

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微观物理量的垂直结构特征分析[J]. 气象,49(4):427-438. Xin Y, Bilige, 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).

基于 CloudSat-CALIPSO 数据的大兴安岭地区 云宏微观物理量的垂直结构特征分析^{*}

辛 悦^{1,2} 毕力格^{1,2} 包山虎³ 苏立娟^{1,2} 郑旭程¹ 张德广² 蔡 敏²

1 内蒙古自治区人工影响天气中心,呼和浩特 010051

2 内蒙古自治区人工影响天气重点实验室,呼和浩特 010051

3 内蒙古师范大学地理科学学院,呼和浩特 010022

提 要: 大兴安岭是我国重要生态资源保护区,深入分析该区域云物理特性参量分布特征,对了解复杂地形区域气候变化及人工影响天气等具有重要意义。基于 CloudSat-CALIPSO(CloudSat-Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)卫星观测资料,分析了大兴安岭地区云层的宏、微观物理特征,结果表明:大兴安岭地区年平均云出现频率为 59.5%,主要以高层云、卷云和层积云为主,春夏季云发生频率高于秋冬季。云层主要以薄云为主,61.41%的云厚度不超过 2 km,云顶高度、云底高度分别呈现双峰型和单峰型分布形式。云垂直结构特征为单层云的出现频率最高,占到总云量的 69.19%,随着云层数的增加,云的发生频率逐渐降低。大兴安岭地区云中液态水含量丰富,年平均值达 $244.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,约为冰水含量年平均值的 4 倍,有 83.2%的云水含量集中在低空 5 km 以下的区域。水滴粒子有效粒径和数浓度的年平均值分别为 $15.86 \mu\text{m}$ 和 $34.47 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,均小于冰晶粒子平均值。云中含水量和有效粒径随高度呈现单峰型分布形式,而云滴粒子数浓度则在低空呈现为双峰型分布形式。

关键词: CloudSat-CALIPSO 卫星,大兴安岭地区,云垂直结构,微物理特征

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.080601

Vertical Structure Characteristics of Cloud Macro and Micro Physical Quantities in the Greater Khingan Mountains Based on CloudSat-CALIPSO Satellite Data

XIN Yue^{1,2} Bilige^{1,2} BAO Shanhu³ SU Lijuan^{1,2} ZHENG Xucheng¹

ZHANG Deguang² CAI Min²

1 Inner Mongolia Weather Modification Center, Hohhot 010051

2 Inner Mongolia Key Laboratory of Weather Modification, Hohhot 010051

3 School of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022

Abstract: The Greater Khingan Mountains Area is an important ecological resource protection area in China due to its complex terrain and various biological species. Understanding and recognizing the microphysical

^{*} 国家自然科学基金地区项目(41961058)、内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS04015、2019MS04003、2022LHMS04003)、内蒙古自治区“十四五”社会公益领域重点研发和成果转化计划项目(2022YFSH0132)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J033)和内蒙古自治区研究型业务项目(nmKYSYJ202001)共同资助

2022 年 2 月 23 日收稿; 2022 年 8 月 31 日收修定稿

第一作者:辛悦,主要从事大气物理与人工影响天气研究. E-mail:598806512@qq.com

通讯作者:毕力格,主要从事人工影响天气研究. E-mail: bilige07@qq.com

properties of clouds is of great significance for studying the climate change and precipitation characteristics in the region. Based on CloudSat-CALIPSO (CloudSat-Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) data, the macroscopic and microscopic physical characteristics of the clouds in the Greater Khingan Mountains are analyzed. The results show that the annual average cloud occurrence frequency over the Greater Khingan Mountains is 59.5%, mainly composed of altostratus, cirrus and stratocumulus, and the cloud occurrence frequency in spring and summer is higher than that in autumn and winter. The clouds are mainly thin clouds, and 61.41% of the clouds are less than 2 km thick. The cloud top height and cloud bottom height show the distribution patterns of double peak and single peak, respectively. The occurrence frequency of single-layer cloud is the highest, accounting for 69.19% of the total cloud cover. With the increase of cloud layer, the occurrence frequency of clouds decreases gradually. The cloud liquid water content in the Greater Khingan Mountains is abundant, with an annual average value of $244.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, which is about 4 times the annual average ice water content. There are 83.2% of cloud water resources concentrated in low-altitude areas below 5 km from the ground. The annual mean values of effective particle size and number concentration of water droplets are $15.86 \mu\text{m}$ and 34.47 cm^{-3} , respectively, which are lower than the average values of ice crystals. The water content and effective particle size in the cloud show a single-peak distribution with height, while the particle number concentration of cloud droplet shows a double-peak distribution at low altitudes.

Key words: CloudSat-CALIPSO, the Greater Khingan Mountains, cloud vertical structure, cloud micro-physical feature

引 言

云覆盖地球表面 50%~70% 的地表,其形成与变化对地球能量平衡、气候变化以及天气演变具有重要影响 (L'Ecuyer et al, 2019; Schoeberl et al, 2019; 桂海林等, 2019; 胡树贞等, 2020)。因此,有效监测与分析云特性参量对天气系统和气候变化有着重要的科学意义。其中,云垂直结构 (cloud vertical structures, CVS) 是天气气候模式中重要云特征参量,其与云辐射特征、云降水条件、降水机制、降水效率及人工增雨潜力密切相关 (苏立娟等, 2015; 郑建宇等, 2018; 杨文霞等, 2019)。充分认识不同类型云的垂直结构特征,不仅有助于深入了解云、降水、辐射和气候之间复杂的相互作用,而且对于人工影响天气作业条件的精准选择、播云催化方案的科学设计,提高降水精细化预报和气候预测水平具有重要意义 (Fu et al, 2018; Zheng et al, 2018; Li et al, 2021; 史月琴等, 2021)。

目前,主要利用飞机探测、地基及空基遥感等方式对云进行观测,获取的云特性资料对云形成与发展研究提供了重要参考。如: Zhou et al (2019) 在将地基观测数据与 Himawari-8 静止卫星数据进行对

比基础上,利用地基毫米波云雷达和云高仪数据分析北京地区云结构特征,得知该地区云底高度在夏季达到峰值,在冬季最低;杨洁帆等 (2021) 利用飞机和地面雷达观测数据,分析了一次典型西风槽天气系统影响下的层状云微物理特征,发现云系在垂直结构上具有明显分层结构,云滴及冰雪晶数浓度存在跃迁现象。地基及飞机观测可提供云层变化的高精度数据,但受限于其移动的便捷性问题,只能获取测站周围一定范围内的云层信息,无法获取大范围云系的特征,然而卫星观测则可对其进行有效的补充,获取一定范围乃至全球范围内云层的分布信息。Tan et al (2019) 对比了多颗气象卫星反演的云顶高度结果,发现 FY-4 和 Himawari-8 对于单层云的云顶高度反演结果与 CloudSat、CALIPOS 和 MODIS 较为接近,但是对于多层云的云层高度存在高估现象; Yang et al (2021) 探究了云发生频率、云季节变化和云重叠现象等因素对不同探测器反演的云顶高度的影响,结果表明随着云发生频率和云厚的增加,各探测仪器间计算的云顶高度差异逐步增大,尤其对于各被动探测卫星则差异更大。

受限于传统被动遥感卫星观测原理,其传感器只能被动地收集地表反射的相关辐射信息,进而反演出云层特征,不能穿透厚云的表层探测其垂直、水

平尺度以及内部结构,其反映的云内部结构及垂直分布特征信息非常有限(李积明等,2009)。自2006年4月美国航空航天局(NASA)成功发射 CloudSat 及 CALIPSO 卫星以后,人类对云的探测进入新阶段。与被动遥感资料“自下而上”的探测方式不同,CloudSat 卫星获得其运行轨道上云的垂直结构、降水机制等内部信息,为深入了解云的内部结构及其发展演变规律,定量解释云对气候的影响与反馈提供了重要的参考资料(马占山等,2008; Stephens et al, 2008)。

