

张华, 杨冰韵, 彭杰, 等. 2015. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究 [J]. 大气科学, 39 (2): 235–248, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13313. Zhang Hua, Yang Bingyun, Peng Jie, et al. 2015. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (2): 235–248.

东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究

张华^{1,2} 杨冰韵³ 彭杰⁴ 王志立⁵ 荆现文^{1,2}

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国气象局气候研究开放实验室/国家气候中心, 北京 100081

3 国家卫星气象中心, 北京 100081

4 上海气象局, 上海 200030

5 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 本文利用 2007~2010 年整四年最新可利用的 CloudSat 卫星资料, 对东亚地区 ($15^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 云的微物理量包括冰/液态水含量、冰/液态水路径、云滴数浓度和有效半径等的分布特征和季节变化进行了分析。本文将整个东亚地区划分为北方、南方、西北、青藏高原地区和东部海域五个子区域进行研究, 结果显示: 东亚地区冰水路径值的范围基本在 700 g m^{-2} 以下, 高值区分布在北纬 40° 以南区域, 在南方地区夏季的平均值最大, 为 394.3 g m^{-2} , 而在西北地区冬季的平均值最小, 为 78.5 g m^{-2} ; 而液态水路径的范围基本在 600 g m^{-2} 以下, 冬季在东部海域的值最大, 达到 300.8 g m^{-2} , 夏季最大值为 281.5 g m^{-2} , 分布在南方地区上空。冰水含量的最高值为 170 mg m^{-3} , 发生在 8 km 附近, 南方地区夏季的值达到最大, 青藏高原地区的季节差异最大; 而液态水含量在东亚地区的范围小于 360 mg m^{-3} , 垂直廓线从 10 km 向下基本呈现逐渐增大的趋势, 峰值位于 $1\sim 2\text{ km}$ 高度上。冰云云滴数浓度在东亚地区的范围在 150 L^{-1} 以下, 水云云滴数浓度的值小于 80 cm^{-3} , 垂直廓线的峰值均在夏季最大。冰云有效半径在东亚地区的最大值为 $90\text{ }\mu\text{m}$, 发生在 5 km 左右; 水云有效半径在东亚地区的值分布在 10 km 以下, 最大值为 $10\sim 12\text{ }\mu\text{m}$, 基本位于 $1\sim 2\text{ km}$ 高度上。从概率分布函数来看, 东亚地区冰/水云云滴数浓度的分布呈现明显的双峰型, 其他量基本为单峰型。本文的结果可以为全球和区域气候模式在东亚地区对以上云微物理量的模拟提供一定的观测参考依据。

关键词 CloudSat 卫星 云水含量 云滴数浓度 云滴有效半径

稿件编号 1006-9895(2015)02-0235-14

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13313

The Characteristics of Cloud Microphysical Properties in East Asia with the CloudSat Dataset

ZHANG Hua^{1,2}, YANG Bingyun³, PENG Jie⁴, WANG Zhili⁵, and JING Xianwen^{1,2}

1 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration/National Climate Center, Beijing 100081

3 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

4 Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030

收稿日期 2013-11-18; 网络预出版日期 2014-08-13

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB403405, 国家自然科学基金项目 41375080, 科技部公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201406023

作者简介 张华, 女, 1965 年出生, 博士, 研究员, 主要从事云—辐射相互作用及其气候影响、大气辐射传输模式等方面的研究。E-mail: huazhang@cma.gov.cn

5 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

Abstract The distribution and seasonal variations of cloud microphysical properties in East Asia (including the liquid water content (LWC), ice water content (IWC), liquid water path (LWP), ice water path (IWP), effective radius, and number concentrations) are analyzed based on the CloudSat dataset from Jan. 2007 to Dec. 2010. East Asia is divided into five sub-regions for this paper, and are defined as the North, South, Northwest, Tibet Plateau, and East Ocean. The results show that the IWP is less than 700 g m^{-2} over all of East Asia. The higher values are located south of 40° N . The IWP is at its maximum at 394.3 g m^{-2} in the South region in summer and at its minimum of 78.5 g m^{-2} in the Northwest region in winter. The LWP is less than 600 g m^{-2} . The maximum LWP is 300.8 g m^{-2} and 281.5 g m^{-2} over the East Ocean in winter and the South in summer, respectively. The maximum IWC occurs near the height of 8 km over the South in summer. East Asia's maximum LWC is 360 mg m^{-3} at an altitude of 1–2 km. The largest ice (liquid) number concentration in East Asia is 150 L^{-1} (80 cm^{-3}) and both these values are larger in summer. The largest ice effective radius in East Asia is $90 \mu\text{m}$ and occurred at around 5 km. East Asia's liquid effective radius is generally lower than 10 km. Its largest value reaches 10–12 μm at 1–2 km altitude. Two peaks are shown in the probability distribution function (PDF) of both the ice and liquid number concentrations, and most of the other cloud microphysical variables show single peak PDFs. The results reported here provide an observational basis for simulations of cloud microphysical properties by global or regional climate models in East Asia.

Keywords CloudSat, Cloud water content, Cloud number concentration, Cloud effective radius

1 引言

云在全球能量和水循环平衡中起着重要的作用,是地气系统不可或缺的组成部分(Liou, 2004)。精确细致地了解云的信息,对于我们深入了解云、辐射和气候之间复杂的相互作用、进而改进气候模拟和气候预测,有着极其重要的意义(Hughes, 1984; 李积明等, 2009; 汪会等, 2011; Zhang et al., 2013; 张华等, 2013; 彭杰等, 2013)。由于云的观测和数值模拟都存在很大不确定性,对于云的相关研究一直是国际国内研究热点和难点问题。特别是近年来,卫星观测因为具有观测覆盖范围广、水平和垂直分辨率高等优势,逐渐成为现阶段研究云的重要手段之一(刘瑞霞等, 2004; 彭杰等, 2010; 杨大生和王普才, 2012)。东亚地区地理位置独特,地形复杂,是亚洲季风的主要活动区域,气候变化特征显著,因此利用卫星资料研究东亚地区云的基本特征具有重要的科学意义(吴润和刘佳, 2011)。目前国内外对于东亚地区上空云的分布以及云微物理量的特征已经有不少研究工作,取得了一定的成果。一些研究从降水等天气学角度对东亚地区云的特征进行分析,阐释了云与天气系统之间的密切联系。赵柏林等(1994)利用 TIROS-N 卫星 TOVS 系统,讨论了大气出射长波通量(OLR)的分布与天气系统的联系; Wang et al. (2004)利用地球同步卫星观测到的逐小时的近红外亮温资料,分析了东亚暖季期间对流云的传播特征,研究着眼于不同

经度上云随时间的变化,为东亚地区降水的预测提供了重要依据;傅云飞等(2007)利用热带测雨卫星的测雨雷达对降水云的综合探测结果,结合降水资料分析了东亚降水分布的特点,并揭示了中国中东部大陆、东海和南海对流降水和层云降水平均降水廓线的季节变化特征及物理意义。另外一部分研究主要集中在云的分布方面,这些工作从季节变化、空间差异等角度,研究了东亚地区云量的分布和垂直结构特征。Liu et al. (2008)利用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 降水雷达与可见光和红外扫描仪的融合资料,首次给出了降水云与非降水光学厚度等参量的差异。Luo et al. (2009)利用 CloudSat/CALIPSO 卫星资料对比分析了中国东部和印度季风区上空云的发生频率和垂直结构,并建立了云量的分布与季风等大尺度环流场的联系;吴润和刘佳(2011)利用国际卫星云气候学计划(ISCCP)的 D2 云气候资料集分析了东亚地区不同种类云量的变化趋势,结果发现近 20 年东亚地区总云量和高、低云量呈现波动减少趋势,中云量呈增加趋势,云量变化存在较大的区域差异;李积明等(2009)利用 CALIPSO 卫星资料,研究了东亚地区云的垂直分布特征,彭杰等(2013)利用 CloudSat/CALIPSO 卫星资料分区研究了东亚地区云垂直分布的统计特征,发现不同高度的云量之和具有明显的季节变化趋势,且云出现总概率的季节变化主要由多层云出现概率的变化决定;尚博(2011)利用 CloudSat 资料,研究了

我国华北和江淮典型区域云的垂直结构统计特征及其差异。这些研究工作主要针对云量、云厚以及云的重叠特征;汪会等(2011)结合 CloudSat/CALIPSO 资料分析了东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原地区的云量和云层垂直结构及其季节变化特征,研究侧重于不同地区上云的分布情况。而为了探讨气溶胶对深对流混合云的可能影响,Peng et al. (2014)首先利用 2007~2010 年整四年的 CloudSat/CALIPSO 卫星资料分析了深对流云系时间和空间变化特征。此外,也有一部分人做了关于云微物理量方面的研究。Chen et al. (2010)利用 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)/CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System)的观测结构分析了中国西北地区云的液态水路径,但是没有给出垂直方向上的分布特征;杨大生和王普才(2012)利用 CloudSat 资料分析了中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征,发现青藏高原地形以及东亚夏季风对月平均云含水量分布具有明显影响,夏季液态水路径最大值出现在 $25^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 纬度带上,但并没有进行详细的分区研究,而且涉及的云微物理量较少。这些研究工作加深了我们对于东亚地区云的分布及其微物理特征的认识,为模式的模拟研究提供了很好的参考依据。但是也可以看出,目前对于云微物理量的研究还很薄弱,特别是缺少有关云微物理量的垂直分布以及区域差异方面的研究,而这些研究结果可以直接为全球或区域模式模拟云的微物理参量提供相应的观测信息和验证资料。杨冰韵等(2014)利用高垂直分辨率 CloudSat 卫星资料,分析了云的微物理特征量和云光学参数在全球的分布情况和季节变化,并研究了云的微物理性质对光学性质的影响,对气候模式中云辐射物理过程的描述及其参数化的改进有着重要的参考意义。本文是上述研究工作的继续和深入,侧重给出东亚地区云的微物理量的分布特征和季节变化,为模式在东亚地区对这些参量的模拟提供可供参考的观测验证信息。

