

刘 旸, 赵 姝 慧, 蔡 波, 等, 2017. 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.

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*

刘 旸^{1,2} 赵 姝 慧² 蔡 波³ 孙 丽²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2 辽宁省人工影响天气办公室, 沈阳 110166

3 北部战区空军参谋部气象处, 沈阳 110000

提 要: 利用 2007—2010 年 CloudSat 和 CALIPSO 卫星资料, 首先通过大量个例分析并结合地面逐小时降水量观测资料验证 CloudSat 卫星识别降水云指标的合理性。在此基础上, 统计分析了东北地区(39°~53°N、119°~135°E)的云垂直结构参数, 着重分析了降水云系和非降水云系的垂直结构差异和季节差异。结果表明: 东北地区云量廓线呈双峰分布特征, 有明显的昼夜及季节差异。东北地区以单层云为主, 降水也主要产生于这类云系, 是东北地区人工增雨作业的主要对象。单层降水云以低云、冷云、冰云或混合云为主, 主要云类别是雨层云。双层降水云以高低云或中低云配置为主, 且都为冷云; 高层以冰云为主, 主要类型是卷云和高层云; 低层以混合云或冰云为主, 主要类型是雨层云、层积云、积云。降水云系与非降水云系存在显著的垂直结构差异, 双层云的降水由低层产生。云底高度较低、云体较厚且夹层厚度更薄的云易产生降水。同时, 降水云云底温度更高, 分布呈现出季节差异。

关键词: 云垂直结构, CloudSat, 降水云, 云类别

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.006

Comparison of Vertical Structure Between Precipitation Cloud and Non-Precipitation Cloud Based on CloudSat Data over Northeast China

LIU Yang^{1,2} ZHAO Shuhui² CAI Bo³ SUN Li²

1 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

2 Liaoning Weather Modification Office, Shenyang 110166

3 Air Staff Weather Department, Northern Theater Command, Shenyang 110000

Abstract: Based on CloudSat and CALIPSO data from 2007 to 2010, the cloud vertical structure (CVS) over Northeast China (39°—53°N, 119°—135°E) was analyzed. At first, the precipitation flag of CloudSat was validated by surface observation. Based on the validation, the parameters of CVS, especially that of precipitation cloud and non-precipitation cloud, were analyzed. The results show that the distribution of cloud fraction profile is bimodal and shows significant diurnal and seasonal variations. Single-layer cloud is the main type over Northeast China and most precipitation is generated by such cloud which is the main target of artificial rainfall enhancement. Most precipitation cloud is nimbostratus of low, cold, ice or mixed phase. Two-layer precipitation cloud is dominated by high-low or high-medium cold cloud, and most of the high cloud is cirrus or altostratus of ice phase while the low cloud is dominated by nimbostratus, stratocumulus or cumulus of mixed or ice phase. Significant differences of CVS between precipitation and

* 国家自然科学基金项目(41275152)和辽宁省自然科学基金项目(2015020773)共同资助

2016 年 8 月 4 日收稿; 2017 年 9 月 12 日收修定稿

第一作者: 刘旸, 主要从事云降水物理及人工影响天气研究. Email: night_elf1986@qq.com

non-precipitation are found. Precipitation is more likely to occur in the cloud with low cloud base (CB), thick cloud depth (CD), and thin cloud interlayer thickness (CIT). Meanwhile, the CB temperature of precipitation cloud is higher and varies significantly with seasons.

Key words: cloud vertical structure, CloudSat, precipitation cloud, cloud type

引 言

云的垂直结构 (cloud vertical structures, CVS) 是非常重要的云宏观特征 (Slingo and Slingo, 1988; Randall et al, 1989; Wang and Rossow, 1998), 云的结构特征与云辐射特性、云降水条件、降水机制、降水效率及人工增雨潜力等紧密相关 (周毓荃等, 2011)。云降水的宏微观物理特征的观测和研究有助于建立典型的云降水多尺度结构模型 (孙鸿聘等, 2011; 王维佳等, 2011), 对准确识别作业条件、有效捕获可播云区及科学实施人工播云催化尤为重要 (周毓荃和赵姝慧, 2008)。

以往的卫星和地面观测提供的云量垂直分布的信息非常有限, 太阳极轨云观测卫星 CloudSat 所搭载的 94 GHz 毫米波云观测雷达垂直分辨率非常高, 为研究云的垂直结构提供了丰富的观测资料。同时配合地球观测系统 EOS 的 A-Train 卫星集群中的其他卫星 (如 CALIPSO 卫星), 能够连续而且准确地获得包括云量、云顶高度、云底高度、云层数以及特征层高度在内的许多云垂直结构信息, 这些信息在人工影响天气过程中起着非常重要的作用。然而, 在实际人工影响天气决策指挥的过程中, 云垂直结构信息的获取都是比较困难的。CloudSat 卫星提供数据产品有助于了解真实大气的云结构特征和云过程规律, 提高对天气系统和云微物理结构认知。

