

霍娟. 2015. 基于 CloudSat/CALIPSO 资料的海陆上空云的物理属性分析 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 30–40, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13188. Huo Juan. 2015. Physical properties of mid-level clouds based on CloudSat/CALIPSO data over land and sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 30–40.

基于 CloudSat/CALIPSO 资料的海陆上空 中云的物理属性分析

霍娟

中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开发重点实验室, 北京 100029

摘要 利用 CloudSat 和 CALIPSO 卫星云产品数据分析了 2007 年 1 月至 2010 年 12 月中国华北 (陆地 A1)、日本海 (近海 A2) 和太平洋地区 (远海 A3) 的中云 (高积云 Ac 和高层云 As) 分布特征。3 个地区全年中云平均发生概率近 1/3, As 的发生概率高于 Ac。As 高度主要位于 4~8 km, Ac 则集中于高度 3.5~5.5 km 范围, 中云垂直及水平尺度从陆地到深海逐步增加。位于对流层中部的中云其所处位置温度使冰晶和过冷水状态的液态水能够同时存在。统计结果表明 As 中冰态粒子含量占绝大多数, Ac 中液态和冰态各占比例彼此相当。As 与 Ac 中 IER (冰晶有效粒子半径) 分布与高度均呈负相关关系, IER 谱分布主要范围为 35~80 μm 。As 中 LER (液水有效粒子半径) 与高度呈正相关特征, 但 Ac 中这一特征明显减弱, Ac 及 As 中 LER 主要分布范围为 5~15 μm 。As 及 Ac 中 IWC 及 LWC 谱分布比较分散, 与高度之间的相关性亦不明显。

关键词 CloudSat 资料 CALIPSO 资料 高层云 高积云 物理属性

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0030-11

中图分类号 P401

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13188

Physical Properties of Mid-Level Clouds Based on CloudSat/CALIPSO Data over Land and Sea

HUO Juan

Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029

Abstract There has been relatively less research on the physical properties of mid-level clouds. In this study, the CloudSat and CALIPSO satellite cloud data from Jan 2007 to Dec 2010 for the North China (area A1), Sea of Japan (area A2), and the Pacific (area A3) was used to analyze the physical characteristics of mid-level clouds (As and Ac). The occurrences of middle level clouds are around 1/3 over all the three areas. The As occurs higher (4–8 km) than the Ac (3.5–5.5 km). The average size of mid-level clouds increases from land to sea. Temperature in the middle troposphere supports the condition for mid-level clouds to contain both ice and supercooled liquid particles. Our statistical results indicate that ice particles dominate in As, while the proportions of liquid and ice particles are similar in Ac. The IER (Ice Effective Radius) of As and Ac varied from 35 to 80 μm and the height and IER of As and Ac ice particles were negatively correlated. The LER (Liquid Effective Radius) of As is highly positively correlated with height, but this correlation is weakened in Ac. The LER values in Ac and As mainly range between 5–15 μm . The IWC and LWC of As and Ac show no obvious correlation with height.

Keywords CloudSat data, CALIPSO data, Altostratus, Altocumulus, Physical property

收稿日期 2013-11-06; 网络预出版日期 2014-03-24

资助项目 国家自然科学基金项目 41275040, 中国科学院战略先导碳专项 XDA05040200

作者简介 霍娟, 女, 1977年出生, 博士, 副研究员, 主要从事大气探测与遥感研究。E-mail: huojuan@mail.iap.ac.cn

1 引言

云有自身热辐射, 另外吸收或散射太阳短波辐射、地面长波辐射, 调节并影响地气系统辐射能量分配, 因而对全球气候产生重要影响 (Liou, 1986; Albrecht, 1989; Cess et al., 1989; Ramanathan et al., 1989; Harrison et al., 1990)。云的分布多样而复杂, 云因所处高度位置、云内粒子相态分布、粒子大小、粒子数浓度等不同对短波 (可见) 及长波 (红外) 波段的辐射效应不同, 在地气辐射传输中所起的作用并不相同。例如, 由冰晶粒子组成的卷云处在对流层上部, 对太阳短波入射辐射影响相对较小, 但能吸收来自地面的长波辐射, 在地气系统辐射收支中主要起增温作用, 而其他类型的云则主要起辐射降温作用 (Platt, 1979; Hartmann et al., 1992; Segal and Davis, 1992; Liou, 2002; Stephens, 2005)。受探测能力的限制, 目前人们对云光学物理特性的了解尚不完全, 在气候模式开发与研究中关于云特征参数的描述亦无法准确和细致, 因此云的辐射效应计算和模拟结果有很大不确定性 (Wilson and Mitchell, 1986; Wetherald and Manabe, 1988; Treut et al., 2007)。研究并深入了解自然界中各类云的物理结构特征和分布特征是全球天气及气候研究的基本和重要方面。

中云主要位于对流层中部, 所处高度一般比卷云 (高云) 低而比积云和层云 (低云) 高。一方面, 过冷云在大气中经常出现, 试验已经证实半径 $5\ \mu\text{m}$ 的纯净小水滴, 有可能过冷却到 $-40\ ^\circ\text{C}$ 左右而未冻结 (Mason, 1971)。另一方面, 当与空气中悬浮的冰核粒子作用时, 这些水滴能够在远高于 $-40\ ^\circ\text{C}$ 温度条件下形成冰晶。中云因所处特殊位置关系, 常常同时包含水云和冰云两种相态, 而其中水云与冰云含量的多少与环境温度、气压、凝结核分布, 外环境辐射和大气运动变化等因素密切相关 (Zhang et al., 2010)。相对其他云属, 针对中云属性特征分析的研究相对较少, 中云在地气辐射系统中的作用及程度估算的研究开展亦不多。全球气候模式研究中关于中云在地气辐射中的作用相比其他云类研究少, 中云云粒子相态分布的复杂和多样可能是其中原因之一 (Zhang et al., 2005)。因此研究和了解中云宏观、微观物理时空变化特征, 是对云分布特性相关研究工作的一个补充 (杨大生和王

普才, 2012), 该工作可应用于开展中云相关的辐射效应研究, 如三维辐射传输模式中云场构建云参数输入, 为气候模式典型地区中云参数的使用提供依据和参考。

2 数据

CALIPSO (the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 上搭载的双波段云—气溶胶正交偏振激光雷达 CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization), 探测云和气溶胶的后向散射系数和极化率廓线 (Winker et al., 2007)。CloudSat 上搭载一部 W 波段 (94 GHz) 毫米波云廓线雷达 (Cloud Profiling Radar, CPR), 可探测对流层内绝大部分云的垂直结构信息 (Stephens et al., 2002)。CALIOP 与 CPR 的观测波长不同, 对云粒子的探测敏感性不同。CALIOP 激光雷达探测波长短 (如绿波段 green, $0.532\ \text{mm}$), 对云粒子包括气溶胶粒子非常敏感, 但是由于波长短经过云层造成的衰减亦很强, 因此仅能探测相对较薄的云层, 而无法穿透相对较厚的云层。CPR 的波长相对较长 ($3.2\ \text{mm}$), 能够穿透相对较厚的云层并能探测多层云。但是, 因为探测波长的关系 CPR 对尺度相对较大的粒子较敏感而对探测相对较小粒子有局限, 例如可能会漏测中云里尺度相对较小的过冷水云、含量相对较少的冰云 (Delanoë and Hogan, 2010; Chan and Comiso, 2011)。因此, CALIOP 和 CPR 的探测能力各有优势, 联合使用二者探测数据能更准确了解云的特征属性。

