 层云 L_i 间的夹层厚度。
Note: L_j-L_i stands for the interval thickness between cloud layer L_i and L_j .

4 作业云系垂直结构特征分析

在 20 世纪 70—80 年代,胡志晋(1979)讨论了

降水形成机制及播撒盐粉的增雨效应,认为云厚是关键,要求云厚达 1 km 以上,从而可以通过随机碰并产生雨滴。于翡(2009)研究表明云厚 > 2 km 的暖性降水积层混合云较有潜力。尚博(2012)研究发现降水云云底高度在 2 km 以下,单层降水云云厚 > 6 km 为主,多层降水云云厚 2~4 km 为主,夹层厚度 1~2 km。而刘畅等(2017a)研究发现双层降水云中由于低层云厚较厚,云顶达到一定高度时,降水主要由低层云本身产生,云夹层的厚度对双层云的降水影响不大。因此,本文在利用云底高度 ≤ 2 km,云厚 ≥ 2 km 的基础上,分别考虑夹层厚度 ≤ 1.5 km 与不考虑夹层厚度两种方法,对作业云系的垂直结构进行了研究。

参照赵姝慧等(2014)的分析方法,利用云层数(单层 S、双层 D、三层 T)、云层高度(高 H、中 M、低 L 云)、云层性质(冷云 C、暖云 W)对符合条件的云层分布及特征层高度进行了分析。考虑到统计代表性,仅对符合条件的廓线数目 > 100 条的云型进行了分析。分析发现两种方法给出的作业云系垂直结构相差不大,考虑云夹层厚度的条件下(图略),MCW 型中作业云系仅比不考虑云夹层厚度的情况下少了双层云低层低冷云顶层高冷云(DLHCC),而

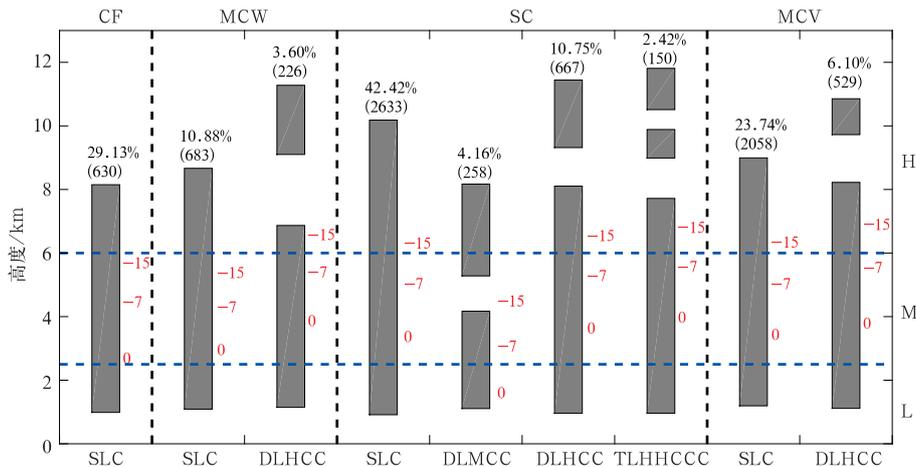


图 5 典型天气系统影响下符合条件的云层垂直分布(灰色柱状图)及特征温度(红色数字)层所在高度

(S:单层云,D:双层云,T:三层云,L:低云,M:中云,H:高云,W:暖云,C:冷云;百分比为各类天气系统影响下作业云系的出现频率,括号内代表样本数)

Fig. 5 Cloud vertical structure of qualified clouds (gray bar) and heights of characteristic temperatures (text in red) under typical synoptic systems (S: single-layer cloud, D: double-layer cloud, T: three-layer cloud, L: low cloud, M: middle cloud, H: high cloud, W: warm cloud, C: cold cloud; data on gray bars stand for the occurrence frequencies of operational clouds under four typical synoptic systems and the data in brackets stand for the number of qualified cloud profiles)