CloudSat 资料已经被用于分析某种典型天气系统的云垂直结构特征 (钟水新等, 2011; 陈英英等, 2011) 或者是区域云垂直结构特征 (Luo et al, 2008; 王胜杰等, 2010; 王帅辉等, 2011; 彭杰等, 2013; 陈超等, 2014; 张晓等, 2015)。这些研究大都是没有区分降水云和非降水云而进行的统计分析, 而人工影响天气作业更关心的是降水云系的垂直结构特征。研究表明降水云和非降水云垂直结构特征存在很大的差异 (尚博等, 2012; 刘雪梅等, 2016)。我国幅员辽阔, 不同地区的云垂直结构特征具备一定的差异, 降水云系的特征也不尽相同。因此, 针对东北地区的

降水云和非降水云进行垂直结构分析, 讨论两者在垂直结构上的差异, 对东北地区科学实施人工影响天气作业十分关键。

1 资料介绍

采用 CloudSat L2 云分类产品 2B-CLDCLASS-LIDAR、L3 月平均云量产品 3D_CloudFraction 及欧洲中心 ECMWF-AUX 产品进行统计分析, 数据源自 <http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>。2B-CLDCLASS-LIDAR 产品是利用垂直和水平云特征、是否出现降水、云体温度、MODIS 辐射数据来确定云分类信息 (马占山等, 2008)。ECMWF-AUX 产品是由欧洲中心提供的大气状态参量数据插值到 Cloudsat CPR 雷达的中间数据产品, 主要提供温度。

月平均云量产品 (3D-CloudFraction) 是 CFMIP (The Cloud Feedback Model Intercomparison Program) 计划的输出产品之一。该计划主要是基于卫星观测资料估测气候和天气预报模式中的云和辐射的信息, 使用的卫星包括 CALIPSO 卫星和 Cloudsat 卫星等。3D-CloudFraction 产品是 CALIPSO 的 1 级数据产品的衍生产品, 由三维云量分布进行月平均计算而来 (Chepfer et al, 2010), 这里使用的是云量月平均值三维网格点数据, 其水平格点为 $2^\circ \times 2^\circ$ 、垂直分辨率为 480 m。CALIPSO 对于光学薄云 (光学厚度 < 3) 及浅积云探测能力较好, 而对于热带辐合带上的深对流云以及中纬度风暴路径上光学厚云的探测能力较差 (Cesana and Chepfer, 2012)。由于激光探测的局限性, 当顶层有激光不能穿透的光学厚云存在时容易遗漏下方的云层或气溶胶信息, 然而这种情形在整个东亚地区较为少见 (李积明等, 2009), 因此采用 3D-CloudFraction 还是能够比较精确地反映东北地区云量的垂直分布特征的, 不过对于中高云统计的可信度要高于低云。

研究区域限定在东北区域 ($39^\circ \sim 53^\circ \text{N}$ 、 $119^\circ \sim 135^\circ \text{E}$)。资料时段是 2007—2010 年, 一共得到 1594 条轨道约 2×10^6 个采样点的数据。

2 云量垂直廓线的昼夜分布及季节分布

这里按照常规气象上定义 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季。对 2007—2010 年东北地区月平均云量进行分类求平均得到平均云量廓线的昼夜分布及季节分布。

图 1a 是平均云量的昼夜分布, 可以看出云量廓线呈双峰分布特征, 在低云区 (2 km 处) 和高云区 (8 km 处) 各存在一个云量峰值区 7% 和 9%。白天 (点线) 在各个高度上的云量都要大于夜间, 表明白天地表温度高, 上升运动强, 易形成云。

图 1b 给出了平均云量廓线的季节分布, 冬季云量峰值区有 2 个, 高云区 (云量约 7%) 位于 6 km 处, 低云区 (云量约 8%) 位于 2 km 处, 以低云为主, 云量较少, 原因是冬季受极地气团控制, 空气干燥。春、秋季节呈现出相似分布特征, 秋季各高度层云量分布比较平均, 云量峰值区 (约 8%) 位于 9 km 处, 由于秋季主要受高压控制, 天气晴朗少云。春季 2~9 km 处的云量明显多于其他季节, 云量峰值区 (约 13%) 位于 8 km, 原因是春季东南季风将海面水汽输送到陆地, 加之锋面活动频繁, 锋面抬升易形成大面积层状云系。夏季中低云区云量与秋、冬季

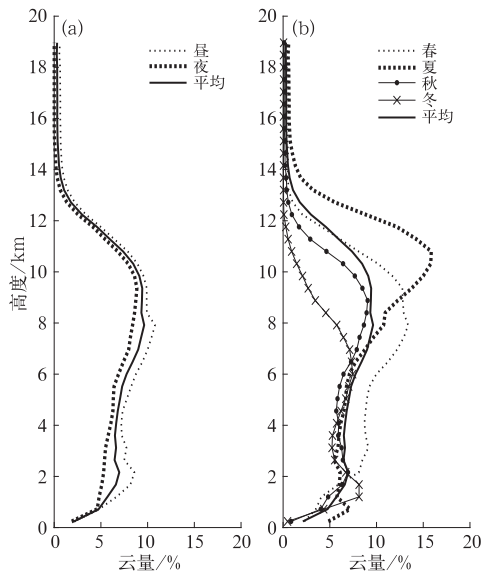


图 1 东北地区平均云量垂直廓线
昼夜分布 (a) 及季节分布 (b)