CloudSat 发布的 2B-CLDCLASS-LIDAR 产品, 即云分类产品 (algorithm version 1.0, <http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/dataIssues.php?prodid=12> [2014-01-20]) 是基于 CALIOP 与 CPR 探测的回波数据, 以及 A-train 系列卫星数据, 如 AQUA 提供的其他辅助数据 (MODIS), 通过分析有无降水、云底高度 (H_{base})、云层厚度 (T_c)、云顶高度 (H_{top})、云顶温度、雷达反射率因子 (radar reflectivity factor, Z_e) 等参数将探测到的云层归为 8 个不同类别, 分别是层云 (St)、层积云 (Sc)、积云 (Cu)、雨层云 (Nb)、高积云 (Ac)、高层云 (As)、深对流云 (deep convective) 以及高云 (high cloud)。

根据 2B-CLDCLASS-LIDAR 云分类结果, 分别对高积云和高层云开展物理结构特征分析。分析

所用数据包括 CloudSat 的冰云属性产品 (2C-ICE product version 000)、水云属性产品 (2B-CWC-RVOD product version 008)。CALIPSO 运用激光雷达衰减后向散射系数 (attenuated backscattering coefficient, β')、退偏振比 (depolarization ratio, δ) 再结合云场温度来区分云粒子相态 (Hu et al., 2009; Avery et al., 2012)。CloudSat 针对云体温度设置温度阈值来确定云相态, 如云体温度 $>0^\circ\text{C}$ 的云层定为水云, 云体温度 $<-20^\circ\text{C}$ 的云层定为冰云, 云体温度介于二者之间的为水云与冰云的混合。2C-ICE 产品是集成了 CALIOP 和 CPR 的探测优势、基于 Z_e 和 β' 值反演出的冰云属性产品, 该产品包括冰水含量 (Ice Water Content, IWC)、冰晶有效粒子半径 (Ice Effective Radius, IER) 和消光系数。IWC、IER 反演算法基本原理是根据地基雷达观测经验, 依据探测到的 Z_e 和 β' 值预先设立 IWC、IER 先验值, 根据此先验值再由雷达方程计算 Z_e' 以及 β'' 值, 并与实测 Z_e 以及 β' 比对, 迭代计算直至收敛获得最接近实测 Z_e 以及 β' 的那组 IWC、IER (Delanoë and Hogan, 2008; Deng et al., 2010)。2B-CWC-RVOD 产品则提供水云微物理属性如云水含量 (Liquid Water Content, LWC)、液水有效粒子半径 (Liquid Effective Radius, LER) 等。云光学厚度反演、水云的云水含量和有效粒子半径反演算法原理与冰晶粒子的相对属性反演方法类似, 建立先验值而后迭代计算并与实测值比较, 获得最佳匹配值。云产品数据分辨率: 2.5 km (沿轨) $\times 1.4\text{ km}$ (跨轨), 垂直分辨率 240 m 。

本文选取具有相同纬度但不同经度的 3 个区域开展中云属性及对比分析, 其地理位置见图 1, 区域尺度完全相同 [5° (纬度) $\times 5^\circ$ (经度)]。A1 区 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $113^\circ\text{E}\sim 118^\circ\text{E}$), 文中称其为陆地地区, 位于中国华北地区, 北京市包含其中, 下垫面陆地为主, 其中包含非常小水面区域, 该地区西北地形高 (山脉及高原), 东南地形低。A2 区 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $131^\circ\text{E}\sim 136^\circ\text{E}$), 文中亦称之为近海区, 位于日本海地区内, 西临亚欧大陆, 东依日本岛, 属温带海洋性季风气候。A3 区 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $151^\circ\text{E}\sim 156^\circ\text{E}$) 则位于太平洋内, 远离大陆。3 个地区处于同一纬度, 入射太阳辐射大致相当, A1 区地形最复杂, 且人类活动影响最大, A3 区相对而言远离大陆直接受到的人类活动影响相对最小, A2 区则介于二者之间。通过运用 2007 年 1 月至 2010 年 12

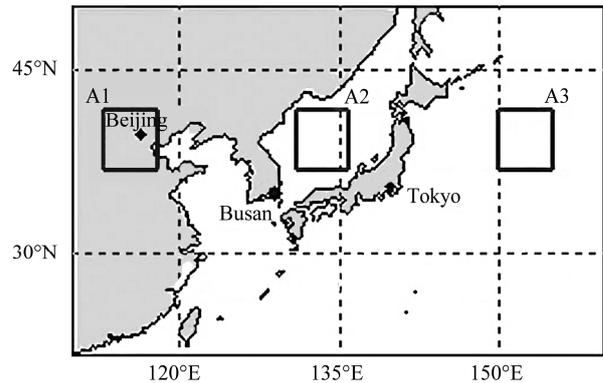


图 1 陆地[A1 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $113^\circ\text{E}\sim 118^\circ\text{E}$)], 近海[A2 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $131^\circ\text{E}\sim 136^\circ\text{E}$)], 远海[A3 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $151^\circ\text{E}\sim 156^\circ\text{E}$)] 3 个地区地理位置

Fig. 1 Locations of the three areas: A1 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $113^\circ\text{E}\sim 118^\circ\text{E}$); A2 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $131^\circ\text{E}\sim 136^\circ\text{E}$); A3 ($37^\circ\text{N}\sim 42^\circ\text{N}$, $151^\circ\text{E}\sim 156^\circ\text{E}$)

月共 4 年 CloudSat 和 CALIPSO 云探测数据分析 3 个不同地理环境特征区域中的中云微物理特征进行对比和分析, 可了解陆地及海洋地区云的物理特征分布的差异。

3 典型中云特征分析

首先了解中云的基本物理和垂直结构特征。本节挑选两个具有典型高层云和高积云特征结构的个例进行分析。

3.1 高层云

图 2 中所选个例发生于 2007 年 2 月 24 日深海地区, 该个例水平分布尺度范围较大, 约几百公里, 高度位于 $4.5\sim 10.5\text{ km}$ 范围, 云顶及云底分布相对“平坦”, 云厚约 6 km , 宏观分布上具有高层云典型特征。图 2 中上两图是液水云 LER 和 LWC 的分布情况, 下两图为冰晶云 IER 和 IWC 的分布情况, 冰晶和液水含量均取对数值。由图 2 中对比看到, 该例液水粒子主要集中在云层底部位置, 且厚度较薄, 最大厚度仅有 1 km , 并且由南向北逐步变薄, 直至在廓线中完全消失。液水 LER 值约有 $0.1\sim 13.9\ \mu\text{m}$, 上层高度的 LER 高于下层位置的 LER 值, 云底 LER 值最小。本例中液水含量值集中在 $1\sim 89\text{ mg m}^{-3}$ 。图 2 下两图中冰晶粒子的分布特征足以说明整个高层云中冰晶占绝对主力, 从顶部到底部分布在整个云层中。该个例中 IER 大小范围 $30\sim 113\ \mu\text{m}$, IER 分布有明显的分层结构, 云顶位置 IER 相对较小, 随高度降低该值逐步增加, 接近云底位置

时达到峰值, 位于云底部的冰晶尺度略有降低。该个例高层云水平尺度范围较广, 微物理属性分析中可看到它存在中心区域, 约位于纬度 39.5°N~41°N 范围内, 接近云底部区域内的 IER 以及 IWC 明显高于其他地区。

3.2 高积云

图 3 中所选个例发生于 2008 年 8 月 1 日 A1 区上空, 在卫星扫描路径上出现了两个独立的高积云个体, 距离约 50 km。两个个体水平尺度约 80 km, 高度约 4~8 km, 南侧个例云顶、云底相对“平