且可以看到该类云中(如图 5 所示),低层云的云顶高度可以达到 6 km 以上。对两种方法识别降水云的准确率进行计算发现,考虑云夹层时降水云的判断准确率、漏报率与空报率分别为:89.0%、7.9%和 3.1%,而不考虑云夹层时分别为 85.4%、2.3%和 7.7%。由此可知,当降水云系发展充分时,夹层对降水的影响很小。不考虑云夹层厚度对降水的影响,对四类天气系统影响下符合条件的云型进行统计发现,共有四种云型可被视为作业云系,分别为单层低冷云(SLC)、双层云低层低冷云顶层中冷云(DLMCC)、双层云底层低冷云顶层高冷云,以及三层云底层低冷云中层和高层均为高冷云(TLHHCC)。其中 CF 型只有 SLC 一种云型,SC 型中四种云型都存在,而 MCW 和 MCV 型影响下作业云系除 SLC 外,还有 DLHCC 云型。有云条件下,CF、MCW、SC 和 MCV 型符合条件的作业云系的比例分别为 29%、14.5%、59.7%和 29.8%。

图 5 给出了符合条件的作业云系的垂直分布情

况以及特征温度(0℃、-7℃、-15℃)层所在的高度分布,可以看出,符合条件的云层均为冷云,其中 SLC 的云层厚度普遍较厚,云底高度均在 1 km 左右,云顶高度在 7 km 以上,而双层云中底层云的云层厚度均较顶层云大,三层云也是如此。

将特征温度层所在的高度与云层的垂直分布相结合,可以为判断作业高度以及选择催化剂类型提供参考。如图 5 所示,除 SC 型影响下的 DLMCC 中云层在-15~-7℃存在夹层外,其他云型的底层云均能发展到-15℃以上,因此在降水云中,云夹层对于催化作业的效果影响不大。0℃主要在 3 km 以下,而-7℃的高度基本在 4 km 以上,-15℃主要在 7 km 以下。在进行作业设计时,可以考虑在 3~4 km 高度的云层内播撒致冷剂进行冷云催化,而 4~7 km 的云层内使用人工冰核进行冷云催化,而对 3 km 以下的暖云区内使用暖云催化剂,如吸湿性巨核或者暖云烟条,进行播撒,作业云系的特征参数具体见表 5。

表 5 典型天气系统影响下作业云系特征参数

Table 5 Characteristic parameters of qualified clouds under typical synoptic systems

天气类型	云型	云层次	云底高/km	云顶高/km	特征层高度/km		
					0℃	-7℃	-15℃
CF	SLC	L_1	0.99	8.15	2.56	4.17	5.55
	SLC	L_1	1.09	8.67	2.83	4.01	5.25
MCW	DLHCC	L_1	1.15	6.87	3.74	5.11	6.45
		L_2	9.10	11.28			
	SLC	L_1	0.91	10.18	3.24	4.74	6.18
	DLMCC	L_1	1.11	4.17	1.47	2.78	4.36
L_2	5.28	8.17					
SC	DLHCC	L_1	0.96	8.11	3.51	5.00	6.41
		L_2	9.32	11.44			
	TLHHCC	L_1	0.96	7.72	3.85	5.28	6.67
L_2		8.99	9.89				
L_3		10.51	11.81				
MCV	SLC	L_1	1.19	8.99	3.31	4.74	6.21
	DLHCC	L_1	1.11	8.22	3.66	5.25	6.77
		L_2	9.73	10.85			

5 结 论

为区分不同天气系统影响下云垂直结构的差异,构建典型系统影响下的云垂直结构模型,从而为人工增雨作业提供参考,本文对 2004—2014 年辽宁省进行人工增雨作业期间,500、850 hPa 以及地面的天气形势进行了统计,筛选典型系统配置下的云

垂直结构进行了分析,并对作业云系进行了研究,主要结论如下:

(1) 辽宁省人工增雨作业期间根据天气形势的不同共分为 225 次过程,根据 500、850 hPa 和地面的系统配置划分主要有 17 种配置类型,出现频率 ≥ 2 次 $\cdot a^{-1}$ 有四种天气类型,分别为西风槽—冷锋(CF 型)、西风槽—低涡—蒙古气旋(MCW 型)、西风槽—低涡—南方气旋(SC 型)和低