Fig. 1 The day-and-night (a) and seasonal (b) variations of cloud fraction with heights over Northeast China

节相当, 但高云区的云量明显增多, 云量峰值区 (约 17%) 可以上升到 9~12 km, 原因是夏季对流运动增强, 云系发展旺盛。

3 不同云系统出现频率

3.1 不同云系统分类方法

在研究不同云系统出现的频率时, 采用以下五种不同的分类方法对云进行分类。按云层数划分时, 采用 2B-CLDCLASS-LIDAR 中提供的云层数产品 Cloudlayer, 最多为 5 层; 按云底高度划分时, 采用 2B-CLDCLASS-LIDAR 中提供的每一层云的云底高度, 将云底高度小于 2.5 km 的划分为低云, 高于 6 km 的划分为高云, 介于两者之间的划分为中云; 按云体温度分类时, 采用 ECMWF-AUX 中提供的温度和高度结合 2B-CLDCLASS-LIDAR 的云底/云顶高度进行插值得到对应的云顶/云底温度及云体温度, 将云体温度均大于 0°C 的判定为暖云, 否则为冷云; 按云相态进行分类时, 采用 2B-CLDCLASS-LIDAR 中提供的云相态产品 CloudPhase, 将云分为冰云、冰水混合云和水云; 按云类别进行分类时, 采用 2B-CLDCLASS-LIDAR 中提供的云分类产品 CloudLayerType, 其云分类算法根据云的水平垂直属性、是否产生降水、温度以及 MODIS 测得的向上辐射等信息将云区分为卷云 (Ci)、高层云 (As)、高积云 (Ac)、层云 (St)、层积云 (Sc)、积云 (Cu)、雨层云 (Ns) 和深对流云 (Dc) 八类。

3.2 利用 CloudSat 判定降水云的方法及合理性分析

利用 CloudSat 判断星下点是否产生降水的常用方法有雷达反射率因子阈值法, 尚博 (2011) 在分析华北及江淮地区降水与非降水云系时也采用了此方法, 并用地面逐小时降水量验证了其合理性。2B-CLDCLASS-LIDAR 中提供了一个判定采样点是否产生降水的指标 PrecipitationFlag, 它可以提供分层判定结果。为验证该指标的合理性, 随机选取了 2010 年一年的卫星过境资料与地面逐小时降水量进行对比。

2010 年卫星过境共有 340 轨, 其中有 32 个星下点轨迹穿过地面降水区。对比得到了比较理想的结果, 以 5 月 9 日 17 时过境的轨 21441 和 8 月 21 日 05 时过境的轨 22948 来举例说明 (图 2)。以卫

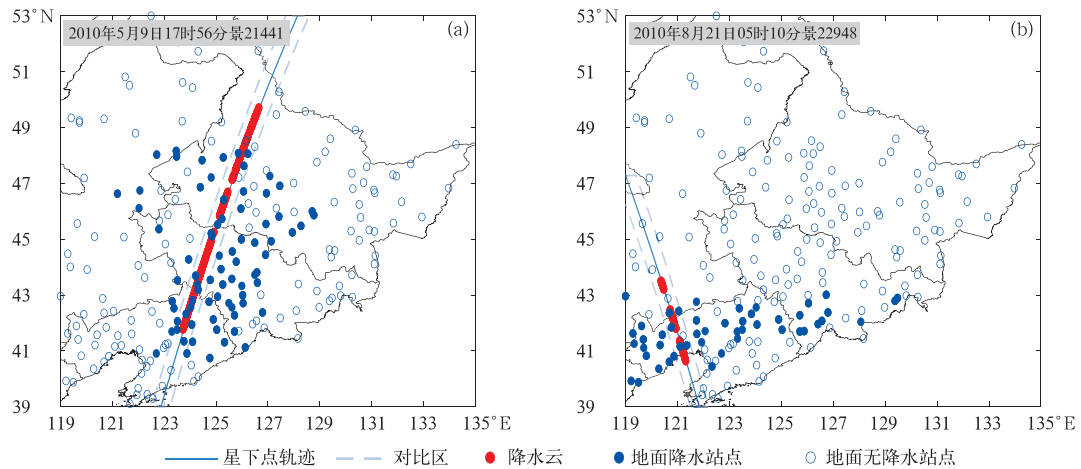


图 2 2010 年 5 月 9 日 17 时(a)和 8 月 21 日 05 时(b)PrecipitationFlag 判断的降水云位置与地面降水站点对比

Fig. 2 Location of precipitation cloud identified by PrecipitationFlag and distribution of surface precipitation observation at 17:00 BT 9 May (a) and 05:00 BT 21 August 2010 (b)

星星下点轨迹左右 30 km 的范围为对比区域(蓝色虚线范围),可以看到,由 PrecipitationFlag 判定的降水云(红点)与地面降水站点(蓝点)吻合情况较好,因此以该指标来判断云样本是否为降水云是可行的。