本文通过对 2006~2010 年整五年最新可利用的 CloudSat 卫星资料进行统计分析,研究了东亚地区 ($15^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$) 包括冰/水云含量、云滴数浓度和有效半径等云微物理量的分布特征和季节变化。本文第 2 部分给出研究所用的资料和方法;第 3 部分是结果分析;第 4 部分是本文的结

论。

2 资料和方法

本文使用的是 CloudSat 卫星提供的 2B-CWC-RO 云产品资料 (5.1 版本)。CloudSat 卫星于 2006 年 4 月 28 日在美国发射升空,是 A-Train 卫星观测系统的成员之一,其上搭载的是 94 GHz 毫米波云廓线雷达 (CPR),每根轨道运行时间约为 2 小时,进行约 37,081 次扫描,扫描星下点的分辨率为 1.1 km (沿轨方向) $\times 1.3\text{ km}$ (垂直轨道运行方向) $\times 0.24\text{ km}$ (垂直方向) (周毓荃和赵姝慧, 2008; 彭杰等, 2010),具有很高的垂直分辨率。2B-CWC-RO 是 CloudSat 的二级产品,它包括了云的液态水含量、冰水含量、有效半径及其相关的量,算法中特别区分了水云和冰云 (具体算法及物理意义参见 <http://www.cloudsat.cira.colostate.edu.html> [2013-09-20]) (Austin, 2007; 杨大生和王普才, 2012)。反演的主要流程如下:首先根据 2B-GEOPROF 产品给出的云盖 (Cloud mask) 判定扫描廓线上出现云的高度,通过 2B-CLDCLASS 产品去除廓线中有问题的部分,然后根据气温等指标设定液态水/冰水粒子的粒径分布参数的初始值,结合初始值和 2B-GEOPROF 给出的雷达探测结果计算出不同垂直高度上液态水/冰水粒子的粒径分布参数,进而计算出冰云和水云的有效半径、云水含量等云物理量值,最后根据 ECMWF 模式的温度情况 (温度小于 -20°C 为冰云,大于 0°C 为水云, $-20\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间为混合相云) 分别得出冰云和水云云物理量的垂直廓线。文中考虑的均为非降水云的云物理量。当然在目前的反演算法中区分非降水云和降水云的标准还存在一定的不确定性,因为算法中仅根据雷达反射率因子小于 -15 dBZ 这一条件来判断非降水云是有一定误差的 (Austin, 2007)。

根据 2B-CWC-RO 的反演算法,云物理量产品存在如下不确定性: (1) 算法中使用的 CloudSat 其他产品数据的不确定性 (① 2B-GEOPROF 产品给出的不同高度上云量的不确定性; ② 2B-CLDCLASS 产品中云分类判断的不确定性; ③ ECMWF 模式提供的温度数据以及差值到 CloudSat 廓线产生的不确定性); (2) 算法过程中的不确定性 (① 水云中降水粒子和冰云中大气粒子的存在会使假定的对数正态分布产生一定的偏差; ② 冰云或水云云物理量反演过程中分别假定整层云均为冰云

粒子或水云粒子, 导致混合层的云物理量产生偏差)。

本文根据彭杰等(2013)的分区方案, 参照《中国自然地理》(1995)中的划分方法, 将东亚地区($15^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)划分为西北地区(以下简称 Nw)、青藏高原地区(以下简称 Tibet)、北方地区(以下简称 North)、南方地区(以下简称 South)和东部海域(以下简称 EO) 5 个部分, 选取了云的冰/液态水路径、冰/液态水含量、冰/水云有效半径、冰/水云云滴数浓度等云微物理量进行研究。具体统计方法为: 将东亚地区按经纬度划分为 $2.8^{\circ}\times 2.8^{\circ}$ 的网格, 根据星下点位置, 筛选出每个网格内的 CloudSat 卫星扫描的廓线, 然后选取所需要的物理量进行网格内平均, 统计出这些物理量在东亚各个区域的月平均分布情况。然后按三个月为一季进行划分, 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 12、1、2 月为冬季, 最终统计出各个物理量在东亚不同区域上的季节分布情况。由于 CPR 雷达在地表以上 2~3 层即 0.48~0.72 km 范围内的值不确定性较大(Stephens et al., 2008), 文中的垂直廓线在统计平均时去除了地表以上 3 层(即 0.72 km)以下的值。需要说明的是, CloudSat 提供的云微物理量产品主要有 2B-CWC-RO 和 2B-CWC-RVOD。本文对两种产品都进行了分析和对比, 得出的结果基本一致。Protat et al. (2010) 也指出 CloudSat 两种微物理产品(2B-CWC-RO 和 2B-CWC-RVOD)统计上来说几乎完全相同。因此, 用 2B-CWC-RO 产品可以满足本文的研究需要。下文中只给出了用 2B-CWC-RO 产品的统计分析结果, 并在给出平均结果同时也给出了相应的标准差。

3 结果和分析

3.1 东亚地区云水路径的分布及其季节变化

3.1.1 云水路径的水平分布及其季节变化

东亚地区冰水路径的季节变化比较显著, 从图 2 中可以看出, 冰水路径值的范围在 700 g m^{-2} 以下, 夏秋两季的值较高, 春季次之, 冬季最小, 高值区分布在北纬 40° 度以南区域。春季高值区范围较小, 东部海域上有小范围的高值区存在, 最大值达到 400 g m^{-2} 以上, 我国长江中下游地区以及东海海域也有小范围的高值, 最大值为 300 g m^{-2} 以上; 夏季高值区分布的范围最大, 青藏高原地区、华南地区

以及东部海域上空大部分区域都有高值分布, 最大值为 400 g m^{-2} 以上; 秋季高值范围向东南移动, 基本分布在东部海域上空, 最大值没有减弱; 冬季整个东亚地区冰水路径的值均较低, 没有明显的高值区存在。这种季节分布的差异主要受大气中水汽含量的影响, 夏季北纬 15° 到 40° 之间东亚地区接收的太阳辐射较多, 地表蒸发量增大, 因此使得大气中水汽含量增多, 加大了整层大气中云的冰水路径值。而接近冬季时, 大气中的水汽主要集中在洋面, 故东亚地区冰水路径的值普遍较小, 大部分高值区位于洋面上空。

液态水路径在东亚地区的分布情况与冰水路径相近, 高值区也普遍集中在北纬 40° 度以南地区, 大小在 600 g m^{-2} 以下。夏季和冬季液态水路径的值比较大, 秋季次之, 春季较小。春季高值区位于青藏高原东南侧、南方地区以及东部海域上空, 最大值在 250 g m^{-2} 以上; 夏季高值区移到青藏高原南侧上空, 最大值增加到 400 g m^{-2} 以上, 东部海域的值分布范围减小; 秋季高值区向东扩展, 分裂成两个中心, 分别位于青藏高原东南侧和东海海域上空, 最大值有所减弱, 达到 350 g m^{-2} 以上; 冬季高值区基本移至东部海域, 最大值增大为 400 g m^{-2} 以上。可以看出, 东亚地区液态水路径的分布同样受到大气中水汽含量的影响, 夏季青藏高原南侧受印度西南夏季风的影响, 水汽的输送较大, 且由于高原的阻挡作用, 导致大量水汽在此堆积, 整个大气中水汽含量较大, 因此液态水路径的高值区集中于此; 这与杨大升等(2012)研究中给出的夏季东亚地区液态水路径最大值出现在 $25^{\circ}\sim 32^{\circ}$ 纬度带上的观点一致。冬季东部海域上蒸发量大, 液态水路径的高值集中在洋面上空。这种季节变化与东亚季风的季节振荡也有一定的相似之处。

3.1.2 不同区域云水路径平均值的季节变化

表 1 中给出的是东亚不同区域内冰水路径、液态水路径平均值的季节变化情况。可以看出, 东亚地区不同区域内冰水路径的平均值在 400 g m^{-2} 以下, 夏季的值普遍比其他季节大, 春秋次之, 冬季最小。从区域差异来看, 冰水路径从大到小依次为南方地区、东部海域、青藏高原地区、北方地区、西北地区, 其中南方地区夏季的平均值达到 394.3 g m^{-2} , 是所有区域中最大的, 西北地区冬季的平均值最小, 只有 78.5 g m^{-2} 。这是因为南方地区和东部海域的水汽条件丰富, 整层大气中云的含水量比

