

中国过冷积状云的时空分布特征^{*1}

杨涛¹ 孙跃^{2,3} 闫文辉¹ 张月晴¹ 吴俊辉¹ 杨慧玲^{2,3} 肖辉^{2,3}

1 中国飞行试验研究院, 西安 710089

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

提 要: 含有过冷水的积状云（简称过冷积状云）是结冰试飞所需的条件。基于 CloudSat-CALIPSO 星载雷达云产品中的云相态、云分类、液态水顶高数据和 ERA5 再分析资料中的气温数据，聚焦年际连续性较好的当地太阳时下午数据，构建了 2006—2019 年中国过冷云历史数据集，并对过冷积状云的时空分布特征开展了统计分析。我国过冷积状云的出现频率平均高值区位于青藏高原东部，并经云贵川地区延伸到华中地区，年均出现频率可达 0.4。相比于过冷层状云，过冷积状云的出现频率高值区位置偏西且频率更高。4 类过冷积状云的出现频率由高到低依次为：云南、华中和华东地区的高积云；青藏高原东部、四川、我国东部洋面和我国北方界外的层积云；青藏高原地区的积云；云南西南部、我国东南和我国东部洋面的深对流。过冷积状云的出现频率在冬季于四川盆地到贵州、我国东部洋面和日本海存在 3 个高值中心，而夏季的过冷积状云高值中心从青藏高原东部向高原其他位置和周边山地延伸。此外，1 月过冷积状云的年际变化在华中地区、西北西部和高原西部呈现显著增多趋势。

关键词: 过冷云, 积状云, 时空分布

中图分类号: P426.5 文献标志码: A doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022601

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Supercooled Cumuliform Clouds in China

YANG Tao¹ SUN Yue^{2,3} YAN Wenhui¹ ZHANG Yueqing¹

Wu Junhui¹ YANG Huiling^{2,3} XIAO Hui^{2,3}

1 Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089

2 Key Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

*民用飞机专项科研项目（MJZ5-XXXX）、中国科学院战略性先导科技专项（XDB0760400）和国家自然科学基金项目（42105127）共同资助

2024 年 8 月 19 日收稿；2025 年 2 月 26 日收修定稿

第一作者: 杨涛, 主要从事航空气象预报及保障技术研究.Email:415931291@qq.com

通讯作者: 孙跃, 主要从事云降水物理学和雷达气象学研究.Email:sunyue1@mail.iap.ac.cn

Abstract: A cumuliform cloud with supercooled water is the condition required for the icing test flight, which is referred to as supercooled cumuliform cloud in this paper. On the basis of the cloud phase state, cloud classification and liquid water top height data from CloudSat-CALIPSO cloud products and the air temperature from ERA5 reanalysis data, focusing on the local solar afternoon data with good interannual continuity, the historical supercooled cloud sample data over China during 2006–2019 were derived, and the spatiotemporal distribution characteristics of supercooled cumuliform clouds were analyzed. The supercooled cumuliform clouds in China most occur in the eastern part of the Qinghai–Xizang Plateau and extend to central China via the Yunnan–Guizhou–Sichuan region, with an annual average occurrence frequency of 0.4. The high value areas of the occurrence frequency of supercooled cumuliform clouds are more westward than that of supercooled stratiform cloud and the occurrence frequency is higher. The occurrence frequencies of the four types of supercooled cumuliform clouds in descending order were as follows: altocumulus over Yunnan, Sichuan Basin, Central China, and East China; stratocumulus over eastern Qinghai–Xizang Plateau, Sichuan, the eastern sea surface, and outside the northern boundary of China; cumulus over the Qinghai–Xizang Plateau; and deep convection over Southwest Yunnan, Southeast China, and the eastern sea surface. In winter, there are three high-value centers of the occurrence frequency of supercooled cumuliform clouds over Sichuan, Guizhou, the ocean over eastern China, and the Sea of Japan, while the high-value center of the occurrence frequency of supercooled cumuliform clouds in summer extends from the eastern part of the Qinghai–Xizang Plateau to other locations on the plateau and the surrounding mountainous areas. In addition, the interannual variation of supercooled cumuliform clouds showed significant increasing trends in January in central China, the west of Northwest China and the west of the Qinghai–Xizang Plateau.

Key words: supercooled cloud, cumuliform cloud, spatiotemporal distribution

引 言

云中环境温度低于 0°C 时存在的液态云滴和雨滴称为过冷水, 其不仅是人工影响天气 (简称人影) 冷云催化的主要作业对象, 也是飞行安全和特种试飞的关注对象。人工冷云催化主要通过播撒人工冰核或制冷剂产生人工冰晶, 引发贝吉隆效应, 消耗过冷水使冰晶增长,

从而启动冷云降水过程，最终达到人工增雨或消减雨的作业目标。另一方面，飞机穿越过冷水区时可能发生结冰现象，这既是民航飞机需要避免的情况，也是试飞检验结冰、防冰、除冰性能所必需的条件。因此，掌握云中过冷水的时空分布特征，在多个学科领域均存在重要价值。

研究过冷水云时空分布特征的同时，按云的宏观特性区分层状云和积状云也具有重要意义。在人影方面，层状云通常具有水平范围大且均匀的宏观结构，适合人影飞机催化作业；而积状云不仅水平空间不均匀性强，且其中气流结构相对复杂，飞机穿越存在较大安全隐患，较难规划飞机催化作业，更适合采用人影高炮、火箭等地面作业方式进行催化。在关系到我国适航标准的特种试飞领域，针对层状云的飞机结冰试飞近年来已取得了显著成果(孙晶等, 2019, 2021; 王泽林等, 2020, 2022; 倪洪波等, 2023a; 李佰平等, 2024; 闫文辉等, 2024)，基于气象背景场的层状云结冰条件潜势预报也在飞行试验中得到了验证(李佰平等, 2018; 倪洪波等, 2022)。然而，针对积状云的飞机结冰试飞尚处于起步阶段。在积状云时空分布不均匀的客观条件下，深入了解含有过冷水的积状云(简称过冷积状云)的时空分布特征，对提前规划积云结冰试飞具有重要意义。