3.3 不同云系统的频率分布

3.3.1 按云层数划分

2007—2010 年共得到 1 163 772 个云样本,从云层数来划分,单层云样本数为 890 670,占 76.5%;双层云样本数为 241 942,占 20.8%;多层云仅占 2.7%。在 1 163 772 个云样本中,产生降水的样本有 177 279 个,仅占 15.2%,说明自然界中产生降水的云较少。图 3 给出了不同季节降水云和非降水云出现的频率。统计表明,春季云样本出现的频率为 72%(单层云、双层云、多层云分别占 54%、16%、2%;降水云、非降水云分别占 11%、61%)。夏季云样本出现的频率为 70%(单层云、双层云、多层云分别占 49%、18%、3%;降水云、非降水云分别占 7%、63%)。秋季云样本出现的频率为 54%(单层云、双层云、多层云样本分别占 44%、9%、1%;降水云、非降水云分别占 9%、46%)。冬季云样本出现的频率为 48%(单层云、双层云、多层云分别占 40%、7%、<0.5%;降水云、非降水云分别占 11%、37%)。可以看出春季云样本和降水云样本的频率均要高于夏季,这与东北地区春季降水少,夏季降水丰沛的情况不一致,分析原因有二:一是由于仪器的采样方式及

春、夏季主要的云系水平尺度不同。CloudSat 极轨卫星一日过境 2 次,每次过境时对星下点连续采样。东北春季主要以层状云系为主,由于其水平尺度大且持续时间长,被仪器捕捉到的几率较高;而夏季多以对流云系为主,虽然其垂直发展旺盛,但水平尺度相对小且分散,产生强降水的持续时间短,被仪器捕捉到的概率较低;二是夏季云量与降水的相关性小于春季(吴伟等,2010),常产生局地强降水。因此出现了云频率与降水分布不一致的情况。从云层数来看,全年均是单层云所占比重最大,双层云其次,多层云(三层及以上)很少。夏季的双层云及多层云频率最高,冬季最低。降水主要源自于单层云,双层云其次,多层云最少。双层云的降水均由下层云产生。由于多层云样本比例较低,因此后续工作仅针对单层云和双层云展开。云层数越多,每层云的厚度会减小,云体发展不充分,产生降水的可能性越低。说明东北地区的降水云,以单层云为主,是人工增雨的

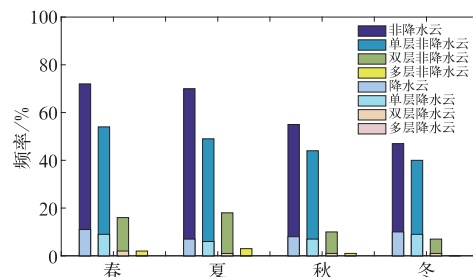


图 3 东北地区不同云系统出现的频率
Fig. 3 Frequencies of different cloud systems over Northeast China

主要对象。

3.3.2 按云底高度划分

非降水性云云底高度分布较为平均,单层云中低云频率略高,双层云高-低云配置的频率略高,没有明显的季节差异。针对降水云样本统计分析得到,单层降水云几乎都为低云,四个季节其出现频率分别为 99.74%、99.66%、99.79%和 99.91%。双层降水云主要由高-低云配置和中-低云配置为主,四个季节高-低云配置出现的频率分别为 61.17%、91.05%、62.23%和 57.35%;中低云配置出现的频率分别为 27.24%、4.75%、26.44%和 24.37%。低-低云配置的降水云也有一些,但这类云系通常云体较薄,通常不会产生持续降水,量级也较小。不存在高-中云配置的降水云,是由于低层云底高度过高,液态水不丰沛,难以产生自然降水。

3.3.3 按云体温度划分

东北地区气温较低,以冷云为主,暖云很少。经统计分析得到,单层降水云几乎都为冷云,四个季节出现频率分别为 99.91%、98.51%、99.65%和 100.00%。双层降水云也几乎都是双层冷云配置,四个季节出现频率分别为 99.53%、93.23%、95.75%和 100.00%。

3.3.4 按云相态划分

东北地区水云较少,春季和秋季单层降水云冰云和混合云的比例相当,春季的冰云和混合云的比例分别为 55.90%和 42.63%,秋季的冰云和混合云的比例分别为 48.00%和 48.85%。夏季以混合云为主,约占 92.58%,水云其次(6.79%)。冬季以冰云为主(76.14%),混合云其次(22.65%)。双层降水云高层几乎都为冰云,春季高层为冰云,低层为冰云、混合云的比例分别为 39.24%、44.21%;秋季双层冰云和冰云+混合云的比例分别为 28.58%、48.59%;夏季以冰云+混合云的配置为主(66.6%),其次是冰云+水云(17.09%);冬季以双层冰云为主(59.84%),其次是冰云+混合云(27.53%)。

3.3.5 按云类型划分

图 4 给出了单层降水云和双层降水云云类别分季节的统计特征。可以看出,云类别分布的季节差异不明显。单层降水云以雨层云为主,其次是层积云和积云,夏季的深对流云出现的频率很高,仅次于雨层云。实际统计发现层云数量很少,是由于 CPR 区分层云和层积云存在一定的困难(Sassen and

