

基于 CALIPSO 的京津冀地区 MODIS 卷云云顶高度订正

杨冰韵 刘健* 贾煦

国家卫星气象中心, 北京, 100081

摘要 卷云在大气辐射中扮演着重要角色, 对天气系统和气候变化产生重要影响。相比传统地基观测手段, 卫星遥感更容易探测到高层卷云的信息, 本文利用 CALIOP 主动遥感仪器可获取较为准确的薄卷云特性的特点, 针对 MODIS 被动遥感探测器反演的薄卷云云顶高度的偏差开展订正研究。研究选取 2013-2017 年京津冀地区 MODIS 云产品, 结合 CALIPSO 的卷云云顶高度数据, 基于交叉验证的方法得到线性拟合方案, 对 MODIS 卷云云顶高度进行订正。订正后的 MODIS 与 CALIPSO 卷云云顶高度差值的分布区间由 $-3\sim 2$ km 变为 $-2.0\sim 2.5$ km, 峰值由 -0.8 km 左右变为 0.2 km 左右。订正效果随云顶高度和云光学厚度的不同有所变化, 其中较低层卷云和光学薄卷云的订正效果更明显。

关键词 卷云, 云顶高度, MODIS, CALIPSO

文章编号 中图分类号 文献标识码

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1911.19181

Correction for the cirrus cloud top height of MODIS based on CALIPSO in Beijing-Tianjin-Hebei region

YANG Bingyun LIU Jian JIA Xu

National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract Cirrus plays an important role in atmospheric radiation. It affects weather system and climate change. Satellite remote sensing has great advantage in cirrus detection, relative to traditional observation. As a passive remote sensing instrument, large deviations are found at thin cirrus cloud top height from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Comparatively, CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) aboard CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) which is an active remote sensing instrument, can acquire more accurate characteristics of thin cirrus cloud. In this study, MODIS cloud products in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2017 are selected. Using CALIPSO cirrus cloud top height data, a linear fitting method is obtained based on cross-validation method, and MODIS cirrus cloud top height is corrected. The difference between MODIS and CALIPSO changes from $-3\sim 2$ km to $-2.0\sim 2.5$ km. Moreover, the maximum difference changes from about -0.8 km to about 0.2 km. In the context of different vertical levels and cloud optical depth, MODIS cirrus cloud top height is improved after correcting, which is more obvious at lower cloud top height and optical thinner cirrus.

Keywords Cirrus, Cloud top height, Correction, MODIS, CALIPSO

收稿日期 2019-06-27; 网络预出版日期

作者简介 杨冰韵, 女, 1989 年出生, 硕士, 主要从事卫星资料分析与应用研究。E-mail: yangby@cma.gov.cn

通讯作者 刘健, 主要从事大气参数遥感反演方法及应用研究。E-mail: liujian@cma.gov.cn

资助课题 国家自然科学基金项目 61531019, 国家重点研发计划专项项目 2018YFC1407204、2018YFC1506603

Found by National Natural Science Foundation of China (Grants 61531019), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502501、Grant 2018YFC1506603)

1 引言

卷云位于对流层中上层和平流层的下层,属于高层云,在大气辐射中扮演着重要角色,卷云既可以通过反射太阳辐射,使到达地表和大气的能量减少,冷却大气,同时也能吸收地表和大气发射的长波辐射,起到加热大气的作用,从而对全球能量的收支平衡以及天气系统和气候变化产生影响(Liou, 1986),因此对卷云的探测是大气科学领域的热点和难点问题。

卷云在全球不同云类型中总云量占比较大,在南北纬度 60 度之间,大约占有所有云中的 20%,而冰云中 40%是卷云(Heidinger and Pavolonis, 2005)。卷云尽管水平分布范围较广,但一般成丝缕状分布,水平不均匀性较强,垂直分布范围小(刘瑞金等, 2011),且一部分卷云具有半透明性,一部分卷云下面常出现中低云。这种特性使得对卷云的准确探测成为难点,因此需要发挥不同探测手段在时空分辨率和精度上的优势。卷云的探测主要分为人工目测、地基观测、探空观测、卫星遥感观测等,可获得云量、云高、云顶温度等宏观特性和光学厚度、粒子尺度等微物理参数。人工目测通过人的经验判断云状信息,估测卷云的高度,是传统的卷云观测方式,但通常卷云很薄,人眼有时不可识别。地基遥感垂直探测具有时间连续性好的优势,包括激光云高仪、热红外成像仪、毫米波雷达等,通过接收到的回波信号判断云区位置,实现云的垂直探测(陆雅君等, 2012; 胡树贞等, 2012; 王喆等, 2016),然而地基观测覆盖范围小,而且回波信号会受到中低层云的影响而衰减,使得高云云顶高度的探测值存在偏差(周非非等, 2010; 曹亚楠等, 2015)。卫星遥感观测的覆盖面积广,与地基观测相比具有良好的空间覆盖性,对云顶信息的探测也较准确。利用卫星对卷云的各种特性进行反演已有十几年的历史,不仅可以获得卷云的高度,而且可以获得卷云微物理特性,如光学厚度和粒子有效半径等(King, 1987; Nakajima and King, 1990)。其中,被动的可见光红外辐射计(如搭载在 Terra 和 Aqua 极轨卫星上的 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer))探测信息主要来自云顶部,当卷云云层较薄,地面向上的发射辐射可穿透云层到达卫星传感器,卫星接收的辐射中同时包含了云顶和地面的辐射信息,使得卷云云顶高度反演出现偏差(Sassen and Campbell, 2001)。作为主动遥感的 CloudSat 卫星搭载的星载毫米波雷达 CPR(Cloud Profile Radar)及 CALIPSO 卫星搭载的激光雷达 CALIOP(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization)等具有很强的垂直探测能力(Wang and Sassen, 2002),可以穿透至云层内部,获取云顶、云底高度等垂直结构信息,国内也已利用其探测数据开展了相关的研究(陈超等, 2014; 张华等, 2015; 杨冰韵等, 2014, 2017, 2019)。主动遥感对卷云云顶高度的探测有很大优势(Nazaryan et al., 2008; Haladay et al., 2009; Heidinger et al., 2010; Thorsen et al., 2011),尤其是 CALIOP 对薄云探测更敏感,对卷云云顶高度的估计更为准确(Weisz et al., 2007),多用来作为被动遥感产品的检验数据。Holz et al.(2008)选取 2006 年 8 月和 2007 年 2 月全球不同纬度带的 MODIS 和 CALIPSO 云顶高度产品,分析发现对于云顶高度大于 5km 的光学薄云来说,MODIS 相对于 CALIOP 会低估云顶高度的值。Menzel et al.(2013)利用 CALIOP 数据对 MODIS 的 MOD06 产品进行检验,发现 MOD06 的云顶高度与 CALIOP 相比存在明显的负偏差,对于卷云而言负偏差更明显。上述研究尽管针对不同研究区域和时段,但对比 MODIS 和 CALIOP 反演的卷云云顶高度均发现 MODIS 存在一定的负偏差,因此有必要对 MODIS 反演的卷云云顶高度进行