坦”, 厚度约 2 km 左右, 北侧个例云顶、云底起伏较大, 厚度约 3.5 km。两个个例中 LER 谱分布相似, 主要在 5~20 μm , LER 没有明显的随高度分层特征。LWC 分布则略有不同, 云顶位置相对较低, 接近云底位置 LWC 值相对偏高, 该个例中 LWC 值 ($1\sim342\text{ mg m}^{-3}$) 明显高于图 2 中的 LWC 值。两云体 IER 值约为 35~110 μm , 云层中部位置的 LER 值相对大些, IER 分层结构不显著。北侧个例的 IWC 值高于南侧个例, 且在云厚相对较大的区间内分别在接近云顶和接近云底位置处出现了高值。

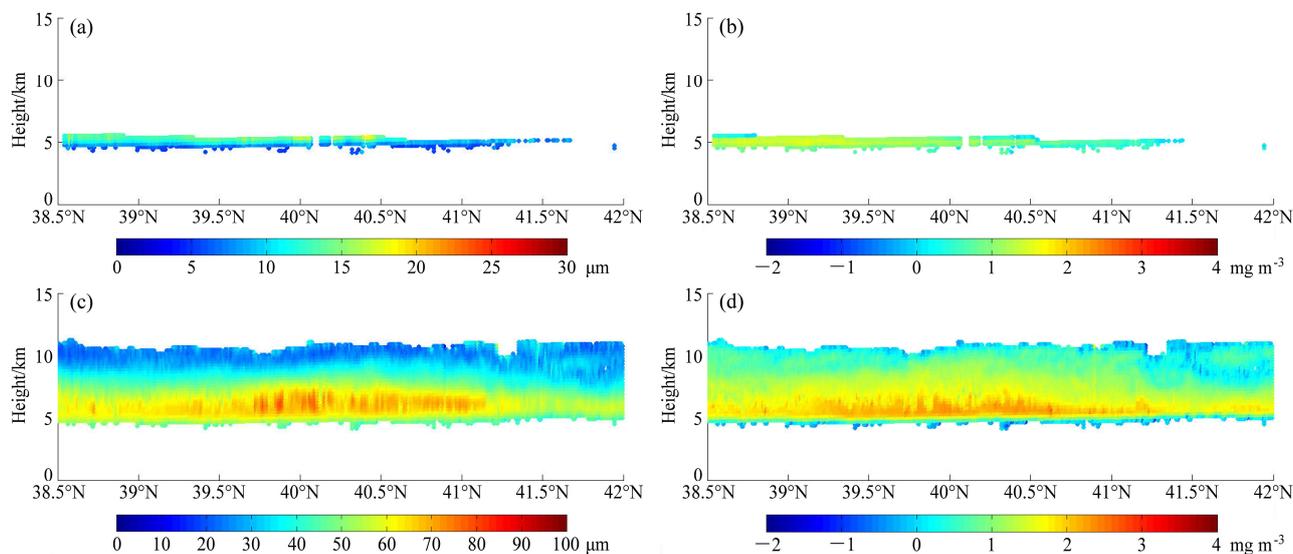


图 2 发生于 2007 年 2 月 24 日 A3 区高层云微物理参数分布: (a) LER; (b) LWC 对数分布; (c) IER; (d) IWC 对数分布

Fig. 2 Physical properties of As case over area A3 on 24 Feb 2007: (a) LER (Liquid Effective Radius); (b) log of LWC (Liquid Water Content); (c) IER (Ice Effective Radius); (d) log of IWC (Ice Water Content)

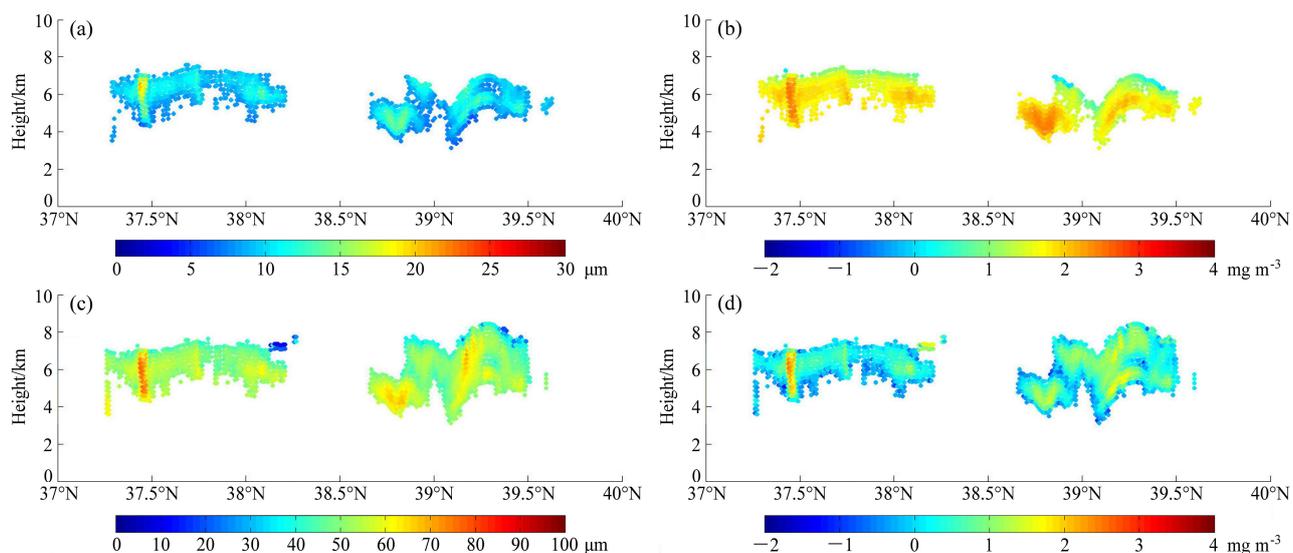


图 3 发生于 2008 年 8 月 1 日 A1 地区高积云微物理参数分布: (a) LER; (b) LWC 对数分布; (c) IER; (d) IWC 对数分布

Fig. 3 Physical properties of Ac case over area A1 on 1 Aug 2008: (a) LER; (b) log of LWC; (c) IER; (d) log of IWC

本节所分析云体个例是两个典型的中云个例，通过分析了解其微物理垂直分布基本特征，下面的章节中针对中云物理属性等时空分布特征进行更详细的分析。

4 宏观属性分布

4.1 云发生率

云的发生情况尤其是不同云种的发生概率一定程度反映地区气候变化特征，该值同时在研究全球及局地辐射能量收支时亦很重要。本文云的总发生率 (P_c) 定义为云廓线总数 (N_c) 与雷达扫描廓线总数 (N_r) 的比值 (Adhikari et al., 2012)，即 $P_c = N_c / N_r \times 100\%$ ；中云的发生率 (P_{ca}) 定义为中云廓线总数 (N_{ca}) 与雷达廓线总数 (N_r) 的比值，即 $P_{ca} = N_{ca} / N_r \times 100\%$ 。

图 4 给出 A1、A2、A3 地区春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月) 及冬 (12、1、2 月) 四季云总发生率以及高积云和高层云的发生率，其中斜条纹柱状图为高积云 (或高层云) 的发生率。因一条雷达扫描廓线中可能会出现多个云层，这几个云层亦可能分属不同的云类，此时若分别计算各类云的发生率，其总和一定大于本文定义的总云发生率 (P_c)，因此图 4a、4b 中无斜纹柱状图概率值不代表除高积云 (高层云) 外其他云类的总发生率。对比图 4a 和图 4b，全年平均来看 As 的平均发生率高于 Ac。但是，As 与 Ac 发生率的季节分布不同，其中 As 春、冬季出现概率相对夏、秋季大且明显大于 Ac，Ac 则是夏、秋季相比春、冬季大，