涡—低涡—蒙古气旋型(MCV型)。

(2) 对四种典型天气系统影响下的云垂直结构分析发现,不同天气系统影响下云层均以单层云为主,多层云中以双层云为主,单层云的云层厚度较多层云厚度大。MCW型影响下低云的出现频率最低,中、高云均最高,因此云底位置较高,而云层较薄。相比其他系统,SC型影响下的云层发展得较为旺盛,云底较低而云顶较高,云层较深厚。云夹层厚度大多($>50\%$)在1 km以下,而且随着云层数目增加,低于1 km的云夹层所占的比例增加。

(3) 典型天气系统下可被视为作业云系的有四种云型,分别为SLC、DLMCC、DLHCC、TLHHC-CC。云夹层对降水云的影响较小,在不考虑云夹层的条件下,CF、MCW、SC和MCV型影响下作业云系的比例分别为29%、14.5%、59.7%和29.8%。各系统影响下作业云系均以SLC为主,SLC的平均云底高度低于1 km,而平均云顶高度可以达到7 km以上。四种天气类型影响下的作业云系中单层云或者多层云中的底层云均可以发展到 -15°C 温度层所在高度以上,因此云夹层的厚度对催化效果的影响较小。

值得注意的是,由于CloudSat卫星重访周期较长(16 d),地面覆盖范围较窄,导致符合条件的样本数较少,因此本文仅针对辽宁省出现频率较高的四类典型天气系统影响下的云垂直结构特征进行了探讨。而这四类天气系统的出现频率仅占了所有类型的55.8%,因此今后有必要针对影响辽宁的其他天气系统进行进一步研究。

参考文献

丁守国,石广玉,赵春生,2004. 利用 ISCCP D2 资料分析近 20 年全球不同云类云量的变化及其对气候可能的影响[J]. 科学通报, 49(11):1105-1111. Ding S G, Shi G Y, Zhao C S, 2004. Analyzing global trends of different cloud types and their potential impacts on climate by using the ISCCP D2 dataset[J]. Chin Sci Bull, 49(11):1105-1111(in Chinese).

高洋,方翔,2018. 基于 CloudSat 卫星分析西太平洋台风云系的垂直结构及其微物理特征[J]. 气象, 44(5):597-611. Gao Y, Fang X, 2018. Analyses on vertical structure and microphysical features of typhoon cloud in Western Pacific based on CloudSat Satellite data[J]. Meteor Mon, 44(5):597-611(in Chinese).

胡志晋,1979. 积云形成暖雨的条件[J]. 气象学报, 37(3):72-79. Hu Z J, 1979. On the conditions of warm rain formation in cumulus clouds[J]. Acta Meteor Sin, 37(3):72-79(in Chinese).

黄兴友,夏俊荣,卜令兵,等,2013. 云底高度的激光云高仪、红外测云

仪以及云雷达观测对比分析[J]. 量子电子学报, 30(1):73-78. Huang X Y, Xia J R, Bu L B, et al, 2013. Comparison and analysis of cloud base height measured by ceilometer, infrared cloud measuring system and cloud radar[J]. Chin J Quantum Electron, 30(1):73-78(in Chinese).

刘柏鑫,李栋梁,2018. 我国云量时空变化特征及其与副热带夏季风北边缘带关系研究[J]. 气象, 44(3):382-395. Liu B X, Li D L, 2018. Spatio-temporal variation features of cloud cover in China and its correlation to north boundary belt of subtropical summer monsoon[J]. Meteor Mon, 44(3):382-395(in Chinese).

刘瑞霞,刘玉洁,杜秉玉,2004. 中国气候特征的分析[J]. 应用气象学报, 15(4):468-476. Liu R X, Liu Y J, Du B Y, 2004. Cloud climatology characteristics of China from ISCCP data[J]. J Appl Meteor Sci, 15(4):468-476(in Chinese).

