

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 Yimin, Yan Yafei, Lu Jianhua, Liu Xiaolin. 2018. Review of current investigations of cloud, radiation and rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 847–858, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281.

基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原 云辐射及降水的研究进展

刘屹岷^{1,2} 燕亚菲³ 吕建华⁴ 刘肖林^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 上海市气象科学研究所, 上海 200030

4 中山大学大气科学学院, 广州 510275

摘 要 青藏高原上空的云及其相关联的降水和辐射影响了高原上空非绝热加热的空间结构。2006 年卫星发射升空的 CloudSat/CALIPSO 卫星提供了定量的、完整的云垂直结构信息。本文回顾了国内外基于该资料进行的青藏高原上云宏观和微观结构特征, 云与降水相关性, 云辐射效应以及模式中的云—辐射问题方面的研究。指出抬升的青藏高原上水汽较少, 限制了高原上云的垂直高度, 对云层厚度和层数有显著压缩作用。在云量及其季节变化上, 单层云的相对贡献大于亚洲季风区的其他区域; 夏季对流云比较浅薄, 积云发生频率最高, 云内滴谱较宽; 降水云以积云和卷云为主, 云对总降水的贡献随着云层数增多而减小, 降水增强时高层冰粒子的密集度趋于紧密; 夏季青藏高原地区云的净辐射效应在 8 km 高度存在一个厚度仅 1 km 左右但较强的辐射冷却层, 而在其下(4~7 km 高度之间)为强的辐射加热层。最后展望了未来需要进一步开展的研究。

关键词 CloudSat/CALIPSO 卫星资料 青藏高原 云 辐射 降水

文章编号 1006-9895(2018)04-0847-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1805.17281

Review of Current Investigations of Cloud, Radiation and Rainfall over the Tibetan Plateau with the CloudSat/CALIPSO Dataset

LIU Yimin^{1,2}, YAN Yafei³, LÜ Jianhua⁴, and LIU Xiaolin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030

4 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

Abstract Clouds over the Tibetan Plateau (TP) and associated precipitation and radiation affect the structure of the TP diabatic heating. The CloudSat/CALIPSO launched in 2006 has provided quantitative information on three-dimensional

收稿日期 2017-11-15; 网络预出版日期 2018-05-14

作者简介 刘屹岷, 女, 1965 年出生, 研究员, 主要从事副热带天气气候动力学、青藏高原天气气候动力学研究。E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 91637312、91437219, 中国科学院前沿科学重点研究项目 QYZDY-SSW-DQC018, NSFC-广东联合基金(第二期)超级计算科学应用研究专项—国家超级计算广州中心项目 U1501501

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91637312, 91437219), the Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant QYZDY-SSW-DQC018), the Special Program for Applied Research on Super Computation of the NSFC-Guangdong Joint Fund (second phase) (Grant U1501501)

distribution of clouds. This paper reviews the studies on the macrophysical and microphysical properties, the connection with precipitation, the cloud radiative forcing and the problem in numerical simulations of clouds over the TP based on the CloudSat/CALIPSO data. It is pointed out that there is less water vapor above the TP, which limits the vertical height of clouds on the plateau and significantly affects the cloud thickness and the number of cloud layers. The relative contribution of single layer cloud on the cloud fraction and its seasonal variation is greater than that in other Asian monsoon regions. The convective cloud in summer is relatively shallow, the cumulus cloud occurrence frequency is the highest, and the drop spectrum in the cloud is wider over the TP. Cirrus and cumulus clouds are major cloud types that have precipitation. The cloud contribution to total precipitation decreases with the increase of the number of cloud layers. The number concentration of ice particle tends to be denser at higher altitudes when precipitation enhances. In the summer, net radiative cooling effect occurs over a layer of only 1 km thick at the height of 8 km over the TP, where the cooling is very strong. Below the cooling layer is a strong radiative heating layer located between 4–7 km. Finally, the future studies are proposed.

Keywords CloudSat/CALIPSO dataset, Tibetan Plateau, Cloud, Radiation, Precipitation

1 引言

云的存在及其宏观和微观结构影响了大气的辐射效应、潜热效应和对流效应,在气候系统的能量和水分循环中起着重要的作用(Ramanathan et al., 1989; Li et al., 1995; Adler et al., 2003; Randall et al., 2003; Stephens, 2005)。云是地气系统辐射收支的主要调控者(Wang and Rossow, 1998; 邱金桓等, 2003; Liou, 2004)。一方面,云吸收和散射太阳短波辐射,通过对太阳辐射较高的反射率起到了冷却地气系统的作用,体现了云的“反照率效应”;另一方面,云吸收和反射地球表面和对流层下层发射的红外长波辐射,同时云自身又能够以较低的温度向外发射热辐射,起到加热地气系统的作用,体现了云的“温室效应”。这两种相反效应的综合使云的作用不能简单地用云的净辐射效应来衡量。云的存在和垂直分布不仅影响着大气层顶的净辐射收支,还将引起大气垂直方向上能量的再分配,进而影响到大气环流和天气气候(汪宏七和赵高祥, 1994; Wu and Liu, 2003)。同时云的各种物理性质和光学性质的模拟是影响气候模拟和气候预测准确性和可靠性的重要因素。因此,对云—辐射进行细致的气候学研究是极为重要的。

由于观测手段的限制,云的垂直分布一直以来都是云的众多参数中非常重要却又很难得以量化的物理量。研究表明云的垂直分布可以通过改变大气的辐射加热率和潜热加热率的垂直梯度来影响大气环流(Webster and Stephens, 1984; Ramaswamy and Ramanathan, 1989; Wang and Rossow, 1998)。随着航空和遥感技术的发展,飞机观测和卫星遥感资料得以大量使用(Hughes, 1984; Rossow et al., 1989; Rossow and Schiffer, 1991)。然而,传统的基于被

动式传感器的卫星资料由于观测手段的限制只能粗略地估计云的位置和垂直范围。直到搭载毫米波云廓线雷达的 CloudSat (Cloud Satellite) 卫星 (Stephens et al., 2002) 和搭载云气溶胶激光雷达的 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 卫星 (Winker et al., 2007) 发射升空,完整的云垂直结构信息才能从这种基于主动式传感器的卫星上获得。该卫星资料已被用来检验其他卫星产品和模式结果 (Johnson and Boukabara, 2016; Wang et al., 2016; Hillman et al., 2017)。

青藏高原位于欧亚大陆东部的副热带地区,其独特的地理位置、巨大的面积及达到对流层中层的海拔高度,使其通过动力和热力强迫作用对全球大气环流和水循环产生显著的影响(如吴国雄等, 1997, 2005; Wu and Zhang, 1998; Duan and Wu, 2005; Liu et al., 2007, 2012, 2017; Wu et al., 2007, 2012, 2016; Xu et al., 2008, 2010, 2013)。一方面,青藏高原上空空气密度只有临近平原的一半左右,从而云—辐射展现出特殊的空间结构;另一方面,云和降水的转化过程不仅影响大气的热力垂直廓线结构,同时也是造成高原尺度上升运动的重要因子,而该上升运动则是建立和维持季风环流的主要动力之一。近年来国内外不同研究组已开展了基于 CloudSat/CALIPSO 资料的青藏高原上云的气候特征、与降水的关联、辐射效应及模式模拟相关的研究。本文将对这些研究进行回顾,并对未来进一步需要开展研究的科学问题进行讨论。