其发生率与 As 相当或在有些月份略大。3 个地区 P_c 值由陆地向深海地区逐步增大，这一情况在季节分布中亦是如此。中云 (As 及 Ac) 3 个地区的总发生率接近 1/3，分别为：A1 区为 31.6% (其中，As 占 19.9%，Ac 占 11.7%)，A2 区为 29.0% (其中，As 占 18.9%，Ac 占 19.1%)，A3 区为 32.5% (其中，As 占 19.0%，Ac 占 13.5%)。As 与 Ac 各自发生率均低于 20%，3 地区中冬季 Ac 的发生率最低，均低于 5%。

4.2 云底高、云顶高及云厚分布

除云的出现概率对地气辐射有影响外，云体所处位置以及云体自身厚度同样影响着地气系统短波和长波辐射收支与平衡。本节分析 2007~2010 年期间 A1、A2、A3 地区云顶高 (H_{top})，云底高 (H_{base}) 以及云厚 (T_c) 的概率分布情况。这里云顶或云底“高度”是指距离地面的高度而非海拔高度，海上则指距离海面的高度。

图 5 中有条纹柱状图为高积云统计结果，无条纹柱状图为高层云结果，图上同时给出各平均值统计结果的均方差。首先分析高层云的统计结果，图 5 中 3 个地区平均 As 云底高差距不大，集中为 4.3~4.5 km，均方差值亦是约 1.5 km 左右。进一步分析云底高高度分布情况发现，2007~2010 年 As 云底在 1~8 km 高度范围内均有出现，高度分布较为分散。A1 地区的 H_{base} 主要在 4~7 km 范围集中分布，约占 59.2%；A2 地区亦是主要集中在此范围内，其比例约占 58.2%；A3 地区有所不同，主要集中范围有所下降，位于 3~6 km 范围内，约占 60.9%。针对云顶高高度分布情况进行分析发现， H_{top} 分布在

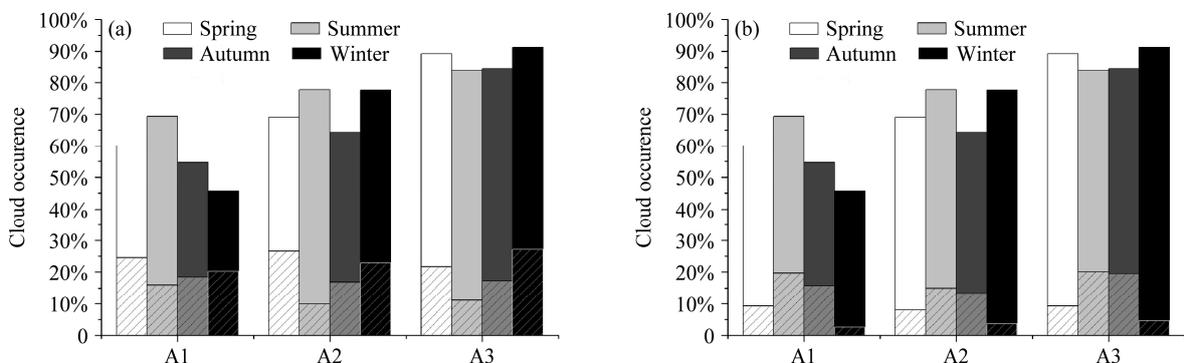


图 4 A1、A2、A3 地区 2007 年 1 月至 2010 年 12 月春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月) 及冬 (12、1、2 月) 四季节中云发生率 (斜条纹柱状图表示) 以及云的总发生率 (斜条纹柱状图+无条纹柱状图): (a) Ac; (b) As

Fig. 4 Cloud occurrence (diagonal stripes histogram and no stripe chart) and middle level cloud occurrence (diagonal stripes histogram) in areas A1, A2, and A3 in Spring (March, April, May), Summer (June, July, August), Autumn (September, October, November), and Winter (December, January, February) from January 2007 to December 2010: (a) As; (b) Ac

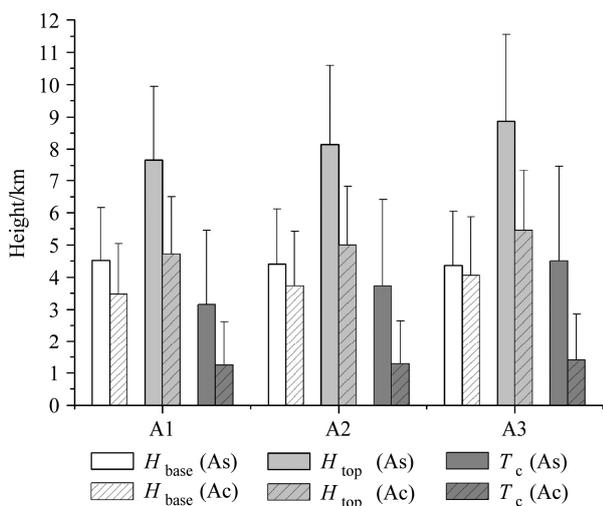


图5 A1、A2、A3 地区中云 H_{base} 、 H_{top} 、 T_c 的统计
Fig. 5 Histogram of H_{base} , H_{top} , and T_c of As and Ac in A1, A2, and A3

3~15 km 范围内, 其中 50% 以上集中在 6~10 km 范围。平均 H_{top} 分布从陆地向深海逐步增加, 其中 A1 地区平均 H_{top} 为 7.67 km, A2 地区为 8.14 km, A3 地区为 8.87 km。另外, H_{top} 均方差大于 2 km, 相比云底高度分布更为分散。As 的平均云厚约为 3~4 km, 海洋高于陆地, 3 个地区平均云厚统计均方差均在 2~3 km, 统计发现最大 As 云厚出现在 A3 区, 达到 14.34 km。

与 As 相比, Ac 3 个地区的平均云底高、平均云顶高、平均云厚以及相应的均方差各值都相对要低。3 个地区平均云底高分布在 3~4 km; 平均云顶高分布于 4.5~5.5 km, 最大云顶高出现在 A2 区为 13.93 km; Ac 的平均云厚 1.2~1.4 km, 最大云厚出现在 A2 地区为 10.2 km。Ac 的云顶高、云底高、云厚分布从陆地向深海逐步增加。

5 微观属性分布

5.1 粒子相态分布情况

如前所述, CloudSat 主要依据云体温度来区分粒子相态。CALIPSO 则通过分析 CALIOP 雷达探测到的退偏比和后向散射因子来区分粒子相态。卫星云产品将扫描廓线中单元格点[2.5 km (长) × 1.4 km (宽) × 240m (高)]所含粒子相态分为了三类, 分别是液态即仅含液态水、液冰混合态以及冰态即仅含冰晶粒子。我们分别对 As 和 Ac 中液态、混合态和冰态各自所占的比例做了统计, 表 1 中列出了

A1、A2、A3 区 3 种相态分布情况的统计结果。

从统计结果看, 高层云与高积云的粒子相态分布不同。高层云中冰态粒子含量占绝大多数, 其中冰态即只含冰晶粒子的单元格点占 70% 以上, 液态单元格点仅为 2% 左右, 剩余混合态约占 20%~30%, 因此总体来说 As 中冰晶粒子所含比例远高于液态粒子。3 个地区相互比较发现, 海洋与陆地各自的相态分布比例比较接近。高积云的粒子相态分布中混合态所占比例最大, 约占总量的 50% 左右, 液态和冰态各占比例彼此相当, 因而总体来说高积云中冰晶粒子与液态粒子分布是相当的。

表 1 中云粒子相态分布情况统计

Table 1 Types of particle status in As and Ac

		仅含液态水含量	液冰混合态含量	仅含冰晶粒子含量
As	A1	2.447%	21.631%	75.922%
	A2	2.166%	24.050%	73.785%
	A3	2.183%	27.155%	70.662%
Ac	A1	25.659%	48.496%	25.845%
	A2	25.148%	54.037%	20.816%
	A3	25.053%	50.020%	24.927%