订正。

Aqua 和 CALIPSO 卫星同处在 A-Train 系列轨道上, 探测时间接近, 但探测的空间范围覆盖性有较大差别。两类数据图像如图 1 所示, CALIOP 观测数据刈幅较窄, 在 MODIS 图像上呈现出线状分布。CALIOP 对卷云有较高的探测能力, 但观测空间范围较小。Aqua/MODIS 的观测空间覆盖范围较广, 但对云顶高度, 尤其是薄卷云的云顶高度的探测精度不如 CALIPSO/CALIOP。如何利用 CALIPSO 卷云探测精度高的优势, 对 MODIS 卷云云顶高度进行订正, 从而发挥 MODIS 探测范围广的特点是本研究的重点内容。

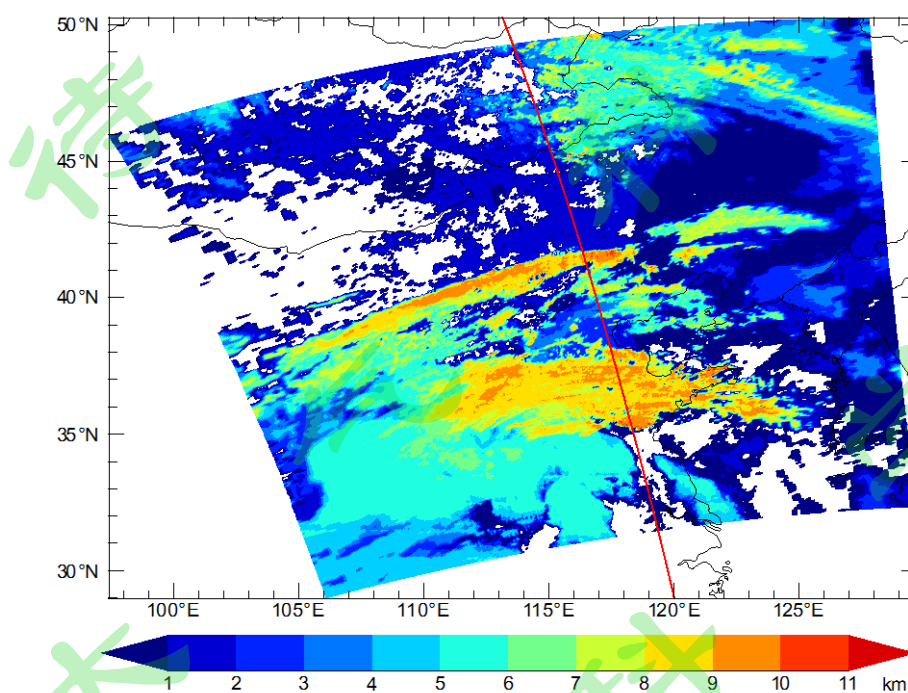


图 1 2017 年 1 月 1 日 05:25 (UTC) MODIS 云顶高度图像, 其上叠加 CALIPSO 轨道
(单位 km, 红线为 CALIPSO 轨道)

Fig.1 Image of cloud top height from MODIS at 05:25, Jan 1, 2017
(unit: km; red line is the orbit of CALIPSO)

我国下垫面种类丰富, 气候类型多样, 不同气候区域内的卷云分布特征也存在很大差异。京津冀地区处于中纬度亚欧大陆东岸, 地势西北高、东南低, 从西北向东南依次为坝上高原、燕山和太行山地、河北平原, 气候具有明显的季节差异, 夏季炎热潮湿多雨, 冬季寒冷干燥少雨。同时, 京津冀地区又是典型的人工影响天气作业区, 研究卷云的高度和分布特征对建立人工影响天气作业指标有重要的指示意义(陈超等, 2014)。然而, 近年来京津冀地区随着经济的快速发展, 气溶胶等污染物的排放量也明显增加(张西雅等, 2017); 卫星遥感反演的云顶高度会受气溶胶的影响存在偏差, 如 Wang et al. (2016) 指出, 有沙尘存在时, MODIS 反演的卷云云顶高度与 CALIPSO 的差值增大。本文首先对 Aqua/MODIS 和 CALIPSO 数据作简单介绍, 然后说明利用 CALIPSO 对京津冀地区 MODIS 卷云云顶高度进行订正的方法, 最后将订正前后的云顶高度做对比分析。

2 资料与方法

2.1 MODIS、CALIPSO 数据

A-Train 系列卫星是美国自主发射的同一轨道上的多颗极轨卫星，目前在轨运行的主要包括 OCO-2、GCOM-W1、CloudSat、CALIPSO、Aqua、Aura 等。Aqua 卫星于 2002 年 5 月 4 日发射，其上搭载了 AMSR-E、MODIS、AMSU-A、AIRS、CERES 等多个传感器，其中 MODIS 为中分辨率成像光谱仪，探测光谱从 0.4 μm 到 14.4 μm ，分布在 36 个光谱波段，可以获取云、气溶胶、大气、地表等辐射信息 (Barnes et al., 2003)。MODIS 云顶气压产品选取 5 个红外通道，在单层云假定条件下，采用 CO_2 薄片法进行反演 (Menzel et al., 2013)。获得云顶气压后，利用 NECP 全球预报系统 (GFS) 数据，转化为云顶高度和云顶温度。由于采用红外通道进行云顶高度反演，对薄卷云的高度会出现低估偏差。本文使用的是 Aqua MODIS L2 级 6.0 版云产品 (简称 MYD06)，分辨率为 1 km。