2 青藏高原云垂直结构

CloudSat/CALIPSO 的一个主要科学目标是提供云垂直廓线的信息。已有很多学者利用 CloudSat/

CALIPSO 资料对青藏高原云的结构特征进行了研究。研究工作包括两类, 一是云量、分布等宏观特征, 另一类是云微物理特征。

王胜杰等(2010)对比青藏高原、高原南坡和南亚季风区的云层厚度, 发现青藏高原地区的云层最薄。汪会等(2011)针对东亚季风区、印度季风区、西北太平洋季风区和青藏高原四个不同区域, 对比分析了云量、云垂直结构及其季节变化特征, 指出青藏高原在各季节单层云的相对贡献率都大于亚洲季风区的其他区域。燕亚菲(2016)和 Yan et al. (2016)通过和毗邻的陆地和海洋地区相应的云的特征对比, 较系统地研究了青藏高原地区云的垂直结构及其季节变化, 指出青藏高原地区的云具有独特的垂直结构和季节变化特征, 大地形对云层厚度和层数有显著的压缩效应。云量一年均为单峰型但存在显著季节变化。在夏季(6~8月)中心位于对流层中上层(位于5~9 km), 另外在12 km 上下存在接近20%云量的副中心; 冬春秋季节中心比夏季的略高型, 以层状云为主(图1)。这是由于受到高原的地形特征及对大气低层水汽供应的限制, 青藏高原云层厚度和层数显著地被压缩。高原南坡地区表现为显著的干湿季节, 在5月中到10月中的雨季呈现双峰型。他们还基于环流季节变化解释了不同地区云结构季节变化原因(图2)。

夏季高原的深对流相对于亚洲季风区深对流的特征和作用存在着争议。Fu et al. (2006)基于微波边缘探测器(MLS)和热带雨量测量卫星(TRMM)的资料提出在表面感热加热作用下, 青藏高原比亚洲季风区通过对流向平流层输送更多的水汽和一氧化碳。而 Park et al. (2007)使用向外长波辐射资料, 认为最强的对流发生在亚洲季风区, 不在青藏高原上空及其南坡。Houze et al. (2007)和 Romatschke et al. (2010)对 TRMM 的雷达降水数据进行了详细分析, 显示与高原南坡和南亚季风区相比, 青藏高原上的对流较弱。利用能够揭示对流云内部反射率垂直结构的 CloudSat/CALIPSO 卫星资料, Luo et al. (2011)分析了青藏高原的深对流云, 并与亚洲季风区和北美副热带地区对比, 揭示出青藏高原整体而言深对流云比较浅薄、水平尺度较小、发生较不频繁的新事实, 指出高耸的地形造成高原上水汽含量少, 部分抵消了高原上地面强的感热加热有利于形成强的对流不稳定性作用, 使得高原上地面空气的对流有效位能较小、中

性浮力层的高度比较低, 不利于深厚对流的发展。

对云的层数和种类的研究方面, 高洋等(2014)研究了青藏高原同纬度带不同层数云出现的概率及其云水含量, 结果表明: 无论有雨还是无雨时青藏高原都是以单层云为主导云; 并且与同纬度地区相比, 青藏高原上的单层云较厚。Li and Zhang (2016)研究了高原夏季8类云(卷云、高层云、高积云、层云、层积云、积云、雨层云和浓积云)的发生频率, 以发生事件为尺度, 指出积云(Cu)事件的发生频率最高, 达到54%。其发生与高原上表面的热力强迫产生的有关(Wu et al., 2015)。高原白天加热产生弱且浅薄的不稳定层和较低的自由对流高度。刘建军和陈葆德(2017)给出青藏高原上空不同高度、不同季节8类云的发生频率, 分析了云的水平和垂直分布特征及其物理成因。指出冬季高原西部的低云频率高; 春季高原中北部的中云频率高, 西部和东南部的低云频率高; 夏季南部的低云(包括Cu)和高云频率高; 秋季云发生频率都很低。他们认为低云的形成主要是地形抬升作用, 中云的形成与高原热力作用相关。

就云微物理特征而言, 基于 CloudSat/CALIPSO, 汪会等(2011)发现青藏高原上的云内滴谱较宽。赵艳风等(2014)分析了青藏高原地区云的云水路径, 发现液水路径大值区在高原南部和东部, 以液相云为主; 冰水路径大值区在高原中部、北部及西部, 以冰相云为主; 云中粒子群随高度先增多后减少, 粒子的大小和数目均在4 km 处达到最大。Zhang et al. (2014)对比分析了冬半年青藏高原雨层云和高层云的发生频次、云顶高度、云水含量、光学厚度等的昼夜差异。陈玲和周筠珺(2015)分析了夏季青藏高原、四川盆地降水云类型的差别以及微观特征的差异。张华等(2015)对东亚地区云的微物理量的分布特征和季节变化进行了研究, 指出青藏高原地区冰水含量的季节差异最大。张晓等(2015)和李浩然等(2015)分析了夏季青藏高原东部云内水凝物垂直结构和云量、云水路径变化特征, 结果表明: 高原东部云的发展可达平流层, 且云在5 km 以下为水云, 5~10 km 为固、液共存的混合态云, 在10 km 以上为冰云; 青藏高原主体以单云层为主; 多层云发生频率在27°N 以北明显减少; 冰水含量在青藏高原上的季节变化最大。此外, Naud and Chen (2010)、Jiang et al. (2011)、王帅辉等(2011)和 R  thrich et al. (2013)

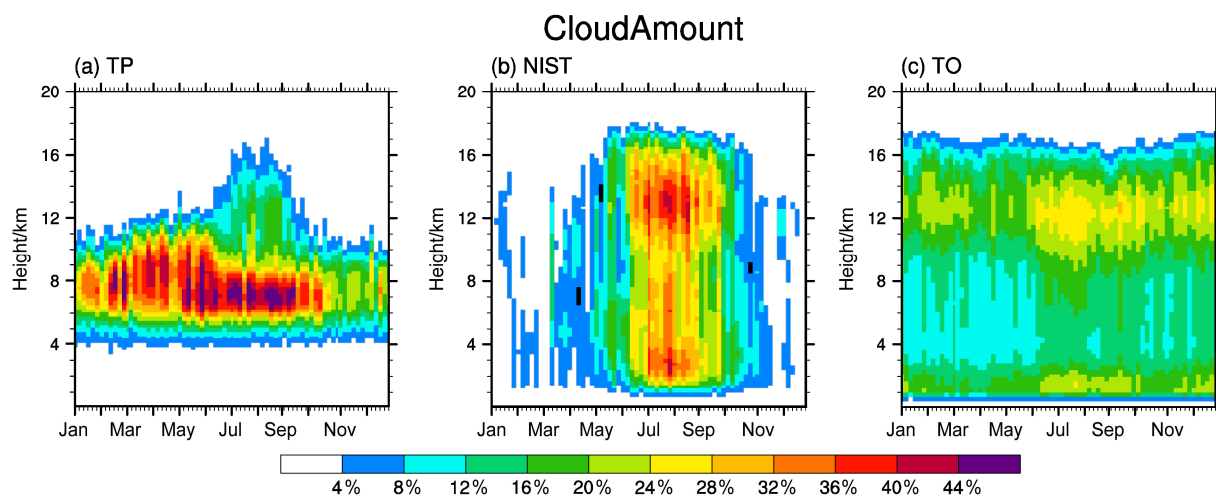


图1 2006年6月15日至2011年4月17日期间 (a) 青藏高原 (TP)、(b) 高原以南陆地 (NIST) 和 (c) 热带海洋 (TO) 地区候平均云量垂直分布的季节变化。修改自 Yan et al. (2016)