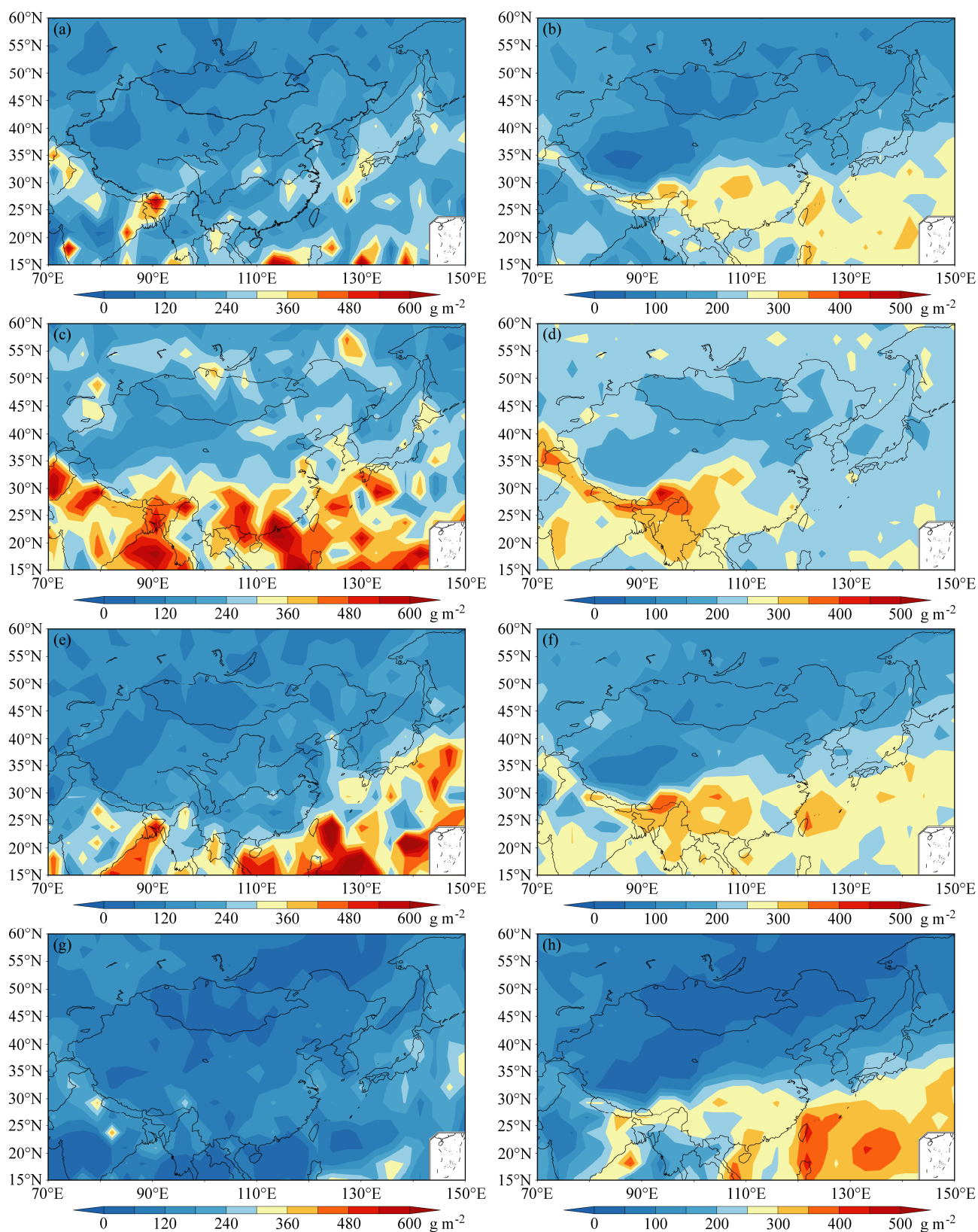


图1 冰水路径(左列)、液态水路径(右列)水平分布(单位: g m^{-2})的季节变化: (a、b)春季; (c、d)夏季; (e、f)秋季; (g、h)冬季

Fig. 1 The seasonal change of ice water path (IWP, left) and liquid water path (LWP, right) horizontal distribution: (a, b) Spring; (c, d) summer; (e, f) fall; (g, h) winter

其他区域高,夏季温度高更有利于蒸发,而西北地区大部分处在干旱半干旱区,水汽较少,云的冰水含量较低,冬季受北部干空气的影响冰水含量达到最低水平。南方地区季节差异最大,夏季和冬季的差值达到 310 g m^{-2} ,西北地区季节差异最小,夏季和冬季的差值仅为 133 g m^{-2} 。

液态水路径在不同区域内的值在 300 g m^{-2} 以下,不同区域间的差异以及季节差异均比冰水路径小。东部海域冬季的值最大,达到 300.8 g m^{-2} ,原因是冬季洋面较暖,水汽蒸发量较大。东部海域、南方地区的值比其他地区大,青藏高原地区只在夏季的值较大。西北地区的值最小,特别是冬季的平均值只有 56.2 g m^{-2} 。季节差异最大的是西北地区,最小的是东部海域和南方地区,原因是东部海域和南方地区全年水汽条件均很充足,容易达到水云形成的条件,而西北地区由于干旱,不同季节中大气的含水量有很大差异,夏季的值会明显高于其他季节,故液态水路径的值受季节变化的影响相对较大。

表 1 不同区域内冰/液态水路径平均值的季节变化(单位: g m^{-2})

Table 1 The seasonal change of the mean of ice water path (IWP)/liquid water path (LWP) in different regions

		冰/液态水路径平均值/ g m^{-2}					
		东亚	东部海域	南方	青藏高原	西北	北方
冰水 路径	春季	202.009	246.3993	213.0217	208.0954	137.4351	200.5626
	夏季	295.0991	348.7511	394.3127	299.845	211.2091	264.0914
	秋季	215.9013	344.1761	262.1809	158.1923	127.4816	187.0611
	冬季	114.0766	148.9988	84.76368	121.2207	78.47543	126.219
液态 水路 径	春季	191.1065	257.879	252.8898	160.1969	124.6043	187.8603
	夏季	233.9378	233.3063	281.5276	256.2117	199.6007	225.8505
	秋季	213.7466	269.9615	287.9599	194.3927	144.8977	207.3832
	冬季	167.2159	300.7871	249.6032	129.0382	56.28774	143.6398

3.2 东亚地区云水含量的垂直分布及其季节变化

图 2 (左) 为东亚不同区域内冰水含量平均值垂直分布的季节变化,误差棒表示各高度上的标准差,横坐标为冰水含量的值,纵坐标为高度。可以看出,冰水含量平均值的范围在 170 mg m^{-3} 以下,最大高度接近 20 km ,不同高度上的值有所差异。这与杨大生和王普才(2012)的中国地区夏季冰水含量发展上限是 19 km 相近。整体来看, 8 km 附近为冰水含量最高值的所在高度,最大值可达 170 mg m^{-3} 以上, 8 km 以上和以下的值均逐渐减小。四个季节中最大值由大到小依次为夏季、秋季、春季、

冬季,主要原因是夏季水汽比较充足。在 15 km 附近有另一个高值区,夏季最为明显,最大值可达 120 mg m^{-3} 以上,其他季节相对较弱,其中南方地区夏季在这个高度上的值远远大于其他地区,原因是这个地区靠近热带,水汽的垂直输送较大,高层的水汽比较充足,再加上 15 km 附近有利的温度条件,因此容易形成大量的冰云。在 8 km 附近南方地区、东部海域和青藏高原地区的值比其他区域大,特别是夏季可以达到 $140 \sim 160 \text{ mg m}^{-3}$,这是因为这几个地区水汽条件充足,夏季更容易通过对流把水汽输送到高空形成冰云。青藏高原地区地区冰水含量的季节差异较大,夏季在 8 km 左右的最大值比其他季节大,冬季最高值所在高度低于其他地区。原因是青藏高原地区地势高,不同季节的热力差异较大,夏季对流旺盛,大量的水汽可以被输送到较高高度,而冬季对流大大减弱,水汽含量又低,最大值出现在高度和大小也相对较低。从标准差的变化情况可以看出,冬季不同区域的标准差相对较小,说明平均值的代表性较好,而夏秋两季的中高层标准差相对较大。

如图 2 (右列) 所示,东亚地区的液态水含量平均值的范围小于 360 mg m^{-3} ,最大高度小于 10 km ,明显低于冰水含量分布的高度,但值的大小明显增大。这也与杨大生和王普才(2012)的结论一致。从垂直变化来看,东亚不同区域液态水含量的廓线从 10 km 向下基本呈现逐渐增大的趋势,峰值位于 $1 \sim 2 \text{ km}$ 高度上,峰值的大小随着不同季节和区域有所差异,只有青藏高原地区春季的峰值位于 3.5 km 左右。从季节变化来看,青藏高原地区在垂直方向上液态水含量峰值的最大值出现在冬季,达到 360 mg m^{-3} 左右,最小值出现在春季,达到 270 mg m^{-3} ; 南方地区在垂直上的峰值在冬季最大,为 325 mg m^{-3} ,夏季最小,为 280 mg m^{-3} ; 东部海域峰值的最大值出现在秋季,达到 190 mg m^{-3} ,最小在夏季,为 270 mg m^{-3} ; 北方地区峰值的最大值出现在夏季,达到 270 mg m^{-3} 左右,最小值出现在冬季,达到 180 mg m^{-3} ; 西北地区的最大值出现在春季,达到 230 mg m^{-3} 左右,最小值出现在冬季,为 150 mg m^{-3} 左右。青藏高原地区的值分布的高度普遍高于其他地区,随季节变化有一定的差异,在夏季液态水含量的值分布高度最高,冬季最低。原因是青藏高原地区平均海拔较高,云出现的高度也比其他地区高,夏季对流旺盛,水汽最充足,最大值