在云的时空特征方面，已有许多研究从我国云水资源角度进行分析(李兴宇等, 2008; 林丹, 2015; 任冉等, 2017; 张沛等, 2020)，但这类研究大多关注整层云水含量或水汽含量表征的可降水量，很少从过冷云水的角度开展统计分析。另一方面，尽管我国人影领域已有一些飞机探测到过冷水的研究(朱士超和郭学良, 2015; 封秋娟等, 2021; 闫非等, 2023)，我国民航及试飞领域也已有一些飞机结冰条件时空分布的研究(孙晶和李想, 2020; 倪洪波等, 2023b; 孙艳辉等, 2023)，但这些研究主要针对的是层状云。目前我国尚缺乏研制特种装甲飞机并大量开展穿越积云/对流云科学观测试验的能力，导致对过冷积状云时空分布特征认识不足。

为解决我国对过冷积状云时空分布特征认识不足的问题，本文提出利用 CloudSat-CALIPSO 星载雷达云产品中的云相态、云分类、液态水顶高数据和 ERA5 再分析资料中的气温数据构建中国过冷云历史数据集，并据此开展时空分布特征统计分析研究。

1 数据与方法

1.1 数据简介

本文使用 CloudSat-CALIPSO 云产品 (Sun et al, 2024) 和 ERA5 再分析数据的高度场及气温场作为输入数据，基于液态水顶高、云分类和 0°C 层高度，判别云廓线中是否存在

过冷水，据此构建过冷积状云的历史样本数据集。

CloudSat-CALIPSO 云产品的主要数据源来自搭载 94 GHz 云廓线雷达的 CloudSat 卫星和搭载双波长偏振激光雷达的 CALIPSO 卫星。这两颗极轨卫星可以 15 s 的时间差探测同一区域 (Mace et al, 2009)，为协同反演提供基础。CloudSat-CALIPSO 云产品中的云相态包括液相、冰相和混合相 3 类。当雷达波束自上而下遇到云中液态水层时，激光雷达的反射率会先增大然后迅速减小，随后云雷达反射率增大，这是 CloudSat-CALIPSO 云产品区分云相态算法的关键物理基础。最终的云相态由反射率值及其变化形态的诊断特征和欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的气温廓线预报值综合判断，同时输出判别获取的液态水顶高。CloudSat-CALIPSO 云产品中的云分类包括高云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云和深对流共 8 类。对应的云分类算法不仅考虑了云雷达和激光雷达的原始观测变量、探测的云高和反演的云相态等因素，还输入了由 MODIS 获取的云系水平分布特征和光学纹理特征等多源数据，最终在一定水平范围内通过聚类分析给出其中所含有的云分类结果。具体算法详见 CloudSat-CALIPSO 云产品公开的工程文档 (Sun et al 2024)。

CloudSat-CALIPSO 云产品的可靠性已在国际卫星云气候计划 (ISCCP) 中得到过初步验证 (Sassen and Wang, 2008)，并在全球性和区域性的研究中得到应用 (Naud et al, 2012; 方乐铎等, 2016; 唐雅慧等, 2020; 辛悦等, 2023; Sun et al, 2024)。特别是在地基观测相对匮乏的青藏高原地区，该云产品也是用于分析云时空分布特征常见的数据之一 (Li and Zhang, 2016; 刘建军和陈葆德, 2017; 刘屹岷等, 2018)。尽管该云产品中的云分类尚未能与地面观测进行更加充分地对比评估，但其云分类算法考虑了星载雷达和其他多源数据的云水平及垂直分布等宏观特征，以及基于物理基础反演的微物理特征，相较于不能直接探测云顶以下垂直结构的被动遥感反演结果(如静止卫星搭载的红外光谱仪)具有更高的可靠性。

由于 CloudSat-CALIPSO 云产品中未储存 ECMWF 预报的气温廓线和 0°C 层高度，在从该产品中获取液态水顶高后，仍需要 0°C 层高度才能判定过冷水的出现。为此，本文使用 ERA5 再分析数据的高度场和气温场计算获取星载雷达探测廓线位置的 0°C 层高度估计值，并结合 ERA5 再分析数据中的总云量数据进行分析，从而对计算的云出现频率的数据一致性和可靠性等进行评估和说明。

本文中所用地图取自国家地理信息公共服务平台(天地图)，审图号为 GS (2024) 0650 号。

1.2 数据处理

采用 CloudSat-CALIPSO 云产品的 R05 版本，该数据可公开下载的时间范围为 2006 年

6月至2019年7月,但中间存在若干缺测时段。特别是CloudSat在2011—2012年出现了电池故障,于2012年5月修复后缺失了夜间观测能力。具体的数据缺测情况及基本处理策略见文献Sun et al (2024)。

为了形成中国过冷积状云历史样本,筛选经过 $2.5^{\circ}\text{S}\sim 57.5^{\circ}\text{N}$ 、 $67.5^{\circ}\sim 137.5^{\circ}\text{E}$ 范围内的CloudSat-CALIPSO云产品轨道数据。为保持CloudSat电池故障前后数据的一致性,仅保留在当地太阳时白天的轨道数据(过境时间为当地太阳时13时前后),最终获得3337 d的55 970 049条有效云产品廓线(含晴空和有云状态)。然后,利用水平分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的ERA5再分析数据估计 0°C 层高度,并取最近时次的数据插值到云廓线位置,结合云产品中的液态水顶高,可获得在某条云廓线中、某个高度上是否存在过冷水的判别结果。结合云分类产品,可获得不同类型过冷云的历史样本。为了便于统计和绘图,将云廓线历史样本分配到 $0^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 135^{\circ}\text{E}$ 范围内 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的均匀格点上。另外,收集了CloudSat-CALIPSO云产品中在当地太阳时夜间(1时前后)的26 451 890个有效云廓线(2006—2011年),以说明白天数据的代表性及其与夜间数据的差异。

