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.

中国地区夏季 6~8 月云水含量的垂直分布特征

杨大生1,2,3 王普才1

1 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室,北京 100029
2 中国气象局气象探测中心,北京 100081
3 中国科学院研究生院,北京 100049

摘 要 基于观测资料的夏季云水含量时空分布情况对于数值天气预报、气候预测以及人工影响天气试验都十 分重要。本文利用 CloudSat 卫星资料,分析了 2006~2008 年中国地区夏季月平均云水含量的垂直和区域变化特 征。结果显示,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。中国中部纬度上对流层中层 的月平均液态水含量比南部及北部的量值大。各月平均云液水含量垂直廓线存在两个不同高度上的峰值区,原 因可能主要是受大尺度参数的控制,以及受到青藏高原和东亚季风环流的影响。平均冰水含量纬向垂直分布的 高值区主要在对流层中上部。本文中所揭示的云水含量特征为天气和气候模式改进、人工影响天气及云一辐射 相互作用提供了重要的基础信息。

关键词 云水含量 垂直分布 区域分布

文章编号 1006 - 9895 (2012) 01 - 0089 - 13 中图分类号 P426 文献标识码 A

Characteristics of Vertical Distributions of Cloud Water Contents over China during Summer

YANG Dasheng^{1,2,3} and WANG Pucai¹

1 Key Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The knowledge on measurement-based spatial – temporal distributions of summertime cloud water contents is greatly important for numerical weather prediction, climate projection, and weather modification experiment. By using the data provided by CloudSat, the study examines the vertical, geographic, and monthly variations of cloud water content over China during the summers of 2006 - 2008. Results show the significant influences of the Tibetan Plateau topography and East Asian summer monsoon on formation, vertical and geographic distributions of monthly average cloud water content. In the regions of central China ($27^\circ N - 35^\circ N$), monthly average liquid cloud water contents in the middle and upper layers of the tropospheric atmosphere are remarkably larger than those in southern and northern China regions. There are two peaks in the vertical profiles of monthly average liquid cloud water contents, which may result from combined effect of large-scale atmospheric parameter, the Tibetan Plateau

收稿日期 2010-05-11, 2011-06-30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875084、40705012,国家科技支撑计划资助项目 2008BAC40B00

作者简介 杨大生,男,1969年出生,博士研究生,高级工程师,主要从事大气遥感和大气辐射研究。E-mail:dashengy@post.iap.ac.cn

topography and East Asian summer monsoon. The high values of monthly average ice water contents are mostly concentrated in the layer of 6-18 km above sea level, namely the upper tropospheric atmosphere. The revealed features of monthly average cloud water content can provide baseline information for the further researches on weather and climate models improvement, weather modification, and cloud-radiation-climate interaction.

 $Key\ words$ $\ \ cloud\ water\ content,\ vertical\ distribution,\ geographic\ distribution$

1 引言

云对于全球地球气候系统中的辐射能量和水循 环起着重要的调节作用,是影响气候及其变化的重 要因子之一。包括云水含量、云水路径、云滴有效 半径、云顶和云底高度、云层厚度等云垂直结构特 征对大气辐射的传输有着非常明显的影响。

中国地区夏季云和降水的发生发展,由于受到 亚洲夏季风、青藏高原等因素的影响,呈现出异常 复杂的特征,给天气预报和气候预测带来很大的困 难。造成这种情况的原因有很多,但主要原因之一 是,对云相关属性及云一辐射反馈过程的观测认识 上的不足,直接影响到模式中相关云属性和过程的 正确表达。

早期对云的仪器探测主要依靠飞机云物理探测 手段,但这种手段具有代表范围小、探测费用高以 及个别情况下误差较大的缺点。后来随着卫星技术 的发展,卫星遥感观测被广泛用于云及相关天气气 候研究。

利用卫星被动遥感观测资料开展云的气候学特 征研究已经有几十年的历史,近年来的研究主要是 利用国际卫星云气候计划(简称 ISCCP)所获取的 资料进行。Yu et al. (2004) 分析了 ISCCP 卫星及 其它资料后指出,在 60°S~60°N 之间全球最大的 光学厚度位于青藏高原的下游,其原因并不是由云 量的多少造成,而是由于深厚层云的存在(主要是 雨层云和高层云)造成的,并且深厚层云的产生和 维持主要是受到青藏高原的摩擦和阻塞。丁守国 (2004)利用 ISCCP 的 D2 云气候资料集,分析了近 20年来中国地区云量、云水路径、云顶温度、云光 学厚度的变化特征和云的辐射特征,并分析了这些 变化的原因。李兴宇等(2008)利用 1984~2004 年 ISCCP 的云水路径(简称 CWP) 资料,分析了 中国地区空中云水资源的分布特征、变化趋势以及 与大气环流和湿度场的关系。中国地区 CWP 以增 加趋势为主, 青藏高原东部、内蒙古东部地区以及