5.2 高层云微物理属性统计特征

有效粒子半径以及云(冰)水含量是描述云微物理属性的两个重要参数, 同时是辐射传输模式以及气候模式中用于表述云物理特征的基本参数。本节及下节分别对高层云和高积云的两个基本物理参数分布特征进行统计分析, 通过 2007~2010 年发生的所有高积云和高层云个例进行统计, 对比陆地、海洋地区分布差异, 可了解中云的垂直结构特征。

5.2.1 冰晶有效粒子半径和冰水含量

图 6 为高层云的冰晶 IER 和冰水含量 IWC 随高度的发生频率(即出现次数), 通过该分析可了解高层云的高度分布特征以及特定高度层上 IWC 或 IER 的分布特征及出现概率, 同样可了解 IWC 和 IER 在高层云中的出现高度。分析时 IER 的统计间隔为 1 μm , 高度的统计间隔为 250 m, 下文中高积云 Ac 的 IER 随高度统计亦是采用如此统计间隔。总体来看, 3 个地区高层云中 IER 与高度分布呈类似汉字笔画“点”的形状, 上部窄, 下部宽, 发生频率峰值基本位于图形中部。具体数值上体现为: IER 分布在 20~80 μm 范围, 高度集中在 2~10 km 范围。地区间对比分析, 陆地与海洋地区的分布略有不同, 其中 A1 地区在高度 5~8 km 范围、IER 40~

60 μm 范围内出现概率最大; A2 地区与 A1 地区较为接近; A3 区发生频次的高值区间则分布在 IER 为 50~70 μm 、高度 4~7 km。图 6a、6b、6c 还给出各高度上的平均 IER 分布情况, 较低高度(低于 2 km)和较高高度(大于 12 km)范围的粒子出现次数较少, 统计样本比较少, 结果随意性比较大, 因此这些范围统计代表性差。图 6 中可以看到, 除较低高度(低于 2 km)和较高高度(大于 12 km)区间外, 3 个地区总体呈现随高度增加 IER 减少的趋势, 其中 A1 地区线性拟合, 斜率为 -0.247, A2 区为 -0.235, A3 区为 -0.227, 陆地与海洋地区差异不大, 下降趋势由陆地向深海逐步减缓。

IWC 与 IER 分布不同, 在 2007~2010 年探测 As 最大 IWC 值为 2638.9 mg m^{-3} , 最小值为 0.01 mg m^{-3} , 均方差值远高于平均值, 说明 IWC 的分布比较分散, 分布范围相对较宽。为便于图形展示,

我们将 IWC 取对数值 (L_{IWC}) 进行概率统计分析, 见图 6d、6e、6f。 L_{IWC} 随高度分布呈现近似“三角形”形状, “三角形”的其中一个顶角位于上部, 另两个顶角位于下部, 说明高度较高位置的 L_{IWC} 分布范围相对比较集中, 较低位置高度的 L_{IWC} 分布范围扩大, 图形中心出现频率最大。数值上, L_{IWC} 主要集中在 -0.5~2.5 范围, 即 IWC 约 0.3~300 mg m^{-3} 范围。图 6 中亦给出平均 L_{IWC} 随高度的分布情况, 不难发现除较低高度(低于 2 km)和较高高度(大于 12 km)区间外, 各高度层平均 L_{IWC} 差异不显著, 且与高度之间的相关性亦不明显。

需要特别说明和注意的是, 受观测能力限制 CPR 一般对尺度相对较大的粒子比较敏感, 虽然 CALIPSO 对尺度小的冰晶粒子敏感, 但其信号经过云层时衰减较大, 不易穿透较厚的云层, 因此当中云上有卷云或自身云体较厚时, CALIPSO 无法完成

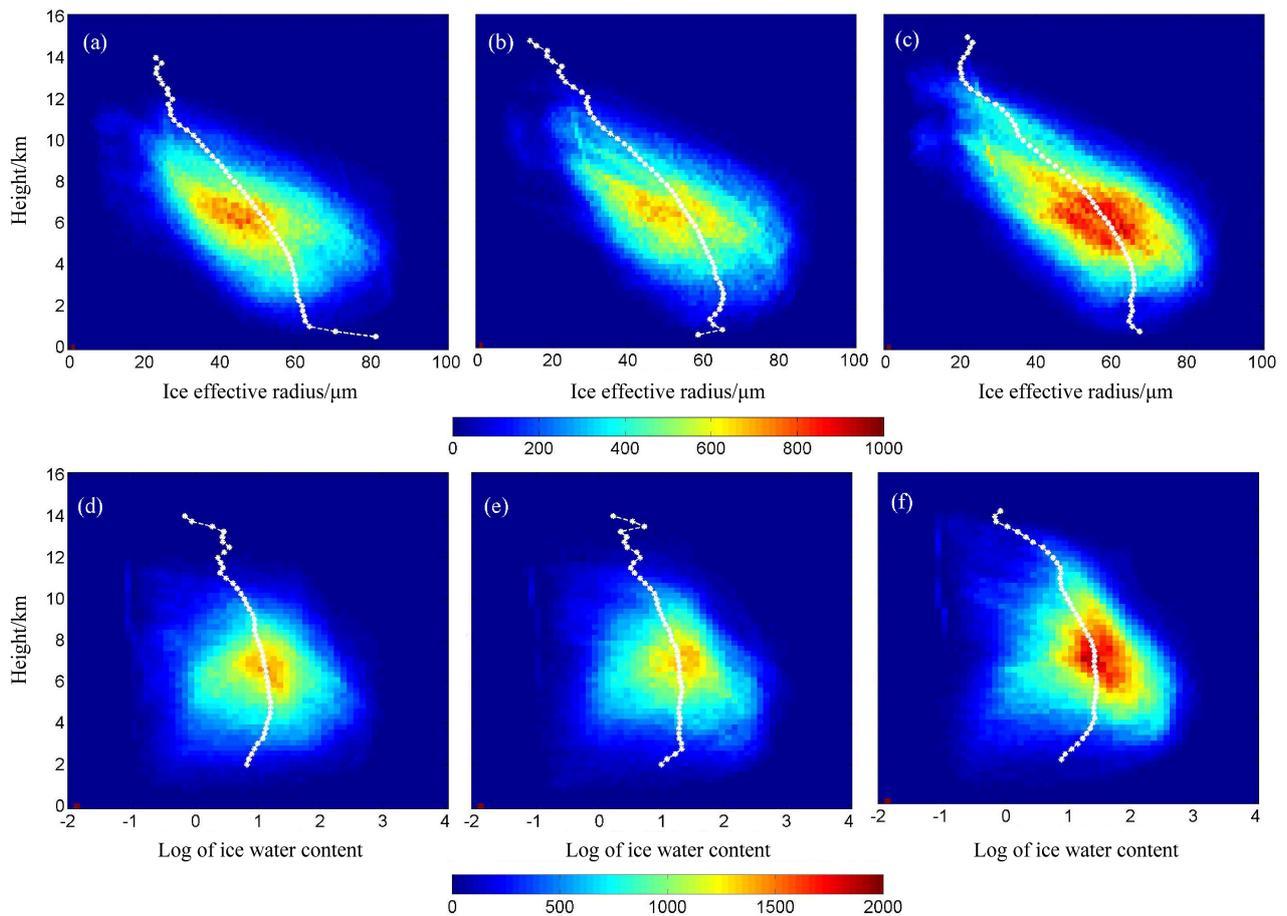


图 6 2007~2010 年 A1 (左)、A2 (中)、A3 (右) 地区高层云 (a、b、c) 冰晶有效粒子半径 (IER) 及 (d、e、f) 冰水含量对数值 (L_{IWC}) 的出现频次随高度变化, 图中白色点线表示 IER 或 L_{IWC} 在各高度的平均值