刘畅,孙丽,蔡波,2017a. 基于 CloudSat 资料的东北地区云垂直结构特征分析及人影作业指标建立[C]//第 34 届中国气象学会年会 S14 云降水物理与人工影响天气进展论文集. 郑州:中国气象学会. Liu Y, Sun L, Cai B, 2017a. Characteristics of cloud vertical structure and establishment of weather modification operation index in Northeast China based on CloudSat data[C]//The 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S14 Papers of Cloud Precipitation Physics and Progress of Weather Modification. Zhengzhou: Chinese Meteorological Society (in Chinese).

刘畅,赵姝慧,蔡波,等,2017b. 基于 CloudSat 资料的东北地区降水云及非降水云垂直结构特征对比分析[J]. 气象, 43(11):1374-1382. Liu Y, Zhao S H, Cai B, et al, 2017b. Comparison of vertical structure between precipitation cloud and non-precipitation cloud based on CloudSat data over Northeast China[J]. Meteor Mon, 43(11):1374-1382(in Chinese).

卢乃锰,方翔,刘健,等,2017. 气象卫星的云观测[J]. 气象, 42(3):257-267. Lu N M, Fang X, Liu J, et al, 2017. Understanding clouds by meteorological satellite[J]. Meteor Mon, 42(3):257-267(in Chinese).

彭杰,张华,沈新勇,2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究[J]. 大气科学, 37(1):91-100. Peng J, Zhang H, Shen X Y, 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data[J]. Chin J Atmos Sci, 37(1):91-100(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]. J Appl Meteor Sci, 23(1):1-9(in Chinese).

孙晶,史月琴,蔡森,等,2015. 南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析[J]. 气象, 41(11):1356-1366. Sun J, Shi Y Q, Cai M, et al, 2015. Analysis on cloud structure forecast and seeding conditions of 3 types of cloud system in South China[J]. Meteor Mon, 41(11):1356-1366(in Chinese).

孙丽,赵姝慧,张晋广,等,2017. 基于相对湿度阈值法的沈阳地区云垂直分布特征[J]. 干旱气象, 35(4):619-625. Sun L, Zhao S H,

- Zhang J G, et al, 2017. Characteristics of cloud vertical structure based on threshold method of relative humidity in Shenyang[J]. *J Arid Meteor*, 35(4): 619-625 (in Chinese).
- 汪会, 罗亚丽, 张人禾, 2011. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征[J]. *大气科学*, 35(6): 1117-1131. Wang H, Luo Y L, Zhang R H, 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau Region using CloudSat/CALIPSO data[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(6): 1117-1131 (in Chinese).
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 等, 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区各类云的宏观特征分析[J]. *气象学报*, 69(5): 883-899. Wang S H, Han Z G, Yao Z G, et al, 2011. An analysis of cloud types and macroscopic characteristics over China and its neighborhood based on the CloudSat data[J]. *Acta Meteor Sin*, 69(5): 883-899 (in Chinese).
- 于翡, 2009. 环北京地区积层混合云降水个例的数值模拟研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院: 1-6. Yu F, 2009. Numerical study on the complex system of the stratiform and embedded convective precipitation over Beijing and adjacent regions[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences: 1-6 (in Chinese).
- 张华, 荆现文, 2016. 气候模式中云的垂直重叠及其辐射传输问题研究进展[J]. *气象学报*, 74(1): 103-113. Zhang H, Jing X W, 2016. Advances in studies of cloud overlap and its radiative transfer issues in the climate models[J]. *Acta Meteor Sin*, 74(1): 103-113 (in Chinese).
- 赵妹慧, 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 Meteor*, 33(6): 1640-1647 (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).
- Marchand R, Mace G G, Ackerman T, et al, 2008. Hydrometeor detection using Cloudsat—an earth orbiting 94 GHz cloud radar [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 25(4): 519-533.
- Sun L, Xia X, Wang P, et al, 2014. Do aerosols impact ground observation of total cloud cover over the North China Plain? [J]. *Global Planet Change*, 117: 91-95.
- Wang J H, Rossow W B, 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J Climate*, 11(11): 3010-3029.