Fig. 1 Seasonal variation of Pentad-averaged cloud amounts over the (a) TP (Tibetan Plateau), (b) NIST (land to the south of the TP and north Indian) and (c) TO (Tropical Ocean). Data are from 15 June 2006 to 17 April 2011. Adapted from Yan et al. (2016)

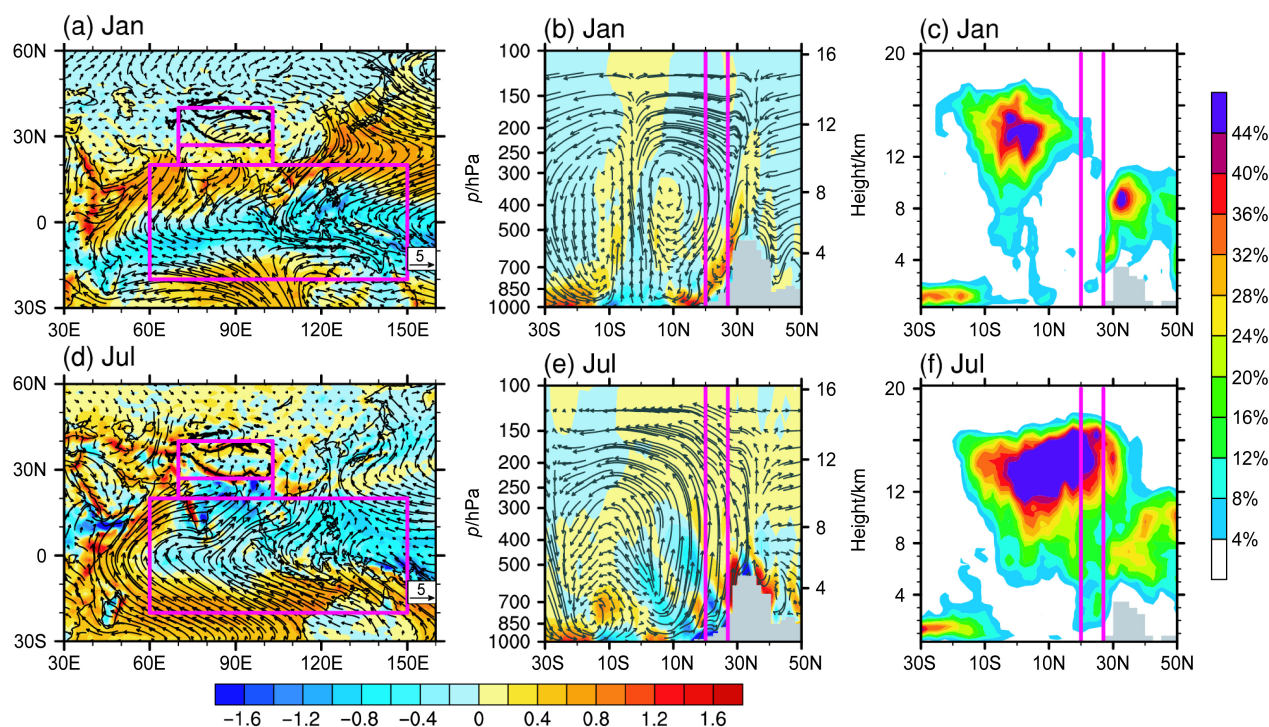


图2 (a-c) 2007~2011年1月平均和 (d-f) 2006~2010年7月平均ERA-Interim数据资料中环路和水汽通量散度以及95°E垂直剖面云量分布: (a, d) 10米风(箭头, 单位: m s^{-1})和地面到100 hPa垂直积分水汽通量散度场(填色, 单位: $10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$), 其中粉色线代表三个区域的范围; (b, e) 95°E垂直剖面水汽通量散度场(填色, 单位: $10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)、经向风速(单位: m s^{-1})与垂直速度(单位: $-\text{Pa s}^{-1}$)的合成矢量(箭头); (c, f) 95°E垂直剖面云量(填色); (b, c, e, f)中的粉色线均代表NIST地区所在纬度范围, 灰色阴影均代表地形。修改自 Yan et al. (2016)

Fig. 2 Distributions of atmospheric circulation, moisture flux divergence and vertical profile of cloud amount along 95°E in (a-c) January from 2007 to 2011 and (d-f) July from 2006 to 2010 by ERA-Interim data: (a, d) 10 m wind (arrows, units: m s^{-1}) and divergence of vertically integrated moisture flux (shadings, units: $10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) integrated from surface to 100 hPa, and pink boxes represent domains of three regions; (b, e) vertical profiles of the divergence of moisture transport (shadings, units: $10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) and meridional-vertical velocity vectors (arrows, units: $-\text{Pa s}^{-1}$) along 95°E; (c, f) vertical profiles of cloud amount along 95°E. The vertical pink lines and gray shadings in (b, e) and (c, f) represent zonal boundaries of the NIST and topography, respectively. Adopted from Yan et al. (2016)

不同程度地结合 CloudSat 资料、国际卫星云气候项目资料、Meteosat 卫星资料或者再分析资料对青藏高原云的特征进行了相关研究。

3 青藏高原云与降水相关性的研究

云与降水有着密切的联系。随着卫星技术的发展, 云的内部结构与降水的关系也越来越得到重视。如 Fu et al. (2006) 利用逐轨道的 TRMM 降水日资料揭示了夏季青藏高原降水云垂直结构存在“塔状”特点。但模式中往往设定的云的垂直分布, 影响了模拟的降水。例如云的垂直结构直接影响大尺度模式中的播撒—受播降水机理 (Jakob and Klein, 1999)。

赵艳凤等 (2014) 利用 CloudSat 资料研究发现, 与东亚地区相比, 青藏高原降水云的垂直分布尺度较小, 雷达反射率范围较大, 云粒子群的累积滞留过程不明显。陈玲和周筠珺 (2015) 结合 CloudSat 资料、FY-2D 卫星的黑体温度资料和台站降水资料, 统计分析了青藏高原、四川盆地及其过渡区域夏季降水云的宏微观物理特性和差异, 结果表明, 青藏高原的降水云发展初期, 云中的冰相粒子等效半径大、谱宽较宽。降水云以积云和卷云为主, 低云所占比例大于中云和高云; 另外以冰云为主, 混合相云次之, 水云最少。

Yan et al. (2016, 2018) 基于 2006~2010 年 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的 3 套数据和相同时段的 3 小时 TRMM 3B42 (空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 降水资料研究了云的垂直结构与降水的关系。结果指出对两套资料的联合分析显示青藏高原

大地形对云垂直结构多样性和降水有限制作用。高原上云对平均降水强度的贡献随着云层数增多而减小, 云的层数越多, 其对降水率的贡献越少 (图 3)。与不同降水强度相对应的云层实际总厚度和最上层云云顶高度及其变化范围, 在青藏高原地区都明显小于其它两个区域。

燕亚菲 (2016) 和 Yan et al. (2018) 还对比分析了发生不同强度降水时, 青藏高原与其邻近陆地和海洋地区云微观垂直结构。指出与邻近地区相比, 高原降水强度较弱, 但是季节变化更明显; 对于同等强度的降水, 在垂直方向上, 高原上的液态水位于较高的高度, 而固态水则位于较低高度, 在 4~8 km 更容易出现尺寸较大的固、液态粒子。夏季, 无雨时 (图 4), 高原上云冰粒子主要位于较低高度 (5~10 km), 粒子尺寸和数浓度比邻近地区更丰富; 随着降水增强, 4~8 km 云冰含量增多, 高层冰粒子的聚集度趋于紧密, 低层冰粒子的等效半径明显增大且空间分布得更均匀 (图 5)。然而即使是暴雨, 高原地区冰粒子的数浓度也最有可能在 $100 \sim 250 \text{ L}^{-1}$ 之间, 小于其邻近的陆地和热带海洋地区; 此外, 对于同等级的降水, 高原地区冰粒子尺寸的谱分布宽于其它地区。但是, 他们在研究中没有区分对流云和层状云。需要注意的是随着降水增强, CloudSat 资料对液态水的反演误差增大, 在研究中需要考虑。