基于 CloudSat 和 CALIPSO 主动遥感探测卫星资料开展云宏观特征分布及云气候相关研究工作已取得了一些独特研究成果(Luo et al, 2009; 王海波等, 2018; 唐雅慧等, 2020)。方乐铎等(2016)利用 CloudSat-CALIPSO 资料分析了全球不同类型云的分布特征得知,卷云和层积云是全球云量最多的两类云,积状云云量呈现从赤道向极地递减的特征,层状云则相反;杨冰韵等(2017)利用 CloudSat 资料分析了中国11个地理区域的深对流云的分布特征及其垂直结构得知,深对流云发生率整体呈现从东南到西北递减的趋势,深对流云出现在18 km以下,其结果为人工影响天气以及数值模式模拟提供了一定的参考依据;孙丽等(2019)统计分析了辽宁省不同天气系统下云层高度、云层厚度等宏观特征,并对有利于人工增雨的作业云系进行归纳;宋琦明(2019)详细分析了祁连山地区各季节云中微物理量的垂直分布特征;袁敏等(2017)对云中积冰类型、云量、温度和过冷水含量进行统计分析,探讨了不同类型云中云内过冷水与环境温度的关系发现大多数积冰发生在层积云、雨层云和高层云中,云中过冷水含量随着温度降低而减少,并且过冷水含量的分布范围随着温度降低而变窄。目前,虽对云层的垂直分布特征已获得较多成果,但对于云中微物理参数的垂直分布及云宏观动力学与微物理学相互作用等方面仍需进一步研究。

大兴安岭地区位于中纬度西风带,主要受西风槽和低涡系统影响,夏季偶尔受到台风影响,天气环流系统复杂,因而云层组成较为复杂多变。此外,大兴安岭是国家重点国有林区和自然生态保护区,也是中国生态环境脆弱地区之一,年降水量分布不均,夏季森林草原火灾频发,人工影响天气作业需求激增。然而,目前针对大兴安岭地区开展的云物理方面的研究较为少见,缺乏对云系的系统性认知,对云内微物理参数分布特征掌握较少。因此本文利用

CloudSat-CALIPSO 卫星资料,分析2006—2017年的大兴安岭地区云特性参数的多年变化趋势和垂直分布特征,其结果不仅有助于减少气候模式在复杂地形下数值模拟存在的不确定性,而且可为空中云水资源评估及生态修复型人工影响天气作业条件监测识别提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

大兴安岭位于内蒙古自治区东北部、黑龙江省西北部,是中国最大的国有林区,维系着中国东北、华北地区的生态安全,是呼伦贝尔大草原和东北平原的绿色屏障。同时,大兴安岭地区也是中国生态环境脆弱地区之一,呼伦湖面积萎缩、林火草原火频发等生态问题一直困扰着该地区。本文选取大兴安岭及其周边地区(简称大兴安岭地区)作为研究区,其区位与高程如图1所示,该图基于审图号为GS(2016)1600号的标准地图制作。该地区范围为 $41^{\circ}\sim 54^{\circ}\text{N}$ 、 $115^{\circ}\sim 127^{\circ}\text{E}$,地势西高东低,年均气温为 $-6\sim 1^{\circ}\text{C}$,年降水量为240~442 mm,属于典型的寒温带大陆性季风气候,季节差异显著,夏季温差变化大,降水集中,春秋季节天气条件变化剧烈,常出现高温、低湿和大风天气,多引发森林火灾,冬季寒冷漫长(李顺等,2017;张艳平,2008)。

1.2 数据

2006年4月28日,NASA发射升空了一对主动式传感器,搭载在CloudSat卫星上的毫米波云廓

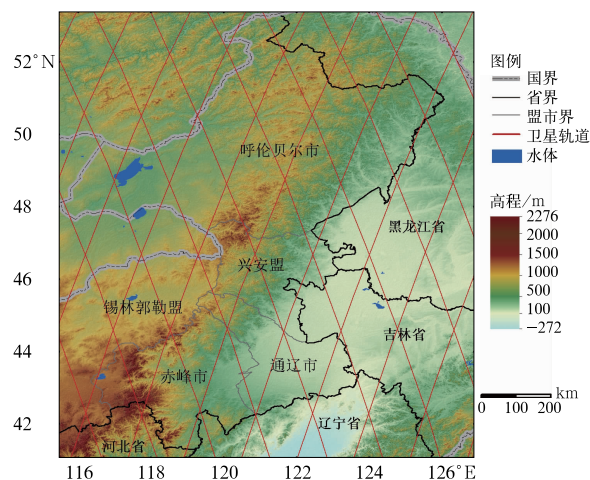


图1 研究区位置与高程图

Fig. 1 Location and elevation map of the study area

线雷达(CPR)和搭载在 CALIPSO 卫星上的云-气溶胶正交偏振激光雷达(CALIOP),可用于从太空探测云和气溶胶的垂直结构。并且,这两颗卫星于 2006 年 6 月 1 日与其他四颗卫星共同组成“A-Train”观测系统,在同一轨道上对地球进行主被动、多波段、准同步的观测。由于六颗卫星前后经过地球上固定点的相隔时间很短,经常将搭载在不同卫星平台上的仪器所获得的数据资料进行联合处理(周毓荃和赵姝慧,2008)。经过多年数据开发及测试应用,并与地面观测数据、卫星数据等进行对比,CloudSat 卫星产品资料可信度得到保证(高洋和方翔,2018;唐雅慧等,2020;任束宇等,2020)。本文采用 NASA 发布的 2006—2017 年 CloudSat 和 CALIPSO 卫星资料合成的二级产品 2B-CLDCLASS-LIDAR 数据集(包括经纬度、云顶高度、云底高度等云宏观特征数据),以及 2B-CWC-RO 数据集(包括云水含量、有效粒径和数浓度等云微观特征数据),该产品集每个轨道约有 36 383 个星下像素点,沿轨分辨率为 1.1 km,横轨分辨率为 1.3 km,垂直分辨率为 0.24 km。目前为止,该卫星数据更新至 2019 年 6 月,其中 2011 年和 2018 年 CloudSat 卫星遭遇技术故障问题导致数据缺失严重,因此为保证数据统计的完整性和一致性,分析中未使用 2011 年、2018 年和 2019 年数据。

1.3 研究方法

CloudSat-CALIPSO 卫星一天可经过研究区域两次,分别在当地时间的 01 时和 12 时左右,本文选取卫星过境时的全部轨道数据进行分析。首先分析了云发生频率、云顶高度、云底高度、云层厚度等云

宏观物理量的变化特征,在计算云发生频率时,根据卫星过境时实际视角下的星下像素点观测到的廓线资料计算云发生频率,具体计算方法为:云发生频率等于有云的像素点个数除以总观测像素点;然后根据 2B-CLDCLASS-LIDAR 数据集云分类产品,分别提取八类云的特征参量,分析不同类型云分布情况及垂直结构特征;最后提取 2B-CWC-RO 产品中冰/液态水含量、冰/液态水有效粒径、冰/液态水粒子数浓度数据,统计以上物理量在大兴安岭地区的逐年、逐月平均分布情况,并统计了云内微物理量的垂直分布特征。季节划分以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。

2 结果与分析

2.1 云宏观特征分析

2.1.1 云发生频率变化特征

云发生频率反应了大兴安岭地区上空云平均出现概率,与局地降水量、太阳辐射、低空环流形势等密切相关,对航空飞行安全及局地气候变化等方面具有重要影响。从 2006—2017 年大兴安岭地区云发生频率的年际变化特征(图 2a)上可以看出,大兴安岭地区年平均云发生频率在 54.71%~67.51%,从年变化来看,云发生频率呈波动状态,整体趋上升态势,平均增长速率为 $0.16\% \cdot a^{-1}$ 。其中,2012—2017 年云平均发生频率为 60.84%,高于 2006—2010 年云发生频率平均值 58.54%,与该地区 2001—2010 年为相对少雨时期、2011—2017 年为多