Wang,2008)。

图 5 给出了双层降水云的云类型分布,可以看出双层云的高层以卷云和高层云为主,低层以雨层云、层积云、积云为主。春季主要的云类型是卷云-雨层云、高层云-雨层云、高层云-雨层云和卷云-积云;夏季主要的云类型是卷云-雨层云、卷云-积云、和卷云-深对流云;秋季主要的云类型是卷云-雨层云、卷云-层积云、高层云-雨层云和卷云-积云;冬季主要的云类型是高层云-雨层云、高层云-层积云和高层云-层云。从总体来看,无论是什么季节,降水性双层云都是以高低云和中低云相互伴随出现的频率较高。

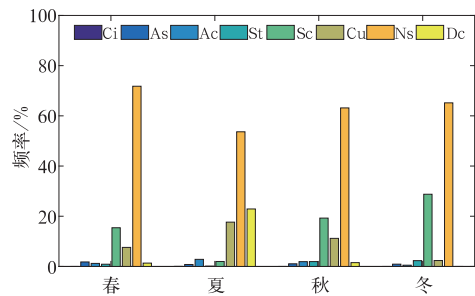


图 4 东北地区单层云中各类云出现的频率

Fig. 4 Frequencies of different cloud types of single-layer cloud over Northeast China

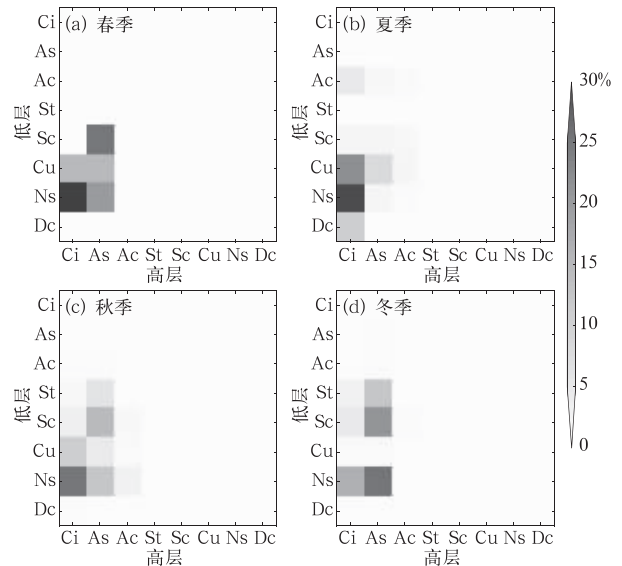


图 5 东北地区四季双层云中各类云出现的频率

Fig. 5 Frequencies of different cloud types of two-layer cloud with different seasons in Northeast China

4 降水云及非降水云垂直结构特征差异

通过对降水云及非降水云进行云垂直结构参数(包括云底高度/温度、云顶高度/温度、云厚度、云夹层厚度)的统计分析发现,单层降水云与非降水云在垂直结构上的差异主要体现在云底高度/温度和云厚度上。双层降水云与非降水云的差异主要体现在低层(后文所述双层云的云底高度/温度和云厚均指低层参数),其中云底高度/温度和云厚度差异明显,夹层厚度也呈现出一定的差异。限于篇幅,这里仅给出单层云云底高度/温度分布的箱型图(图 6)、双层云云底高度/温度分布的箱型图(图 7)和双层云云夹层厚度分布(图 8)。

从图 6 可以看出单层降水云云底高度通常较

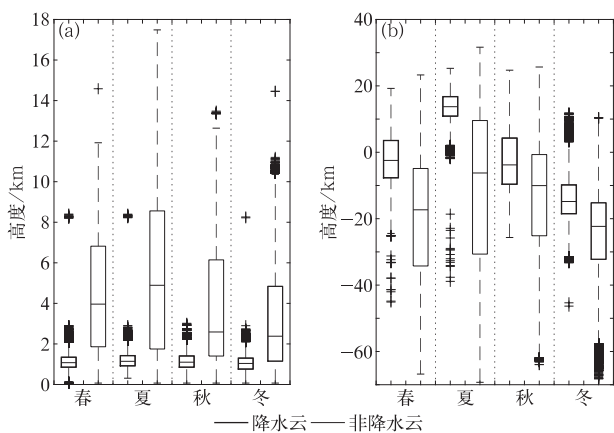


图 6 东北地区单层降水云和非降水云云底高度(a)及温度(b)差异箱型图(箱体中实线为中位数,箱体下、上边界分别为第一和第三分位数,箱体垂直延伸的线条表示分布的扩展长度,代表第一和第三分位数差值的 1.5 倍,其中“+”代表在此范围之外的观测点)

Fig. 6 Boxplot of height (a) and temperature (b) differences of cloud base between precipitation cloud and non-precipitation cloud of single-layer cloud in Northeast China (The central bar is the median and the lower and upper limits are the first and the third quartiles, respectively. The lines extending vertically from the box indicate the spread of the distribution with the length being 1.5 times of the difference of the first and the third quartiles. Height difference falling beyond the limits of those lines is indicated by plus symbols)