CALIPSO 卫星于 2006 年 4 月 28 日发射，其上搭载了 CALIOP、WFC、IIR 等传感器，其中 CALIOP 是一部双波长灵敏的偏振激光雷达，可以探测到云和气溶胶的高垂直分辨率廓线，对卷云的探测更加敏感 (Winker et al., 2009; Hagihara et al., 2014)。

本文所使用的 CALIPSO 卫星 L2 级云层产品 CAL_LID_L2_01kmClay-Standard-V4-10，水平分辨率为 1km，数据主要提供云层的云顶和云底高度、温度、气压、反射率及后向散射等参数 (Vaughan et al., 2004)，其中云和气溶胶的识别是通过调节 532 nm 和 1064 nm 两个波长上激光雷达后向散射变化的阈值来实现的 (Liu et al., 2004)。两种数据的时间范围均为 2013-2017 年。

2.2 卷云判识

本研究基于 MODIS 数据的卷云选取参考 ISCCP 的云分类标准 (Rossow and Schiffer, 1999; Cho et al., 2008)，即云光学厚度为 0~3.6，云顶气压在 50~440 hPa 之间。基于 CALIPSO 数据的卷云判识参考 Meenu et al. (2011) 提出的方法：(1) 根据 Feature_Classification_Flags 判识出的特征类型为云，亚类型为卷云；(2) CAD (Cloud Aerosol Discrimination) 评分在 80~100 之间；(3) FFQC (Feature Finder Quality Control) 值等于 0；其中后两条标准表明特征识别具有较高的可信度。由于多层云情形下较低云层的回波信号会受到顶层云的影响而衰减，本文只考虑顶层云为卷云的情况，包含单层云 (卷云) 和多层云 (顶层云为卷云)。

2.3 MODIS、CALIPSO 数据匹配方法

在 A-Train 卫星星座中，CALIPSO 在观测时间上滞后 Aqua 大约 3 分钟，两颗卫星在观测时间上的差异可忽略不计。MODIS 数据轨道扫描宽度为 2330 km，CALIPSO 卫星 L2 级云层产品的星下点水平分辨率为 1 km。采取最近点匹配原则，根据 CALIPSO 扫描点经纬度匹配 MODIS 像元，匹配上的两个卷云样本点作为研究所用数据。本文只选取 MODIS 和 CALIPSO 产品同时判识出卷云时的样本进行匹配。

2.4 卷云云顶高度订正方法

研究选用 2013-2017 年数据，其中 4 年数据作为建模的训练数据，1 年数据作为检验数据。利用线性回归和交叉验证 (Cross-validation) 方法对 2013-2017 年的 MODIS、CALIPSO 卷云云顶高度进行拟合，建立订正模型。采用数据滚动循环方法，即在选定的 2013-2017 年

5 年研究数据中，任选 4 年数据进行建模，1 年数据进行检验，数据循环滚动处理，保证每一年都可作为检验数据，分别得到 5 个拟合系数和相应的订正误差。图 2a~e 依次为分别以 2013、2014、2015、2016、2017 年作为检验数据，其余 4 年作为训练数据时，MODIS 和 CALIPSO 卷云云顶高度的拟合结果，其中拟合参数如表 1 所示。结果显示，5 组拟合数据均具有较好的聚集度，呈现明显的线性分布。各回归模型均通过 0.01 的显著性水平检验，5 组线性拟合决定系数 R^2 表明拟合效果均很好。

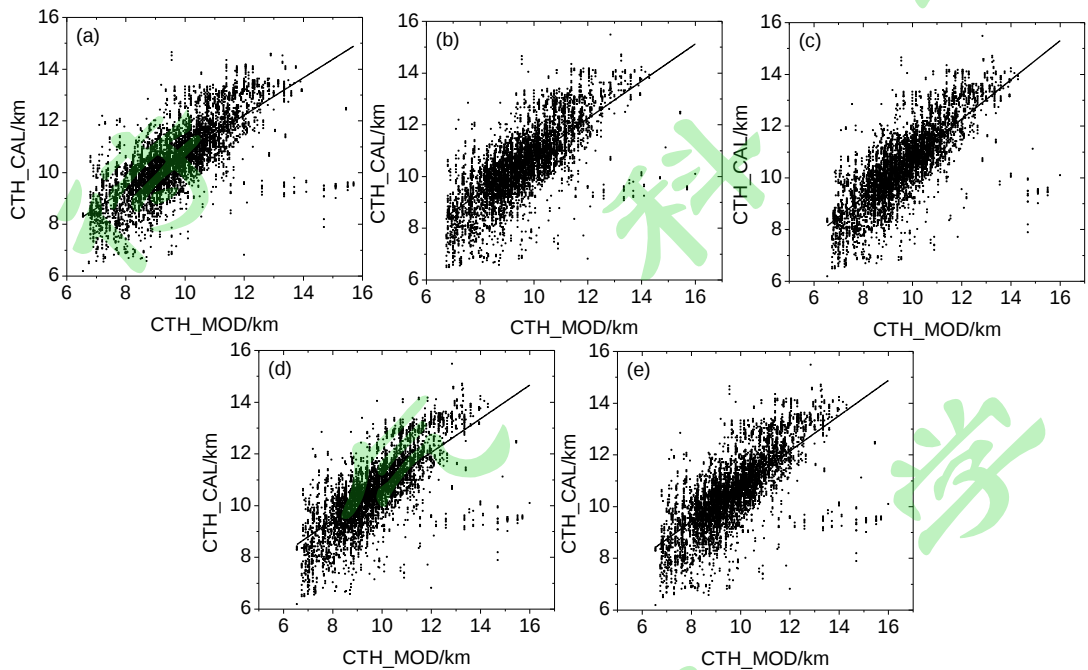


图 2 卷云云顶高度的线性拟合

(横坐标为 MODIS 卷云云顶高度 (CTH_MOD)，纵坐标为 CALIPSO 顶层卷云云顶高度 (CTH_CAL)，单位为 km；a~e 依次对应分别以 2013-2017 各年为检验数据，其他年份数据作为拟合数据时的拟合结果)

Fig.2 Linear fitting of cloud top height

(x and y axis in the five figures represent cloud top height of MODIS (CTH_MOD) and CALIPSO (CTH_CAL), with unit of km. a, b, c, d and e represent fitting results from four of five years excluding 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, respectively)