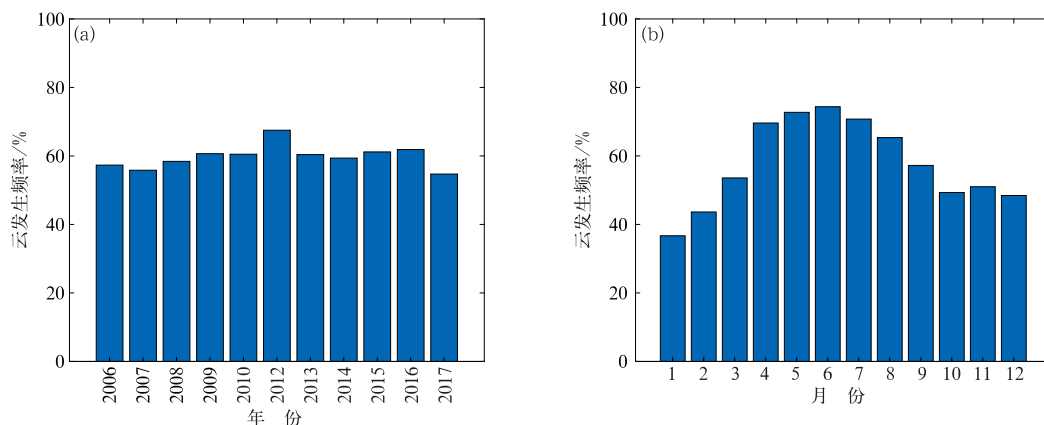


图 2 2006—2016 年云发生频率的(a)年变化和(b)月变化

Fig. 2 (a) Interannual variation and (b) monthly variation of cloud occurrence frequency during 2006—2016

雨时期研究结果吻合(任东宇等,2020),表明云发生频率与地区降水量有较为一致的变化趋势。

大兴安岭地区云发生频率具有明显的季节变化特征,如图2b所示。春夏季云发生频率高于秋冬季,夏季云发生频率最高,平均频率达到69.99%,春季次之,云发生频率为66.88%,秋季云发生频率则比春夏季节大幅下降,降至52.4%,冬季云发生频率最低,仅为43.12%,与夏季平均云发生频率相差26.87%。在云发生频率的逐月分布变化情况中,5—7月云发生频率均在70%以上,其中6月云发生频率最高,达到74.37%,1月云发生频率最低,仅为36.69%,各个月之间云发生频率差异明显。

2.1.2 云高度及厚度变化特征

统计所有过境云层的云顶高度、云底高度和云层厚度,以500 m作为垂直间隔,分别统计云层在不同间隔范围内的频率变化情况(图3)。如图3a所示,云顶高度呈现双峰型分布形式,云顶高度发生

最大频率在3.5 km处,峰值频率为5.32%,次峰值为10.5 km左右的位置。云底的分布形式与云顶明显不同(图3b),主要以中低云占主导地位,云底随高度变化呈现出单峰型分布形式,云底位于1~2 km的云最多,超过总数的22%,随着高度升高,云底的出现频率逐渐降低,在11 km以上,云底出现频率迅速下降,仅有1.5%的云云底高度在11 km以上。大兴安岭上空主要以薄云为主,云层厚度分布频率随厚度增加而降低,云厚度在500 m内的云发生频率最多,占到总云的20.66%。有61.41%的云厚度不超过2 km,云厚超过10 km的云只占2.13%。云顶高度和云底高度具有较明显的季节变化特征,月平均云底高度在3.0~4.5 km变化,夏季云底最高,可达4.51 km,月平均云顶高度在5~7 km内变化,月平均云厚值维持在2.4 km左右。云顶、云底高度在夏秋季节高于春冬季节,主要由于夏季辐射加热作用强,对流活动相对旺盛,导致云层发展的高度更高。

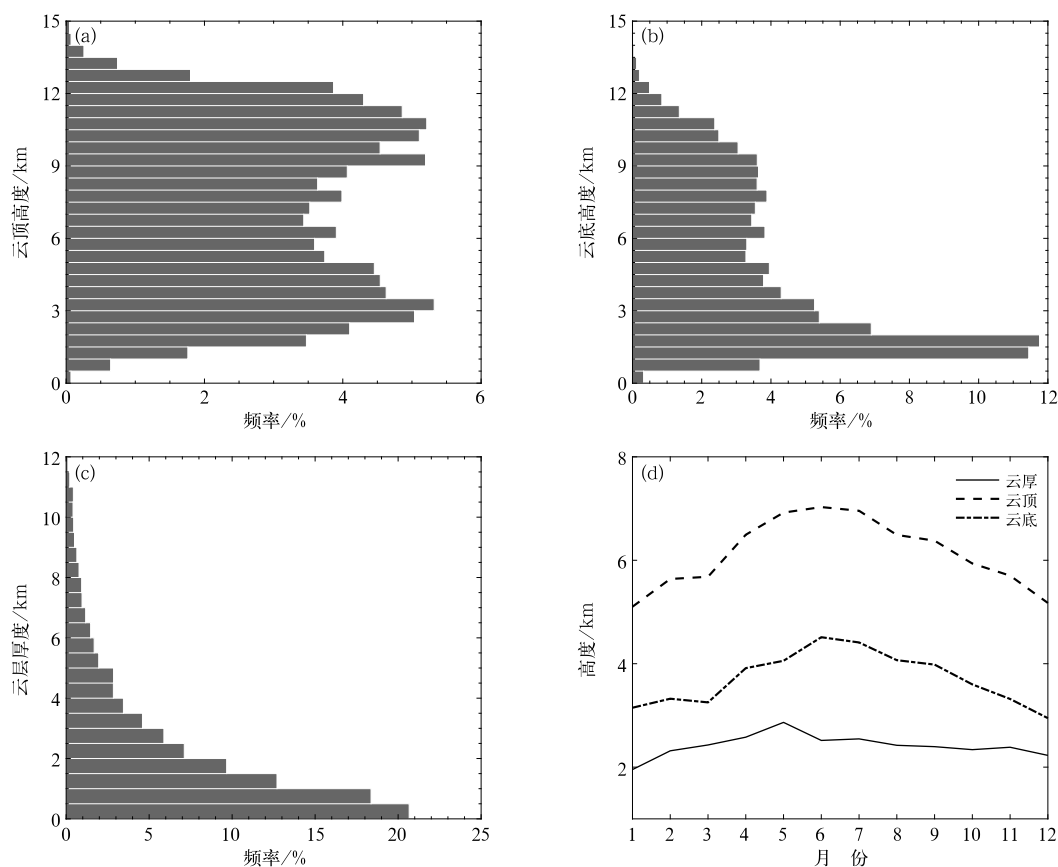


图3 (a)云顶高度、(b)云底高度和(c)云层厚度频率及其(d)月变化分布

Fig. 3 Distribution of (a) cloud top height, (b) cloud base height and (c) cloud thickness frequency and (d) their monthly variations

2.1.3 云层数分布特征

根据卫星探测的云垂直结构信息,统计不同层数云的出现频率及其季节变化(图 4)。图 4a 表明大兴安岭地区单层云的出现频率最高,约为总云量的 69.19%,随着云层数的增加,云的发生频率逐渐降低,单层云、双层云和三层云的云出现频率之和达到云总数的 99%以上,四层以上的多层云只达到云总数的 0.75%。大兴安岭地区不同季节 1~3 层云的发生频率如图 4b 所示。整体而言,各个季节云发生频率以单层云为主,占总云发生数的 64.37%~77.53%,其中在冬季对总云量的相对贡献最多,夏季则较少。多层云则相反,在夏季双层云和三层云出现频率高于其他季节,主要是由于夏季对流活动相对旺盛,更容易出现复杂的云层垂直分布,多层云出现频率明显升高。

