

梁垚, 孙学金, 李浩然, 等, 2017. 基于云类型匹配和距离误差权重的单层云云底高度估计[J]. 气象, 43(10): 1224-1231.

基于云类型匹配和距离误差权重的 单层云云底高度估计^{*}

梁 垚¹ 孙学金¹ 李浩然¹ 周永波¹ 张日伟² 李绍辉¹

¹ 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101

² 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043

提 要: 云底高度(cloud base height, CBH)的观测对地-气系统的辐射模拟和保障飞行安全有重要意义。本文结合 CloudSat/CPR、CALIPSO/CALIOP 和 Aqua/MODIS 的主被动观测资料, 建立了基于云类型和距离的 CBH 估计算法。本文云分类方法采取国际卫星云气候计划(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP)的云分类法, 并利用 A-Train 数据对估计结果进行验证。结果表明, CBH 的平均误差小于 3 km, 而低云 CBH 的平均误差小于 1 km。在 0~500 km 的估计范围内, CBH 估计的绝对误差主要在 1 km 以内, 均方根误差不超过 3 km。最后, 基于此方法, 本文重建了一个锋面云系的三维结构。

关键词: 云底高度, ISCCP 云分类, A-Train, 三维云结构

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.006

Single-Layer Cloud Base Height Estimation Based on ISCCP Cloud-Type Classification and Weighted Distance

LIANG Yao¹ SUN Xuejin¹ LI Haoran¹ ZHOU Yongbo¹ ZHANG Riwei² LI Shaohui¹

¹ College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101

² State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an 710043

Abstract: Observation of cloud base height (CBH) is crucial in modeling earth-atmosphere radiation budget and for the aviation safety. CBH is estimated by combining measurements from CloudSat/CALIPSO and MODIS based on the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) cloud-type classification and a weighted distance algorithm. The proposed method is validated by A-Train data. The result indicates that the mean error of CBH is always less than 3 km, while the average error of CBH of low clouds is smaller than 1 km. The difference between the real and estimated CBHs is mainly within 1 km when distance ranges from 0 km to 500 km, and the root mean square error is smaller than 3 km. Application to the 3D cloud structure of a frontal cloud is also demonstrated.

Key words: cloud base height (CBH), ISCCP cloud-type classification, A-Train, 3D cloud structure

引 言

云影响着地球热量平衡和水汽输送, 不断反射

太阳短波辐射和吸收、发射长波热辐射(唐英杰等, 2015; Ramanathan et al, 1989; Norris et al, 2016), 一直是气候模拟中不确定性最大的来源(彭杰等, 2013; IPCC, 2013)。云的垂直结构特征

^{*} 国家自然科学基金项目(41575020)资助

2016 年 12 月 26 日收稿; 2017 年 7 月 27 日收修定稿

第一作者: 梁垚, 从事云物理及其反演技术研究. Email: liangyao06@sina.com

通信作者: 孙学金, 主要从事大气辐射与遥感研究. Email: xjsun2002@sina.com

(cloud vertical structure, CVS), 如云顶高 (cloud top height, CTH)、云底高 (cloud base height, CBH)、云厚 (cloud layer thickness, CLT) 等, 通过影响辐射收支、潜热垂直梯度等影响大气环流 (李积明等, 2009; Webster and Stephens, 1980)。其中 CBH 作为重要的云宏观参数, 在航空飞行、导弹发射方面作用突出 (赵静等, 2017; Welliver, 2009)。

在探测 CBH 方面, 不少学者做了一些工作。刘雪梅等 (2016) 利用地面站点资料对中国降水云 CBH 进行了估计。陶法等 (2013) 利用双摄像机构建双目成像系统测量 CBH。严卫等 (2012a; 2012b) 基于 COSMIC 掩星湿空气数据反演全球的云边界高度, 并与探空仪、毫米波雷达反演结果进行了对比分析。地基和探空资料空间分辨率有限, 不能进行全球观测, 同时洋面上空的 CBH 难以观测, 而卫星遥感能够不间断地获取全球云信息 (张华等, 2015; Forsythe et al, 2000)。Li et al (2013) 提出一种基于气温垂直递减率、CTH 和海表温度等参数的计算海洋边界层 CBH 的方法。赵仕伟等 (2009) 利用 MODIS 数据反演了我国西北某空域水云的 CBH, 并结合飞机实测数据进行了反演结果的对比试验。卫星遥感是获取全球云结构信息必不可少的手段, 其中主动遥感能得到准确的 CVS 信息, 但观测范围窄。而被动遥感可以获得大范围云相对准确的云顶信息 (周非非等, 2010), 但很难获取 CBH (Forsythe et al, 2000)。