分布所在位置和大小也最高。西北地区的值比其他区域明显减小,特别是冬季的峰值只有 150 mg m^{-3} 左右,这是因为西北地区水汽条件不充足,水云的云量减少,液态水含量也相对较小,进而会使这个地区的降水减少,形成负反馈。相对而言,对流层高层的标准差较小,青藏高原地区的标准差在几个区域中是较大的。

3.3 东亚地区云滴数浓度的垂直分布及其季节变化

云滴数浓度为单位体积所含的云滴数目(单位:冰云用 L^{-1} ,水云用 cm^{-3})。云滴的数目与气溶胶数浓度、气溶胶粒子的尺度、化学组分、上升速度以及过饱和度等因子有关(黄梦宇等, 2005)。由于云滴数浓度与气溶胶之间具有密不可分的联系,而气溶胶的间接效应又是当前国内外研究的热点问题,因此研究云滴数浓度有着十分重要的意义。

义。

图3左列为冰云云滴数浓度的垂直分布情况,误差棒表示各高度上的标准差,可以看出,冰云云滴数浓度的范围在 150 L^{-1} 以下,最大所在高度为 20 km ,最大值所在的高度随季节和地区的不同有所差异,基本在 $8 \sim 18 \text{ km}$ 之间不等。夏季的值最大,其中南方地区的最大值达到 150 L^{-1} ,位于 15 km 左右,是所有区域中最大的,东部海域次之,为 100 L^{-1} 左右,其他三个区域的最大值位于 10 km 高度上,值从大到小依次为青藏高原地区、北方地区、西北地区。春秋两季最大值的大小和高度差别不大,最大值为 70 L^{-1} 左右,高度在 $7 \sim 8 \text{ km}$,但秋季青藏高原地区、南方地区的垂直廓线有较大差异。青藏高原地区的最大值比其他区域大,可以达到 90 L^{-1} ,南方地区的最大值所在高度较高,位于

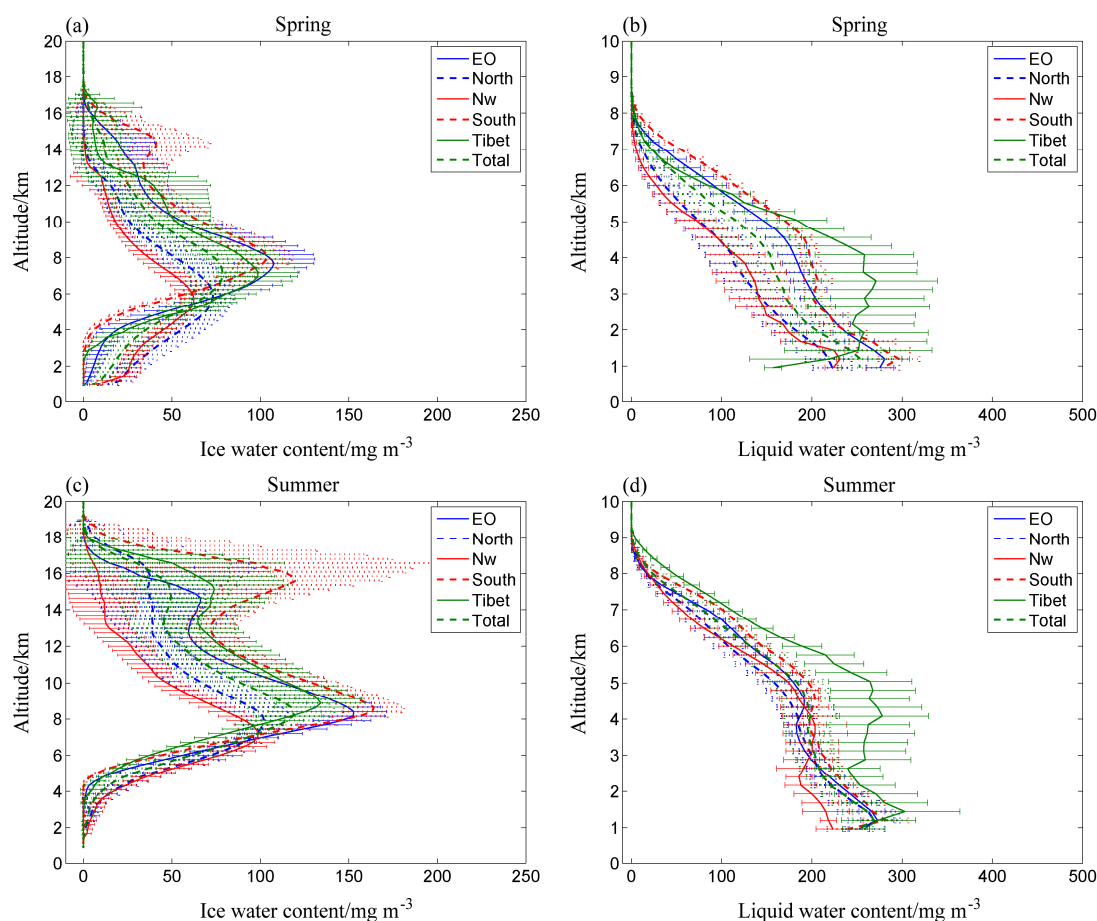


图2 不同区域内冰水含量(左列)、液态水含量(右列)垂直分布(单位: mg m^{-3})的季节变化:(a、b)春季;(c、d)夏季;(e、f)秋季;(g、h)冬季。横向线段为误差棒,表示物理量在各高度上的标准差(下同)

Fig. 2 The seasonal change of the vertical distribution of the liquid water content (LWC), ice water content (IWC) in different regions: (a, b) Spring, (c, d) summer, (e, f) fall, (g, h) winter. Horizontal segments denote error bar, show the standard deviation of physical quantities in different heights (the same below)

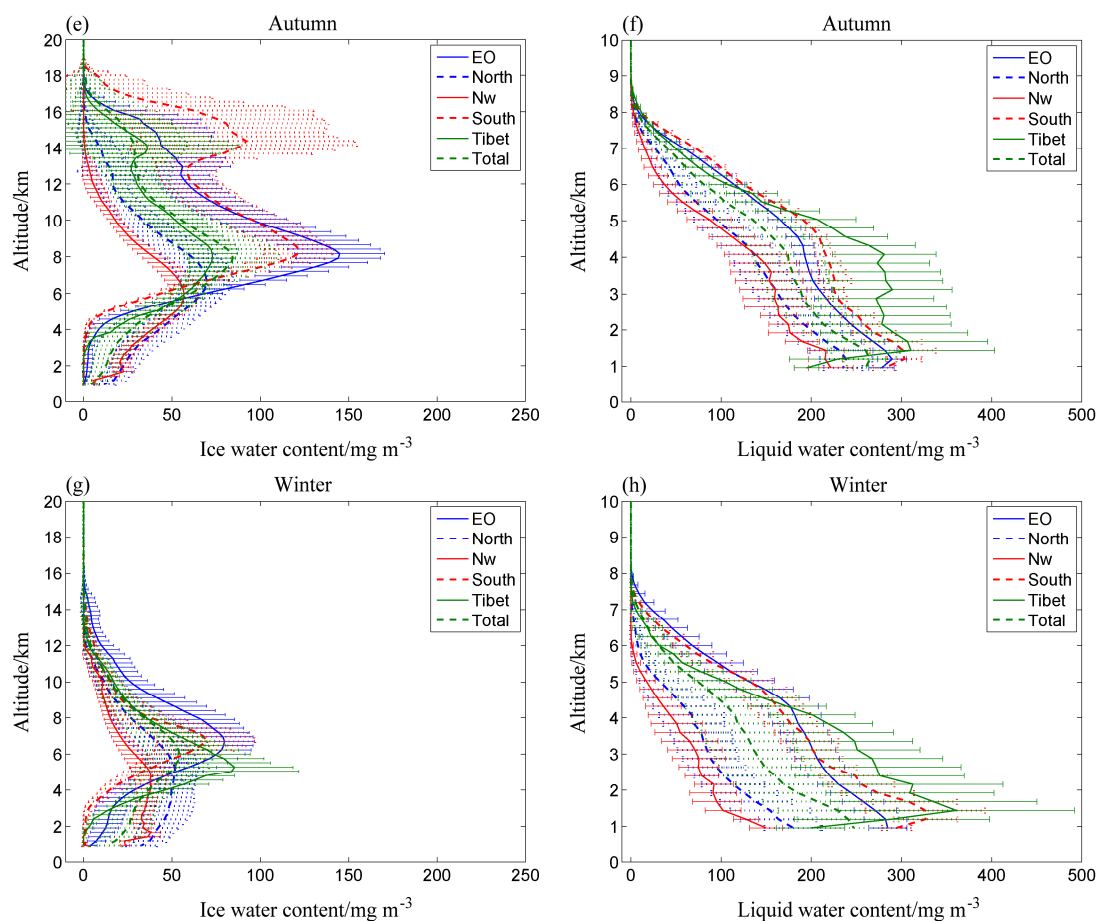


图2 (续)
Fig. 2 (Continued)