2.1.4 不同类型云宏观特征

为了获取不同类型云的云宏观特征,利用 2B-CLDCLASS-LIDAR 数据集云产品分类,分类统计分析了卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云和深对流云等八类云的云发生频率和平均高度,结果如图 5 所示。在大兴安岭地区,高层云、卷云和层积云是最常出现的三类云,云的出现频率占比分别为 30.52%、25.61%和 14.70%,其原因主要为大兴安岭地处中国东北部地区,属于寒温带大陆性季风气候,常年受西风带槽脊系统、东北冷涡系统等大尺度天气过程影响,容易形成层状云、积状云等系统性云系(孙丽等,2019)。层云和深对流云的出现频率则较低,占比分别为 0.15%和 0.67%,在夏季偶有对流性天气发生,故对流云出现频率较低,但是其发展最为深厚,平均厚度可达 8.8 km。层云的出现频率最低,甚至低于深对流云,主要是由于层云的生成机理所致。层云是在大气稳定的条件下,因夜间辐射冷却或乱流混合作用,水汽凝结或由雾抬升而形成,厚度很薄,平均厚度仅为 600 m,由水滴组成,太阳升起后,气温逐渐升高,稳定层被破坏,层云也逐渐消散。不同类型云各季节出现频率统计中(表 1),春季、秋季和冬季的高层云出现频率为最高,层积云次之;夏季则是以高积云出现频率为最高,卷云次之,主要是由于夏季的温度较高,受地表热力抬升的作用,云层发展高度更高。

不同类型云的各季节云层垂直分布厚度统计如图 6 所示。层云、层积云、积云、高积云和卷云的平均云厚较小,均在 1.5 km 以内,高层云、雨层云和

深对流云等降水云系垂直发展则较为深厚,平均厚度可达 3~9 km。除层云和层积云外,其他所有类型云均在冬季发展最为浅薄,云顶高度和云底高度明显低于其他季节,冬季无深对流云出现。高层云、雨层云、深对流云等降水云系和卷云的云层季节变化特征明显,夏季云层发展明显高于其他季节,高层云、层云、层积云和积云则在春、夏、秋三季云层发展高度没有明显差异。不同类型云的垂直分布特征与赵阳等(2017)对全球顶层云各季节不同类型云的云层高度统计结果基本一致,差别在于大兴安岭地区在夏季容易受到东北冷涡的影响,易形成各类锋面系统,高层云和雨层云多为锋面云系的组成成分,所以这两类云在夏季发展较为旺盛。

2.2 云微观特征分析

2.2.1 云中含水量特征

云中含水量是描述云属性的最基本的参量之一,其表示了单位体积云中所包含的液态或固态水量的多少,与云的降水潜力密切相关。大兴安岭地区云中液态水资源较为丰富,年平均值达到 $244.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,约为冰水含量平均值的 4 倍。从 2006—2017 年云液态水含量和冰水含量距平的变化趋势(图 7)得知,云中含水量呈现上升趋势,尤其是从 2011 年以后冰水含量距平均为正距平。如图 7c 所示,云中含水量随季节变化明显,整体表现为夏季云中含水量高、冬季低的特征,但液态水含量和冰水含量随月份的变化仍有一定差异。冰水含量随月份呈现出单峰的分布形式,峰值出现在 7 月,冰水含量平均值达到 $82.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。液态水含量呈现双峰型分布形式,峰值出现在 6 月,其液态水含量为 $285.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,次峰值在 9 月,其液态水含量为 $283.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

云中含水量垂直分布特征如图 8 所示,云中液态水含量最大高度为 8.5 km,冰水含量最大高度不超过 12.5 km,云中含水量最高的区域主要为低空 5 km 以下,液态水含量在 $0 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,高度在 2~4 km 范围内其发生概率最高,可达 0.09%以上;冰水含量在 $0 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 内,高度在 3~5 km 范围内的概率最高,可达 0.45%以上。在 5 km 以上,随着高度的升高,冰水含量逐渐减少;不同于冰水含量随高度的单调分布,液态水在高空和低空,均有峰值出现,除去上述的在 2~3 km 的频率最大值区,在 3~4 km 内和 6.5~7.0 km 在液态水含量

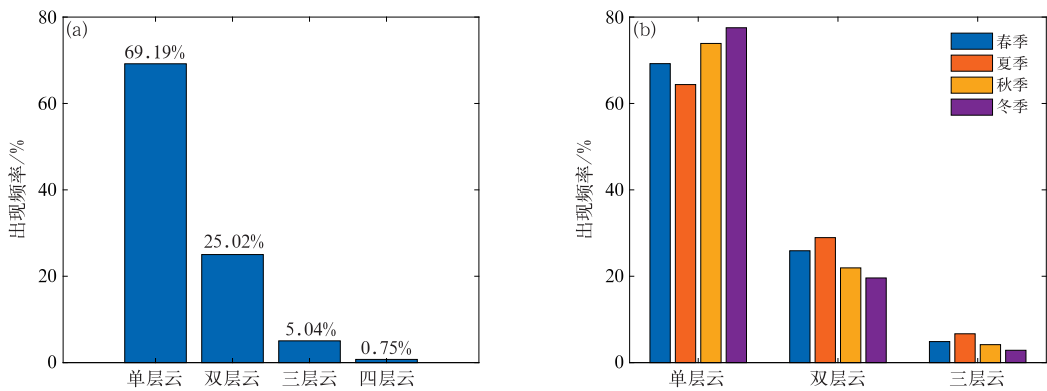


图 4 不同层数云的(a)出现频率及其(b)季节变化

Fig. 4 The frequency of occurrence of clouds with (a) different layer numbers and (b) their seasonal variations

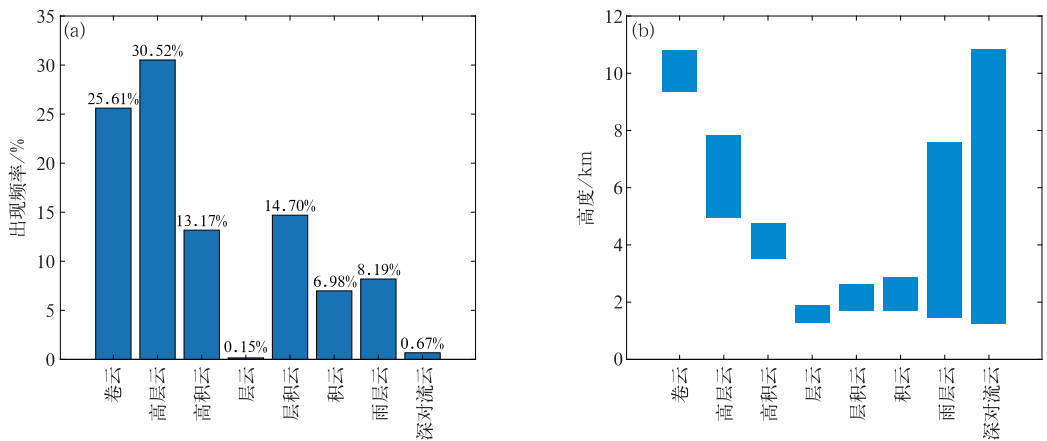


图 5 不同类型云的(a)出现频率及其(b)云层垂直分布

Fig. 5 (a) The frequency of occurrence and (b) the vertical distribution of different types of clouds

表 1 大兴安岭不同类型云的出现频率季节统计(单位: %)

Table 1 Seasonal statistics of the occurrence frequency of different types of clouds in the Greater Khingan Mountains (unit: %)