4 青藏高原云辐射效应的研究

云辐射效应 (原称云辐射强迫) 的概念是由 Ramanathan 在 1989 年 (Ramanathan et al., 1989)

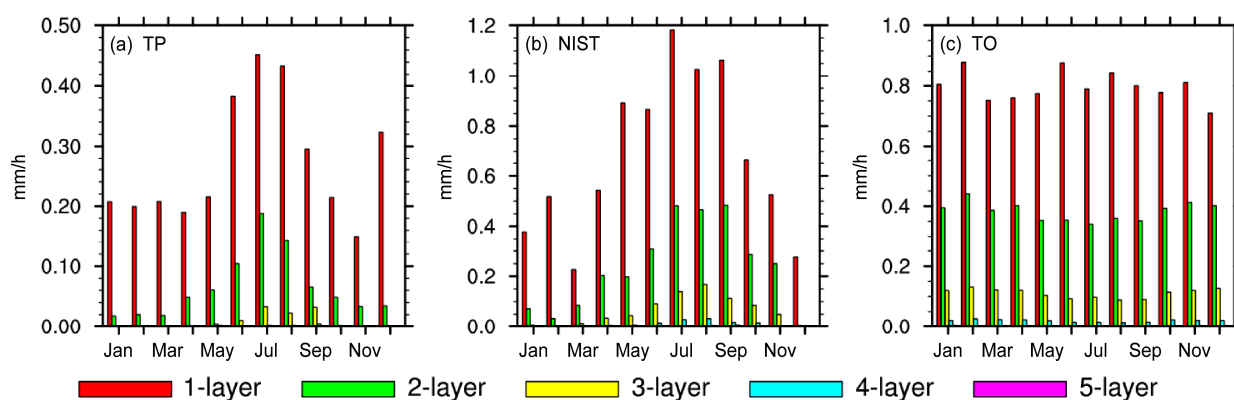


图3 2006年6月15日至2010年12月31日数据时段内 (a) 青藏高原、(b) NIST 和 (c) TO 地区单层云和多层云 (1 到 5 层) 对平均降水强度贡献量的逐月分布。引自 Yan et al. (2016)

Fig. 3 Monthly-mean contributions of precipitation intensity corresponding to clouds of 1–5 layers to mean precipitation intensity over the (a) TP, (b) NIST, and (c) TO from the data period: 15 June 2006 to 31 December 2010. Quoted from Yan et al. (2016)

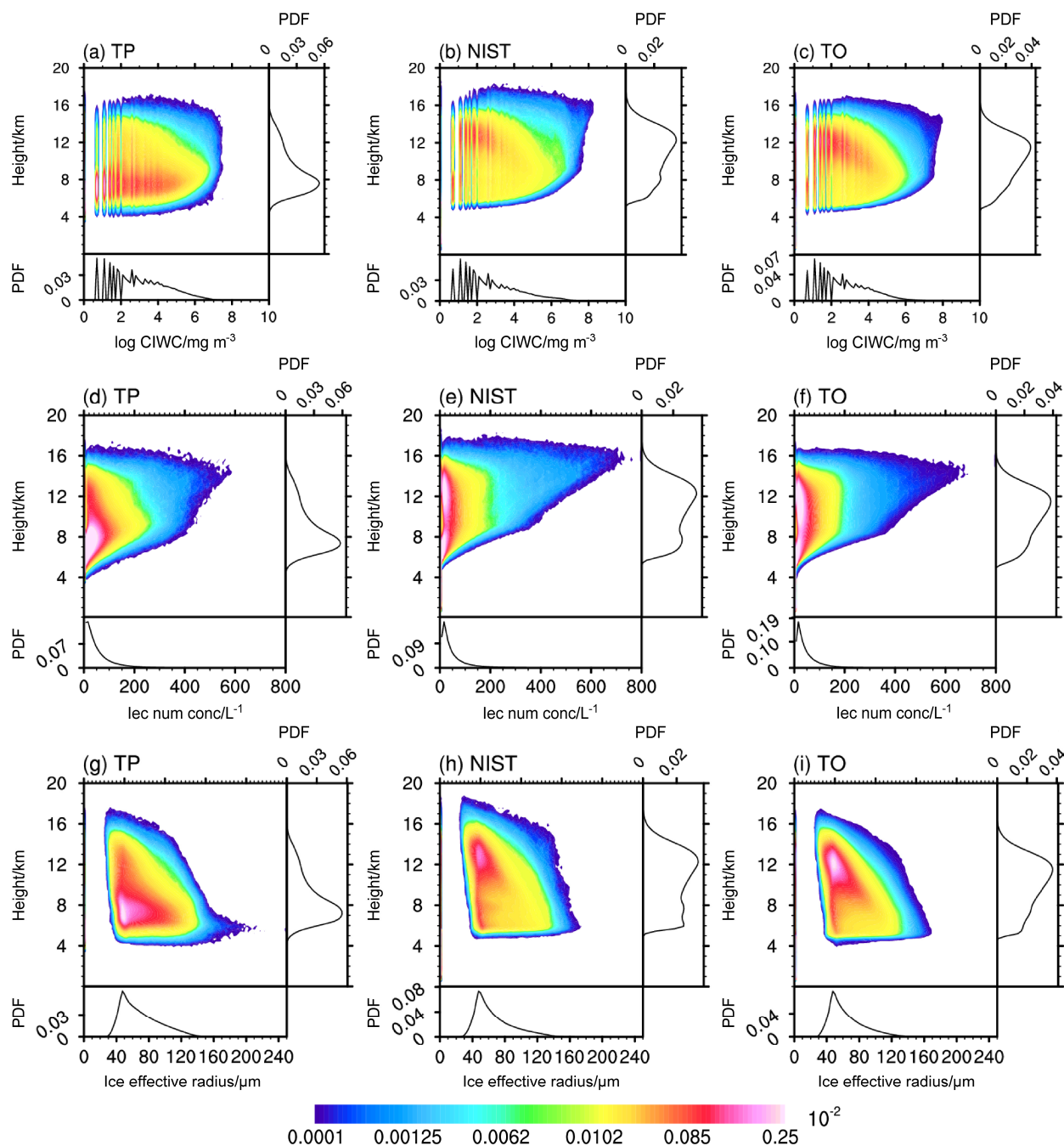


图4 2007年1月1日至2010年12月31日数据时段内夏季无雨时TP(左列)、NIST(中间列)和TO(右列)地区标准化的不同高度处(a-c)云固态水含量、(d-f)云固态粒子数浓度和(g-i)云固态粒子等效半径和概率密度函数分布(PDF)。引自Yan et al. (2018)

Fig. 4 The normalized frequency by altitude diagrams (color-shaded) and probability distribution functions (PDF) of (a-c) cloud ice water content, (d-f) number concentration, and (g-i) effective radius over the TP (left column), NIST (middle column) and TO (right column) under no rain condition in the summer from data period: 1 January 2007 to 31 December 2010. Quoted from Yan et al. (2018)

第一次提出的,反映了云的存在造成辐射能量的增多或者减少。发射CloudSat的一个关键目标是提供足够的信息以确定云在大气辐射加热中的贡献(Stephens et al., 2002)。Yan et al. (2016)指出,在青藏高原地区,无论对于地—气系统,还是对于