西北东部地区 CWP 的增加趋势较强。尽管 ISCCP 资料提供了众多关于云的信息,但是,卫星所利用 的可见光和红外波段无法获取云在垂直方向上的内 部信息。云内部信息的获取还要依靠主动遥感手 段。

2006 年 4 月 CloudSat 卫星发射并加入 A-Train 卫星星列后,为我们研究云的垂直结构及其 物理属性的全球分布提供了可能。已经有多位研究 者利用雷达反射率资料和反演产品资料对全球和区 域范围上云的特征进行了分析并取得相应结果。 Luo et al. (2008) 利用 CloudSat/CALIPSO 的 2B-GEOPROF 和 2B-GEOPROF-LIDAR 资料,分析 了 2006 年 7 月至 2007 年 8 月中国东部及印度季风 区的水凝物的发生频率、垂直位置以及雷达反射率 的季节变化。结果表明,中国东部和印度季风区的 14个月的平均水凝物的发生频率为80%和70%。 其中,多层水凝物(多数是两层或者三层)分别占 37%和47%。在印度季风区,由冬季到夏季,多层 水凝物总是呈现明显的增加,而在中国东部,单层 或多层水凝物的量值接近反相位变化,使得水凝物 的总量变化很小。Haynes and Stephens (2007) 用 2006年6~8月2B-GEOPROF资料分析了热带海 洋上云的分布特征; Mace et al. (2007) 用 2B-GEOPROF 分析了 2006 年 6~8 月全球水凝物发生 频率的垂直分布,并且指出西太平洋暖池和亚洲季 风区是全球卷云量最大的区域。云的垂直结构与大 尺度环境动力学、热力学条件密切相关, Zhang et al. (2007) 利用 84 天的 2B-GEOPROF 中雷达反射 率因子资料,通过聚类分析的方法将热带云系进行 中尺度分类,同时用 500 hPa 云平均垂直速度代表 大气动力环流特征,说明不同云系和大气环流的联 系。另外, Su et al. (2008) 利用 500 hPa 垂直速 度、海表温度及其梯度、地面散度、降水、水汽路 径、对流有效位能以及对流层低层静力稳定度等大 尺度参数,对热带海洋性云的 CloudSat 云水含量 (简称 CWC) 廓线进行了分类,发现热带云的垂直 结构中存在两个明显不同的模态。王帅辉等 (2010)利用2006年7月至2007年6月的Cloud-Sat 2B2GEOPROF-LIDAR产品资料和 ISCCP D2 月平均云量数据,统计分析了中国及周边地区午 间、凌晨年平均总云量的分布特征,并对两种探测 手段得到的年平均总云量及其昼夜变化进行了对比 分析。

据前所述,对于中国区域范围内关于云的含水 量分布特征的研究尽管有不少,但还存在不足。为 进一步加强对中国地区上空云含水量的时空分布特 别是垂直分布特征的认识,并为改进天气气候模式 的参数化、人工影响天气业务开展以及云一辐射相 互作用研究提供基本信息,本文采用 CloudSat 卫 星 2006~2008 年 2B-CWC 资料,对中国地区夏季 6~8 月的月平均云含水量的垂直和区域变化特征 进行了初步分析,并探讨了这些变化特征形成的原 因。

2 2B-CWC 资料介绍

CloudSat 的 2B-CWC 产品是由 2B-GEOPROF 和 2B-CLDCLASS 资料以及 ECMWF 的辅助数据 生成,具有 1.4 km 的水平分辨率和 480 m 的垂直 分辨率,过采样为 240 m。本文所采用的是只考虑 云雷达信息不包含可见光云光学厚度信息 2B-CWC-RO 云水含量资料,白天和夜间观测都有,云 水含量 CWC 包含液态水含量(简称 LWC)和云冰 水含量(简称 IWC)。IWC/LWC 的反演是依据 94 GHz 雷达反射率因子(Z)观测值与 IWC/LWC 之 间的对数线性关系。由于 CloudSat 卫星轨道重复 周期是 16 天,所以不适合于云的日变化研究。