云类型	春季	夏季	秋季	冬季	全年
卷云	14.68	21.62	13.81	6.24	25.61
高层云	36.15	14.95	30.16	44.45	30.52
高积云	11.66	24.88	10.32	1.69	13.17
层云	0.09	0.09	0.3	0.51	0.15
层积云	18.97	13.63	24.33	28.47	14.7
积云	5.25	14.82	7.73	5.29	6.98
雨层云	13.13	7.64	13.16	13.36	8.19
深对流云	0.08	2.37	0.18	0	0.67

小值区,均有频率大于 0.08% 的部分出现。在同一高度层上,液态水含量和冰水含量也呈现出不同分布形式,随着液态水含量的增大,其出现频率呈逐渐减小的单调变化趋势,而冰水含量则呈现为先增加后减小的趋势。

2.2.2 云粒子有效粒径特征

云有效粒径是描述云滴尺度的重要物理特征参

量,其分布对降水的形成有重要的指导意义,大兴安岭地区云粒子有效粒径分布情况如图 9 所示,水滴粒子平均有效粒径为 15.86 μm ,冰晶粒子平均有效粒径为 69.91 μm ,近年来均呈现逐渐增加的趋势,但是其季节变化具有明显差异。冰晶粒子平均粒径月平均值在 7 月达到最大,平均粒径为 73.03 μm ,水滴粒子粒径的谷值则主要集中在夏季,6—8 月,

水滴粒子月平均粒径均小于 $15\ \mu\text{m}$, 最低值位于 6 月 ($14.72\ \mu\text{m}$), 有效粒径变化范围与范梦奇等 (2019) 对青岛地区的研究结果较为一致。

有效半径随高度的分布形式如图 10 所示, 云滴粒子和冰晶粒子均呈现出相似的分布情况, 随着粒径的增大, 高度的升高, 出现频率逐渐降低, 两者之间显著的差异是最大频率出现的高度范围不一致。在粒径范围为 $46\sim 56\ \mu\text{m}$, 高度为 $5.5\sim 9.5\ \text{km}$ 范围的冰晶粒子, 其出现频率最高, 均大于 0.25% , 在 $34\sim 130\ \mu\text{m}$ 范围内, 均有分散的冰晶粒子出现。而水滴粒子出现频率最多的粒径范围为 $10\sim 14\ \mu\text{m}$, 位于高度在 $2.5\sim 3.5\ \text{km}$, 其出现频率大于 1% , 有

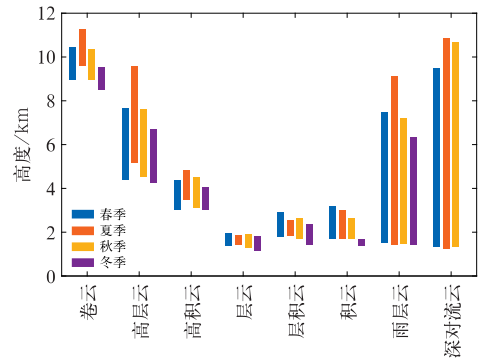


图 6 不同类型云云高度和厚度季节平均
Fig. 6 Seasonal mean height and thickness of different types of clouds

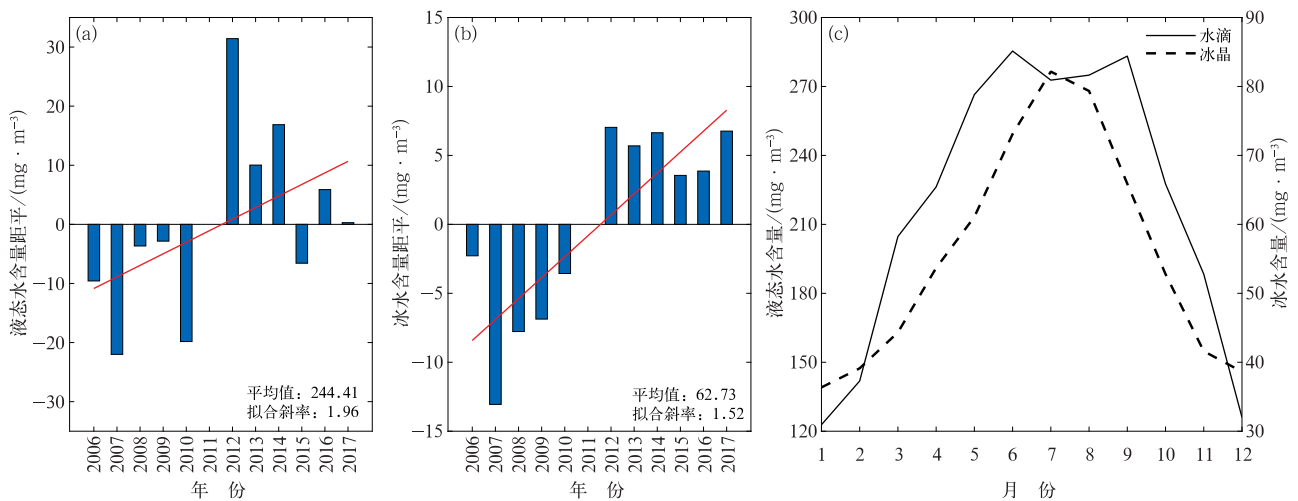


图 7 2006—2017 年 (a) 液态水含量和 (b) 冰水含量的距平年变化特征, 及其 (c) 液态含量和冰水含量的月变化特征
Fig. 7 Interannual variability characteristics of (a) liquid water content anomaly, (b) ice water content anomaly, and (c) liquid/ice water content monthly variations during 2006–2017

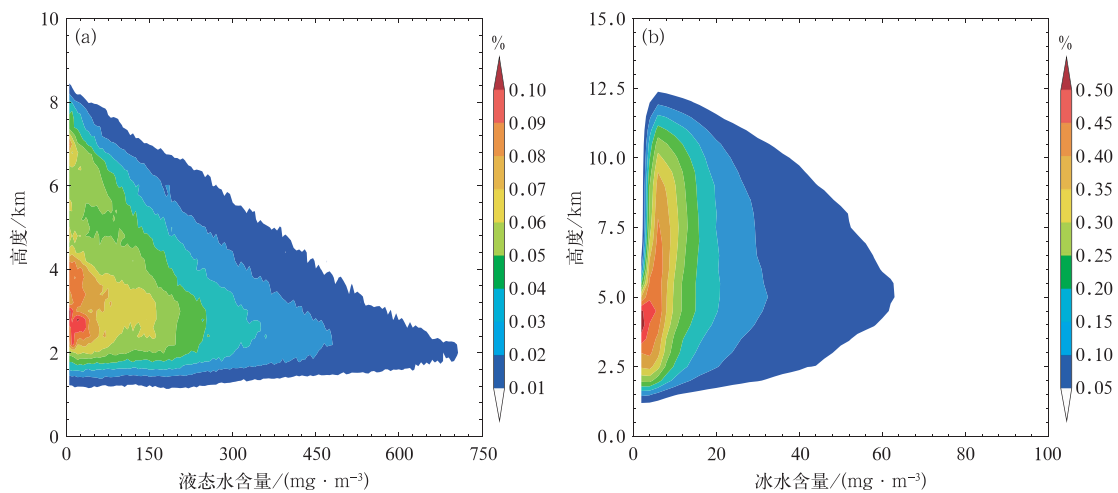


图 8 (a) 液态水含量和 (b) 冰水含量的高度归一化概率分布

Fig. 8 The normalized probability distribution with height of (a) liquid water content and (b) ice water content