表 1 云顶高度订正拟合参数一览表

Table 1 Parameter of linear fitting method of cloud top height

训练数据	检验数据	样本数	线性拟合	R^2	均方根误差	相对均方根误差
2014-2017	2013	1343	$y = 0.720x + 3.584$	0.546	1.062	0.101
2013, 2015-2017	2014	1713	$y = 0.720x + 3.606$	0.397	1.051	0.099
2013-2014, 2016-2017	2015	2454	$y = 0.757x + 3.184$	0.444	0.924	0.088
2013-2015, 2017	2016	2414	$y = 0.652x + 4.231$	0.360	0.930	0.088
2013-2016	2017	1984	$y = 0.683x + 3.960$	0.384	0.796	0.077

从 5 组拟合结果可以看出,采用不同年份数据得到的拟合系数间差异不大,说明数据的年际变化不大。根据 MODIS 订正值和 CALIPSO 值分别计算 2013-2017 年采用交叉验证的 5 组拟合模型的均方根误差和相对均方根误差,其中均方根误差的结果依次为 1.062、1.051、0.924、0.930、0.796,相对均方根误差的结果依次为 0.101、0.099、0.088、0.088、0.077,其中以 2017 年数据为检验数据,2013-2016 年数据为拟合数据所得到的 MODIS 云顶高度的订正误差最小,选择作为最终的订正模型。

3 结果与讨论

3.1 基于 MODIS 的卷云云顶高度订正

图 3 是利用订正模型得到的 2017 年京津冀地区基于 MODIS 数据的卷云云顶高度订正结果。从卷云云顶高度的 MODIS 原始值、订正值和 CALIPSO 散点图(图 3a)可以看出,MODIS 云顶高度原始值和 CALIPSO 值分布形态相近,云顶高度在 6~15 km 之间,峰值出现在 9 km 附近。CALIPSO 的云顶高度分布有两个峰值,分别在 10 km 和 11.5 km 附近。订正后(图 3b),MODIS 云顶高度峰值在 11km 附近,与 CALIPSO 值的概率分布曲线更接近,分布最集中的区间为 10~11 km。与此同时,高度在 9 km 以下的探测数据分布较少,与 CALIPSO 值相比存在一定偏差。

从 MODIS 云顶高度原始值、MODIS 云顶高度订正值与 CALIPSO 差值的散点图(图 3c)可以看出,MODIS 原始值与 CALIPSO 差值在 0 km 以下分布较多,存在明显的负偏差,而订正后与 CALIPSO 的差值有所减小。对比两个量对应的概率分布曲线(图 3d),MODIS 原始值与 CALIPSO 差值的分布区间为-3~2 km,峰值在-0.8 km 附近,而订正值与 CALIPSO 差值的分布曲线向右侧偏移,分布范围为-2.0~2.5 km,峰值集中在 0.2 km 附近,从 0.2 km 向左和向右的分布概率逐渐减小。

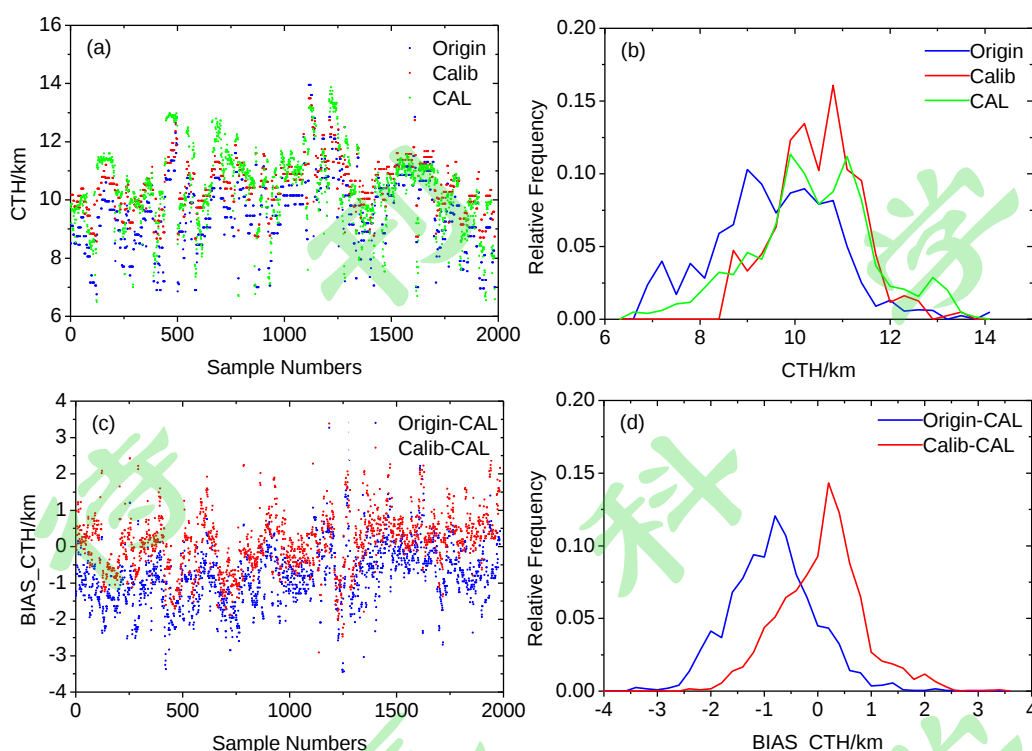


图 3 2017 年卷云云顶高度订正图

(a 为卷云云顶高度 (CTH) 的散点图, 其中蓝、红、绿点分别为 MODIS 原始值 (Origin)、MODIS 订正值 (Calib)、CALIPSO 值 (CAL), b 为 a 中三个量对应的概率分布曲线, c 为卷云云顶高度差值 (BIAS_CTH) 的散点图, 其中蓝、红点分别为 MODIS 原始值与 CALIPSO 的差值 (Origin-CAL)、订正值与 CALIPSO 的差值 (Calib-CAL), d 为 c 中两个量对应的概率分布曲线)

Fig.3 Correction for cloud top height in 2017

(a and b represent scatter distribution and probability distribution of cloud top height (CTH) for raw MODIS (Origin, blue), corrected MODIS (Calib, red) and CALIPSO (CAL, green). c and d represent scatter distribution and probability distribution for the difference between cloud top height (BIAS_CTH) of raw MODIS and CALIPSO (Origin-CAL, blue), corrected MODIS and CALIPSO (Calib-CAL, red))