15 km 左右, 8 km 处有次大值。冬季最大值所在高度为 5~10 km, 但最大值是四季中最小的, 只有 $20 \sim 50 \text{ L}^{-1}$ 左右, 其中东部海域、北方地区的值最大, 南方地区最小。影响冰云云滴数浓度分布的因素主要是温度和水汽条件, 夏季温度高对流旺盛, 水汽可以输送到较高高度上, 值也较大, 冬季反之。总体来说, 冰云云滴数浓度的值在夏季最大, 冬季最小, 夏季不同地区的最大值在 $80 \sim 150 \text{ L}^{-1}$ 之间, 15 km、10 km 为最高值所在高度, 南方地区最大值可以达到 150 L^{-1} 。冬季最大值在 $20 \sim 50 \text{ L}^{-1}$ 之间, 位于 5~10 km 之间, 值的大小和分布高度在四季中均为最小。

水云云滴数浓度反映了单位体积中水云的云滴个数, 如图 3 右列所示, 水云云滴数浓度的值分布在 9 km 以下, 范围小于 80 cm^{-3} , 夏季值分布的高度范围比其他季节大。除青藏高原地区夏季垂直

廓线的最大值在 4 km 左右外, 其他区域的最大值位于 1~2 km 的高度上。南方地区廓线峰值在四季基本都在 79 cm^{-3} 左右; 东部海域在春、夏、秋季的峰值最大, 达到 79 cm^{-3} 左右, 冬季的峰值略小, 为 75 cm^{-3} 左右; 青藏高原地区、西北地区、北方地区的峰值最大值均出现在夏季, 均为 75 cm^{-3} 左右, 最小值均出现在冬季, 分别为 68 、 48 、 48 cm^{-3} 。总的来说, 在夏季东亚各个区域上水云云滴数浓度的值差异较小, 冬季较大; 垂直廓线的峰值在夏季较大, 冬季较小。

3.4 东亚地区云滴有效半径的垂直分布及其季节变化

云滴有效半径反映了云粒子的平均有效尺度, 它可以影响云层的散射特性。对于给定的液态水含量或冰水含量而言, 具有较小的水云有效半径或冰云有效半径值的云将反/散射较多的太阳辐射

(Liou, 2004)。

图 4 左列给出不同区域内冰云有效半径的垂直廓线及其季节变化（误差棒表示各高度上的标准差）。发现，冰云有效半径的值基本在 $90\ \mu\text{m}$ 以下，分布在 $20\ \text{km}$ 高度以下， $5\ \text{km}$ 左右为最大值出现的高度， $5\ \text{km}$ 以上及以下的值均逐渐减小。整体来说，四季中夏季的值最大，春秋次之，冬季最小，最大值出现的高度同样为夏季最高，冬季最低。原因是夏季水汽条件充足，使得最大值在四个季节中也最大，然而较高的温度导致冰云形成的高度比其他季节高，特别是在 $5\ \text{km}$ 以下所有地区的值均较小。北方地区、西北地区的最高值所在高度比其他地区略低，其中冬季的差异最大。说明在 $5\ \text{km}$ 以下同一高度上北方地区和西北地区冰云有效半径的值偏大，原因之一是越接近地面，冰云出现的纬度越高，这两个地区位置偏北，受温度影响更容易形成冰云，冰晶尺度也较大。

图 4 右列为水云有效半径的垂直分布情况，误差棒表示各高度上的标准差，可以看出，水云有效半径的值分布在 $10\ \text{km}$ 以下，不同季节的最大高度有所差异，夏季最高，最大高度为 $9.5\ \text{km}$ ，冬季最低，为 $8.5\ \text{km}$ 。有效半径的大小在 $12\ \mu\text{m}$ 以下。除了青藏高原地区在春、秋、冬季的最大值在 $5\ \text{km}$ 左右外，东亚各区域内水云有效半径的最大值基本位于 $1\sim 2\ \text{km}$ ，最大值在 $10\sim 12\ \mu\text{m}$ 之间。在夏季各区域间的差异最小，在 $7\ \text{km}$ 以下的值随高度变化较小，春秋两季在 $5\ \text{km}$ 以下的值随高度变化较小，冬季在 $3\ \text{km}$ 以下变化较小。南方地区、东部海域的值比北方地区、西北地区的值大，原因是南方地区、东部海域处于东亚季风区，靠近洋面，水汽比较充足，越接近地面水汽含量越大，更容易形成水云，云滴的含水量也大。夏季 $7\sim 9\ \text{km}$ 高度上水云有效半径的值也较高，可以达到 $10\ \mu\text{m}$ 以上，说明夏季下垫面蒸发量较大，

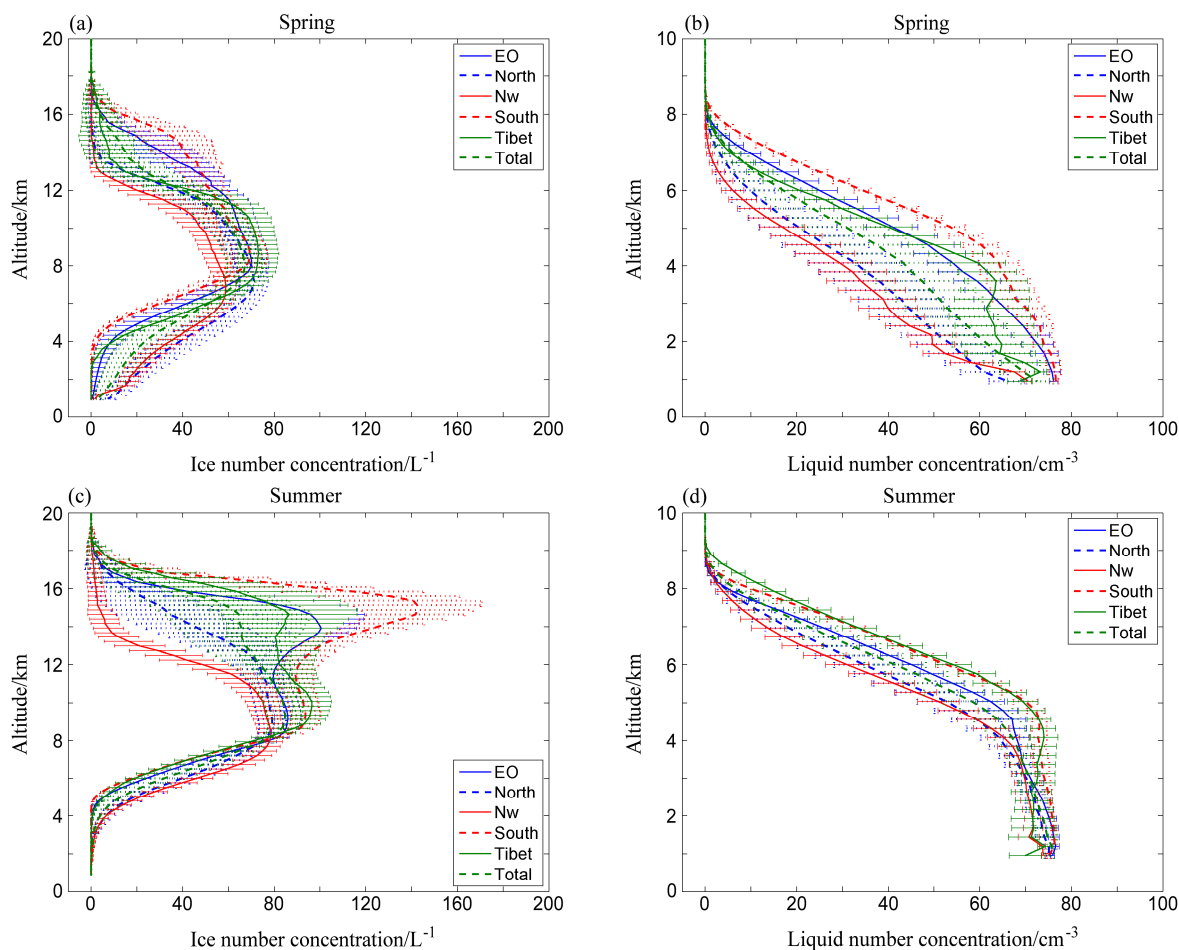


图 3 不同区域内冰云云滴数浓度（左列，单位： L^{-1} ）、水云云滴数浓度（右列，单位： cm^{-3} ）垂直分布的季节变化：（a、b）春季；（c、d）夏季；（e、f）秋季；（g、h）冬季