A-Train 卫星编队拥有 Aqua/MODIS、CloudSat/CPR 和 CALIPSO/CALIOP 遥感探测器, 为主、被动联合反演云结构信息提供了可能。在主被动结合反演 CBH 方面, Barker et al (2011) 采用辐射相似 (radiance-similarity) 方法, 将主动遥感观测点作为供给像元匹配给周围被动观测点的接受像元来估计云底高信息。李浩然等 (2015) 提出了以 CTH 和云水路径 (cloud water path, CWP) 作为模板的匹配法对 CBH 进行了估计。Sun et al (2016) 为了进一步准确估计 CBH, 在 Barker et al (2011) 研究的基础上提出了基于云顶气压约束的光谱匹配法。Forsythe et al (2000) 结合地面毫米波雷达数据与 GOES 卫星数据, 基于距离和云类型进行了大范围 CBH 估计, 并指出同一区域内同类型云具有相同或相近的 CBH。但由于地基雷达观测能力有限, 他们的研究仅限于 3 km 以下的低云。Miller et al (2014) 基于同类云具有相近物理性质假设, 提出了

“Few donors”方法来减小了 CVS 发生剧烈变化时的估计误差。王帅辉等 (2012) 利用多光谱最大似然法 (刘志刚等, 2007; Li et al, 2003) 的云类型建立了一种基于云类型和距离权重的 CBH 估计方法, 该方法的云分类仅将云分为积雨云、卷云、高云、中云和低云 5 类, 难以和地面及其他卫星云分类对应。

为了得到更大范围的 CBH 信息, 构建适用于多种卫星进行 CBH 估计的算法, 本文结合主被动遥感资料建立基于云类型和距离误差权重的 CBH 估计算法, 其中云分类方法采取国际卫星云气候计划 (International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP) 的云分类法。ISCCP 始于 1983 年, 作为世界气候研究计划 (World Climate Research Program, WCRP) 的第一个子计划, 为研究工作者们提供了比较系统的云气候资料。这些资料为全面了解云的时空分布特征, 研究云的辐射效应、水循环状况提供了可参考的观测事实 (刘洪利等, 2003; 刘奇等, 2010)。目前, 用于生成 ISCCP 数据集的卫星包括: NOAA-17/18、METOP-1、FY-2E、GOES-13/15、MTSAT-2 和 METEOSAT-7/8/9 等。本文首先对 MODIS 资料按照 ISCCP 的云分类标准进行分类, 然后验证了基于 ISCCP 云类型估计 CBH 的可行性, 建立 CBH 估计算法, 并以一次锋面云系为例开展个例分析, 获取云结构信息。

1 数据与方法

1.1 CPR 和 CALIOP

CPR 是搭载在 CloudSat 卫星上的 94 GHz 的云廓线雷达, 每隔 1.1 km 产生一个水平分辨率约为 1.7 km (沿轨) $\times$ 1.4 km (跨轨) 的足迹, 垂直方向有 125 库, 每一库代表 240 m 的距离气柱 (Stephens et al, 2002)。CPR 能够有效穿透光学厚云, 但对光学薄云漏检测。CALIOP 是搭载在 CALIPSO 卫星上的云-气溶胶正交偏振激光雷达, 弥补了 CPR 在观测薄卷云方面的不足。本文用到的 2B-CLD-CLASS-LIDAR 是 CPR 和 CALIOP 联合数据产品, 能提供云层数和每层云的顶高和底高。

1.2 MODIS

MODIS 是搭载于太阳同步极轨卫星 Terra 和 Aqua 上的中分辨率成像光谱仪 (Li et al, 2003)。

由于 Aqua 与 CloudSat 同在 A-Train 上,两者时间间隔仅相差约 1 min,因此联合 MODIS 和 CloudSat 数据时选择 Aqua 卫星资料,即 L2 级云产品(MYD06)。MYD06 能提供 1 km 水平分辨率的云顶气压(cloud top pressure,CTP)和云光学厚度(cloud optical thickness,COT)产品。

1.3 ISCCP 云分类标准

ISCCP 根据云顶气压和云光学厚度将云分为 9 类。根据 CTP 对高中低云进行分类,大于 680 hPa 的云为低云,680~440 hPa 的为中云,小于 440 hPa 的为高云。图 1 为 ISCCP 中 D 系列产品云分类标准(Doutriaux-Boucher and Sèze,1998)。

根据 ISCCP 云分类标准,我们使用 MYD06 提供的 CTP 和 COT 产品对 MODIS 图像进行云分类,图 2 为基于 ISCCP 云分类标准的一次 MODIS 云分类产品个例,图中黑线为 CloudSat 观测轨迹线,在这条轨迹上的点都有较准确的 CBH。

2 验证基于 ISCCP 云类型外推 CBH 的可行性

根据 Forsythe et al(2000)的假设,同一区域同类型云具有相同或相近的 CBH。因而可通过匹配的主被动观测卫星像元,将主动遥感像元的云底信息外推给周围相同 MODIS 云类型的被动遥感像