地表而言,云短波辐射效应均为冷却,而长波辐射效应为加热,净辐射效应为弱的冷却(图6)。但单就对整层大气而言,云对大气层总的短波辐射效应为加热,尤其在春夏季节最强,并且具有很明显的区域独特性;同时云对大气层总的长波辐射效应为

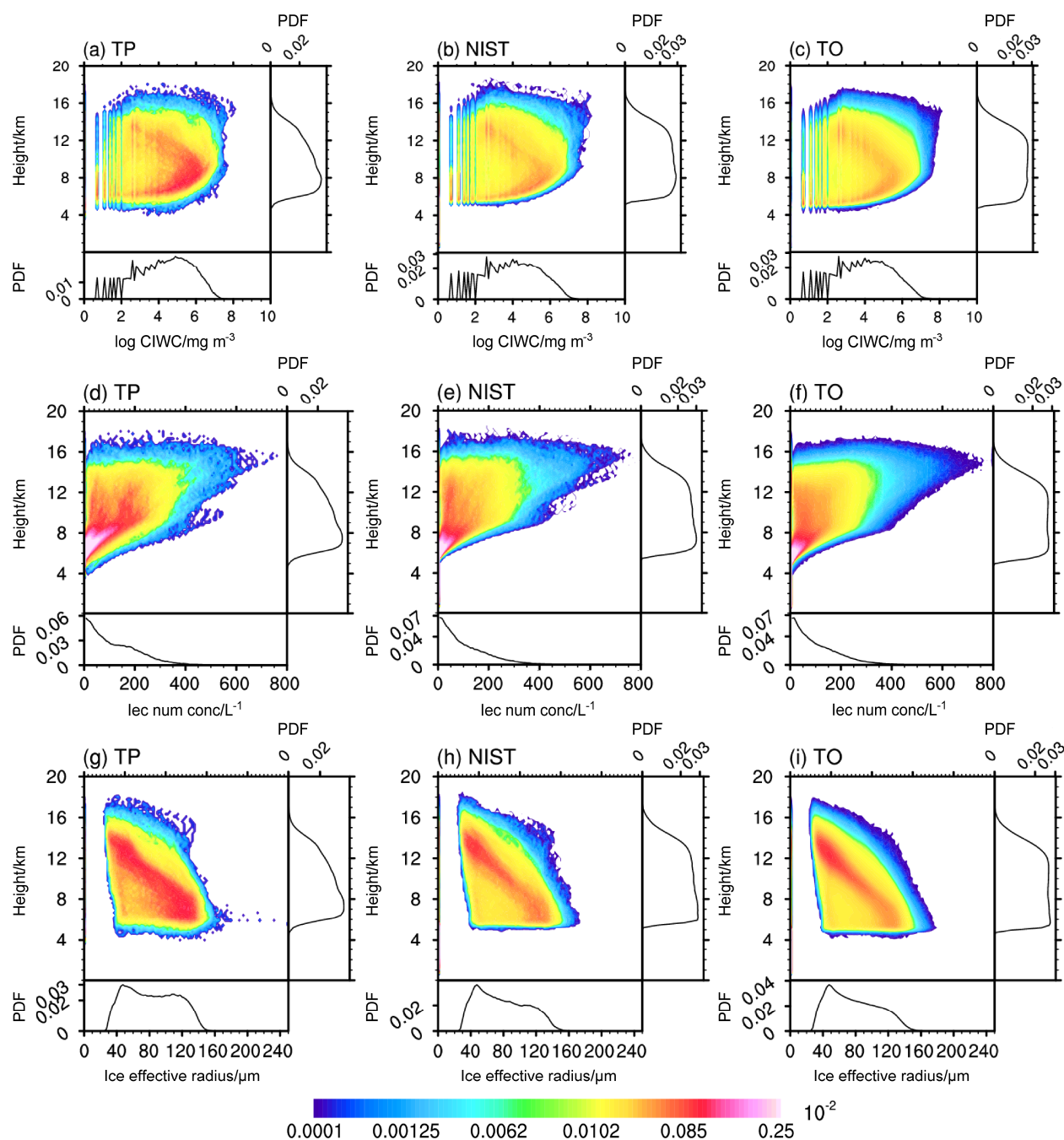


图5 同图4，但为夏季大雨时 ($25\sim50\text{ mm d}^{-1}$)。引自 Yan et al. (2018)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for heavy rain ($25\sim50\text{ mm d}^{-1}$) condition. Quoted from Yan et al. (2018)

冷却 (约为 -20 W m^{-2})，该辐射效应不同于同纬度地区和热带地区，在青藏高原上表现出了与中高纬地区相似的特征 (图 7)。

青藏高原上空云辐射效应呈现独特的垂直结构，突出表现为夏季青藏高原地区云的净辐射效应在 8 km 高度存在一个厚度仅 1 km 左右但较强的辐射冷却层，而在其下 ($4\sim7\text{ km}$ 高度之间) 为

强的辐射加热层 (图 8)。该发现对于认识该地区对流、云辐射和大尺度环流之间相互作用有重要意义。

5 模式中的云—辐射问题

CloudSat/CALIPSO 的科学目标是为评估和提高云的模拟，为全球模式提供数据，改善之前对气

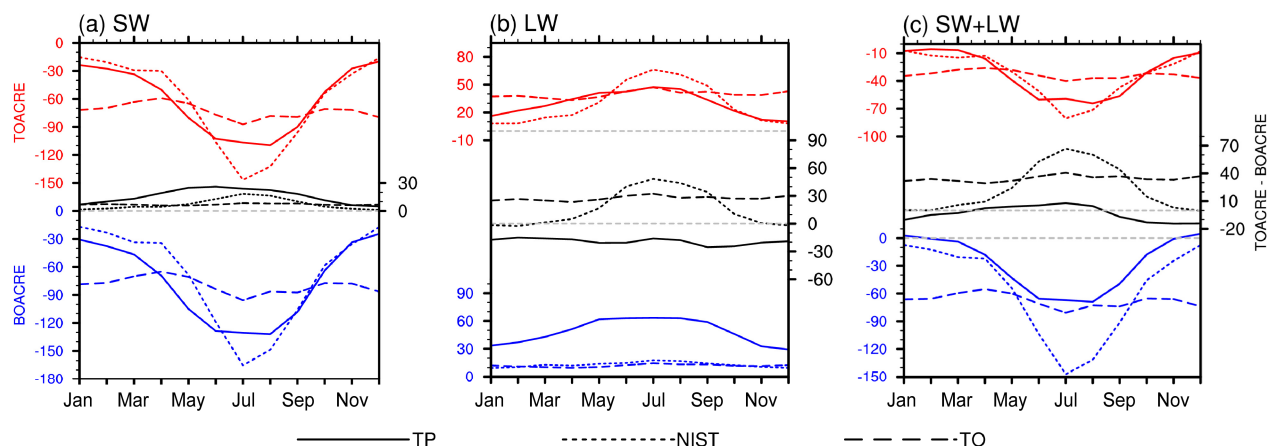


图6 2006年7月6日至2011年4月17日数据时段内TP、NIST和TO大气层顶部、大气层底部和整层大气的云辐射效应（短波、长波、短波+长波）的逐月变化；正值代表加热，负值代表冷却，灰色虚线代表0。引自Yan et al. (2016)

Fig. 6 Seasonal cycles (units: W m^{-2}) of shortwave (SW), longwave (LW) and total (SW+LW) CRE (Cloud radiation effect) at the top of the atmosphere (TOACRE), in the atmosphere (TOACRE-BOACRE), and at the bottom of the atmosphere (BOACRE) over three regions. Positive (negative) values represent heating (cooling) rates from data period: 6 July 2006 to 17 April 2011. Quoted from Yan et al. (2016).