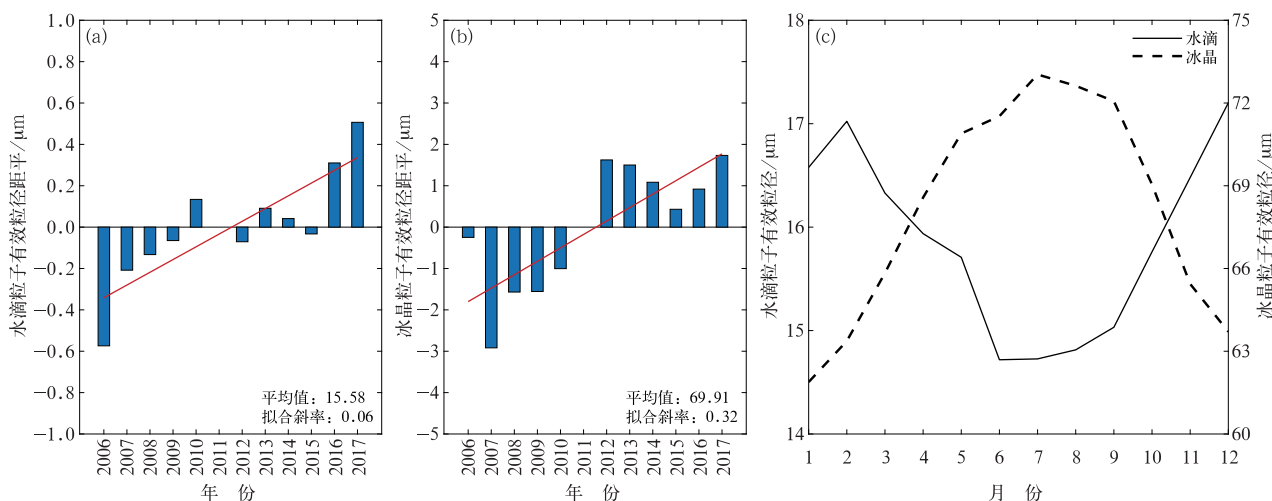


图9 2006—2017年(a)水滴粒子有效粒径和(b)冰晶粒子有效粒径的距平年变化特征,及其(c)水滴粒子和冰晶粒子有效粒径的月变化特征

Fig. 9 Interannual variability characteristics of (a) liquid effective particle size anomaly, (b) ice effective particle size anomaly, and (c) liquid/ice effective particle size monthly variations during 2006–2017

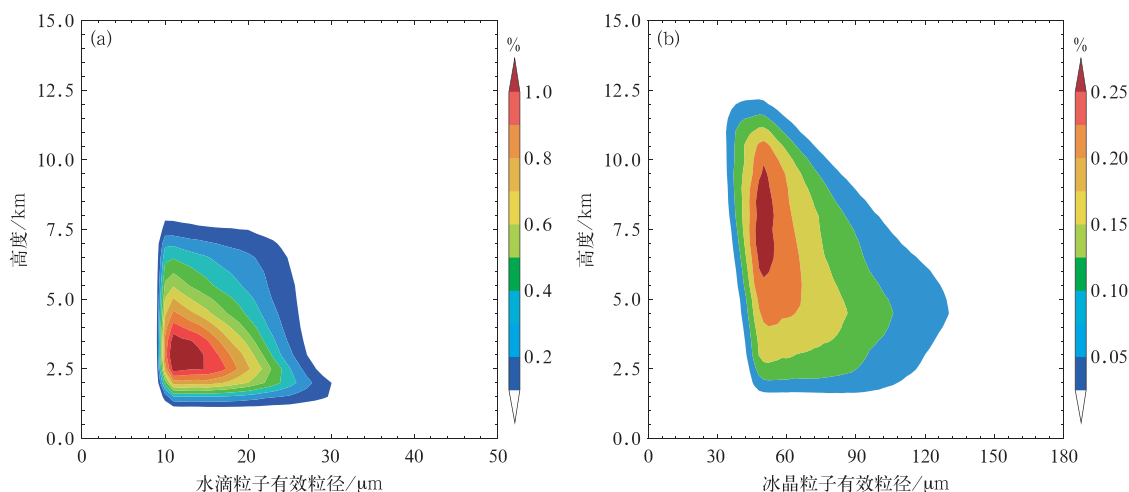


图10 (a)水滴粒子有效粒径和(b)冰晶粒子有效粒径随高度的归一化概率分布

Fig. 10 The normalized probability distribution with height of (a) liquid effective particle size and (b) ice effective particle size

99%以上的水滴粒子的粒径均小于 $30\ \mu\text{m}$ 。相较于冰晶,水滴粒子出现高度更低,粒径分布范围更小,数据更为集中。

2.2.3 云粒子数浓度特征

人工增雨作业中,冰云在云水转化中起着重要作用,冰粒子的凝结增长对降水的贡献超过 35%,随着冰粒子的加强,地面降水随之增大,冰粒子减弱时,地面降水随之减少(宋琦明,2019),大兴安岭地区云中数浓度变化特征如图 11 所示。水滴和冰晶粒子数浓度平均值分别为 $34.47\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $63.86\ \text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,数浓度的季节变化与其他微物理量的变

化形势一致,峰值集中在夏季,谷值集中在冬季,且均呈现单峰型分布形式,但是其年变化与其他物理量略有差异。冰晶粒子数浓度经线性拟合后呈现出增加的趋势,而水滴粒子数浓度的线性拟合系数仅为 0.02,整体上呈现波动分布的形式,自 2015—2017 年的近年来甚至呈现逐渐减少的趋势。

数浓度随高度分布形式如图 12 所示,与含水量和有效粒径的单峰值分布情况不同,冰晶数浓度和水滴数浓度存在两个数据密集区,在同一高度呈现出双峰的分布形式。冰晶粒子数浓度的两个频率大值区,都在数浓度较低的区域,分别在数浓度范围为

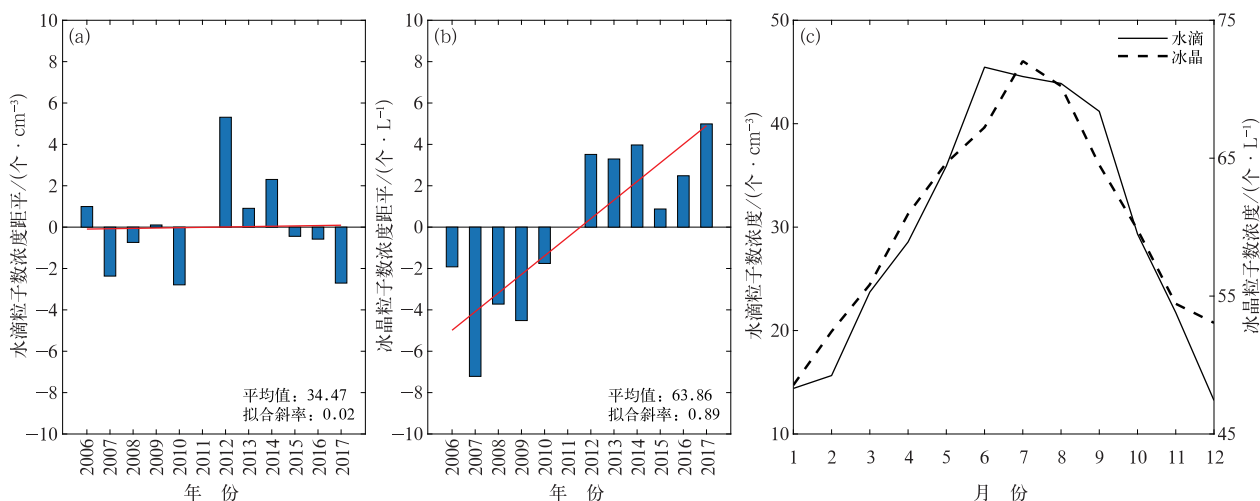


图 11 2006—2017 年(a)水滴粒子数浓度和(b)冰晶粒子数浓度的距平年变化特征,及其
(c)水滴粒子和冰晶粒子数浓度的月变化

Fig. 11 Interannual variability characteristics of (a) liquid particle number concentration anomaly, (b) ice particle number concentration anomaly, and (c) liquid/ice particle number concentration monthly variations during 2006—2017