Fig. 3 The same as Fig.2, but for ice (liquid) number concentrations

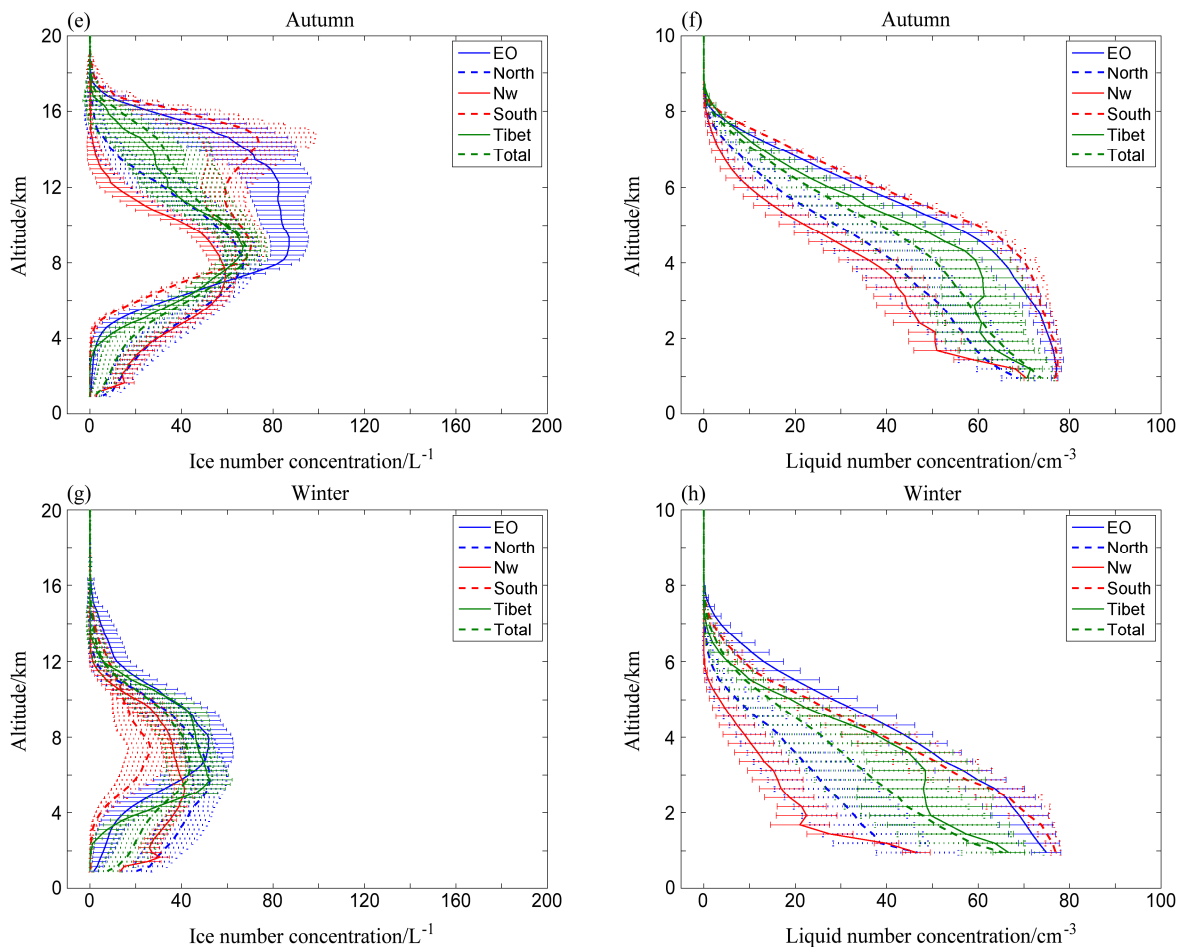


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

对流旺盛,气流可以把充足的水汽输送到较高的高度上。

3.5 东亚地区云微物理量的概率分布函数(PDF)及其季节变化

图 5a-b 是东亚地区所有高度上冰水含量和液态水含量的 PDF 分布图。从图中可以看出,冰水含量的范围大部分在 200 mg m^{-3} 以下,其中 80% 左右的值都分布在 100 mg m^{-3} 以下,随着冰水含量值的增加,分布概率逐渐减小。从季节变化来看,在 50 mg m^{-3} 以下冬季冰水含量值的分布概率最高,夏季最低,而在 50 mg m^{-3} 以上夏季分布概率最高,冬季最低;春、夏、秋、冬四季冰水含量在 10 mg m^{-3} 以下的分布概率分别达到 0.16、0.14、0.17、0.26。

液态水含量的范围比冰水含量大,大部分的值分布在 800 mg m^{-3} 以下,其中 90% 的值在 300 mg m^{-3} 以下。除冬季以外,分布概率曲线呈现两个峰值,分别位于 50 mg m^{-3} 以下以及 $150 \sim 200 \text{ mg m}^{-3}$ 之

间,在 200 mg m^{-3} 以上随着液态水含量的增大分布概率逐渐减小,冬季只有 50 mg m^{-3} 以下的分布概率最大。从季节变化来看,冬季分布概率的最大值在 50 mg m^{-3} 以下,夏季最大值在 $150 \sim 200 \text{ mg m}^{-3}$ 之间;春、夏、秋、冬四季液态水含量在 50 mg m^{-3} 以下的分布概率分别为 0.26、0.17、0.24、0.31,在 $150 \sim 200 \text{ mg m}^{-3}$ 之间的概率分别为 0.16、0.27、0.15、0.11。总体来看,冬季分布概率较高的液态水含量的值较小,夏季较大。

图 5c-d 为冰云和水云云滴数浓度的 PDF 分布图。可以看出,冰云云滴数浓度的范围大部分在 200 L^{-1} 以下,其中冬季为 100 L^{-1} 以下。最大分布概率呈现两个峰值,一个峰值出现在 10 L^{-1} 以下,春、夏、秋、冬四季的概率分别为 0.15、0.16、0.16、0.24;另一个峰值在不同季节的分布区间有所差异,春、夏、秋、冬的最大分布概率所在的云滴数浓度值的区间分别为 $50 \sim 60$ 、 $70 \sim 80$ 、 $50 \sim 60$ 、 $30 \sim 40$

L^{-1} , 最大分布概率分别为 0.15、0.12、0.13、0.18。

水云云滴数浓度的值基本在 90 cm^{-3} 以下, 分布函数同样呈现双峰型。一个峰值出现在 5 cm^{-3} 以下, 春、夏、秋、冬四季的概率分别为 0.17、0.1、0.14、0.21; 另一个峰值在夏季出现在 $70 \sim 75 \text{ cm}^{-3}$, 春、秋、冬季节在 $75 \sim 80 \text{ cm}^{-3}$, 四季的概率依次为 0.09、0.18、0.13、0.07。

图 5e-f 是冰云有效半径和水云有效半径的 PDF 分布图。从图中可见, 冰云有效半径的值基本分布在 $100 \text{ }\mu\text{m}$ 以下, $40 \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$ 的值占到 80% 左右, 最大分布概率在 $50 \sim 80 \text{ }\mu\text{m}$ 之间, $10 \sim 20 \text{ }\mu\text{m}$ 有另一个弱的峰值。四个季节最大分布概率的冰云有效半径值的区间有所不同, 春、夏、秋季分布概率最高的区间均集中在 $70 \sim 80 \text{ }\mu\text{m}$, 冬季集中在 $50 \sim 60 \text{ }\mu\text{m}$, 最大概率在春、夏、秋、冬季节分别为 0.18、0.16、0.18、0.2。

水云有效半径的值大部分在 $20 \text{ }\mu\text{m}$ 以下, $9 \sim$

$12 \text{ }\mu\text{m}$ 范围内的分布概率较高, 最大分布概率发生在 $10 \sim 11 \text{ }\mu\text{m}$ 。春、夏、秋、冬四季分布概率最大的区间均为 $10 \sim 11 \text{ }\mu\text{m}$, 分别达到 0.36、0.4、0.38、0.33。

4 结论

本文利用整 4 年 CloudSat 卫星资料对云的微物理特征量 (云中液态水/冰水含量、液态水/冰水路径、云滴数浓度、云滴有效半径等) 在东亚地区的分布情况和季节变化进行了统计分析, 并将东亚地区划分为 5 个区域进行了详细的研究, 得到以下结论:

(1) 东亚地区冰水路径值的范围在 700 g m^{-2} 以下, 受水汽条件的影响, 夏秋两季的值较高, 高值区分布在北纬 40 度以南区域, 夏季最大值达到 400 g m^{-2} 以上。液态水路径的范围在 600 g m^{-2} 以下, 夏季和冬季的值较大, 春季较小, 夏季高值区