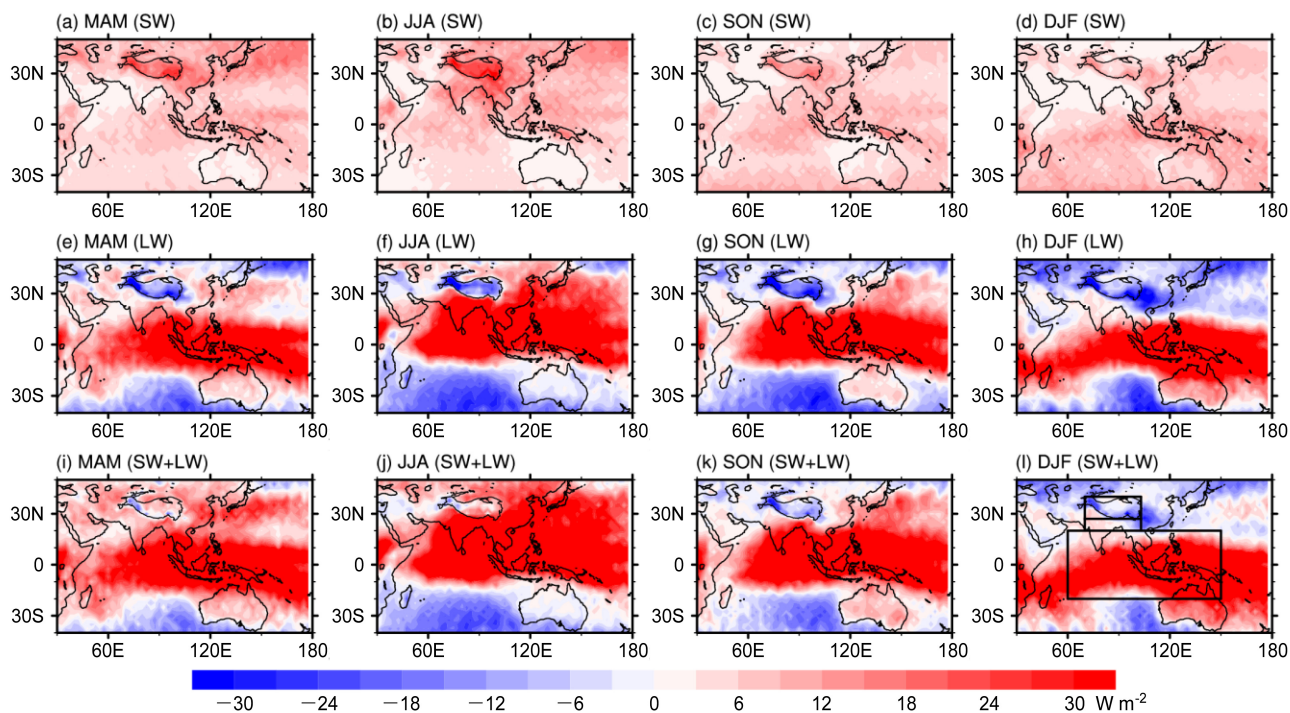


图7 2006年7月6日至2011年4月17日数据时段内整层大气的云辐射效应（短波、长波、短波+长波）的季节分布；正值代表加热，负值代表冷却。引自Yan et al. (2016)

Fig. 7 Spatial patterns (units: W m^{-2}) of atmospheric cloud shortwave (SW), longwave (LW), total (SW+LW) CRE in different seasons from data period: 6 July 2006 to 17 April 2011. Quoted from Yan et al. (2016)

候变化和云与气候之间反馈作用的有限理解。基于该资料，张华等（2013）研究了东亚地区的云的垂直结构，计算了在气候模式的云辐射过程中表征云的垂直重叠特征的重要参数抗相关厚度。指出处于较高纬度的北方地区和西北地区的抗相关厚度

整体大于较低纬的青藏高原地区和南方地区。青藏高原地区和南方地区的抗相关厚度具有夏季最大，春、秋次之，冬季最小的特点。并以 CloudSat/CALIPSO 得到的垂直重叠特征等为观测依据，改进 BCC_AGCM2.0.1 模式中的云辐射方案（Zhang et

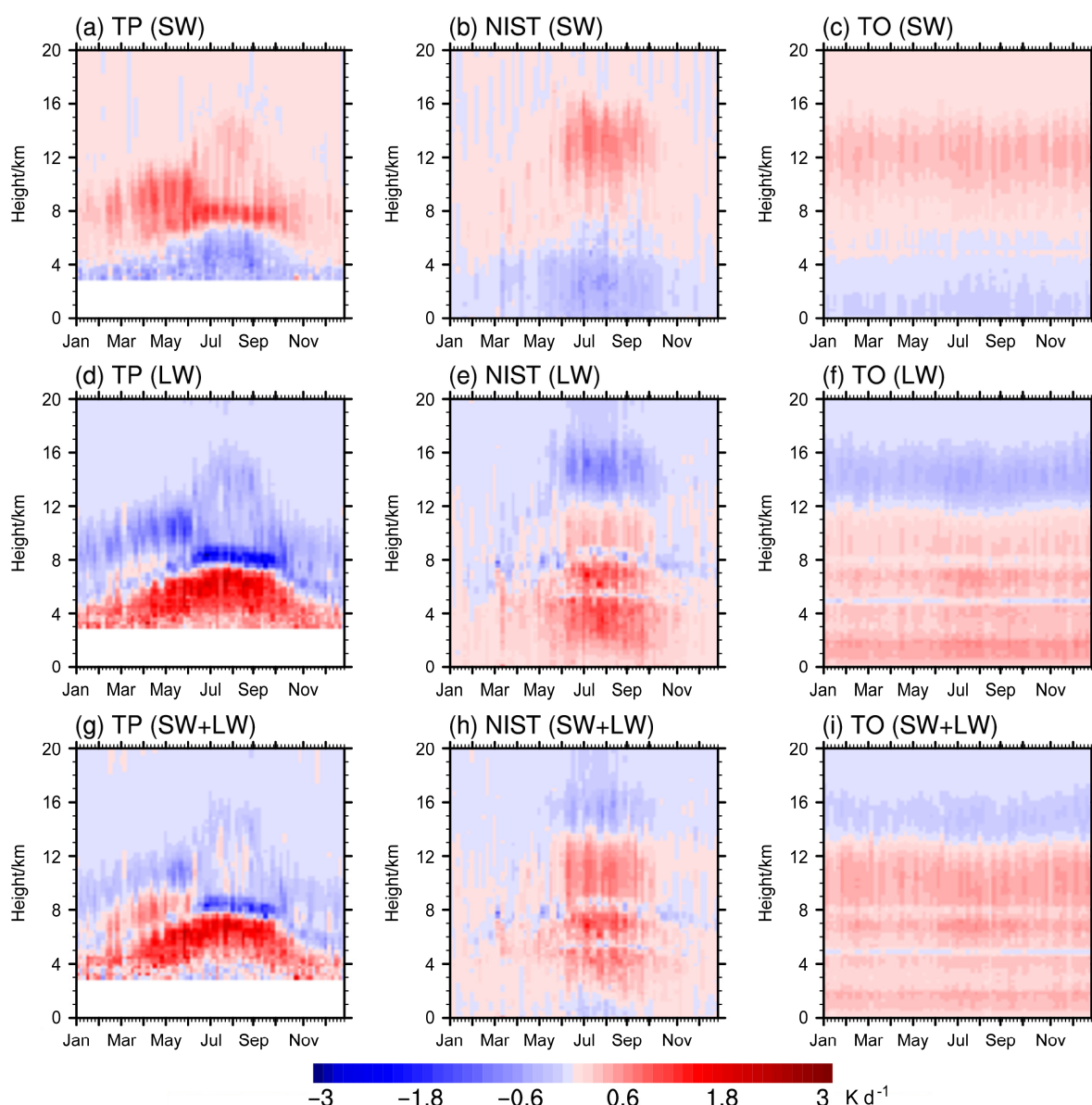


图8 2006年7月6日至2011年4月17日数据时段内TP、NIST和TO云辐射中的(a、b、c)短波、(d、e、f)长波、(g、h、i)短波+长波效应的逐候分布；正值代表加热，负值代表冷却。引自Yan et al. (2016)