我们收集了中国区域范围内(20°N~45°N, 80°E~130°E)2006~2008年6~8月的2B-CWC-RO资料,首先对CWC廓线资料上的每一档(bin) 都按经向1°平均和2°纬向平均后,再对资料按月作 平均,然后得到共9个月的中国地区夏季云微物理 量沿经向和纬向的垂直分布情况。通过前期个例分 析,我们发现,对于强降水性云及较厚的非降水性 云,雷达信号受降水衰减的影响很大,2B-CWC资 料中给出的是不具物理意义的负值,我们将这种 CWC资料处理为零。由于地面反射杂波的影响, CloudSat不能够探测最接近地面的云,所以我们的 分析限制在0.5 km以上。除了上面所说对强降水 处理为零外,我们对于晴空无云的档也处理为零, 作平均计算时不对零值的数据作平均,得到的 CWC平均值全部是对反演成功且有云时的平均, 这也是与 Su et al. (2008)给出的平均值量级上不 同的原因,因为后者对晴空部分也进行统计平均。 图 1 给出的是 CloudSat 卫星在中国区域的星下点 轨迹。

3 2B-CWC 产品的反演原理

首先,2B-CWC产品的反演过程的正演模型假 定云滴尺度分布为对数正态分布:

$$N(r) = \frac{N_{\rm T}}{\sqrt{2\pi\sigma_{\log}r}} \exp\left[\frac{-\ln^2(r/r_{\rm g})}{2\sigma_{\log}^2}\right], \quad (1)$$

 $N_{\rm T}$ 是云滴数密度, r 是云滴半径, $r_{\rm g}$ 、 $\sigma_{\rm log}$ 、 $\sigma_{\rm g}$ 定义为

$$\begin{split} \ln r_{\rm g} &= \overline{\ln r},\\ \sigma_{\rm log} &= \ln \sigma_{\rm g},\\ \sigma_{\rm g}^2 &= \overline{\left(\ln r - \ln r_{\rm g}\right)^2} \end{split}$$

 $r_{\rm g}$ 是云滴几何平均半径, σ_{\log} 是云滴谱宽参数, $\sigma_{\rm g}$ 是 云滴几何标准差,上划线表示算术平均。式(1)由 $N_{\rm T}$ 、 σ_{\log} 、 $r_{\rm g}$ 这3个参数确定。液态水含量LWC和 云滴有效半径 $r_{\rm e}$ 由云滴尺度分布的矩量来确定:

$$LWC = \int_0^\infty \rho_w N(r) \frac{4}{3} \pi r^3 dr, \qquad (2)$$

$$r_{\rm e} = \frac{\int_0^\infty N(r) r^3 \mathrm{d}r}{\int_0^\infty N(r) r^2 \mathrm{d}r},\tag{3}$$

其中,ρ_w是水的密度。

对于只降可忽略的毛毛雨和小雨的云来说,云 滴相对于 CloudSat 雷达波长已经小到可以被认为 满足 Rayleigh 散射。根据这些假设,可以得到雷达 反射率因子 Z:

$$Z = 64 \int_0^\infty N(r) r^6 \mathrm{d}r. \tag{4}$$

将(1)式的尺度分布代入(2)~(4)式,得到 各种云属性参数:

$$LWC = \frac{4\pi}{3} N_{\rm T} \rho_{\rm w} r_{\rm g}^3 \exp\left(\frac{9}{2}\sigma_{\rm log}^2\right),\tag{5}$$

$$r_{\rm e} = r_{\rm g} \exp\left(\frac{5}{2}\sigma_{\rm log}^2\right),\tag{6}$$

$$Z = 64N_{\rm T} r_{\rm g}^6 \exp(18\sigma_{\rm log}^2). \tag{7}$$

这些云属性参数同时又是云粒子所在云柱体内位置的函数,即可以写成LWC(z)、 $r_e(z)$ 、Z(z)。

数包括有状态矢量及其误差协变量,加上观测矢量 及其误差协变量,以及正演模型包含的不确定信 息,最后的反演结果中给出的是包含了被反演量不 确定程度大小的反演结果。对被反演量不确定性信 息的分析及应用,需要在以后的工作中进一步深入 研究。