1.3 分析量

以云的出现频率为主要统计分析对象,计算方法是统计每个水平格点上出现某类云的廓线数与有效(非缺测)廓线数的比值。总云出现频率 F_t 和某类云出现频率 F_s 的计算公式如下:

$$F_t = N_t/N_e \quad (1)$$

$$F_s = N_s/N_e \quad (2)$$

式中: N_t 为出现云的廓线数, N_e 为有效廓线数, N_s 为出现某类云的廓线数。需要注意的是,同一水平格点上方可能同时存在多种类型的云,因此不同类型云的出现频率之和可能会大于总云出现频率。将积云、高积云、层积云和深对流4类云视作本研究的积状云,将层云、高层云、雨层云视作层状云。积云和深对流是大气不稳定条件下形成的典型对流云,而高积云和层积云分别是在对流层中层和边界层偏稳定层结下由大气波动导致产生的,并不对应典型的对流天气。但是,鉴于高积云和层积云在气流和含水量等方面具有空间不连续性,二者仍有作为积状云讨论的价值。由于高云主要由冰晶组成,含有过冷水的情况极少,故本文不予考虑。

1.4 数据的代表性和一致性

在数据的代表性方面,本文主要分析当地太阳时13时左右即白天午后数据,其反映的云时空分布特征难免和其他时次存在差异。例如,青藏高原及周边山区的总云出现频率在白

天均多于夜间（图 1a, 1b），差异可达 0.1~0.2，而我国东部沿海的总云出现频率在夜间略高于白天。这些与地形分布有关的差异，除了可利用午后陆地下垫面加热易形成对流来解释，还可以用山谷风、海陆风等典型的环流日变化模型解释。除此之外，白天与夜间的总云出现频率空间分布总体仍是相似的，故基于年际连续性较好的当地太阳时下午数据获取的云时空分布特征仍具有一定的代表性。考虑到人影飞机作业和适航飞行试验主要在白天开展，更需要聚焦白天的数据，因此以下不再讨论夜间数据。

在数据一致性方面，本文使用的云出现频率是一个与气象中常用的云量在数值分布上有相似性但在概念上有差异的变量。尽管统计计算的云出现频率的相对空间分布（图 1a）与 ERA5 总云量（图 1c）相似，但图 1c 的填色下限低了 0.2（图 1c 的填色和图 1a 采用了差异化绘制），表明本文计算的云出现频率在数值上略高于 ERA5 平均云量，特别是在印度西部和蒙古、内蒙古等年均少云地区可高出约 0.2。王帅辉等（2010）在对比 CloudSat-CALIPSO 统计的云出现频率和 ISCCP 云量时也曾指出类似的偏高现象。这种现象可能受多种因素影响，例如：云量被定义为云遮蔽天空的比例，其本身在理论上小于等于云的出现频率；使用的数据全部取自当地太阳时的午后，相比 ERA5 全天平均的云量也存在差异。但是，两种数据在云分布上总体一致，均显示出多云区域从青藏高原东部和热带洋面经中南半岛延伸至我国四川盆地和贵州，可初步验证本文计算的云出现频率的可靠性。

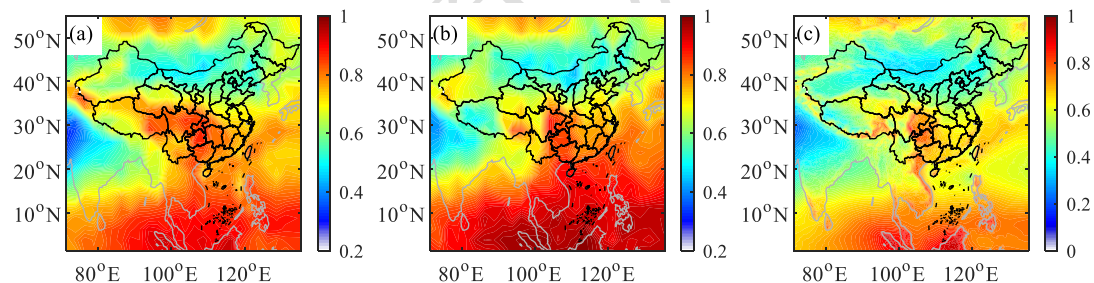


图 1 (a, b) 由 CloudSat-CALIPSO 统计计算的 2006—2019 年 (a) 白天及 (b) 夜间平均总云出现频率与与 (c) 由 ERA5 统计得到的 2006—2019 年白天平均总云量对比

Fig.1 Comparison of (a, b) averaged total cloud occurrence frequency derived from the CloudSat-CALIPSO using (a) the daytime-data and (b) the nighttime-data, and (c) the all-day averaged total cloud fraction from ERA5 during 2006—2019

2 过冷积状云的平均空间分布

受热力条件、海陆分布及环流等因素影响，我国 35°N 以南的积状云出现频率明显多于北方（图 2a），云出现频率超过 0.6 的高值区可从我国南方延伸到中南半岛和西太平洋。在

相近纬度的印度半岛则没有如此多的积状云,是由于东亚季风和南亚季风的差异对云出现频率的影响。层状云则更多出现在 30°N 以北的区域(图 2b),可归因于不同性质气团在该范围内更易交汇并产生大范围抬升运动。层状云出现频率的高值带主要沿天山山脉和昆仑山脉分布,可归因于大范围地形对层状云形成的贡献,且与青藏高原上的水汽输送特征密切相关(王奕丹等, 2021)。就我国及周边地区平均而言,层状云的出现频率比积状云低 0.1~0.2,这可能与本文仅统计了白天的数据有关。白天在下垫面辐射加热的条件下容易产生积状云,而夜间辐射冷却后大气稳定度增加,更有利于层状云形成。另外,一般直觉上认为层状云比积状云更常见,但图 2a、2b 显示积状云出现频率更高,这是由于本文将层积云归类为积状云进行统计所导致的。