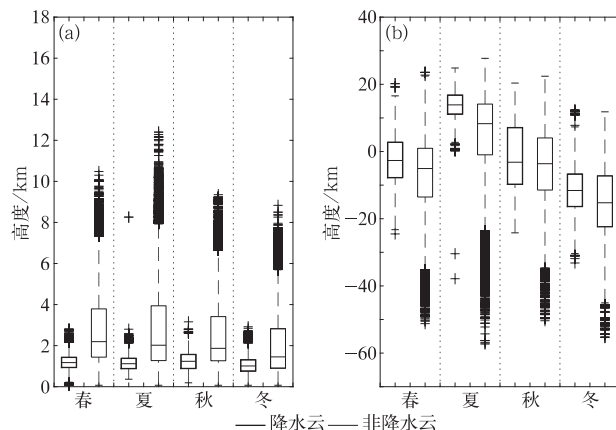


图 7 同图 6,但为双层云
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for double-layer cloud

低,且分布较为集中,大部分位于 1 km 左右,云底高度分布没有明显的季节差异。同时,降水云云底温度较高(除冬季外,大部分位于 -5°C 以上),由于东北地区四季分明,地表温差大,云底温度呈现出比较明显的季节差异,夏季云底温度分布更为集中非降水云云底高度通常在 2 km 以上,且较为分散。同时云底温度较低,且较为分散,大部分位于 -10°C 以下。从图 8a 可以看出降水云与非降水云厚度的差异很明显,降水云云厚度更厚,夏季降水云最厚,厚度能达到 7 km 以上,春、秋季次之,大多在 4 km 以上,冬季也超过 3 km;而非降水云的云厚度基本都小于 4 km,没有明显的季节差异。

图 7 给出了双层云云底高度/温度分布的箱型图。与单层云类似,云底高度较低,且分布较为集中,大部分位于 1 km 左右,云底高度分布没有明显的季节差异,非降水云的云底高度通常在 1.5 km 以上,且分布较为分散。同时,云底温度较高(除冬季外,大部分位于 -5°C 以上),由于东北地区四季分明,地表温差大,云底温度呈现出比较明显的季节差异,即夏季云底温度最高,春、秋季其次,冬季最低。降水云与非降水云云底温度的差异不如云底高度显著。由图 8b 看到,降水性云的厚度通常在 2 km 以上,而非降水云厚度通常在 2 km 以下。同时降水云的夹层厚度更薄,大都小于 3 km,且分布较为集中。

为了更直观地显示降水云与非降水云的垂直结构差异,以云顶高度、云底高度的中位数来展示不同季节单层云、双层云的云体位置,如图 9。

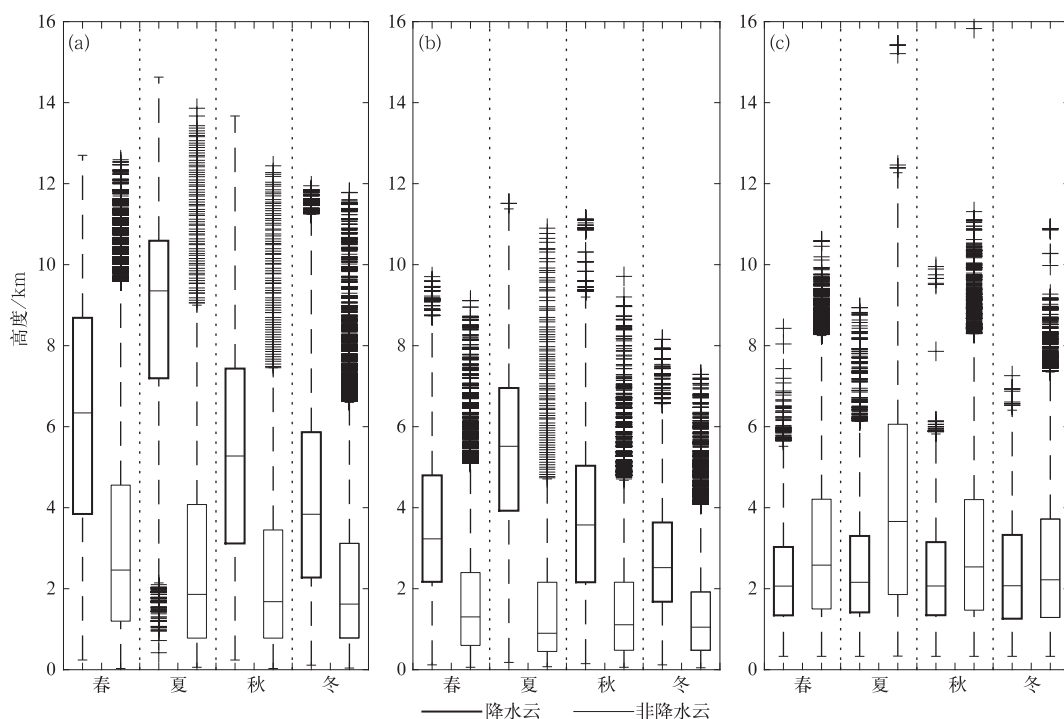


图 8 东北地区单层云云厚(a)、双层云云厚(b)和夹层厚度(c)降水云和非降水云差异箱型图
(图注同图 6)

Fig. 8 Boxplot of single-layer cloud thickness (a), two-layer cloud thickness (b) and two-layer interlayer thickness (c) of precipitation cloud and non-precipitation cloud over Northeast China
(The annotation is the same as Fig. 6)