中国地区夏季 6~8 月平均云液水 4 含量的经向变化特征

图 2 给出了中国地区 2006 年 6~8 月的月平均 云液态水含量经向平均垂直分布。由于 CloudSat 提供的正式产品数据是从 2006 年 6 月 16 日开始 的,所以2006年6月份的所有产品只代表6月下 半月的情况。

从各月平均云液水含量的纬度—高度剖面中可 以看到, CloudSat 卫星反演的 2006~2008 年 6~8 月份的中国地区月平均云液态水含量在垂直方向上 的最大高度在9 km 附近, 在接近 45°N 附近高度略 有下降,说明在星载云雷达探测到的液态水物质所 能达到的高度是 9 km, 北部地区的对流发展高度 比南部地区略有偏低。

月平均云液态水含量经向垂直分布的高值区 (大于 $1 g/m^3$)基本都在2 km以下的对流层下部, 且经向分布主要在 25°N~32°N 之间,反映出 CloudSat 卫星探测并反演的中国地区高含水量低 云主要分布在这一纬度区。

另外,在27°N~35°N之间高度在4~7 km的 对流层中层,月平均云液态水含量明显比偏南及偏 北纬度的同样高度区要高,说明青藏高原地形的存 在对所在纬度地区对流层中层云的影响。这一结果 与 Yu et al. (2004) 给出的受青藏高原影响该地区 主要盛行雨层云和高层云的结论比较一致。值得注 意的是,在2km高度以上,月平均云液态水含量 相对高值区(大于 0.3 g/m³)分别从 25°N 开始, 沿着极向随着纬度增加逐渐由对流层较低层向对流 层较高层延伸,在26°N和28°N之间是倾斜的爬升 区间,在28°N~35°N之间的6~7 km高度附近到 达上界,随高度变化缓慢,从35°N~36°N开始又 随纬度增加而月平均云液态水含量相对高值区的高 度有所降低。

为进一步揭示中国地区 2006~2008 年夏季各 月平均云液态水含量随纬度和高度变化的特征,评 估青藏高原在经向和高度上对月平均云液态水含量 的影响,我们将经向月平均云液态水含量分布分成 三个不同纬度区(南部区 20°N~27°N、中部区 27°N~35°N、北部区 35°N~45°N) 作平均,得到三 个中国地区不同纬度区月平均云液态水含量随高度 变化平均分布,分析月平均云液态水含量的垂直变 化特征。

从图 3 中可以看到, 中国地区夏季不同纬度区 的月平均云液态水含量值具有明显不同的垂直分布 特征。对于 2006~2008 年中国地区夏季各个月来 说,除了2007年7月以及2008年8月中部区与南 部区相接近以外,中部区月平均云液态水含量值比 南部区和北部区月平均云液态水含量值在 0~9 km 的各个高度上普遍都要大。通过分析发现,对于中 国三个纬度区来说,中国夏季各月平均云液水含量 垂直廓线存在两个不同高度上的峰值区,一个在海 拔高度 0.5~1.0 km 之间, 另一个在 3.5~4.5 km。 这一结果与 Su et al. (2008) 对热带地区分析的结 果相类似,但高度有差别(分别是 1.5 km 和 5 km),原因可能主要是,在热带地区云垂直结构 主要受大尺度参数的控制,在中国地区更多受到青 藏高原和东亚季风环流的影响。对于中国中部区和 北部区,第二峰值比较明显,且北部区第二峰值高 度要比中部区低1~2 km。对于中国南部区,第二 峰值区不够明显。这种情况说明,即使是青藏高原 和东亚季风环流都对云 LWC 产生影响,对不同区 域的影响也是有所差别的。

需要说明的是,尽管从气候平均情况来说,中 国地区的月平均降水量从南部向北部是逐渐减少 的,但这种情况在月平均云液态水含量经向分布上 并没有明显反应。主要的原因是,94 GHz 云雷达 的探测能力对于超过一定强度的降水会明显下降, 对云中的液水含量反演也会失败,而中国南部夏季 降水中的强降水比例相对比较高,所以在资料中对 这部分的含水量值剔除的相对较多。

中国地区夏季 6~8 月平均云液水 5 含量的纬向变化特征

青藏高原是世界上最高大的高原, 面积约 250 万平方公里,平均海拔高度约为4000 m。由于青 藏高原地势很高,西风带的气流遇到此高原不仅爬 越高原流向高原东侧, 而且会绕高原南北两侧也流