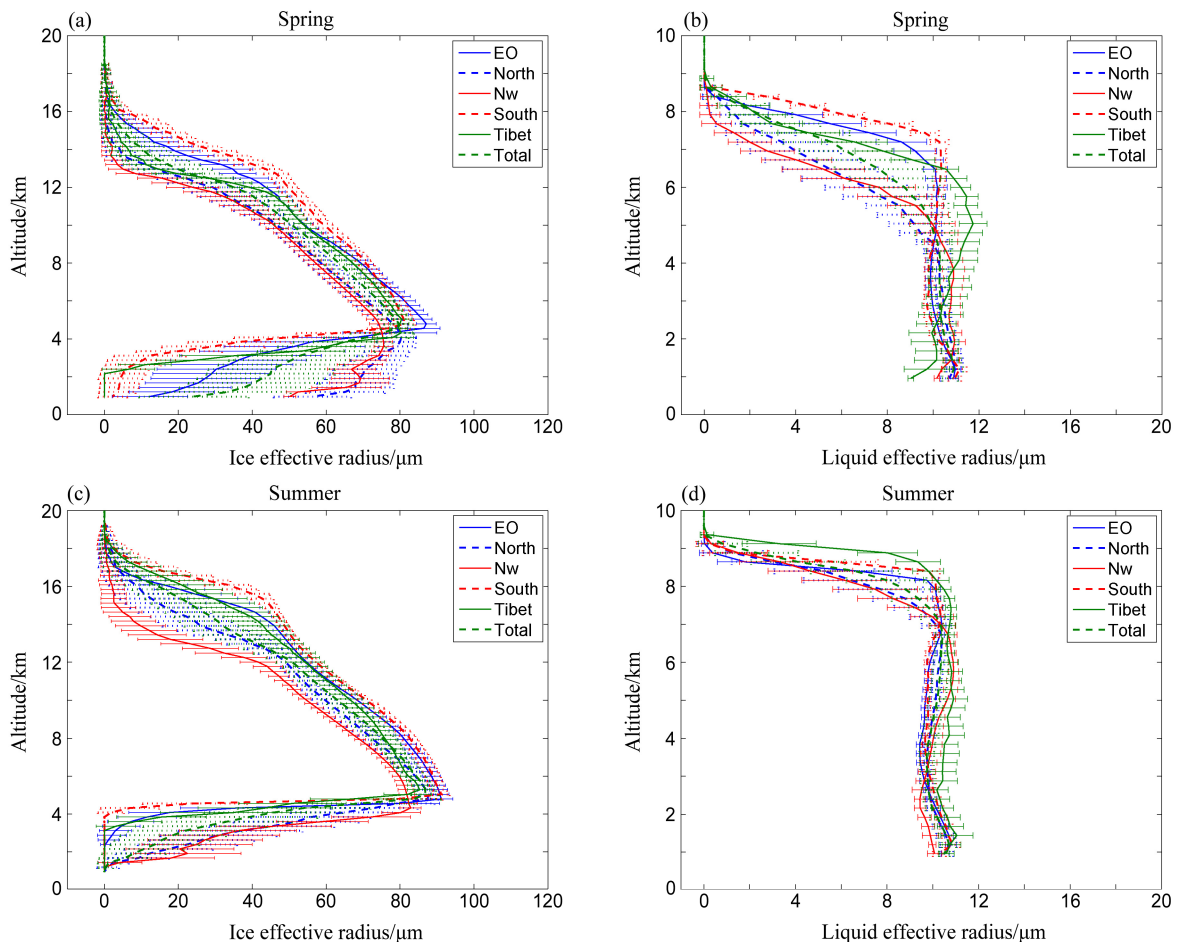


图 4 不同区域内冰云有效半径 (左列)、水云有效半径 (右列) 垂直分布 (单位: μm) 的季节变化: (a、b) 春季; (c、d) 夏季; (e、f) 秋季; (g、h) 冬季

Fig. 4 The same as Fig. 2, but for ice (liquid) effective radius

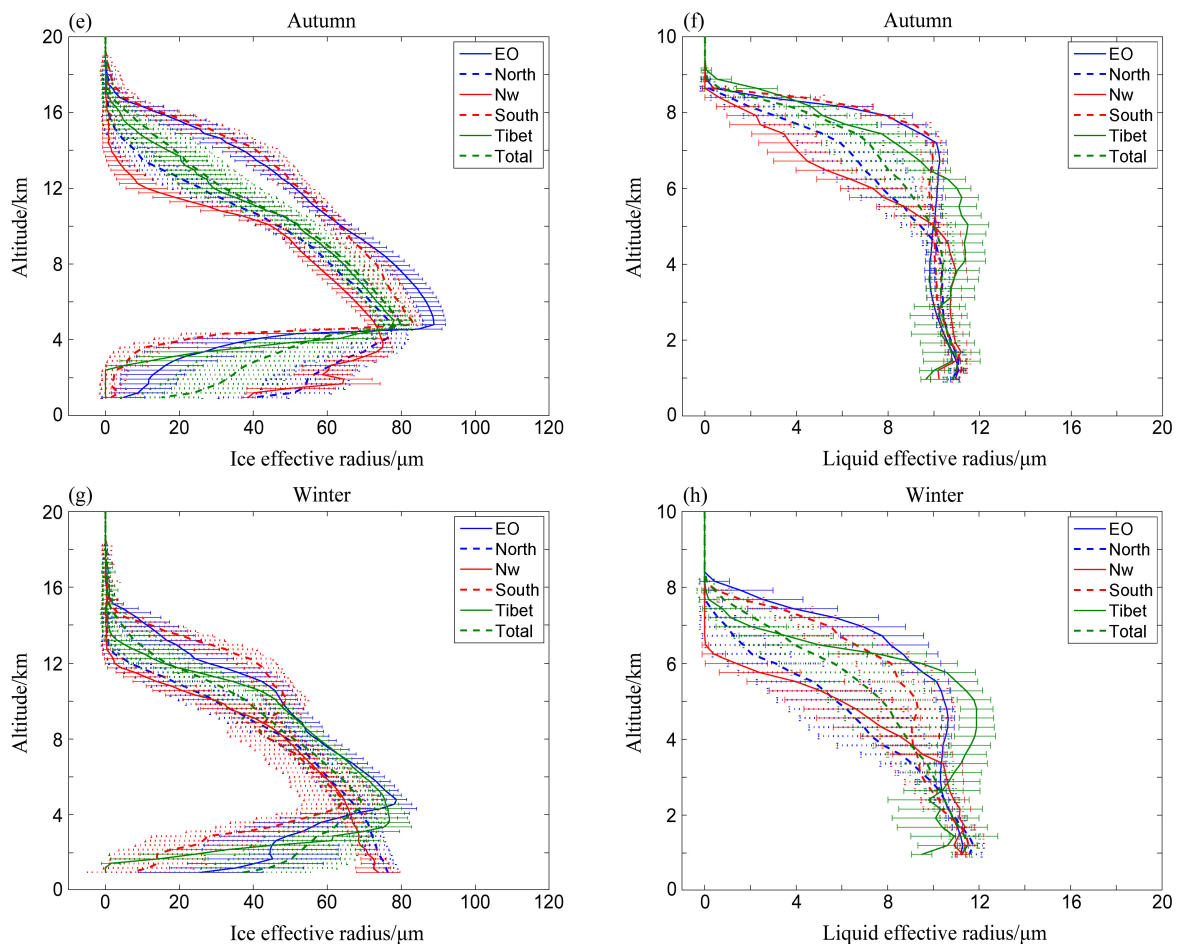


图4 (续)
Fig. 4 (Continued)

分布在青藏高原南侧上空, 冬季集中在东部海域, 最大值达到 400 g m^{-2} 以上。冰水路径的平均值在南方地区的夏季最大, 为 394.3 g m^{-2} , 西北地区冬季最小, 为 78.5 g m^{-2} , 南方地区的季节差异最大, 西北地区差异最小。液态水路径的值整体来说在夏季最大, 基本在 600 g m^{-2} 以下, 冬季在东部海域的值最大, 达到 300.8 g m^{-2} , 夏季最大值为 281.5 g m^{-2} , 分布在南方地区上空, 季节差异最大的是西北地区, 最小的是南方地区。

(2) 冰水含量在不同高度上的值的范围在 170 mg m^{-3} 以下, 最高值在 8 km 附近, 四个季节的值从大到小依次为夏季、秋季、春季、冬季; 南方地区、东部海域和青藏高原地区的值比其他区域大, 青藏高原地区的季节差异较大。液态水含量的范围小于 360 mg m^{-3} , 垂直廓线的峰值在夏季较大, 冬季较小, 峰值位于 $1 \sim 2 \text{ km}$ 高度上。

(3) 冰云云滴数浓度的范围在 150 L^{-1} 以下,

最大值集中在 8 km 左右, 夏季的值最大, 冬季最小。水云云滴数浓度的值分布在 9 km 以下, 范围小于 80 cm^{-3} , 最大值位于 $1 \sim 2 \text{ km}$ 高度上, 在夏季各个区域上水云云滴数浓度的值差异较小, 冬季较大; 垂直廓线的峰值在夏季较大, 冬季较小。

(4) 冰云有效半径的值在 $90 \mu\text{m}$ 以下, 5 km 左右为最大值所在高度, 四季中夏季的值最大, 冬季最小, 不同区域的差异不大。水云有效半径的值分布在 10 km 以下, 除了青藏高原地区在春、秋、冬季的最大值在 5 km 左右外, 东亚各区域的最大值基本位于 $1 \sim 2 \text{ km}$, 最大值在 $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 之间。

(5) 从 PDF 分布来看, 冰水含量 80% 左右的值都分布在 100 mg m^{-3} 以下, 随着冰水含量值的增加, 分布概率逐渐减小; 液态水含量 90% 的值在 300 mg m^{-3} 以下, 除冬季以外, 分布概率曲线呈现两个峰值, 分别位于 50 mg m^{-3} 以下以及 $150 \sim 200 \text{ mg m}^{-3}$ 之间。冰云云滴数浓度的范围大部分在 200