进一步关注过冷云的出现频率发现,过冷积状云(图 2c)和过冷层状云(图 2d)出现频率高值区的纬度类似,均位于 30°N 及其南北 5~10 个纬度内,明显区别于积状云和层状云的总体空间分布(图 2a、2b)。在 10°~20°N 范围内过冷云出现频率较低,这可能是随着纬度降低,整层气温升高致使 0°C 层高度上升所导致的。总体而言,过冷积状云的出现频率高于过冷层状云(图 2c, 2d)。中南半岛缅甸山区和赤道附近的陆地区域过冷积状云出现频率显著高于海面。过冷积状云出现频率的平均高值区从位于青藏高原东部,并经云贵川地区延伸到华中地区,可能主要受地形和西南涡系统影响产生;而过冷层状云出现频率的高值区从川渝、陕南延伸至华东及东海,可能主要受西南涡及江淮锋面系统影响产生。

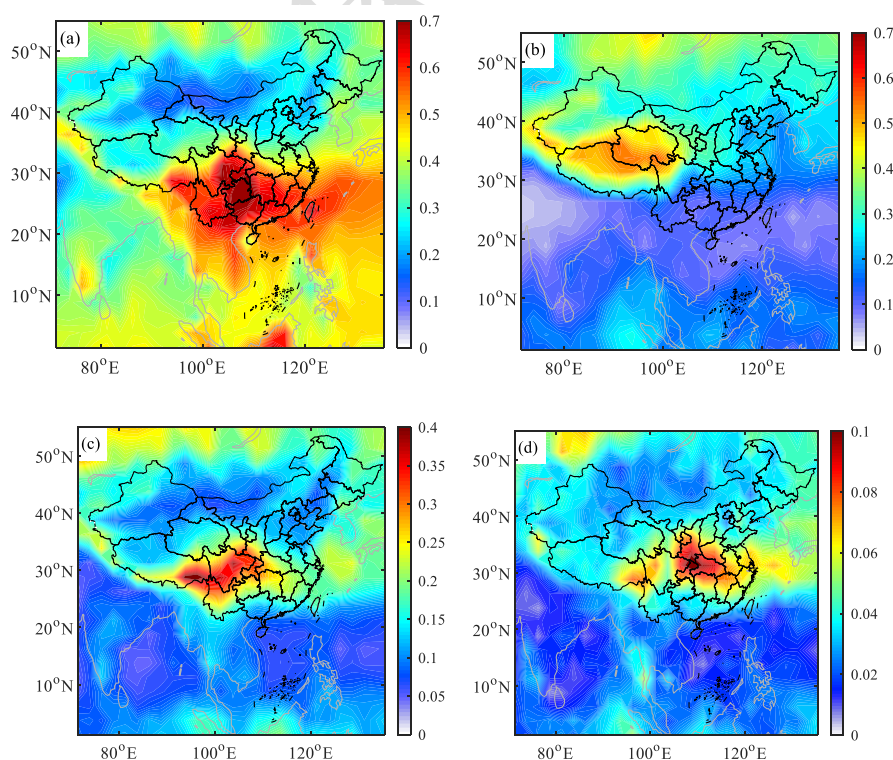


图2 2006—2019年(a)积状云,(b)层状云,(c)过冷积状云及(d)过冷层状云出现频率平均空间分布

Fig.2 The averaged spatial distribution of the occurrence frequency of (a) cumuliform cloud, (d) stratiform cloud, (c) supercooled cumuliform cloud and (d) supercooled stratiform cloud during 2006—2019

针对过冷积状云的4种子类型(图3),依据统计结果的上、下限设定了差异化的色标,以便更清晰地呈现各子类型云出现频率的空间分布特征。过冷积云主要分布在青藏高原地区(图3a),在新疆西南部和青藏高原东部各有一个出现频率高值中心,这可能与高原大地形强迫水汽抬升、青藏高原作为大气热源的加热作用和这些区域海拔较高、高空温度较低等因素共同作用有关。过冷深对流在我国主要分布在云南西南部、我国东南和我国东部洋面(图3b),但出现频率比其他云低1~2个量级。过冷高积云主要出现在云南、四川盆地、华中和华东地区(图3c),从出现区域判断可能主要是受西南涡系统影响产生的。过冷层积云主要出现在青藏高原东部、四川、我国东部洋面和我国北方界外(图3d),出现频率高值中心位于在高原东部至四川,可能受高原相关波动影响而产生。从过冷积状云4个子类型出现频率的量级来看,过冷高积云最为常见,出现频率最高可达0.25;过冷层积云次之,出现频率最高约0.2;过冷积云的出现频率最高超过0.1;过冷深对流的出现频率最少且量级明显低于其他类型的云。