Fig. 6 Occurrence frequency of (a, b, c) IER and (d, e, f) L_{IWC} (log of IWC) in As cloud VS height over areas A1, A2, and A3 during 2007-2010. Variation of average IER or L_{IWC} with height is shown by white line

对下层中云的探测,也因此可能会有漏测云中小粒子,这一情况同样存在于液态粒子的测量和反演中。

5.2.2 液水有效粒子半径和液水含量

我们将云的液水 LER 以 $0.5 \mu\text{m}$ 为间隔,高度以 250 m 为间隔统计各区间的粒子出现次数。图 7a-7c 中给出了 A1、A2、A3 地区的统计结果。LER 分布平均所在高度明显低于 IER (图 6) 的高度,这是必然的,因为温度是影响云粒子相态的极其重要因素,一般条件下云的高度越高其温度越低,因此统计意义上冰晶所处平均高度一般高于液水粒子。高积云 LER 与高度的分布形状类似汉字笔画“撇”,频次峰值出现在图形高度相对偏上的位置。高层云的 LER 主要分布范围为 $5\sim 15 \mu\text{m}$,高度主要集中在 $2\sim 7 \text{ km}$ 范围。从 2 km 高度以上,随着高度增加,LER 呈现增加的特征,随着高度的逐步上升,LER 增加的幅度变小。地区分布对比来看,

LER 分布总体随陆地向近海、远海增大,且出现次数亦是深海地区最大。

高层云中 LWC 随高度的分布特征同样采用取对数 (L_{LWC}) 再统计的办法 (图 7d-7f)。从图上看, L_{LWC} 主要集中在 $1\sim 2.5$ 区间,即 LWC 在约 $10\sim 300 \text{ mg m}^{-3}$ 范围。统计意义上,同样 L_{LWC} 与高度分布的相关性不明显。

5.3 高积云微物理属性统计特征

5.3.1 冰晶有效粒子半径和冰水含量

上节关于云高、云厚的统计中已经说明平均高积云高度低于高层云的高度,图 8 中再次体现,高积云冰晶粒子主要分布在 $2\sim 8 \text{ km}$ 的高度范围,在相对较低的云底部分亦存在冰晶粒子。高积云冰晶粒子出现频次明显少于高层云中的出现频次,一方面是因为高积云自身的发生率少,同时也是由于高积云中冰晶粒子所占的分量减少的缘故。因此,尽管有 4 年的数据,但高积云中 IER 随高度的分布统

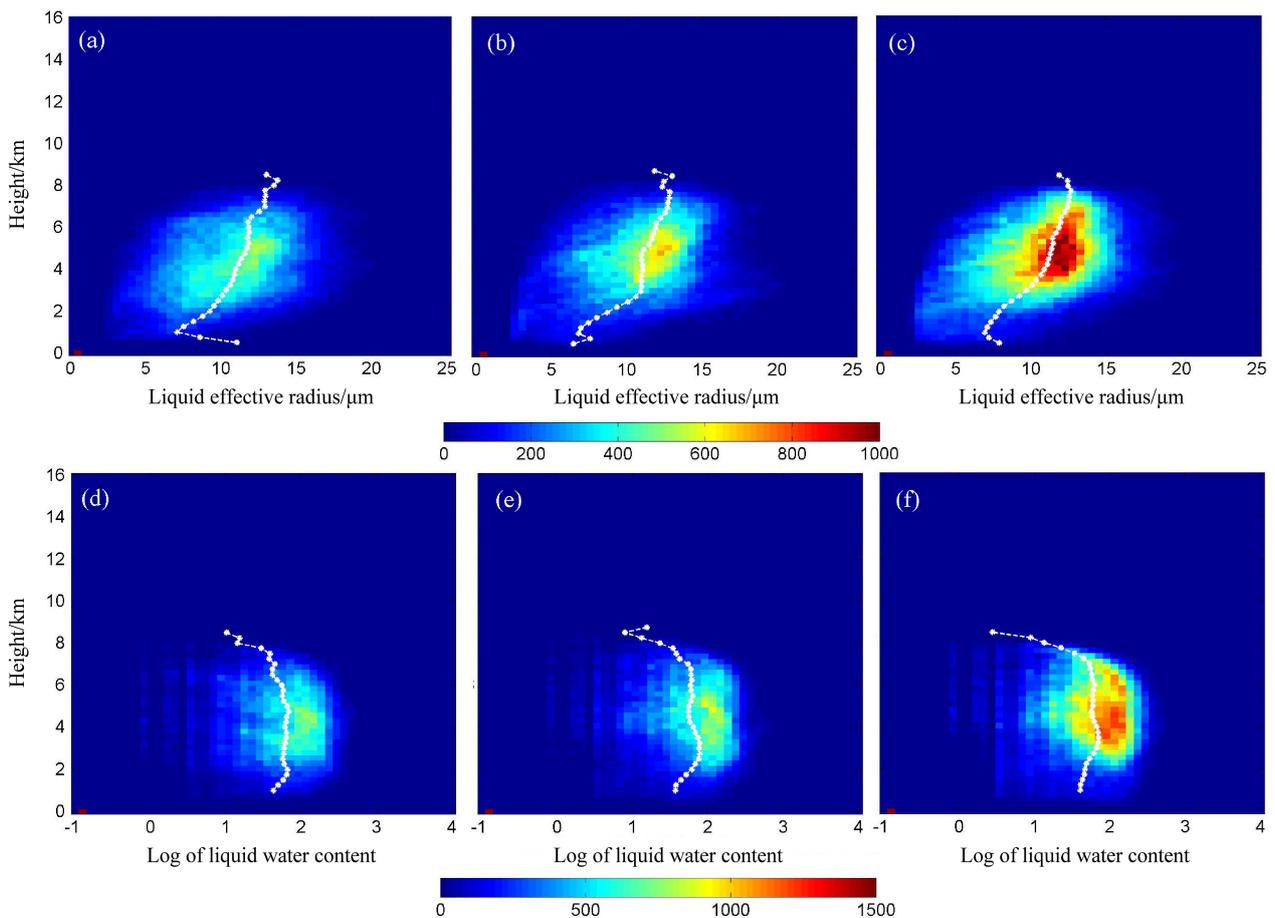


图 7 2007~2010 年 A1 (左)、A2 (中)、A3 (右) 地区高层云 (a、b、c) 液水有效粒子半径 (LER) 及 (d、e、f) 冰水含量对数值 (L_{LWC}) 的出现频次随高度变化,图中白色点线表示 LER 或 L_{LWC} 在各高度的平均值
Fig. 7 Occurrence frequency of (a, b, c) LER and (d, e, f) L_{LWC} (log of LWC) in As cloud vs height in areas A1 (left), A2 (middle), A3 (right) during 2007-2010. Variation of average LER or L_{LWC} on height is shown by white line