Fig. 8 Seasonal cycles (units: K d^{-1}) of vertical profiles of shortwave (SW, upper panel), longwave (LW, middle panel) and total (SW+LW, lower panel) CRE per unit mass over the TP (left), NIST (middle) and TO (right). Positive (negative) values represent heating (cooling) rates from data period: 6 July 2006 to 17 April 2011. Quoted from Yan et al. (2016)

al., 2014)。不过文中未提及改进效果在青藏高原上是否有所体现。Li and Zhang (2017) 诊断了CAM5.3 模式对浅对流的模拟性能，指出与CloudSat/CALIPSO 观测的浅对流云相比，模式能基本模拟青藏高原上显著多的浅对流云，但可能模式中由于湿静力能偏弱，深对流过度活跃，使模拟的高原浅对流强度偏弱，云顶高度偏低了2 km，不能给出观测中陡峭的高原南坡上强的、云顶达到5 km

的浅对流大值区。

6 讨论

目前已开展的研究中，基本上给出了云—辐射的三维特征，但讨论其与环流间的反馈较少。需要加强理解云、辐射和对流和环流之间相互作用和反馈过程，从而改善在气候变化和云与气候之间反馈作用上尚广存在的局限性的理解。

发展高分辨率模式需要更精细尺度的云垂直结构及其辐射效应, 基于 CloudSat/Caplisso 等卫星资料的研究在改进高分辨率模式的参数化方面具有重要的作用, 但目前的应用较少。对于青藏高原上独特的云辐射过程的理解及在模式改进上的应用尚需要大量工作, 尤其是通过卫星资料和高分辨率大气环流模式的比较, 可以改进对青藏高原区域的模拟能力, 从而可能改进对亚洲季风的模拟甚至预报。

CloudSat/Caplisso 是极轨卫星, 无法给出时间连续的观测。未来还需要将 CloudSat/Caplisso 资料与其他卫星特别是静止卫星的产品结合, 以更精细定量地给出青藏高原和季风区云—辐射时空分布和变化的结构, 从而改进高分辨大气环流模式中的参数化方案。

参考文献 (References)

- Adler R F, Huffman G J, Chang A, et al. 2003. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present) [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 4 (6): 1147–1167, doi:10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2.
- 陈玲, 周筠珏. 2015. 青藏高原和四川盆地夏季降水云物理特性差异 [J]. *高原气象*, 34 (3): 621–632. Chen L, Zhou Y J. 2015. Different physical properties of summer precipitation clouds over Qinghai–Xizang Plateau and Sichuan Basin [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (3): 621–632, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00036.
- Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia [J]. *Climate Dyn.*, 24 (7–8): 793–807, doi:10.1007/s00382-004-0488-8.
- Fu R, Wright J S, Jiang J H, et al. 2006. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 103 (15): 5664–5669, doi:10.1073/pnas.0601584103.
- Fu Y F, Liu G S, Wu G X, et al. 2006. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (5): L05802, doi:10.1029/2005GL024713.
- 高洋. 2014. 我国沿青藏高原同纬度带降水云系的垂直结构及其微物理特征的分析模拟研究 [D]. 中国气象科学研究院博士学位论文. Gao Yang. 2014. Analyses and numerical simulations on the vertical structure and microphysics feature of precipitating cloud along the latitude zone of Tibetan Plateau over China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Chinese Academy of Meteorology Sciences.
- Hillman B R, Marchand R T, Ackerman T P, et al. 2017. Assessing the accuracy of MISR and MISR-simulated cloud top heights using CloudSat- and CALIPSO-retrieved hydrometeor profiles [J]. *J. Geophys. Res.*, 122 (5): 2878–2897, doi:10.1002/2016JD025510.
- Houze R A Jr, Wilton D C, Smull B F. 2007. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM precipitation radar [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133 (627): 1389–1411, doi: 10.1002/qj.106.
- Hughes N A. 1984. Global cloud climatologies: A historical review [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (5): 724–751, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0724:GCCAHR>2.0.CO;2.
- Jakob C, Klein S A. 1999. The role of vertically varying cloud fraction in the parametrization of microphysical processes in the ECMWF model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (555): 941–965, doi:10.1002/qj.49712555510.
- Jiang X N, Waliser D E, Li J L, et al. 2011. Vertical cloud structures of the boreal summer intraseasonal variability based on CloudSat observations and ERA-interim reanalysis [J]. *Climate Dyn.*, 36 (11–12): 2219–2232, doi:10.1007/s00382-010-0853-8.
- Johnson B T, Boukabara S A. 2016. Development of the community active sensor module (CASIM): Forward simulation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, doi:10.5194/amt-2016-154.
- 李浩然, 孙学金, 王旻燕, 等. 2015. 中国及周边地区白天各类云及其水凝物变化特征研究 [J]. *高原气象*, 34 (6): 1625–1635. Li Haoran, Sun Xuejin, Wang Minyan, et al. 2015. Research on different types of cloud and variation characteristics of hydrometeors in cloud over China and its neighborhood in daytime [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 34 (6): 1625–1635, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00129.
- 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, doi:10.1175/JCLI-D-15-0492.1.
- Li Y Y, Zhang M H. 2017. The role of shallow convection over the Tibetan Plateau [J]. *J. Climate*, 30 (15): 5791–5803, doi:10.1175/JCLI-D-16-0599.1.
- Li Z Q, Barker H W, Moreau L. 1995. The variable effect of clouds on atmospheric absorption of solar radiation [J]. *Nature*, 376 (6540): 486–490, doi:10.1038/376486a0.
- Liou K N. 2004. 大气辐射导论 [M]. 郭彩丽, 周诗健, 译. 2 版. 北京: 气象出版社, 614pp. Liou K N. 2004. An Introduction to Atmospheric Radiation (in Chinese) [M]. Guo C L, Zhou S J, trans. 2nd ed. Beijing, China Meteorological Press, 614pp.
- 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 Jianjun, Chen Baode. 2017. Cloud occurrence frequency and structure over the Qinghai–Tibetan Plateau from CloudSat observation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 36 (3): 632–642, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00028.
- Liu Y M, Hoskins B, Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B: 1–19.
- Liu Y M, Wang Z Q, Zhuo H F, et al. 2017. Two types of summertime heating over Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing II. Sensible heating Over Tibetan–Iranian Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 60(4): 733–744, doi:10.1007/s11430-016-9016-3.
- Liu Y M, Wu G X, Hong J L, et al. 2012. Revisiting Asian monsoon formation and change associated with Tibetan Plateau forcing: II. Change [J]. *Climate Dyn.*, 39(5): 1183–1195, doi:10.1007/s00382-012-1335-y.
- Luo Y L, Zhang R H, Qian W M, et al. 2011. Intercomparison of deep convection over the Tibetan Plateau–Asian monsoon region and subtropical North America in boreal summer using CloudSat/CALIPSO data [J]. *J. Climate*, 24 (8): 2164–2177, doi:10.1175/2010JCLI4032.1.