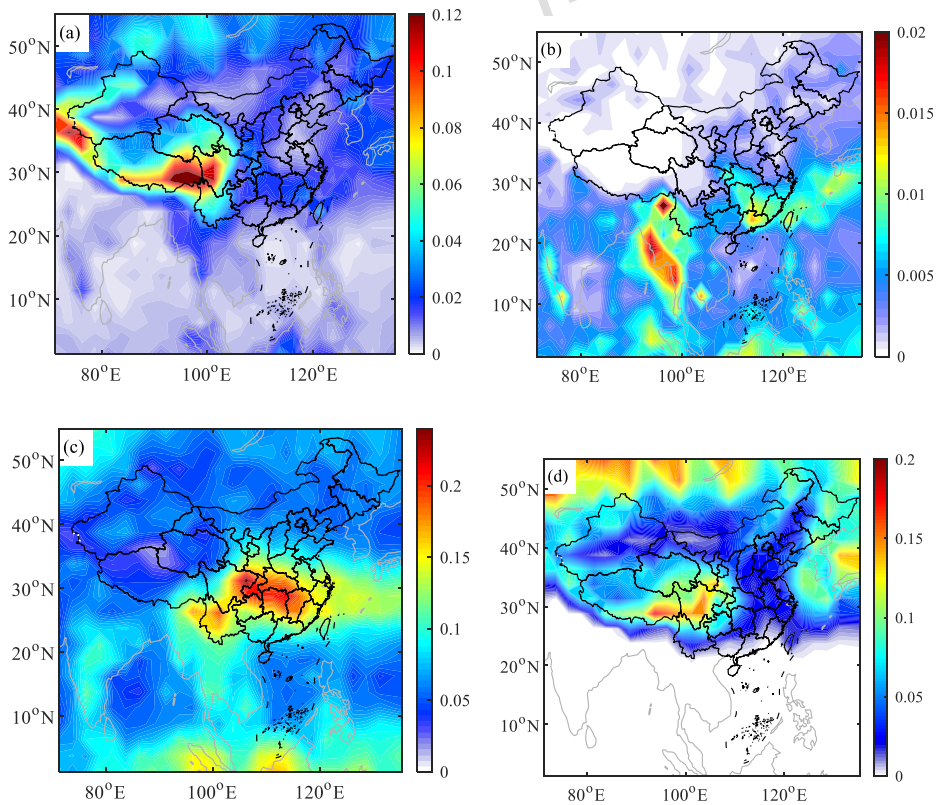


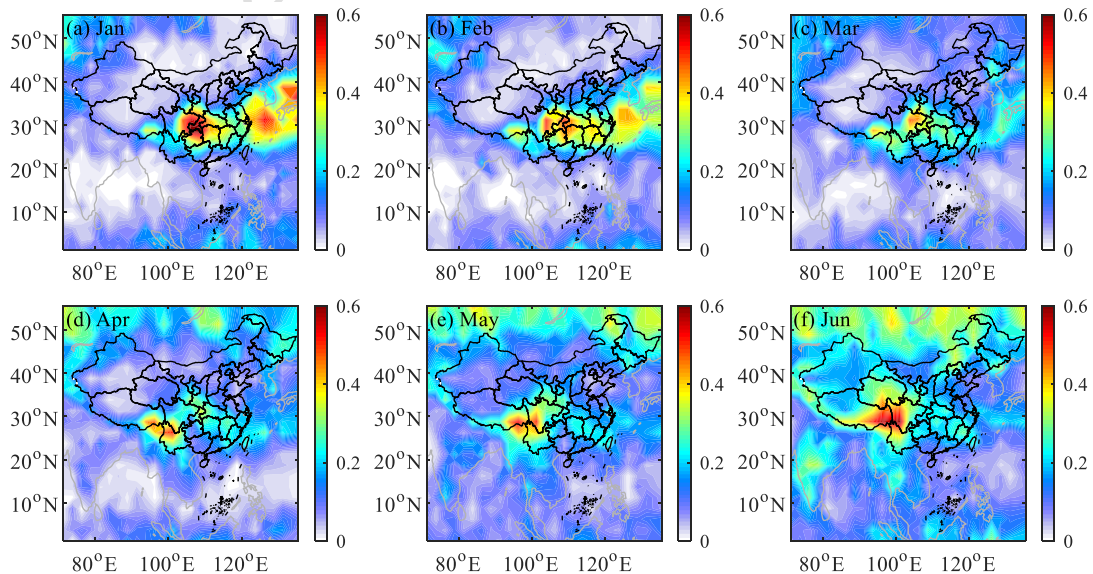
图3 2006—2019年 (a) 过冷积云, (b) 过冷深对流, (c) 过冷高积云以及 (d) 过冷层积云出现频率的平均空间分布

Fig.3 The averaged spatial distribution of occurrence frequency of (a) supercooled cumulus, (b) supercooled deep convection, (c) supercooled altocumulus and (d) supercooled stratocumulus during 2006—2019

对于深对流出现频率的统计结果还应指出, 除台风天气系统外, 深对流主要发生在中小尺度强对流天气过程中, 相比于其他类型的云可能更难被 CloudSat 这类极轨卫星及其云廓线雷达充分观测到。因此, 图 3b 中过冷深对流的分布结果仅能作为一种与其他类型云统计口径一致的气候学参考, 而不适宜作为强对流天气研究的参考。

3 过冷积状云的季节分布

按 1—12 月逐月进行多年平均统计, 分析过冷积状云的季节分布特征。受篇幅所限, 仅针对过冷积状云这一大类进行统计, 结果如图 4 所示。过冷积状云有两种空间分布形态, 一种是从 12 月至次年 2 月, 有 3 个出现频率高值中心, 分别位于四川盆地到贵州、我国东部海面和日本海, 1 月有接近 0.6 的出现频率。结合图 3 中过冷积状云各子类型云的出现频率高值区可推断, 冬季在四川东部的过冷积状云以高积云为主, 而在我国东部洋面上的过冷积状云以层积云为主。另一种分布形态是从 5 月至 9 月, 出现频率高值中心从青藏高原东部向高原其他位置区域和周边山地延伸, 7 月范围最广, 几乎覆盖整个青藏高原, 最高值可达 0.4, 这与高原上活跃的积云对流活动现象是吻合的。以上两种形态的过渡时期 (3—4 月和 10—11 月) 相对较短, 且过冷积状云出现频率的数值和高值范围都明显偏小。