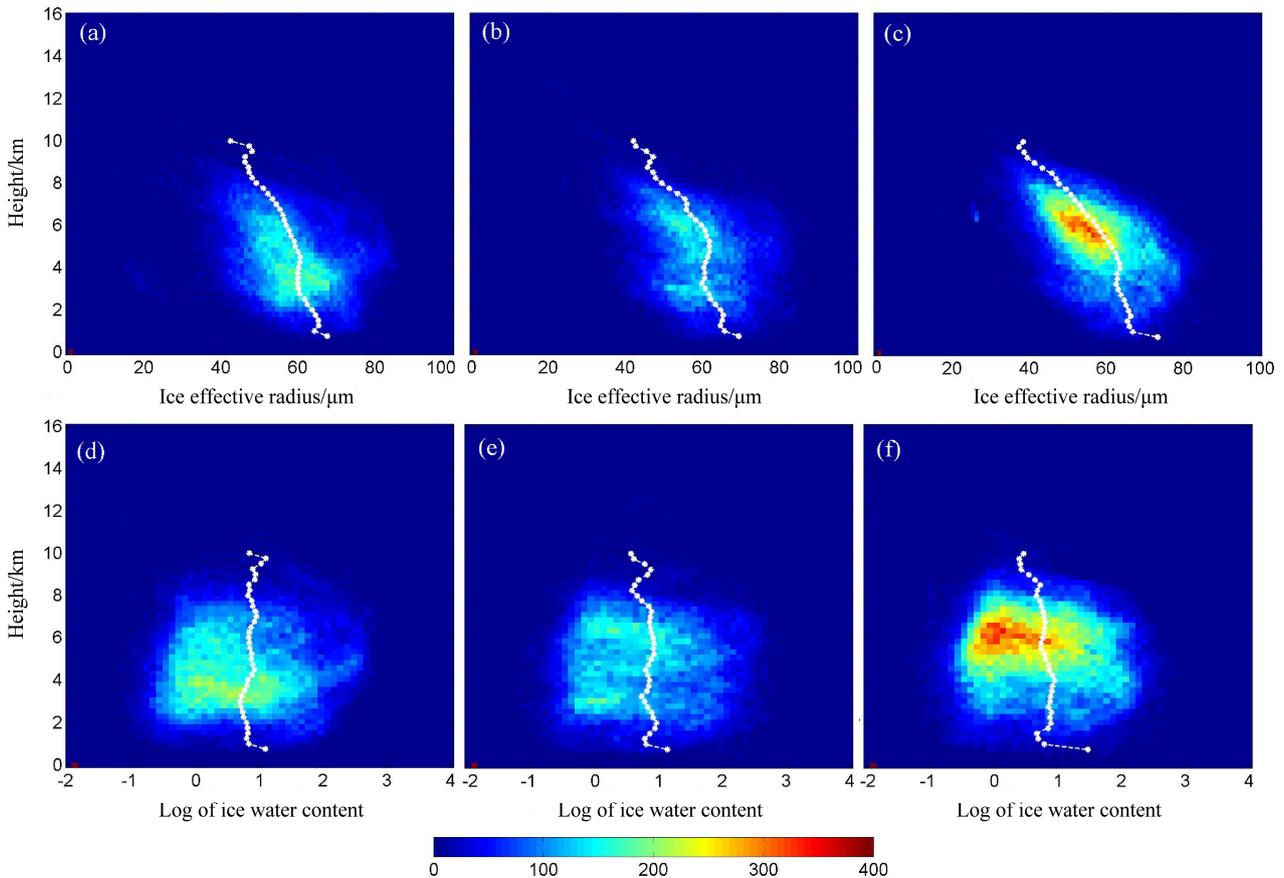


图8 同图6, 但为高积云的情况

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the Ac cloud

计次数均小于 400 次。尽管如此, 高积云中 IER 随高度的分布特征呈现高层云中类似的形状分布特征, 高处的 IER 小而高度较低的 IER 大。总体来看, 高积云中 IER 主要分布在 $35\sim 85\ \mu\text{m}$, 相比高层云中平均 IER 值大。

高积云中冰水含量对数值分布主要集中在 $-0.5\sim 2.5$, 即 IWC 约为 $0.3\sim 300\ \text{mg m}^{-3}$ 范围, L_{IWC} 与高度的分布图形介于“圆形”和“方形”之间, 说明 IWC 随高度的分布特征不明显, 并且不同高度上的 IWC 分布谱特征比较接近。

5.3.2 液水有效粒子半径和液水含量

图9中可以看到3个地区高积云 LER 主要分布在 $5\sim 20\ \mu\text{m}$ 范围, 陆地的 LER 谱宽略小于近海和远海, 因此平均 LER 值陆地小于近海及深海地区。高积云中 LER 分布在 $1\sim 7\ \text{km}$ 的高度之间, 主要集中在 $2.5\sim 4.5\ \text{km}$ 范围, 与高层云中 LER—高度分布图不同的是, 高积云中 LER 与高度分布图形亦是介于矩形和圆形之间, 图中各高度层分析的平均 LER 值 (白色点线) 表明总体来看平均 LER 随高

度下降呈现略微减少的趋势, 但相关性相比高层云中的关系明显减弱, 变得很不明显。高积云中 L_{LWC} 的值介于 $1\sim 3$, 即 LWC 约 $10\sim 1000\ \text{mg m}^{-3}$, 平均高于高层云中相应高度的液水含量值。LWC 随高度变化的分布特征同样不明显。

6 小结

本文利用 CALIPSO 和 CloudSat 云垂直产品分析了 2007 年~2010 年期间中云 (包括高积云和高层云) 在中国华北、日本海和太平洋深海地区的宏观微物理分布特征, 分析了中云空间分布和季节分布特征, 以及中云有效粒子半径和冰 (水) 含量分布情况。一方面通过对比分析了解不同下垫面的中云物理结构特征, 另一方面为气候模式或辐射传输模式典型中云参数输入和使用提供参考。研究的主要结论如下:

(1) 统计分析表明中云全年平均发生概率为 $1/3$ 左右 (陆地略小于深海), 其中 As 的发生概率高于

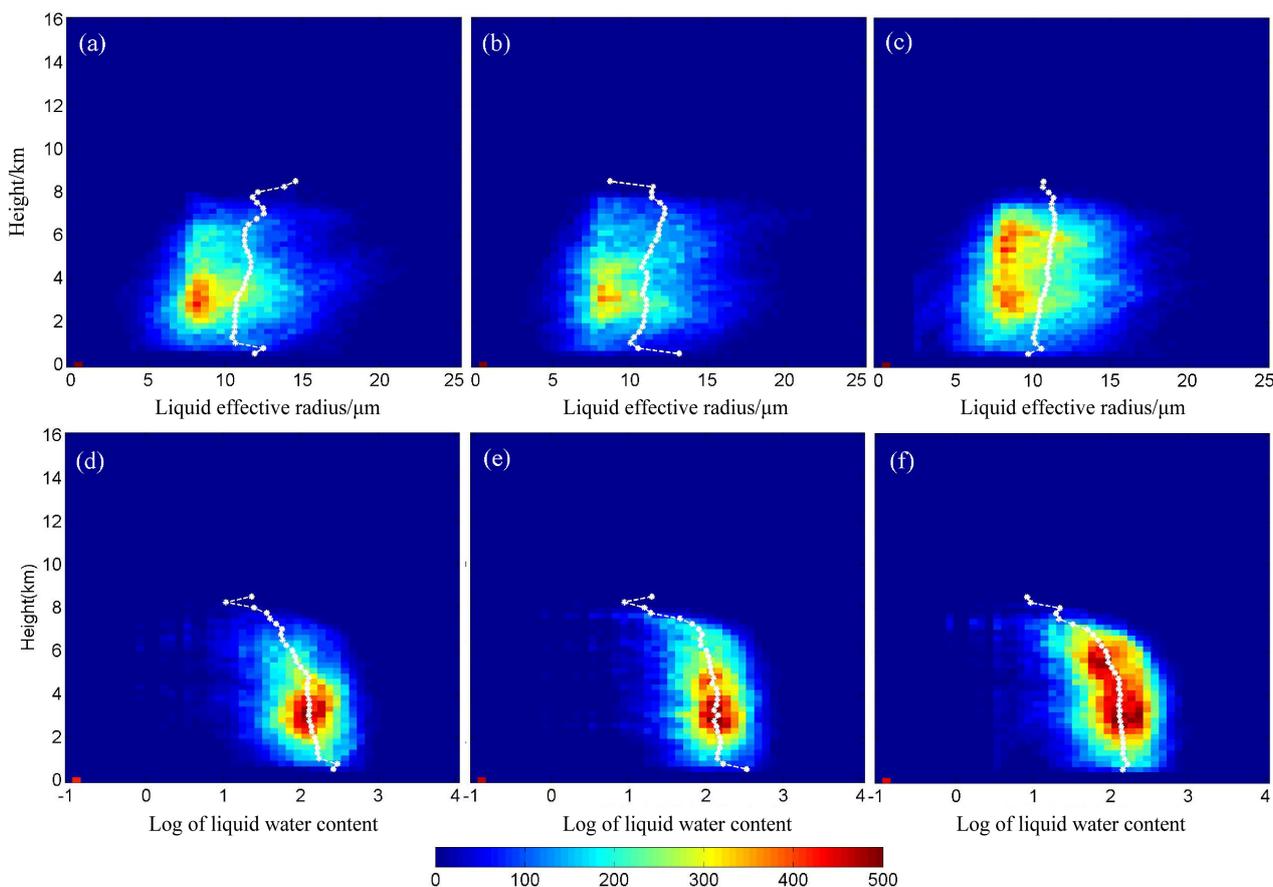


图9 同图7, 但为高积云的情况

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the Ac cloud

Ac。季节分布上, As 春、冬季出现概率相对大且明显大于 Ac; Ac 则是夏、秋季较大, 发生率与 As 相当或在部分月份略大。冬季 Ac 发生率最低, 均低于 5%。

(2) 统计分析表明 As 的平均厚度高于 Ac, 且其平均高度高于 Ac 平均高度。3 个地区 As 平均云底高约为 4.4 km, 平均云顶高约 8.2 km。3 个地区 As 平均云底高差距不大, 平均云厚及云顶高一般海洋高于陆地。3 个地区 Ac 平均云底高约 3.5 km; 平均云顶高约 5 km; Ac 的云顶高、云底高、云厚地区分布从陆地向深海逐步增加。

(3) As 中冰晶粒子所含比例远高于液水粒子, 粒子相态分布比例情况海洋与陆地接近。Ac 中液态与冰晶粒子的比例相当, 比例分布上地区差异不明显。

(4) As 中 IER 谱分布区间为 10~90 μm, 其中 45~65 μm 范围内出现概率相对较大, 海洋地区平均 IER 值高于陆地, IER 总体呈现随高度增加而减

少的特征。As 中 IWC 谱分布范围较广, 0.1~1000 mg m⁻³, 统计发现较高的 IWC 谱宽比低高度的谱宽范围窄。As 中 LER 随高度增加而增加。地区分布对比来看, 有效粒子半径分布总体随陆地向近海、远海增大。As 中 LWC 在约 10~300 mg m⁻³ 范围, 统计意义上 LWC 与高度分布的相关性不明显。

(5) Ac 中 IER 主要分布范围为 35~85 μm。IWC 分布范围为 0.3~300 mg m⁻³, IWC 随高度的分布特征不明显。Ac 中 IWC 及 IER 谱分布情况与 As 相当。3 个地区高积云 LER 主要范围为 5~15 μm, 陆地 LER 谱宽略小于近海和远海, LER 随高度下降呈略下降特征。Ac 的 LWC 分布范围为 10~1000 mg m⁻³, Ac 中 LWC 平均值高于 As, 海洋平均值高于陆地。

综上所述不难发现, 受季风循环、热带辐合带的南北移动、局地对流活动、温度和水汽等因素影响, 3 个地区云发生率、几何尺度、平均高度、有

效粒子半径和云水含量总体在海洋地区更大。

参考文献 (References)

- Adhikari L, Wang Z, Deng M. 2012. Seasonal variations of Antarctic clouds observed by CloudSat and CALIPSO satellites [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D04202, doi: 10.1029/2011JD016719.
- Albrecht B A. 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. *Science*, 245: 1227–1230.
- Avery M, Winker D, Heymsfield A, et al. 2012. Cloud ice water content retrieved from the CALIOP space-based lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 39 (5): L05808, doi: 10.1029/2011GL050545.
- Cess R D, Potter G L, Blanchet J P, et al. 1989. Interpretation of cloud-climate feedback as produced by 14 atmospheric general circulation models [J]. *Science*, 245 (4917): 513–516.
- Chan M A, Comiso J C. 2011. Cloud features detected by MODIS but not by CloudSat and CALIOP[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (24): L24813, doi: 10.1029/2011GL050063.
- Delanoë J, Hogan R J. 2008. A variational scheme for retrieving ice cloud properties from combined radar, lidar, and infrared radiometer [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D7): D07204, doi: 10.1029/2007JD009000.
- Delanoë J, Hogan R J. 2010. Combined CloudSat-CALIPSO-MODIS retrievals of the properties of ice clouds [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D4): D00H29, doi: 10.1029/2009JD012346.
- Deng M, Mace G G, Wang Z, et al. 2010. Tropical composition, cloud and climate coupling experiment validation for cirrus cloud profiling retrieval using CloudSat radar and CALIPSO lidar [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D10): D00J15, doi: 10.1029/2009JD013104.
- Harrison E F, Minnis P, Barkstrom B R, et al. 1990. Seasonal variation of cloud radiative forcing derived from the earth radiation budget experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 95 (D11): 18687–18703.
- Hartmann D L, Ockert-Bell M E, Michelsen M L. 1992. The effect of cloud type on earth's energy balance: Global analysis [J]. *J. Climate*, 5: 1281–1304.
- Hu Y X, Winker D, Vaughan M, et al. 2009. CALIPSO/CALIOP cloud phase discrimination algorithm [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26 (11): 2293–2309.
- Liou K N. 1986. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (6): 1167–1199.
- Liou K N. 2002. *An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)* [M]. Salt Lake City: Academic Press, 583pp.
- Mason B J. 1971. *The Physics of Clouds*[M]. Oxford: Oxford University Press, 884pp.
- Platt C M R. 1979. Remote sounding of high clouds: I. Calculation of visible and infrared optical properties from lidar and radiometer measurements [J]. *J. Appl. Meteor.*, 18: 1130–1143.
- Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. 1989. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment[J]. *Science*, 243 (4887): 57–63, doi: 10.1126/science.243.4887.57.
- Segal M, Davis J. 1992. The impact of deep cumulus reflection on the ground-level global irradiance [J]. *J. Appl. Meteor.*, 31: 217–222.
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *J. Climate*, 18 (2): 237–273.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J. 2002. The CloudSat mission and the A-train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (12): 1771–1790.
- Treut H L, Somerville R, Cubasch U, et al. 2007. Historical overview of climate change [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wetherald R T, Manabe S. 1988. Cloud feedback processes in a general circulation model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45 (8): 1397–1416.
- Wilson C A, Mitchell J F B. 1986. Diurnal variation and cloud in a general circulation model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112 (472): 347–369.
- Winker D M, Hunt W H, McGill M J. 2007. Initial performance assessment of CALIOP [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (19): L19803, doi: 10.1029/2007GL030135.
- 杨大生, 王普才. 2012. 中国地区夏季云粒子尺寸的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 17 (4): 433–443, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10066.
- Yang Dasheng, Wang Pucai. 2012. Tempo-spatial distribution characteristics of cloud particle size over China during summer [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (4): 433–443.
- Zhang D M, Wang Z, Liu D. 2010. A global view of midlevel liquid-layer topped stratiform cloud distribution and phase partition from CALIPSO and CloudSat measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D4): D00H13, doi: 10.1029/2009JD012143.
- Zhang M H, Lin W Y, Klein S A, et al. 2005. Comparing clouds and their seasonal variations in 10 atmospheric general circulation models with satellite measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D15S02, doi: 10.1029/2004JD005021.