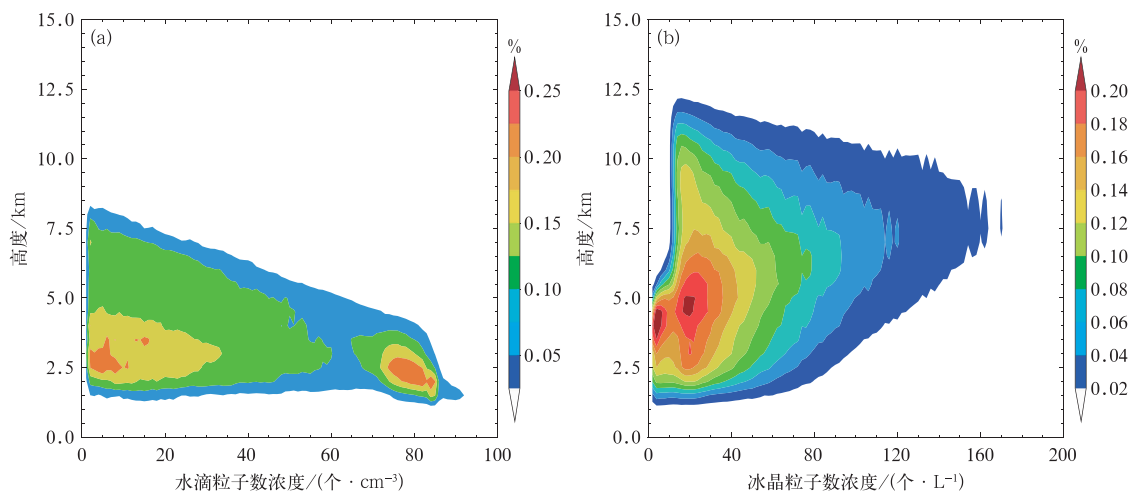


图 12 (a)水滴粒子数浓度和(b)冰晶粒子数浓度随高度的归一化概率分布

Fig. 12 The normalized probability distribution with height of (a) liquid particle number concentration and (b) ice particle number concentration

$2 \sim 6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $12 \sim 20 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 高度在 $3.5 \sim 5.0 \text{ km}$ 的区域内, 其出现频率均大于 0.2% , 在随着高度的分布上, 冰晶粒子数浓度呈现出随高度升高, 先增大后减少的趋势, 转折高度约在 $6 \sim 7 \text{ km}$ 处。水滴粒子数浓度也呈现出两个数据密集区, 但与冰晶不同的是, 两个数据密集区, 分别位于数浓度在 $2 \sim 11 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的小值区和数浓度在 $74 \sim 85 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 大值区, 并且其出现高度较低, 低于冰水含量密集区高度, 主要位于 $2 \sim 3.5 \text{ km}$ 的高度范围内。

3 结论与讨论

本文利用 2006—2017 年 CloudSat-CALIPSO 卫星 2B 数据集, 分析大兴安岭地区云宏观、微观参量垂直分布特征, 得出以下结论:

(1) 大兴安岭地区云顶高度呈双峰型分布特征, 云顶高度发生最大频率约为海拔 3.5 km 处, 次峰值约为海拔 10.5 km 处, 而云底高度以位于海拔

1~2 km 的云最多,超过总云的 22%,云厚度小于 500 m 的薄云出现频率最多,约为总云的 20.66%,61.41% 的云厚度不超过 2 km,厚度超过 10 km 的云只占 2.13%。

(2)大兴安岭地区单层云的出现频率最高,占到总云量的 69.19%,双层云出现频率为 25.02%。高层云、卷云和层积云是最常出现的三类云,占比分别为 30.52%、25.61%和 14.7%,深对流云出现频率最低(0.67%)。大兴安岭地区云发生频率的月际变化(36.69%~74.37%)较大,其变化范围远大于华北地区的 64.1%~77.6%(陈超等,2014),夏季云发生频率与国内其他区域基本保持一致,均在 70%左右,而冬季由于天气系统明显减少,云发生频率显著下降,仅为 43.12%。由于明显的季节波动,导致大兴安岭地区全年云出现频率平均值低于祁连山、秦岭等西北山地地区(位晶和段克勤,2018;宋琦明,2019)。

(3)大兴安岭地区云中液态水资源较为丰富,年平均直达 $244.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,冰水含量平均值为 $62.73 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,云中含水量随季节变化明显,整体上夏季云中含水量高,冬季低,云中含水量最高的区域主要为低空 5 km 以下,其中液水含量在 2~4 km 高度出现概率最高,可达 0.09%以上;冰水含量在 3~5 km 高度概率最高,为 0.45%以上。云中液态水含量最大高度为 8.5 km,冰水含量最大高度不超过 12.5 km,冰水含量发展高度略低于全国平均值(杨大生和王普才,2012)。

(4)大兴安岭地区云水滴和冰晶粒子平均有效粒径分别为 $15.86 \mu\text{m}$ 和 $69.91 \mu\text{m}$,随着粒径的增大,高度的升高,其出现频率逐渐降低,有效粒径变化范围与范梦奇等(2019)对青岛地区的研究结果较为一致。云水滴和冰晶粒子数浓度平均值分别为 $34.47 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $63.86 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,随高度分布呈现出双峰型分布形式,与其他微物理量的单峰形式不同。

本文对大兴安岭地区云宏观特性进行了系统分析,由于观测资料和观测手段的不足,对于不同天气类型下人工影响天气作业云系的选择指标等内容涉及较少,后续希望结合地基观测资料及飞机机载探测数据等资料深入分析人工影响天气作业云系的物理垂直结构与云内微物理特征。

参考文献

陈超,孟辉,靳瑞军,等,2014. 基于 CloudSat 云分类资料的华北地区云宏观特征分析[J]. 气象科技,42(2):294-301. Chen C, Meng H, Jin R J, et al, 2014. Cloud macroscopic characteristics over North China based on CloudSat data[J]. Meteor Sci Technol, 42(2):294-301(in Chinese).

范梦奇,王文彩,韩永清,等,2019. 基于 CloudSat 卫星资料的青岛地区云特征研究[J]. 海洋气象学报,39(1):76-85. Fan M Q, Wang W C, Han Y Q, et al, 2019. Study on cloud characteristics in Qingdao Area based on CloudSat data[J]. J Marine Meteor, 39(1):76-85(in Chinese).

方乐铨,李昀英,孙国荣,等,2016. 基于 CloudSat-CALIPSO 资料的全球不同类型云的水平和垂直分布特征[J]. 气候与环境研究,21(5):547-556. Fang L X, Li Y Y, Sun G R, et al, 2016. Horizontal and vertical distributions of clouds of different types based on CloudSat-CALIPSO data[J]. Clim Environ Res, 21(5):547-556(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).

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).

胡树贞,曹晓钟,陶法,等,2020. 船载毫米波云雷达观测西太平洋云宏观特征对比分析[J]. 气象,46(6):745-752. Hu S Z, Cao X Z, Tao F, et al, 2020. Comparative analysis of cloud macro characteristics from two shipborne millimeter wave cloud radars in the West Pacific[J]. Meteor Mon, 46(6):745-752(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]. Chin J Atmos Sci, 33(4):698-707(in Chinese).

李顺,吴志伟,梁宇,等,2017. 大兴安岭人为火发生影响因素及气候变化下的趋势[J]. 应用生态学报,28(1):210-218. Li S, Wu Z W, Liang Y, et al, 2017. Drivers of human-caused fire occurrence and its variation trend under climate change in the Great Xing'an Mountains, Northeast China[J]. Chin J Appl Ecol, 28(1):210-218(in Chinese).