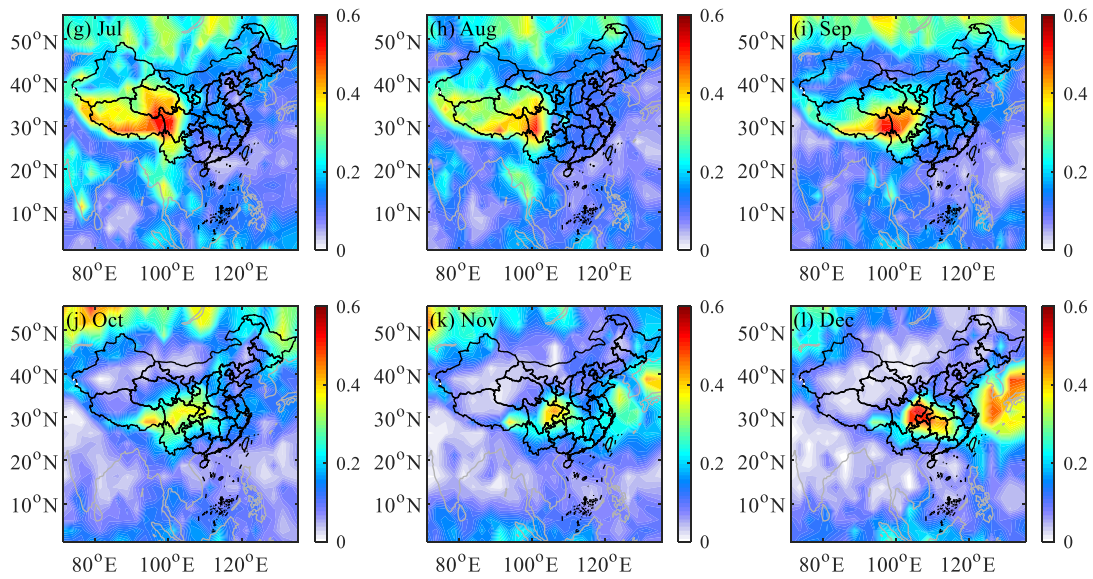


图4 2006—2019年过冷积状云出现频率的(a~l)月空间平均分布

Fig.4 (a~l) Monthly averaged spatial distributions of the occurrence frequency of supercooled cumulus cloud during 2006—2019

4 过冷积状云的年际变化趋势

在全球变暖背景下,过冷积状云出现频率的年际变化趋势也是规划未来特种试飞项目时值得关注的问题。由于 CloudSat-CALIPSO 轨道数据的水平覆盖率在沿轨道和垂直轨道两个方向上存在较大差异,导致分配到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 及分辨率更高的水平均匀网格后,逐月数据存在一定的空间不均匀性,最终会导致计算和绘制每个格点年际变化线性趋势的空间分布起伏较大,不易形成有价值的结论。如果使用分辨率更粗的水平网格进行统计,或者对数据进行空间平滑,则会导致分析结果的空间准确程度降低。因此,本文不直接分析每个格点上的年际变化趋势值所呈现的空间分布,而是先将格点数据按地理位置进行划分(图5)并计算出空间平均,在此基础上分析不同区域内过冷积状云出现频率的年际变化趋势。

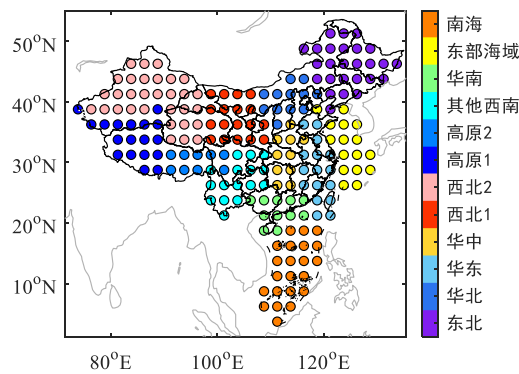


图5 用于统计不同区域云出现频率年际变化趋势的格点划分

Fig.5 Grid division for counting the interannual variation trend of cloud occurrence frequency in different regions

按不同月份统计的不同区域过冷积状云和所有积状云出现频率的年际变化趋势及显著性检验结果如图 6 所示。其中，过冷积状云出现频率减少集中发生在 8 月，在青藏高原、西北东部和南海均有显著减少趋势。减少最多的区域为高原东部，趋势可达 $-0.3 (10 a)^{-1}$ 。过冷积状云频率增加的时间集中在 1 月，在高原西部、西北西部和华中呈现显著增加趋势。增加最多的区域为华中，趋势可达 $0.3 (10 a)^{-1}$ 。过冷积状云频率增加月数最多的区域是高原西部，在 1—4 月和 12 月均呈现显著增加趋势。此外，由图 6a 和图 6b 对比可见，过冷积状云的年际变化趋势和所有积状云并不完全一致。例如华南、华东 11 月份积状云的显著增多并不对应过冷积状云的增多，这可能与这些地区气温偏高有关系。

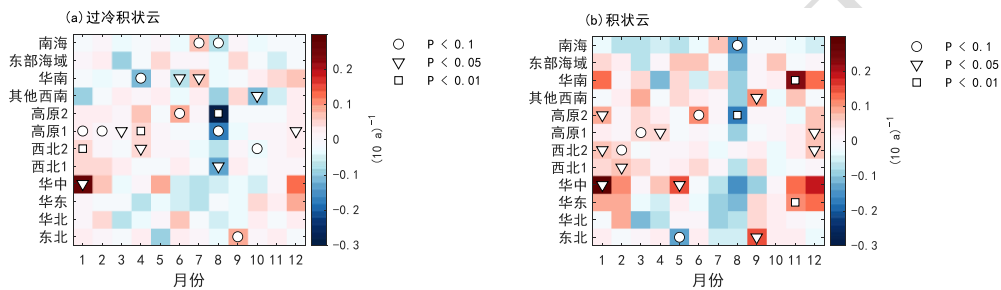


图 6 2006—2019 年不同区域 (a) 过冷积状云和 (b) 积状云出现频率的年际变化趋势及显著性检验结果

Fig.6 The interannual variation trend and significance test results of the occurrence frequency of (a) supercooled cumulonimbus cloud and (b) cumulonimbus cloud in different regions during 2006—2019

5 总结与讨论

本文对我国过冷积状云的时空分布特征进行了概括性的统计分析，结果显示，在平均空间分布方面，过冷积状云出现频率平均高值区位于青藏高原东部，并经云贵川地区延伸到华中地区。在季节变化方面，过冷积状云出现频率在冬季于四川盆地到贵州、我国东部洋面和日本海存在 3 个高值中心，在夏季的高值中心从青藏高原东部向高原其他位置和周边山地延伸。在年际变化趋势方面，华中地区、西北西部和高原西部在 1 月有过冷积状云显著增多趋势，增加最多的为华中地区。高原西部在 1—4 月和 12 月有过冷积状云显著增多趋势。