将云顶高度划分为不同区间, 进一步讨论不同卷云云顶高度的订正效果。图 4 给出基于 MODIS 云顶高度原始值小于 8 km、8~9 km、9~10 km、10~11 km、11~12 km 和大于 12 km 情况下的订正结果。可以看到, 不同高度区间订正值与 CALIPSO 相接近, 差值在[-1, 1 km]的分布概率较高, 说明针对不同云顶高度的订正效果均比较明显。从订正幅度来看, 随着卷云云顶高度的增加, 订正值分布区间与 MODIS 原始值的差异逐渐减小, 其中在小于 8 km 区间上, 订正前大部分值为负偏差, 订正后正偏差的分布概率明显高于负偏差, 订正幅度较大。原因是卷云云顶高度越高, 与卫星传感器的距离更近, 两种传感器接收到的回波信号衰减更少, 均更接近真实的卷云高度, 因此两种产品的数值也更接近, 订正幅度更小。

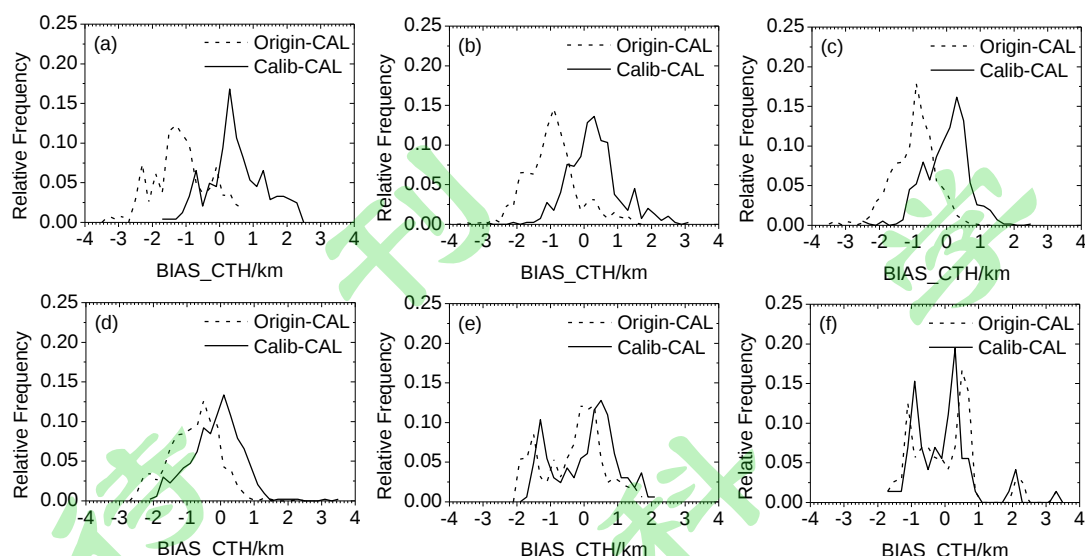


图 4 2017 年不同卷云云顶高度的订正对比图

(a~f 分别为 MODIS 原始值小于 8 km、8~9 km、9~10 km、10~11 km、11~12 km、大于 12 km，横坐标为云顶高度的差值 (BIAS_CTH)，虚、实线分别为 MODIS 原始值与 CALIPSO 的差值 (Origin-CAL)、订正值与 CALIPSO 的差值 (Calib-CAL) 的概率分布曲线)

Fig.4 Comparison of correction for cloud top height of cirrus at different altitudes in 2017

(a, b, c, d, e and f represent the correction at raw MODIS cloud top height < 8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12 and > 12 km, respectively, x axis represents the difference between cloud top height (BIAS_CTH); dotted and solid line represent probability distribution for the difference between height of raw MODIS and CALIPSO (Origin-CAL), corrected MODIS and CALIPSO (Calib-CAL))

将 MODIS 卷云光学厚度划分为 0~1.0、1.0~2.0、2.0~3.0、3.0~3.6 四个区间，进一步研究具有不同云光学厚度卷云云顶高度的订正效果 (图 5)。可以看到，对不同云光学厚度卷云云顶高度的订正效果均比较明显，订正后与 CALIPSO 云顶高度差值的分布曲线整体更接近无偏分布。从订正幅度来看，随着云光学厚度的增加，卷云云顶高度订正值的分布区间与 MODIS 原始值的差异有一定程度的减小，说明所选取订正方案对光学厚度薄的卷云的订正效果更明显。原因是对于光学厚度薄的卷云而言，薄卷云下的辐射可透过卷云到达探测器，使得光学被动遥感仪器 MODIS 无法准确探测出云层高度，存在明显的误判或漏判。CALIPSO 卫星搭载的 CALIOP 激光雷达对光学薄卷云的探测敏感，可以更准确地探测出其在高度，因此对于光学厚度薄的卷云，其订正效果比光学厚度厚的卷云明显。