图 3 中国地区夏季 (a-c) 6 月、(d-f) 7 月和 (g-i) 8 月三个不同纬度区域平均云液水含量垂直廓线: (a、d、g) 2006 年; (b、e、h) 2007 年; (c、f、i) 2008 年。实线: 南部; 点线: 中部; 虚线: 北部

Fig. 3 Vertical profiles of monthly average liquid cloud water contents for (a-c) Jun, (d-f) Jul, and (g-i) Aug in different latitudinal zones over China (solid line for southern China, dotted line for central China, dashed line for northern China): (a, d, g) 2006; (b, e, h) 2007; (c, f, i) 2008

向高原东侧,并在高原东侧汇合。青藏高原对冬季 高原及以东地区上空西风环流系统有分支作用,并 且在6月上中旬,由于青藏高原对西风急流分支作 用所产生的南支急流会北跳到江淮流域,与北支急 流汇合,从而导致江淮流域梅雨的开始。因此,青 藏高原的高地势对于对流层下层西风带环流系统也 有明显很大的分流作用。

青藏高原对西风带环流系统的分流作用必将会

引起青藏高原南部和北部及各自的下游地区的天气 形势发生明显变化,进而影响到云和降水系统的产 生、发展过程,云的宏微观物理结构也相应地发生 改变。为了解青藏高原对环流系统、天气形势以及 伴随的云和降水的影响,需要对云含水量垂直分布 资料进行更具体的分析。我们按照 27°N 和 35°N 纬度线将整个中国地区划分为中国南部 (20°N~ 27°N, 80°E~130°E)、中部 (27°N~35°N, 80°E~ 从 2006 年 6~8 月份的月平均云液水含量的经 度一高度剖面(图 4、5)可以看到,中国北部及中 部地区 2006 年 6~8 月份的平均云液态水含量在 80°E~105°E之间的海拔高度 4~8 km 范围内存在 一个明显的高值区分布带,最大月平均云液态水含 量值在 2.042~2.368 g/m³之间,而在 105°E 以东 地区的月平均云液态水含量值相对较低,只有在 7 月的 105°E 附近的存在一个海拔高度在 1~2 km 的 相对高值区,最大月平均云液态水含量为 1.5 g/m³。

从中国 27°N 以南地区 2006 年 6~8 月份的平 均云液水含量的经度—高度剖面中可以看到(图 6),中国南部地区(SC)2006 年 6~8 月份的平均 云液态水含量在 95°E~105°E之间的1~6 km 高度 范围内存在一个明显的高值区分布带,最大月平均 云液水含量值在 2.280~3.290 g/m³之间,而在 105°E 以东地区的月平均云液水含量值相对较低。 另外,在 80°E~85°E之间的1~2.5 km 高度范围 内也存在一个月平均云液水含量高值区,这里实际 上对应的是印度西南季风核心影响区。

对于上述平均云液水含量纬向特征的进一步分 析,可以发现,(20°N~30°N,95°E~105°E)范围 的云液态水含量高值明显是受到东亚夏季风环流系 统的影响,该系统包括了西太平洋副热带高压以及 沿副热带南侧和西侧的东南季风、印度西南季风、 跨赤道气流以及中纬度扰动等,这些影响系统都具 有暖湿气流的共同特点,并且在云贵高原作用下发 生抬升,从而形成了上述特点(Tao and Chen, 1987)。

6 中国地区夏季 6~8 月平均云冰水 含量的经向变化特征

在各类云中,冰云对地球辐射收支的影响是很 独特的,冰云对温度变化反馈的正负号有赖于其含 水量、高度以及详细的微物理属性。利用地基云雷 达反演冰云含水量的工作已经开展了很多,特别是 在 ARM 项目中。在已有利用地基雷达反演云冰水 含量的研究中,多采用类似于 IWC=*a*·*Z*⁶ 的关系 式来建立云冰水含量 IWC (单位:g/m³)和雷达反 射率 *Z* (单位:mm⁶/m³)之间的关系,不同研究者 给出的 a 和 b 值各不相同。Liu and Illingworth (2000) 给出的结果是 a=0.097, b=0.59; Mace et al. (2002) 给出的结果是 a=0.1037, b=0.516; Seo and Liu (2005) 给出的结果是 a=0.078, b=0.79。IWC-Z关系之所以变化较大,主要原因包括:(1)所采用的云粒子谱分布(指数分布和 Gamma 分布)及冰密度不同,(2) 计算后向散射时对冰粒子的处理方法不同(球形和非球形)。CloudSat 卫星采用了结合云粒子谱分布先验信息的 Bayesian 反演算法,对全球范围内的冰云 IWC 进行反演,因此,全球不同地区的冰云 IWC 比较分析具有统一的算法基础。