就地理、地形条件而言，在山区较多的云贵川及华中地区布设新的人影高炮、火箭等地面作业试验点存在一定的困难，但是否能部署一些近年发展的作业装备仍然值得研究，例如考虑可移动的、不需要申请空域且安全系数更高的人工强声波（孙跃等，2024）和燃气炮（杨

慧玲等, 2024) 等新型作业装置。对于积云结冰试飞而言, 过冷积状云出现频率较高的四川盆地到陕南地区以及年际变化显示增多的华中地区等区域值得继续关注。此外, 我国东部海域在冬季也常出现过冷积状云, 但该区域民航航线较多, 如果能够协调好试飞空域和航线, 也是积云结冰试飞的一种潜在选择。

本文未对过冷云中含水量的时空分布进行分析, 是因为目前无论是单频率或双频率的云雷达和降水雷达在精准反演云滴谱参数时还有一些不确定性。本文使用的 CloudSat-CALIPSO 卫星已到退役年限, 未来应结合国内外更新一代的星载雷达数据, 并充分利用地基天气雷达、云雷达、微波辐射计等多源观测数据, 开展综合性的验证和分析。

参考文献

方乐铎, 李昉英, 孙国荣, 等, 2016. 基于 CloudSat-CALIPSO 资料的全球不同类型云的水平分布特征[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]. Climatic Environ Res, 21(5): 547-556(in Chinese).

封秋娟, 牛生杰, 侯团结, 等, 2021. 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(5): 1146-1160. Feng Q J, Niu S J, Hou T J, et al, 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in Shanxi Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5): 1146-1160(in Chinese).

李佰平, 戴建华, 孙敏, 等, 2018. 一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J]. 气象, 44(11): 1377-1390. Li B P, Dai J H, Sun M, et al, 2018. An improved aircraft natural icing potential algorithm[J]. Meteor Mon, 44(11): 1377-1390 (in Chinese).

李佰平, 李静, 杨箐, 等, 2024. 我国飞机试飞气象保障服务的发展现状与展望[J]. 大气科学学报, 47(3): 498-508. Li B P, Li J, Yang Z, et al, 2024. Progress and prospect of meteorological service for aircraft flight test in China[J]. Trans Atmos Sci, 47(3): 498-508 (in Chinese).

李兴宇, 郭学良, 朱江, 2008. 中国地区空中云水资源气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学, 32(5): 1094-1106. Li X Y, Guo X L, Zhu J, 2008. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(5): 1094-1106 (in Chinese).

林丹, 2015. 利用 MODIS 卫星产品分析西南地区云水特征[J]. 气象科技, 43(1): 138-144. Lin D, 2015. Characteristic analysis of cloud water in southwest China using MODIS data[J]. Meteor Sci Technol, 43(1): 138-144 (in Chinese).

刘建军, 陈葆德, 2017. 基于 CloudSat 卫星资料的青藏高原云系发生频率及其结构[J]. 高原气象, 36(3): 632-642. Liu J J, Chen B D, 2017. Cloud occurrence frequency and structure over the Qinghai-Tibetan Plateau from CloudSat observation[J]. Plateau Meteor, 36(3): 632-642 (in Chinese).

-
- 刘屹岷, 燕亚菲, 吕建华, 等, 2018. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云辐射及降水的研究进展[J]. 大气科学, 42(4): 847-858. Liu Y M, Yan Y F, Lv J H, et al, 2018. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 847-858 (in Chinese).
- 倪洪波, 李佰平, 闫文辉, 等, 2022. 飞机试飞的自然结冰潜势预测及检验评估[J]. 气象科技, 50(2): 254-266. Ni H B, Li B P, Yan W H, et al, 2022. Aircraft natural icing potential forecast and its evaluation in flight test[J]. Meteor Sci Technol, 50(2): 254-266(in Chinese).
- 倪洪波, 丑岩, 张莹, 等, 2023a. 国产某大型客机自然结冰取证试飞气象条件分析[C]/第六届中国航空科学技术大会论文集. 嘉兴: 中国航空学会. Ni H B, Chou Y, Zhang Y, et al, 2023a. Analysis of meteorological conditions for the natural icing test flight of a large domestic passenger aircraft[C]/Proceedings of the 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Jiaxing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics (in Chinese).
- 倪洪波, 李佰平, 李静, 等, 2023b. 国内飞机自然结冰潜势的时空分布状况研究[J]. 气动研究与试验, 1(1): 89-101. Ni H B, Li B P, Li J, et al, 2023b. Study on temporal and spatial distribution of aircraft natural icing potential in China[J]. Aerodyn Res Exp, 1(1): 89-101 (in Chinese).
- 任冉, 单婵, 张羽, 等, 2017. 夏季云贵高原地区降水特征及云水资源匹配[J]. 气象, 43(3): 315-322. Ren R, Shan C, Zhang Y, et al, 2017. Spatio-temporal characteristics of precipitation and water vapor resource over the Yunnan-Guizhou Plateau in summer[J]. Meteor Mon, 43(3): 315-322 (in Chinese).
- 孙晶, 蔡淼, 王飞, 等, 2019. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象, 45(10): 1341-1351. Sun J, Cai M, Wang F, et al, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. Meteor Mon, 45(10): 1341-1351 (in Chinese).
- 孙晶, 李想, 2020. 飞机积冰气象条件研究进展[J]. 气象科技, 48(4): 561-569. Sun J, Li X, 2020. Advances in researches on meteorological conditions related to aircraft icing[J]. Meteor Sci Technol, 48(4): 561-569 (in Chinese).
- 孙晶, 谭超, 周毓荃, 等, 2021. 新疆春季两次直升机积冰气象条件分析[J]. 气象与环境科学, 44(4): 24-32. Sun J, Tan C, Zhou Y Q, et al, 2021. Meteorological conditions of two cases of aircraft icing in spring in Xinjiang[J]. Meteor Environ Sci, 44(4): 24-32 (in Chinese).
- 孙艳辉, 张波, 刘伟, 等, 2023. 高空冷涡背景下飞机积冰特征和机制的探测研究[J]. 气象, 49(8): 972-984. Sun Y H, Zhang B, Liu W, et al, 2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold vortex[J]. Meteor Mon, 49(8): 972-984 (in Chinese).
- 孙跃, 肖辉, 冯强, 等, 2024. 2020 年雾灵山人工低频强声波增雨和消雾试验[J]. 应用气象学报, 35(1): 90-102. Sun Y, Xiao H, Feng Q, et al, 2024. Rainfall enhancement and fog dissipation experiments in Wuling Mountain in 2020 using artificial strong sound wave[J]. J Appl Meteor Sci, 35(1): 90-102 (in Chinese).
- 唐雅慧, 周毓荃, 蔡淼, 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).