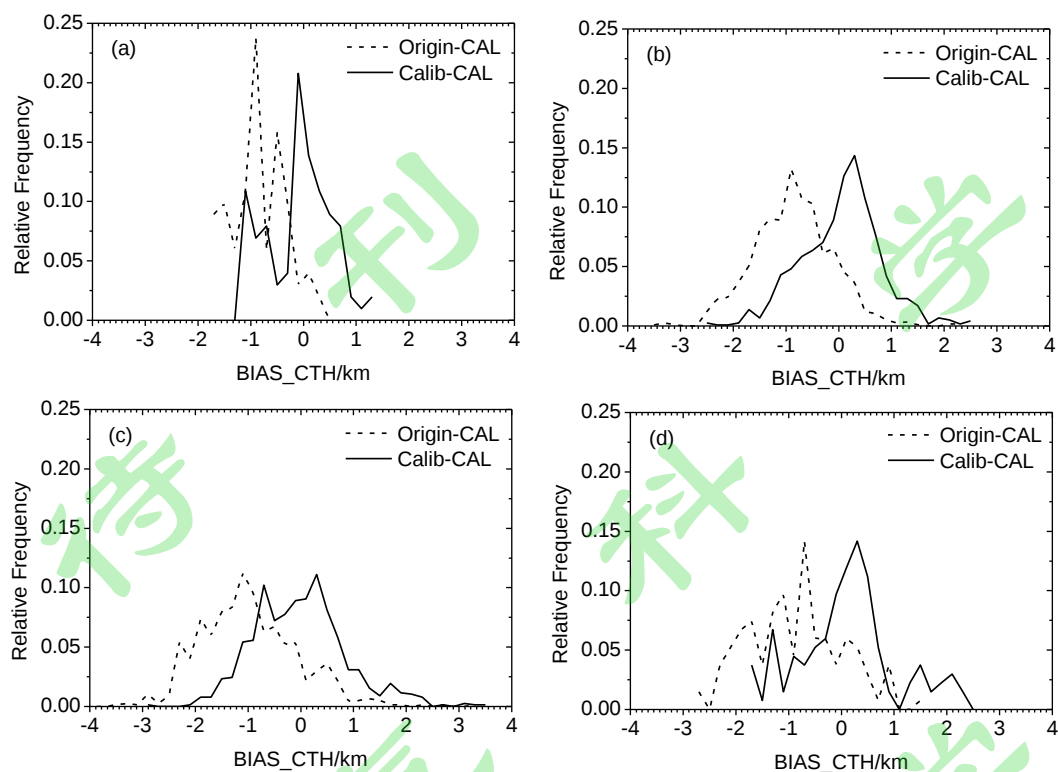


图 5 2017 年不同云光学厚度的卷云云顶高度订正对比图

(a~d 分别为 MODIS 云光学厚度原始值小于 1.0、1.0~2.0、2.0~3.0、3.0~3.6，横坐标为云顶高度的差值 (BIAS_CTH)，虚、实线分别为 MODIS 原始值与 CALIPSO 的差值 (Origin-CAL)、订正值与 CALIPSO 的差值 (Calib-CAL) 的概率分布曲线)

Fig.5 Comparison of correction for cloud top height of cirrus at different cloud optical depth in 2017

(a, b, c and d represent the correction at raw cloud optical depth <1.0、1.0~2.0、2.0~3.0、3.0~3.6, respectively, x axis represents the difference between cloud top height (BIAS_CTH); dotted and solid line represent probability distribution for the difference between height of raw MODIS and CALIPSO (Origin-CAL), corrected MODIS and CALIPSO (Calib-CAL))

3.2 订正前后卷云云顶高度的年平均分布

从 2013-2017 年京津冀地区订正前后的卷云云顶高度的年平均分布来看，河北中部、渤海湾及山东半岛东部的值相对较高（图 6a、b），而河北北部和南部、北京、山东半岛西北部订正幅度最大，渤海湾、山东半岛东北部的订正幅度较小（图 6c）。图 7 给出了订正前后卷云云顶高度年平均的概率分布曲线，其中参与订正的样本数为 4288。可以看出，订正后的卷云云顶高度整体有所增大，由 9.35~10.30 km 调整至 10.15~11.05 km，最大分布概率由 9.55 km 左右（达到 0.113）增大到 10.50 km 左右（达到 0.171），分布区间的整体范围有所缩小。订正后与订正前差值的分布区间为 0.69~1.07 km，其中在 0.91 km 附近的分布最集中。

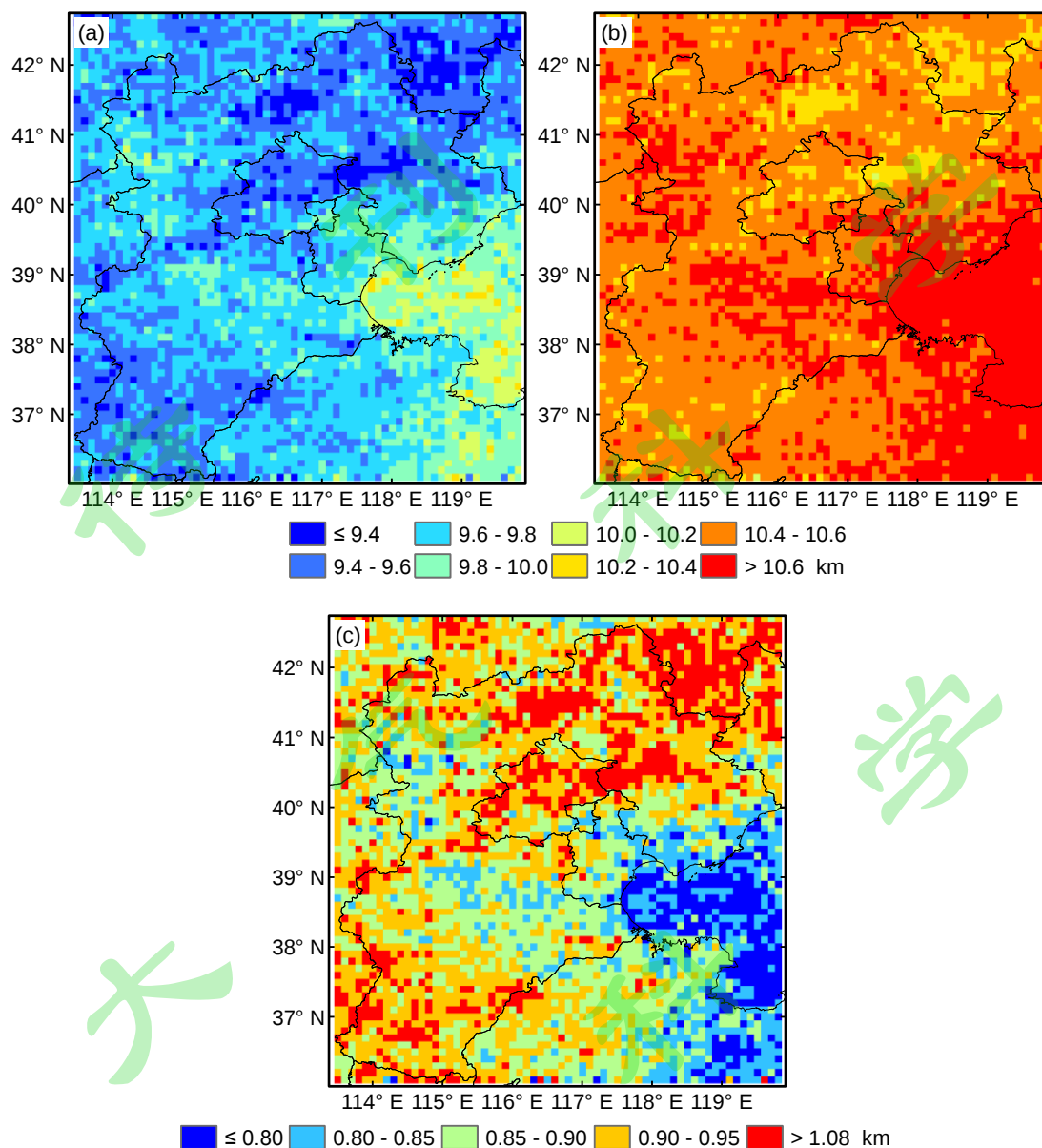


图 6 2013-2017 年订正前后卷云云顶高度的年平均分布

(a、b、c 分别为订正前、订正后、订正后与订正前的差值)