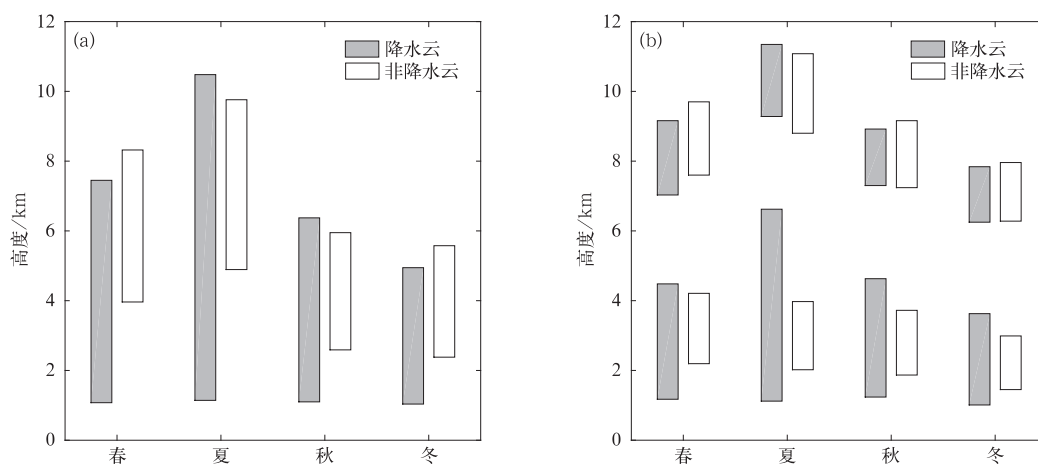


图 9 东北地区单层降水云(a)和双层降水云(b)云体位置

Fig. 9 Location of single-layer cloud (a) and two-layer cloud (b) over Northeast China

总体来看,无论是单层云还是多层云,降水云系的云底高度都较低且厚度较厚。这样的单层云云体上部存在冰晶,下部存在丰沛的过冷水,可以产生自然降水。而双层云系统,当低层云的云底高度较低、厚度较厚,且夹层较薄时,可以保证云内过冷水丰沛,且高层对低层有引晶作用,容易产生降水。

5 结论

本研究通过对 2007—2010 年东北地区 Cloud-Sat L2 云分类产品、L3 月平均云量产品结合欧洲中心 ECMWF-AUX 产品进行统计分析,得到东北地

区云垂直结构特征,着重分析降水云与非降水云在垂直结构上的差异,得到的主要结论如下。

(1) 东北地区云量垂直结构特征

东北地区平均云量垂直廓线呈现出一定的昼夜差异和明显的季节差异。廓线呈双峰分布特征,在低云区(2 km 处)和高云区(8 km 处)各存在一个云量峰值区 7% 和 9%。从昼夜分布来看,白天云量在各个高度上都大于夜晚。从季节差异来看,冬季云量峰值区有 2 个,高云区(云量约 7%)位于 6 km 处,低云区(云量约 8%)位于 2 km 处,以低云为主,云量较少。秋季云量较少且各高度层云量分布比较平均,云量峰值区(约 8%)位于 9 km 处。春季 2~9 km 处的云量明显多于其他季节,云量峰值区(约 13%)位于 8 km。夏季中低云区云量与秋、冬季相当,但高云区的云量明显增多,云量峰值区(约 17%)可以上升到 9~12 km。

(2) 东北地区不同云系统的频率分布

就全年而言,单层云、双层云和多层云分别占 76.5%、20.8% 和 2.7%;降水性云样本与非降水性云样本分别占 15.2% 和 84.8%。四个季节均是单层云所占比重最大,双层云其次,多层云(三层及以上)很少。夏季的双层云及多层云频率最高,冬季最低。降水性云样本出现的概率四个季节分别是 7%、7%、9% 和 11%。降水主要源自于单层云,双层云其次,多层云最少。双层云的降水均由低层产生。东北地区的降水云,以单层云为主,是人工增雨的主要对象。

从云底高度划分来看,单层降水云几乎都为低云。双层降水云主要由高-低云配置为主,中-低云配置其次。低-低云配置的降水云仅有很少一部分,但这类云系通常云体较薄,通常不会产生持续降水,量级也较小。不存在高-中云配置的降水云,是由于低层云底高度过高,过冷水不丰沛,难以产生自然降水。

从云体温度划分来看,全年单层降水云几乎都为冷云,双层降水云也几乎都是双层冷云配置。

从云相态划分来看,东北地区水云较少,春、秋季单层降水云冰云和混合云的频率相当,水云很少;夏季几乎都是混合云,水云和冰云都很少;冬季以冰云为主,混合云其次。双层降水云高层几乎都为冰云,除冬季外,冰云-混合云的频率最高,其次是冰云-冰云(春、秋季)或冰云-水云(夏季);冬季以双层冰云为主,其次是冰云+混合云。