王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 2010. 基于 CloudSat 和 ISCCP 资料的中国及周边地区云量分布的对比分析[J]. *大气科学*, 34(4): 767-779. Wang S H, Han Z G, Yao Z G, 2010. Comparison of cloud amounts from ISCCP and CloudSat over China and its neighborhood[J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(4): 767-779 (in Chinese).

王奕丹, 杨慧玲, 孙跃, 等, 2021. 1998—2017 年三江源地区水汽和云水状况的时空分布[J]. *成都信息工程大学学报*, 36(2): 174-184. Wang Y D, Yang H L, Sun Y, et al, 2021. Temporal and spatial distribution of water vapor and cloud water in the Sanjiangyuan region from 1998 to 2017[J]. *J Chengdu Univ Inform Technol*, 36(2): 174-184 (in Chinese).

王泽林, 倪洪波, 裴昌春, 2020. 我国干旱地区一次直升机自然结冰试飞天气个例分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 14(2): 68-74. Wang Z L, Ni H B, Pei C C, 2020. A case study of helicopter natural icing flight test in arid areas of China[J]. *Desert Oasis Meteor*, 14(2): 68-74(in Chinese).

王泽林, 周旭, 吴俊辉, 等, 2022. 一次飞机严重积冰的天气条件和云微物理特征[J]. *应用气象学报*, 33(5): 555-567. Wang Z L, Zhou X, Wu J H, et al, 2022. Weather conditions and cloud microphysical characteristics of an aircraft severe icing process[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(5): 555-567(in Chinese).

辛悦, 毕力格, 包山虎, 等, 2023. 基于 CloudSat-CALIPSO 数据的大兴安岭地区云宏观物理量的垂直结构特征分析[J]. *气象*, 49(4): 427-438. Xin Y, Bi L G, Bao S H, et al, 2023. Vertical structure characteristics of cloud macro and micro physical quantities in the Greater Khingan Mountains based on CloudSat-CALIPSO satellite data[J]. *Meteor Mon*, 49(4): 427-438 (in Chinese).

闫非, 杨洁帆, 董晓波, 等, 2023. 冬季中尺度降雪系统暖输送带云微物理垂直特征的飞机观测研究[J]. *大气科学*, 47(5): 1451-1465. Yan F, Yang J F, Dong X B, et al, 2023. Airborne observations of the cloud vertical microphysical characteristics of warm conveyor belt within a winter mesoscale snowstorm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(5): 1451-1465 (in Chinese).

闫文辉, 王泽林, 赵钰锦, 等, 2024. 基于飞机探测的陕西及周边地区结冰云层微物理特征分析[J]. *空气动力学学报*, 42(3): 47-54. Yan W H, Wang Z L, Zhao Y J, et al, 2024. Analysis of microphysical characteristics of icing clouds in Shaanxi and surrounding areas based on aircraft probing[J]. *Acta Aerodyn Sin*, 42(3): 47-54 (in Chinese).

杨慧玲, 孙跃, 肖辉, 等, 2024. 安徽省燃气炮人工增雨作业效果综合评估[J]. *应用气象学报*, 35(1): 103-117. Yang H L, Sun Y, Xiao H, et al, 2024. Comprehensive evaluation of rainfall enhancement of gas cannon in Anhui Province[J]. *J Appl Meteor Sci*, 35(1): 103-117 (in Chinese).

张沛, 姚展予, 贾烁, 等, 2020. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. *大气科学*, 44(2): 421-434. Zhang P, Yao Z Y, Jia S, et al, 2020. Study of the characteristics of atmospheric water resources and hydrometeor precipitation efficiency over the Liupan Shan area[J]. *Chin J Atmos Sci*, 44(2): 421-434 (in Chinese).

朱士超, 郭学良, 2015. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究[J]. *大气科学*, 39(2): 370-384.

Zhu S C, Guo X L, 2015. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(2): 370-384 (in Chinese).

Li Y Y, Zhang M H, 2016. Cumulus over the Tibetan Plateau in the summer based on CloudSat-CALIPSO data[J]. *J Climate*, 29(3): 1219-1230.

Mace G G, Zhang Q Q, Vaughan M, et al, 2009. A description of hydrometeor layer occurrence statistics derived from the first year of merged Cloudsat and CALIPSO data[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 114(D8): D00A26.

Naud C M, Posselt D J, Van Den Heever S C, 2012. Observational analysis of cloud and precipitation in midlatitude cyclones: Northern versus Southern Hemisphere warm fronts[J]. *J Clim*, 25(14): 5135-5151.

Sassen K, Wang Z E, 2008. Classifying clouds around the globe with the CloudSat radar: 1-year of results[J]. *Geophys Res Lett*, 35(4): L04805.

Sun Y, Yang H L, Xiao H, et al, 2024. The spatiotemporal distribution characteristics of cloud types and phases in the Arctic based on CloudSat and CALIPSO cloud classification products[J]. *Adv Atmos Sci*, 41(2): 310-324.