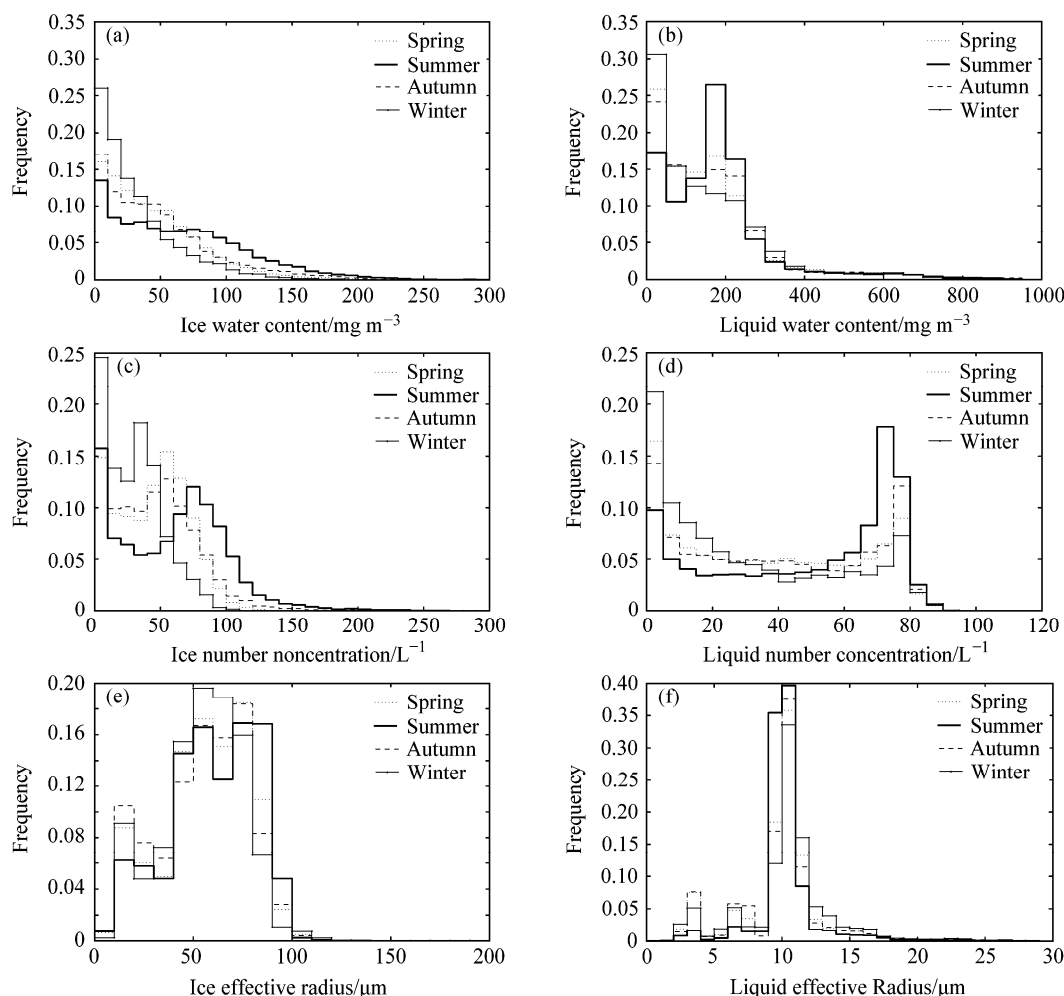


图5 东亚地区云微物理量概率分布函数(PDF)的季节变化:(a、b)冰水、液态水含量;(c、d)冰云、水云云滴数浓度;(e、f)冰云、水云有效半径

Fig. 5 The seasonal changes of the probability distribution function of cloud microphysical properties in East Asia: (a, b) IWC and LWC, (c, d) ice and liquid number concentrations, (e, f) ice and liquid effective radius

L^{-1} 以下, 水云云滴数浓度的值基本在 $90 L^{-1}$ 以下, 最大分布概率均呈现双峰型, 其中水云云滴数浓度两个峰值的间隔比冰云云滴数浓度大。冰云有效半径在 $40 \sim 90 \mu m$ 的值占到 80% 左右, 水云有效半径在 $9 \sim 12 \mu m$ 范围内的分布概率较高, 都为单峰型分布。

本研究充分利用了 CloudSat 资料高垂直分辨率的优势, 给出了主要的云微物理量在东亚不同区域和高度上的分布特征及其季节变化规律, 为气候模式在该地区精确描云的微物理分布特征提供了可供参考的观测依据。需要说明的是, 本文只给出用 CloudSat 卫星资料得到的云的微物理量在东亚地区的分布特征, 目前还没有可以获得的东亚地区

多年的相应的观测资料进行对比验证, 这是今后需要加强开展的研究方向。

致谢 感谢匿名评审专家和终审专家对本文的指正和给予的非常有帮助的建议和意见。

参考文献 (References)

- Austin R T. 2007. Level 2B radar-only cloud water content (2B-CWC-RO) process description document [R]. CloudSat project report.
- Chen Y H, Peng K J, Huang J P, et al. 2010. Seasonal and regional variability of cloud liquid water path in northwestern China derived from MODIS/CERES observations [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 31 (4): 1037–1042.
- 傅云飞, 宇如聪, 崔春光, 等. 2007. 基于热带测雨卫星探测的东亚降水云结构特征的研究 [J]. *暴雨灾害*, 26 (1): 9–20.
- Fu Yunfei, Yu Rucong, Cui Chunguang, et al. 2007. The structure characteristics of

- precipitating clouds over the East Asia based on TRMM measurements [J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 26 (1): 9–20.
- 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 2005. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (3): 360–368. Huang Mengyu, Zhao Chunsheng, Zhou Guangqiang, et al. 2005. Stratus cloud microphysical characters over North China region and the relationship between aerosols and clouds [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 28 (3): 360–368.
- Hughes N A. 1984. Global cloud climatologies: A historical review [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (5): 724–751.
- 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 Jiming, Huang Jianping, Yi Yuhong, et al. 2009. Analysis of vertical distribution of cloud in East Asia by space-based LiDAR data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (4): 698–707.
- Liou K N. 2004. 大气辐射导论 [M]. 北京: 气象出版社. Liou K N. 2004. *An Introduction to Atmospheric Radiation* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 2004. 中国云气候特征的分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (4): 468–476. Liu Ruixia, Liu Yujie, Du Bingyu. 2004. Cloud climatology characteristics of China from ISCCP data [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 15 (4): 468–476.
- Liu Q, Fu Y F, Yu R C, et al. 2008. A new satellite-based census of precipitating and nonprecipitating clouds over the tropics and subtropics [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (7), doi: 10.1029/2008GL033208.
- 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.
- 彭杰, 沈新勇, 王志立, 等. 2010. 中国地区云的观测研究进展 [J]. *安徽农业科学*, 38 (24): 13070–13073. Peng Jie, Shen Xinyong, Wang Zhili, et al. 2010. Overview of observational researches on clouds over China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (in Chinese), 38 (24): 13070–13073.
- 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 Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (1): 91–100.
- Peng J, Zhang H, Li Z Q. 2014. Temporal and spatial variations of global deep cloud systems based on CloudSat and CALIPSO satellite observations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (3): 593–603.
- Protat A, Delanoë J, O'Connor E J, et al. 2010. The evaluation of CloudSat and CALIPSO ice microphysical products using ground-based cloud radar and lidar observations [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 27 (5): 793–810.
- 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]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Shang Bo. 2011. Research on vertical structure of cloud and precipitation feature of CloudSat data in Huabei and Jianghuai [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 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, D00A18, doi: 10.1029/2008JD009982.
- Wang C C, Chen G T J, Carbone R E. 2004. A climatology of warm-season cloud patterns over East Asia based on GMS infrared brightness temperature observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (7): 1606–1629.
- 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 Hui, Luo Yali, Zhang Renhe. 2011. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian monsoon regions and the Tibetan Plateau region using CloudSat/CALIPSO data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (6): 1117–1131.
- 吴润, 刘佳. 2011. 近二十年全球变暖背景下东亚地区云量变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (4): 551–559. Wu Jian, Liu Jia. 2011. Trend of cloud amount in East Asia under the backdrop of global warming in the past 20 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 27 (4): 551–559.
- 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 Dasheng, Wang Pucai. 2012. Characteristics of vertical distributions of cloud water contents over China during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 89–101.
- 杨冰韵, 张华, 彭杰, 等. 2014. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征 [J]. *高原气象*, 33 (4): 1105–1118. Yang Bingyun, Zhang Hua, Peng Jie, et al. 2014. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 33 (4): 1105–1118.
- Zhang H, Peng J, Jing X W, et al. 2013. The features of cloud overlapping in eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 56 (5): 737–747, doi: 10.1007/s11430-012-4489-x.
- 张华, 彭杰, 荆现文, 等. 2013. 东亚地区云的垂直重叠特性及其对云辐射强迫的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 43 (4): 523–535. Zhang Hua, Peng Jie, Jing Xianwen, et al. 2013. The features of cloud overlapping in eastern Asia and their effect on cloud radiative forcing [J]. *Science China: Earth Sciences*, 56 (5): 737–747.
- 赵柏林, 彭欣荣, 朱元竞. 1994. 卫星遥感东亚地区云辐射与气候 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 30 (3): 361–374. Zhao Bolin, Peng Xinrong, Zhu Yuanjing. 1994. Satellite observation of cloud radiation on climate in East Asia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis* (in Chinese), 30 (3): 361–374.
- 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 Yuquan, Zhao Shuhui. 2008. CloudSat satellite and its application in weather and cloud observation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31 (5): 603–614.