马占山,刘奇俊,秦琰琰,等,2008. 云探测卫星 CloudSat[J]. 气象,34(8):104-111. Ma Z S, Liu Q J, Qin Y Y, et al, 2008. Introductions to a new type cloud detecting satellite-CloudSat[J]. Meteor Mon, 34(8):104-111(in Chinese).

任东宇,刘滨辉,廉陆鹂,等,2020. 大兴安岭地区降水量变化及干湿期特征分析[J]. 森林工程,36(5):16-23. Ren J Y, Liu B H, Lian L Y, et al, 2020. Analysis of the variation of precipitation in the Daxing'an Mountains and the characteristics of the dry and wet periods[J]. Forest Engineering, 36(5):16-23(in Chinese).

史月琴,刘卫国,王飞,等,2021. 一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析[J]. 气象,47(2):192-204. Shi Y Q, Liu W G, Wang F, et al, 2021. Forecast on convective cloud condition and analysis on seeding plan of an artificial rainfall mitigation case[J]. Meteor Mon, 47(2):192-204(in Chinese).

宋琦明,2019. 基于卫星遥感的祁连山及甘肃中部地区云特征分析[D]. 兰州:兰州大学. Song Q M, 2019. Study on cloud features over Qilian Mountains and central Gansu based on satellite

- remote sensing[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese).
- 苏立娟, 达布希拉图, 毕力格, 等, 2015. 内蒙古中部地区飞机人工增雨概念模型[J]. 干旱区资源与环境, 29(4): 97-101. Su L J, Dabuxilatu, Bilige, et al, 2015. Aircraft artificial precipitation conceptual model for middle Inner Mongolia[J]. J Arid Land Resour Environ, 29(4): 97-101(in Chinese).
- 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).
- 唐雅慧, 周毓荃, 蔡森, 等, 2020. 基于 CloudSat 与 CALIPSO 联合观测研究全球云分布特征[J]. 大气科学学报, 43(5): 917-931. Tang Y H, Zhou Y Q, Cai M, et al, 2020. Global distribution of clouds based on CloudSat and CALIPSO combined observations[J]. Trans Atmos Sci, 43(5): 917-931(in Chinese).
- 王海波, 张华, 荆现文, 等, 2018. 不同云重叠参数对全球和东亚地区模拟总云量的影响[J]. 气象学报, 76(5): 767-778. Wang H B, Zhang H, Jing X W, et al, 2018. Effects of different cloud overlapping parameters on simulated total cloud fraction over the globe and East Asian Region[J]. Acta Meteor Sin, 76(5): 767-778(in Chinese).
- 位晶, 段克勤, 2018. 基于卫星资料的秦岭南北云系及其垂直结构特征[J]. 高原气象, 37(3): 777-785. Wei J, Duan K Q, 2018. Analysis of cloud system and its vertical structure between the southern and northern Qinling based on satellite data[J]. Plateau Meteor, 37(3): 777-785(in Chinese).
- 杨冰韵, 吴晓京, 郭微, 2017. 基于 CloudSat 资料的中国地区深对流云物理特征研究[J]. 高原气象, 36(6): 1655-1664. Yang B Y, Wu X J, Guo Z, 2017. The characteristics of cloud properties in deep convective clouds across China with the CloudSat dataset[J]. Plateau Meteor, 36(6): 1655-1664(in Chinese).
- 杨大生, 王普才, 2012. 中国地区夏季 6—8 月云水含量的垂直分布特征[J]. 大气科学, 36(1): 89-101. Yang D S, Wang P C, 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer[J]. Chin J Atmos Sci, 36(1): 89-101(in Chinese).
- 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等, 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(1): 88-106. Yang J F, Hu X F, Lei H C, et al, 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 88-106(in Chinese).
- 杨文霞, 范皓, 杨洋, 等, 2019. 一次层状云降雨过程多源遥感特征参量演变分析[J]. 气象, 45(9): 1278-1287. Yang W X, Fan H, Yang Y, et al, 2019. Evolution analysis of physical quantities obtained by multi-source remote sensing in a process of stratiform cloud rainfall[J]. Meteor Mon, 45(9): 1278-1287(in Chinese).
- 袁敏, 段炼, 平凡, 等, 2017. 基于 CloudSat 识别飞机积冰环境中的过冷水滴[J]. 气象, 43(2): 206-212. Yuan M, Duan L, Ping F, et al, 2017. Identifying the supercooled liquid water in aircraft icing condition using CloudSat satellite data[J]. Meteor Mon, 43(2): 206-212(in Chinese).
- 张艳平, 2008. 黑龙江大兴安岭地区气候变化对森林火灾影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学. Zhang Y P, 2008. Study on the impacts of climate change of forest fires in Daxing'anling Mountains[D]. Harbin: Northeast Forestry University(in Chinese).
- 赵阳, 赵增亮, 姚志刚, 等, 2017. 基于卫星云分类资料的顶层云宏观特征研究[J]. 气象水文海洋仪器, 34(1): 1-7. Zhao Y, Zhao Z L, Yao Z G, et al, 2017. Research of top cloud macroscopic characteristics based on CloudSat cloud classification products[J]. Meteor Hydrol Mar Instrum, 34(1): 1-7(in Chinese).
- 郑建宇, 刘东, 王志恩, 等, 2018. CloudSat/CALIPSO 卫星资料分析云的全球分布及其季节变化特征[J]. 气象学报, 76(3): 420-433. Zheng J Y, Liu D, Wang Z E, et al, 2018. Global distribution and seasonal variation of clouds observed from CloudSat/CALIPSO[J]. Acta Meteor Sin, 76(3): 420-433(in Chinese).
- 周毓荃, 赵姝慧, 2008. CloudSat 卫星及其在天气和云观测分析中的应用[J]. 南京气象学院学报, 31(5): 603-614. Zhou Y Q, Zhao S H, 2008. CloudSat Satellite and its application in weather and cloud observation[J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(5): 603-614(in Chinese).
- Fu Q, Smith M, Yang Q, 2018. The impact of cloud radiative effects on the tropical tropopause layer temperatures[J]. Atmosphere, 9(10): 377.
- L'Ecuyer T S, Hang Y, Matus A V, et al, 2019. Reassessing the effect of cloud type on earth's energy balance in the age of active spaceborne observations. Part I: top of atmosphere and surface[J]. J Climate, 2019, 32(19): 6197-6217.
- Li Y R, Ge J M, Dong Z X, et al, 2021. Pairwise-rotated EOFs of global cloud cover and their linkages to sea surface temperature[J]. Int J Climatol, 41(4): 2342-2359.
- Luo Y L, Zhang R H, Wang H, 2009. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between Eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO data[J]. J Climate, 22(4): 1052-1064.
- Schoeberl M R, Jensen E J, Pfister L, et al, 2019. Water vapor, clouds, and saturation in the tropical tropopause layer[J]. J Geophys Res, 124(7): 3984-4003.
- Stephens G L, Vane D G, Tanelli S, et al, 2008. CloudSat mission: performance and early science after the first year of operation[J]. J Geophys Res, 113(D8): D00A18.
- Tan Z H, Ma S, Zhao X B, et al, 2019. Evaluation of cloud top height retrievals from China's next-generation geostationary meteorological satellite FY-4A[J]. J Meteor Res, 33(3): 553-562.
- Yang X, Ge J M, Hu X Y, et al, 2021. Cloud-Top height comparison from multi-satellite sensors and ground-based cloud radar over SACOL site[J]. Remote Sens, 13(14): 2715.
- Zheng Y T, Rosenfeld D, Li Z Q, 2018. The relationships between cloud top radiative cooling rates, surface latent heat fluxes, and cloud-base heights in marine stratocumulus[J]. J Geophys Res, 123(11): 11678-11690.
- Zhou Q, Zhang Y, Li B, et al, 2019. Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China[J]. Atmos Environ, 201: 381-390.

(本文责编: 俞卫平)