- Naud C M, Chen Y H. 2010. Assessment of ISCCP cloudiness over the Tibetan Plateau using CloudSat–CALIPSO [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D10): D10203, doi:10.1029/2009JD013053.
- Park M, Randel W J, Gettelman A, et al. 2007. Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura Microwave Limb Sounder tracers [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (D16): D16309, doi: 10.1029/2006JD008294.
- 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2003. 现代大气物理学研究进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 628–652. Qiu Jinhuan, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2003. Modern research progresses in atmospheric physics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 628–652.
- Ramaswamy V, Ramanathan V. 1989. Solar absorption by cirrus clouds and the maintenance of the tropical upper troposphere thermal structure [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46 (14): 2293–2310, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<2293:SABCCA>2.0.CO;2.
- 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.
- Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. 2003. Breaking the cloud parameterization deadlock [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (11): 1547–1564, doi:10.1175/BAMS-84-11-1547.
- Romatschke U, Medina S, and Houze R A Jr. 2010. Regional, seasonal, and diurnal variations of extreme convection in the South Asian region [J]. *J. Climate*, 23 (2): 419–439, doi:10.1175/2009JCLI3140.1.
- Rossow W B, Schiffer R A. 1991. ISCCP cloud data products [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72 (1): 2–20, doi:10.1175/1520-0477(1991)072<0002:ICDP>2.0.CO;2.
- Rossow W B, Garder L C, Lacis A A. 1989. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part I: Sensitivity of Analysis [J]. *J. Climate*, 2 (5): 419–458, doi:10.1175/1520-0442(1989)002<0419:GSCVFS>2.0.CO;2.
- Rüthrich F, Thies B, Reudenbach C, et al. 2013. Cloud detection and analysis on the Tibetan Plateau using Meteosat and CloudSat [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (17): 10082–10099, doi:10.1002/jgrd.50790.
- Stephens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review [J]. *J. Climate*, 18 (2): 237–273, doi:10.1175/JCLI-3243.1.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The Cloudsat mission and the A-Train [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83 (12): 1771–1790, doi:10.1175/BAMS-83-12-1771.
- 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.11.
- 汪宏七, 赵高祥. 1994. 云和辐射 (I) 云气候学和云的辐射作用 [J]. *大气科学*, 18 (S1): 910–932. Wang Hongqi, Zhao Gaoxiang. 1994. Cloud and radiation I: Cloud climatology and radiative effects of clouds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18 (S1): 910–932.
- Wang J H, Rossow W B. 1998. Effects of cloud vertical structure on atmospheric circulation in the GISS GCM [J]. *J. Climate*, 11 (11): 3010–3029, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<3010:EOCVSO>2.0.CO;2.
- 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. Wang Shengjie, He Wenyong, Chen Hongbin, et al. Statistics of cloud height over the Tibetan Plateau and its surrounding region derived from the CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (1): 1–9.
- 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚, 等. 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析 [J]. *高原气象*, 30 (1): 38–52. Wang Shuaihui, Han Zhigang, Yao Zhigang, et al. 2011. Analysis on cloud vertical structure over China and its neighborhood based on CloudSat data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (1): 38–52.
- Wang T, Fetzner E J, Wong S, et al. 2016. Validation of MODIS cloud mask and multilayer flag using CloudSat–CALIPSO cloud profiles and a cross-reference of their cloud classifications [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (19): 11620–11635, doi:10.1002/2016JD025239.
- Webster P J, Stephens G L. 1984. Cloud–radiation interaction and the climate problem [M]//Houghton J L. *The Global Climate*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 63–78.
- 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.
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea [J]. *Monthly weather review*, 126 (4): 913–927, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0913:TPFATT>2.0.CO;2.
- Wu G X, Liu Y M. 2003. Summertime quadruplet heating pattern in the subtropics and the associated atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (5): 1201, doi:10.1029/2002GL016209.
- 吴国雄, 李伟平, 郭华, 等. 1997. 青藏高原感热热泵和亚洲夏季风[M]//叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 116–120. Wu Guoxiong, Li Weiping, Guo Hua, et al. 1998. Sensible heating-driving air pump of the Tibetan Plateau and the Asian summer monsoon [M]//Ye Duzheng. *Memorial Volume of Prof. Zhao Jiuzhang (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 116–126.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局 [J]. *大气科学*, 29 (1): 47–56. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Xin, et al. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 47–56, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.06.
- Wu G X, Duan A M, Liu Y M, et al. 2015. Tibetan Plateau climate dynamics: Recent research progress and outlook [J]. *National Science Review*, 2 (1): 100–116, doi:10.1093/nsr/nwu045.
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon [J]. *Scientific Reports*, 2: 404.
- Wu G X, Liu Y M, Wang T M, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (4): 770–789, doi:10.1175/JHM609.1.
- Wu G X, Zhuo H F, Wang Z Q, et al. 2016. Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing I. Over Tibetan Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 59 (10): 1996–2008, doi:10.1007/s11430-016-5328-2.
- Xu X D, Lu C G, Ding Y H, et al. 2013. What is the relationship between

- China summer precipitation and the change of apparent heat source over the Tibetan Plateau? [J]. *Atmospheric Science Letters*, 14 (4): 227–234, doi:10.1002/asl2.444.
- Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. 2008. World water tower: An atmospheric perspective [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (20): L20815, doi:10.1029/2008GL035867.
- Xu X D, Lu C G, Shi X H, et al. 2010. Large-scale topography of China: A factor for the seasonal progression of the Meiyu rainband? [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D2): D02110, doi:10.1029/2009JD012444.
- 燕亚菲. 2016. 基于 CloudSat/CALIPSO 卫星资料的青藏高原云垂直结构和辐射效应的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 142 pp.
- Yan Yafei. 2016. Cloud vertical structure and cloud radiative effects over Tibetan Plateau based on CloudSat/CALIPSO data [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. 142 pp.
- Yan Y F, Liu Y M, Lu J H. 2016. Cloud vertical structure, precipitation, and cloud radiative effects over Tibetan Plateau and its neighboring regions [J]. *J. Geophys. Res.*, 121 (10): 5864–5877, doi:10.1002/2015JD024591.
- Yan Y F, Wang X C, Liu Y M. 2018. Cloud vertical structures associated with precipitation magnitudes over the Tibetan Plateau and its neighboring regions [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 11 (1): 44–53, doi:10.1080/16742834.2018.1395680.
- 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, doi:10.1007/s11430-012-4489-x.
- 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. 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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13313.
- Zhang H, Jing X, Li J. 2014. Application and evaluation of a new radiation code under McICA scheme in BCC_AGCM2.0.1. [J]. *Geoscientific Model Development*, 7 (3): 737–754, doi:10.5194/gmd-7-737-2014.
- 张晓, 段克勤, 石培宏. 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. Zhang Xiao, Duan Kinqin, Shi Peihong. 2015. Cloud vertical profiles from CloudSat data over the eastern Tibetan Plateau during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (6): 1073–1080, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14196.
- 赵艳凤, 王东海, 尹金方. 2014. 基于 CloudSat 资料的青藏高原地区云微物理特征分析 [J]. *热带气象学报*, 30 (2): 239–248. Zhao Yanfeng, Wang Donghai, Yin Jinfang. 2014. A study on cloud microphysical characteristics over the Tibetan Plateau using CloudSat data [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 30 (2): 239–248, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2014.02.005.