Fig.6 Distribution of raw and corrected cloud top height of cirrus during 2013-2017

(a, b and c represent raw height, corrected height, difference between corrected height and raw height, respectively)

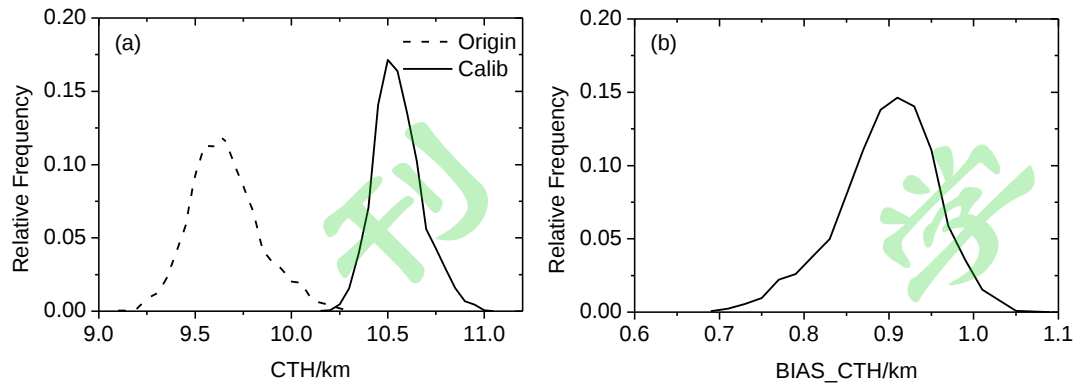


图 7 2013-2017 年订正前后卷云云顶高度的年平均概率分布 (a 为订正前和订正后的两条分布曲线, 其中虚线为订正前 (Origin), 实线为订正后 (Calib), 横坐标为云顶高度 (CTH), b 横坐标为订正后与订正前的云顶高度差值 (BIAS_CTH))

Fig.7 Probability distribution of raw and corrected cloud top height of cirrus during 2013-2017

(a represents raw height and corrected height, dotted and solid line represent raw height (Origin) and corrected height (Calib), respectively, x axis represents cloud top height (CTH); x axis of b represents the difference between corrected height and raw height (BIAS_CTH))

4 小结与讨论

本文选取 2013-2017 年京津冀地区 MODIS、CALIPSO 的卷云云顶高度数据, 基于交叉验证的方法制定线性拟合方案, 并对 MODIS 卷云云顶高度进行订正。主要结论如下:

(1) 基于 MODIS、CALIPSO 资料的卷云云顶高度的拟合效果较好, 回归模型达到 0.01 的显著性水平; 概率分布曲线显示, CALIPSO 卷云云顶高度的分布区间比 MODIS 高, 两者的最大分布区间分别为 10~11 km 和 9~10 km。

(2) 交叉验证结果显示, 订正后的 MODIS 卷云云顶高度分布曲线更接近 CALIPSO, 两者偏差明显减小, 其中 MODIS 原始值与 CALIPSO 差值的分布区间为 -3~2 km, 峰值在 -0.8 km 左右。订正后 MODIS 云顶高度与 CALIPSO 差值的分布曲线向右侧偏移, 分布范围为 -2.0~2.5 km, 峰值集中在 0.2 km 附近。

(3) 卷云云顶高度订正效果随云顶高度和云光学厚度不同有所变化。订正效果在不同高度上均比较明显, 其中较低层卷云的订正幅度更大。对光学厚度小的薄卷云, 其订正效果更明显。

(4) 河北中部、渤海湾及山东半岛东部的卷云云顶高度年平均值相对较高, 订正后的卷云云顶高度整体增大, 低值区的订正更明显。

本研究工作结合了卫星主被动遥感观测的优势, 利用 CALIPSO 卫星数据提出了 MODIS 卷云云顶高度的订正方法, 讨论了云顶高度和云光学厚度对订正效果的影响。当然, 由于 CALIPSO 卫星数据获取的是星下点像元的观测, 故云顶高度是基于星下点像元的进行的, 对于 MODIS 非星下点像元的适用性在今后研究中将尝试利用其它观测数据进行评估。此外, 未来还将考虑不同时间和空间上多种类型云物理量的变化特征, 继续推进该项研究工作。

参考文献 (References)