图 7 给出了中国地区 2006 年 6~8 月的月平均 云冰水含量经向平均垂直分布,从中可以看到,中 云高度以上(低纬度对应 8 km 以上,高纬度对应 6 km 以上),月平均云冰水含量随着云高度增加呈 现减小的趋势,其原因一方面是水汽随着高度的增 加而减小,另一方面是冰晶随着自身不断长大而下 沉,造成冰水含量通常随着云高度增加而降低。

从各月平均云冰水含量的纬度一高度剖面中可 以看到,CloudSat 卫星反演的 2006~2008 年 6~8 月份的中国地区月平均云冰水含量在垂直方向上的 最大高度在 19 km 附近,在 35°N 以北高度明显下 降,说明在中国地区,冰相云发展的上限是 19 km 高度,中国北部地区的冰相云发展高度比南部地区 有明显偏低。

月平均云冰水含量经向垂直分布的高值区(大于 0.15g/m³)基本都在 6~18 km 的对流层上部, 且经向分布主要是在 20°N~35°N 之间,反映出 CloudSat 卫星探测并反演的中国地区高含水量冰 云主要分布在这一纬度区。个别纬度上在 15 km 以上高度出现有月平均云冰水含量奇高值区,主要 原因是在该位置上参与统计的样本数少。

值得注意的是,在 20°N~35°N 之间对流层上 部月平均云冰水含量高值区出现的情况说明,除了 大气温度层结使低纬比高纬度地区的对流层顶高, 相应的云发展高度也较高这一主要因素外,还可能 受到其它因素的影响。根据已有的观测研究,热带 地区深对流云出现较多,并有时能够穿透对流层 顶,在深对流系统消散后通常会遗留下冰相卷云, 这种卷云的高度通常在 15 km 以上 (Comstock et al., 2002)。中国南部低纬度地区 (20°N~27°N)的



图 11 中国不同地区夏季 (a-c) 6 月、(d-f) 7 月、(g-i) 8 月海拔高度 6~11 km 上的平均云冰水含量纬向分布 (实线) 和纬向平均值 (点划线): (a, d, g) 北部; (b, e, h) 中部; (c, f, i) 南部

Fig. 11 Longitudinal distributions (solid line) and averages (dash-dotted line) of ice cloud water content for 6-11 km above sea level for (a-c) Jun, (d-f) Jul, and (g-i) Aug: (a, d, g) Northern China; (b, e, h) central China; (c, f, i) southern China

月为 0.055 g/m³。上述结果说明,云冰水含量主要 高值区的云冰水含量在中国南部和中部地区不同月 份之间的变化很小,而在中国北部地区不同月份之 间的云冰水含量变化明显,并且从 6 月到 8 月呈现 逐月减小的趋势。

另外,对于中国中部和南部地区,6~11 km 高 度上的平均云冰水含量纬向分布在整个纬向范围内 变化不明显,而在中国北部地区云冰水含量在 80°E~105°E之间的值比105°E~130°E之间的值 略微偏小。

8 总结

中国区域夏季 6~8 月的云水含量垂直向和经 纬向分布特征受到青藏高原、云贵高原等地形、大 气环流的影响非常明显,对于天气和气候预报预测 以及水文循环都非常重要。主要得出以下几点结 论:

(1)在中国地区夏季 6~8月,星载云雷达探 测到云中液态水含量上限是在 9 km 高度附近,冰 相云发展的上限是 19 km,北部地区的对流发展高 度比南部地区略有偏低。这与 Su et al. (2008)的 热带地区对流发展上限超过 16 km 且沿极向减小 的结论并不矛盾。

(2)夏季云月平均液态含水量经向垂直分布的 高值区基本都在2km以下的对流层下部,且经向 分布主要在25°N~32°N之间,反映出中国地区夏 季6~8月高含水量性低云主要分布在这一纬度区。 这与中国夏季降水分布紧密相关。另外,在27°N~ 35°N之间的中部纬度区,对流层中层4~7km高 度上的月平均云液水含量明显比南部及北部纬度地 区的月平均云液水含量要高,说明青藏高原对所在 纬度地区对流层中层云的明显影响。