从云类型划分来看,单层降水云以雨层云为主,其次是层积云和积云,夏季的深对流云出现的频率很高,仅次于雨层云。双层云的高层以卷云和高层云为主,低层以雨层云、层积云、积云为主。春季主要的云类型是卷云-雨层云、高层云-雨层云、高层云-雨层云和卷云-积云;夏季主要的云类型是卷云-雨层云、卷云-积云、和卷云-深对流云;秋季主要的云类型是卷云-雨层云、卷云-层积云、高层云-雨层云和卷云-积云;冬季主要的云类型是高层云-雨层云、高层云-层积云和高层云-层云。无论是什么季节,降水性双层云都是以高低云和中低云相互伴随出现的频率较高。

(3) 东北地区降水云及非降水云垂直结构特征差异

东北地区单层降水云云底高度通常较低,且分布较为集中,大部分位于 1 km 左右,云底高度分布没有明显的季节差异。同时,降水云云底温度较高(除冬季外,大部分位于 -5°C 以上),由于东北地区四季分明,地表温差大,云底温度呈现出比较明显的季节差异,夏季云底温度分布更为集中。非降水云云底高度通常在 2 km 以上,且较为分散。同时云底温度较低,且较为分散,大部分位于 -10°C 以下。降水云与非降水云厚度的差异很明显,降水云云厚度更厚,夏季降水云最厚,厚度能达到 7 km 以上,春、秋季次之,大多在 4 km 以上,冬季也超过 3 km。而非降水云的云厚度基本都小于 4 km,没有明显的季节差异。

与单层云类似,双层降水云云底高度较低,且分布较为集中,大部分位于 1 km 左右,云底高度分布没有明显的季节差异,非降水云的云底高度通常在 1.5 km 以上,且分布较为分散。同时,云底温度较高(除冬季外,大部分位于 -5°C 以上),由于东北地区四季分明,地表温差大,云底温度呈现出比较明显的季节差异,即夏季云底温度最高,春、秋季其次,冬季最低。降水云与非降水云云底温度的差异不如云底高度显著。降水性云的厚度通常在 2 km 以上,而非降水云厚度通常在 2 km 以下。同时降水云的夹层厚度更薄,大都小于 3 km,且分布较为集中。

本研究利用 CloudSat 卫星观测资料进行统计分析,加深了对东北地区云垂直结构参数特征的认识,尤其是降水云系和非降水云系的差异,可以为东北地区人影作业指标体系的建立和区域数值模式的改进提供参考依据。本文仅针对东北地区云宏观资

料进行统计分析,后续将开展针对云微物理特性及光学性质的分析工作。

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.
- 陈英英,武文辉,唐仁茂,等,2011.利用 Cloudsat 卫星资料分析冻雨天气的云结构[J].气象,37(6):707-713.
- 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.
- 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.
- 马占山,刘奇俊,秦琰琰,等,2008.云探测卫星 CloudSat[J].气象,34(8):104-111.
- 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. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
- 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:1-45.
- 尚博,周毓荃,刘建朝,等,2012.基于 CloudSat 的降水云和非降水云的垂直特征[J].应用气象学报,23(1):1-9.
- 孙鸿聘,李培仁,闰世明,等,2011.华北层状冷云降水微物理特征及人工增雨可播性研究[J].气象,37(10):1252-1261.
- 王胜杰,何文英,陈洪滨,等,2010.利用 CloudSat 资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风区云高度的统计特征量[J].高原气象,29(1):1-9.
- 王维佳,刘建西,石立新,等,2011.四川盆地降水云系飞机物理观测个例分析[J].气象,37(11):1389-1394.
- 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.
- 吴伟,王式功,邓莲堂,等,2010.中国北方云量的四季分布与降水[J].兰州大学学报(自然科学版),46(6):32-40.
- 张晓,段克勤,石培宏,等,2015.基于 CloudSat 卫星资料分析青藏高原东部夏季云的垂直结构[J].大气科学,39(6):1073-1080.
- 钟水新,王东海,张人禾,等,2011.基于资料的冷涡对流云带垂直结构特征[J].应用气象学报,22(3):257-264.
- 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.
- 周毓荃,蔡森,欧建军,等,2011.云特征参数与降水相关性的研究[J].大气科学学报,34(6):641-652.
- Chepfer H, Bony S, Winker D, et al, 2010. The GCM oriented CALIPSO cloud product (CALIPSO-GOCCP), J Geophys Res, 115, D00H16; DOI:10.1029/2009JD012251.
- Cesana G, Chepfer H, 2012. How well do climate models simulate cloud vertical structure? A comparison between CALIPSO-GOCCP satellite observations and CMIP5 models[J]. Geophys Res Lett, 39, L20803. DOI:10.1029/2012GL053153.
- Luo Yali, Zhang Renhe, Wang Hui, 2008. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between Eastern China and the Indian Monsoon Region using CloudSat /CALIPSO data [J]. J Climate, 22:1052-1064.
- Randall D A, Harshvardhan, Dazlich D A, 1989. Interactions among radiation, convection, and large-scale dynamics in a general circulation model[J]. J Atmos Sci, 46:1943-1970.
- Sassen K, Wang Z, 2008. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results[J]. Geophys Res Lett, 35: L04805. DOI:10.1029/2007GL032591.
- Slingo A, Slingo J M, 1988. The response of a general circulation model to cloud longwave radiative forcing. Part I: introduction and initial experiments[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 114:1027-1062.
- Wang J H, Rossow W B, 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM[J]. J Climate, 11: 3010-3029.