- Barnes W L, Xiong X, Salomonson V V. 2003. Status of Terra MODIS and Aqua MODIS[J]. *Adv. Space Res.*, 32(11): 2099-2106.
- 曹亚楠, 魏合理, 戴聪明, 等. 2015. AIRS 红外高光谱卫星数据反演卷云光学厚度和云顶高度[J]. *光谱学与光谱分析*, 35(5): 1208-1213. Cao Yanan, Wei Heli, Dai Congming, et al. 2015. Retrieval of the optical thickness and cloud top height of cirrus clouds based on airs high spectral resolution data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis (in Chinese)*, 35(5): 1208-1213.
- 陈超, 孟辉, 靳瑞军, 等. 2014. 基于 CloudSat 云分类资料的华北地区云宏观特征分析[J]. *气象科技*, 42(2): 294-301. Chen Chao, Meng Hui, Ji Ruijun, et al. 2014. Cloud macroscopic characteristics over North China based on CloudSat data[J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 42(2): 294-301.
- Cho H M, Yang P, Kattawar G W, et al. 2008. Depolarization ratio and attenuated backscatter for nine cloud types: Analyses based on collocated CALIPSO lidar and MODIS measurements[J]. *Optics Express*, 16(6): 3931-3948.
- Hagihara Y, Okamoto H, Luo Z J. 2014. Joint analysis of cloud top heights from CloudSat and CALIPSO: New insights into cloud top microphysics[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119(7): 4087-4106.
- Haladay T, Stephens G. 2009. Characteristics of tropical thin cirrus clouds deduced from joint CloudSat and CALIPSO observations[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 114(D8).
- Heidinger A K, Pavolonis M J. 2005. Global daytime distribution of overlapping cirrus cloud from NOAA's advanced very high resolution radiometer[J]. *J. Clim.*, 18: 4772-4784.
- Heidinger A K, Pavolonis M J, Holz R E, et al. 2010. Using CALIPSO to explore the sensitivity to cirrus height in the infrared observations from NPOESS/VIIRS and GOES-R/ABI[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 115(D12).
- Holz R E, Ackerman S A, Nagle F W, et al. 2008. Global Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) cloud detection and height evaluation using CALIOP[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D8).
- 胡树贞, 马舒庆, 陶法, 等. 2012. 地基双波段测云系统及其对比试验[J]. *应用气象学报*, 23(4): 441-450. Hu Shuzhen, Ma Shuqin, Tao Fa, et al. 2012. Ground-based dual-band cloud observing system and its comparative experiments[J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 23(4): 441-450.
- King M D. 1987. Determination of the scaled optical thickness of clouds from reflected solar radiation measurements[J]. *J. Atmos. Sci.*, 44(13): 1734-1751.
- Liou K N. 1986. Influence of cirrus on weather and climate process: A global perspective[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114: 1167-1199.
- Liu Z Y, Vaughan M, Winker D M, et al. 2004. Use of probability distribution functions for discriminating between cloud and aerosol in lidar backscatter data[J]. *J. Geophys. Res.*, 109(D15): D15202.
- 刘瑞金, 张镭, 王宏斌, 等. 2011. 半干旱地区卷云特征的激光雷达探测[J]. *大气科学*, 35(5): 863-870. Liu Ruijin, Zhang Lei, Wang Hongbin, et al. 2011. Cirrus cloud measurement using Lidar over Semi-Arid Areas[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35(5): 863-870.
- 陆雅君, 陈刚毅, 龚克坚, 等. 2012. 测云方法研究进展[J]. *气象科技*, 40(5): 689-697. Lu Yajun, Chen Gangyi, Gong Kejian, et al. 2012. Overview of researches on cloud sounding methods[J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 40(5): 689-697.

- Meenu S, Rajeev K, Parameswaran K. 2011. Regional and vertical distribution of semitransparent cirrus clouds over the tropical Indian region derived from CALIPSO data[J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 73(13): 1967-1979.
- Menzel W P, Frey R A, Baum B A. 2013. Cloud top properties and cloud phase algorithm theoretical basis document [G].
- Nakajima T, King M D. 1990. Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory[J]. *J. Atmos. Sci.*, 47(15): 1878-1893
- Nazaryan H, McCormick M P, Menzel W P. 2008. Global characterization of cirrus clouds using CALIPSO data[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 113(D16).
- Rossow W B, Schiffer R A. 1999. Advances in understanding clouds from ISCCP[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80(11): 2261-2287.
- Sassen K, Campbell J R. 2001. A mid-latitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. Part I: Microphysical and Synoptic Properties[J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(58): 481-496.
- Thorsen T J, Fu Q, Comstock J. 2011. Comparison of the CALIPSO satellite and ground-based observations of cirrus clouds at the ARM TWP sites[J]. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(D21).
- Vaughan M A, Young S A, Winker D M, et al. 2004. Fully automated analysis of space-based lidar data: An overview of the CALIPSO retrieval algorithms and data products[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5575.
- 王喆, 王振会, 曹晓钟. 2016. 毫米波雷达与无线电探空对云垂直结构探测的一致性分析[J]. *气象学报*, 74(5): 815-826. Wang Zhe, Wang Zhenhui, Cao Xiaozhong. 2016. Consistency analysis for cloud vertical structure derived from millimeter cloud radar and radiosonde profiles[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 74(5): 815-826.
- Wang W C, Sheng L F, Dong X, et al. 2016. Dust aerosol impact on the retrieval of cloud top height from satellite observations of CALIPSO, CloudSat and MODIS [J]. *J. Quant. Spectrosc. R.A.*, 188: 132-141.
- Wang Z, Sassen K. 2002. Cirrus cloud microphysical property retrieval using Lidar and Radar measurements part I algorithm description and comparison with in situ data[J]. *J. App. Meteor.*, 41: 218-229
- Weisz E, Li J, Menzel W P, et al. 2007. Comparison of AIRS, MODIS, CloudSat and CALIPSO cloud top height retrievals[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(17): 251-270.
- Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms[J]. *J. Atmos. Ocean Tech.*, 26(11): 2310-2323
- 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. 2004. 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.
- 杨冰韵, 吴晓京, 郭微. 2017. 基于 CloudSat 资料的中国地区深对流云物理特征研究[J]. *高原气象*, 36(6): 1655-1664. Yang Bingyun, Wu Xiaojing, Guo Zhen. 2017. The characteristics of cloud properties in deep convective clouds across China with the CloudSat dataset[J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 36(6): 1655-1664.

- 杨冰韵, 吴晓京, 王曦. 2019. 基于 CloudSat、FY-2E 资料的中国海域及周边地区深对流和穿透性对流特征[J]. 气象学报, 77(2): 256-267. Yang Bingyun, Wu Xiaojing, Wang Xi. 2019. The sea-land characteristics of deep convections and convective overshootings over China sea and surrounding areas based on the CloudSat and FY-2E datasets[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 77(2): 256-267.
- 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.
- 张西雅, 扈海波. 2017. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究[J]. 大气科学, 41(4): 797-810. Zhang Xiya, Hu Haibo. 2017. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 797-810.
- 周非非, 周毓荃, 王俊, 等. 2010. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探[J]. 气象, 36(4): 43-50. Zhou Feifei, Zhou Minquan, Wang Jun, et al. 2010. Relationship of cloud-top heights retrieved from combination of FY-2C/D geostationary satellite data and other observation data and radar-retrieved echo tops[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(4): 43-50.