(3)中国夏季各月平均云液水含量垂直廓线存 在两个不同高度上的峰值区,一个在海拔高度 0.5~ 1.0 km之间,另一个在 3.5~4.5 km。这一结果与 Su et al. (2008)对热带地区分析的结果相类似,但 高度有差别(后者分别是 1.5 km 和 5 km),原因可 能主要是,在热带地区云垂直结构主要受大尺度参 数的控制,在中国地区更多受到青藏高原和东亚季 风环流的影响。对于中国中部区和北部区,第二峰 No. 1 YANG Dasheng et al. Characteristics of Vertical Distributions of Cloud Water Contents over China during ... 101

值比较明显,且北部区第二峰值高度要比中部区低 1~2 km。对于中国南部区,第二峰值区不够明显。 这种情况说明,即使是青藏高原和东亚季风环流都 对云 LWC 产生影响,对不同区域的影响也是有所 差别的。

(4)中国地区夏季,平均冰水含量经向垂直分 布的高值区(大于 0.15 g/m³)基本都在 6~18 km 的对流层上部,且主要分布在 20°N~35°N 之间。 云冰水含量在 80°E~130°E 之间的海拔高度 6~ 11 km 范围内存在一个明显的纬向高值区分布带的 特征,说明青藏高原对云纬向垂直结构的影响能够 达到冰云部分。

致谢 感谢 CloudSat 开发组能将产品数据公开发布。本文所用数 据由 CloudSat 数据处理中心获取(http://www.cloudsat.cira.colostate.edu/[2009-03-10])。

参考文献 (References)

- Comstock J M, Ackerman T P, Mace G G. 2002. Ground-based lidar and radar remote sensing of tropical cirrus clouds at Nauru Island: Cloud statistics and radiative impacts [J]. J. Geophys. Res., 107 (D23), 4714, doi: 10.1029/2002JD002203.
- 丁守国. 2004. 中国地区云及其辐射特性的研究 [D]. 中国科学院 大气物理研究所博士学位论文. Ding S G. 2004. Study on clouds and their radiative properties over China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Haynes J M, Stephens G L. 2007. Tropical oceanic cloudiness and the incidence of precipitation: Early results from CloudSat [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L09811, doi: 10.1029/2007GL029335.
- 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 Xingyu, Guo Xueliang, Zhu Jiang. 2008. Climatic distribution features and trends of cloud water resources over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1094-1106.

- Liu C-L, Illingworth A J. 2000. Toward more accurate retrievals of ice water content from radar measurements of clouds [J]. J. Appl. Meteor., 39: 1130-1146.
- Luo Y L, Zhang R H, Wang H. 2008. Comparing occurrences and vertical structures of hydrometeors between the Eastern China and the Indian monsoon region using CloudSat/CALIPSO Data [J]. J. Climate, 22: 1052-1064, doi: 10.1175/2008JCLI26061.
- Mace G G, Heymsfield A J, Poellot M R. 2002. On retrieving the microphysical properties of cirrus clouds using the moments of the millimeter-wavelength Doppler spectrum [J]. J. Geophys. Res., 107 (D24), 4815, doi: 10.1029/2001JD001308.
- Mace G G, Marchand R, Zhang Q, et al. 2007. Global hydrometeor occurrence as observed by CloudSat: Initial observations from summer 2006 [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L09808, doi: 10. 1029/2006GL029017.
- Su H, Jiang J H, Vane D G, et al. 2008. Observed vertical structure of tropical oceanic clouds sorted in large-scale regimes [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L24704, doi: 10.1029/2008GL035888.
- Seo E-K, Liu G. 2005. Retrievals of cloud ice water path by combining ground cloud radar and satellite high-frequency microwave measurements near the ARM SGP site [J]. J. Geophys. Res., 110, D14203, doi: 10.1029/2004JD005727.
- Tao S, Chen L. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M] // Chang C P, Krishnarmurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford University Press, 60 72.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 17: 2702-2713.
- 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 767-779.
- Zhang Y Y, Klein S, Mace G G, et al. 2007. Cluster analysis of tropical clouds using CloudSat data [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L12813, doi: 10.1029/2007GL029336.