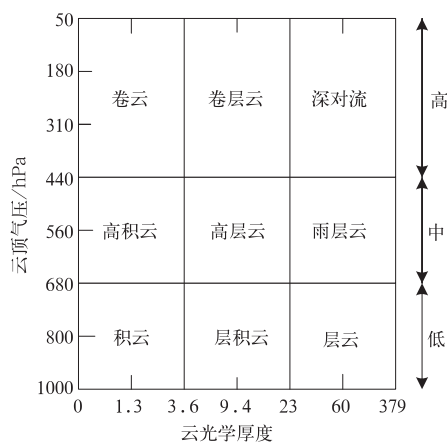


图 1 ISCCP D 系列云分类标准

(Doutriaux-Boucher and Sèze, 1998)

Fig. 1 Cloud-type definitions used in the ISCCP D-series datasets for daytime

(Doutriaux-Boucher and Sèze, 1998)

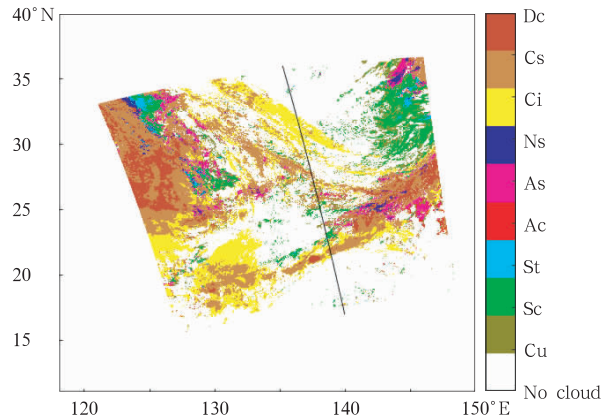


图 2 2010 年 6 月 10 日 04:15 UTC 基于 ISCCP 云分类标准的 MODIS 云分类产品和 CloudSat 轨迹线

Fig. 2 ISCCP cloud-type classification derived from MODIS data with CloudSat ground track overlaid for an example case collected at 04:15 UTC 10 June 2010

元,从而估计大范围有云像元的 CBH。建立算法之前,首先对基于 ISCCP 云类型外推 CBH 的可行性进行验证。通常对于 CloudSat 观测轨道上 CBH 进行扩展,一般基于距离和云类型扩展(王帅辉等,2012)。这里就要验证基于 ISCCP 云类型是否优于基于距离的估计。为此,在太平洋面上选取了 20 组 MODIS 和 CloudSat 匹配数据(2010 年 3 和 6 月),设计了如下比较方案:

(1) 对 20 组 MODIS 数据进行 ISCCP 云分类处理。

(2) 根据经纬度匹配 CloudSat 与 MODIS 数据集。

(3) 选择 MODIS 识别为单层云的廓线,同时记录对应 CloudSat 观测廓线内的 CBH 和 MODIS 识别的云类型。若对应 CloudSat 观测廓线内的云为多层云,则记录最上层云的 CBH。Wang et al (2016)发现 MODIS 识别的单层云中只有 60%与 CloudSat 一致,同时当有多层云存在时,MODIS 很难穿透云层识别下层云的属性,CloudSat 是主动遥感卫星,穿透能力较强,可以得到基本完整的云结构信息。因此,考虑记录最上层的 CBH。

(4) 在步骤(3)选定的廓线集中每次选择一条廓线(记为 REFER),然后分别在距离 REFER 10, 50, 100 和 200 km 以外的同一轨道匹配廓线内寻找两条廓线:(a)与 REFER 距离最近,但具有与

REFER 不同 MODIS 云类型的廓线(记为 DIST); (b)与 REFER 距离最近,但大于 REFER 与 DIST 之间的距离,且具有与 REFER 相同 MODIS 云类型的廓线(记为 TYPE)。如果对于一个 REFER,找不到满足条件的 DIST 或者 TYPE,那么放弃 REFER,然后重新寻找。

(5) 对步骤(4)找到的数据集(REFER, DIST, TYPE)进行处理分析,并引入均方根误差(root mean square error, RMSE)。以 REFER 的 CBH 作为参考值, DIST 和 TYPE 的 CBH 分别作为估计值,计算 DIST 和 TYPE 情况下的 RMSE。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H'_i - H_i)^2}{n}} \quad (1)$$

式中, H'_i 表示第 i 个估计值, H_i 表示第 i 个参考值(真实值)。

通过以上步骤,能够比较出基于距离的 CBH

估计与基于云类型估计的优劣。对两种估计方法进行线性拟合,结果如图 3,可以发现在不同的距离上,TYPE 较 DIST 数据更加集中, RMSE 也相对较小,同时随着距离的增加,TYPE 优于 DIST 的效果更加明显。说明 TYPE 较 DIST 具有较好的云底高度估计,从而验证了基于 ISCCP 云类型外推的可行性。

3 建立基于云类型和距离权重的估计 CBH 的算法

3.1 算法描述

本文建立了一种基于云类型和距离权重的 CBH 估计方法。该方法的主要思路是寻找允许范围内 CloudSat 轨道上对待测点具有相同云类型的已知 CBH 观测点,同时在这里应用一个距离权重函

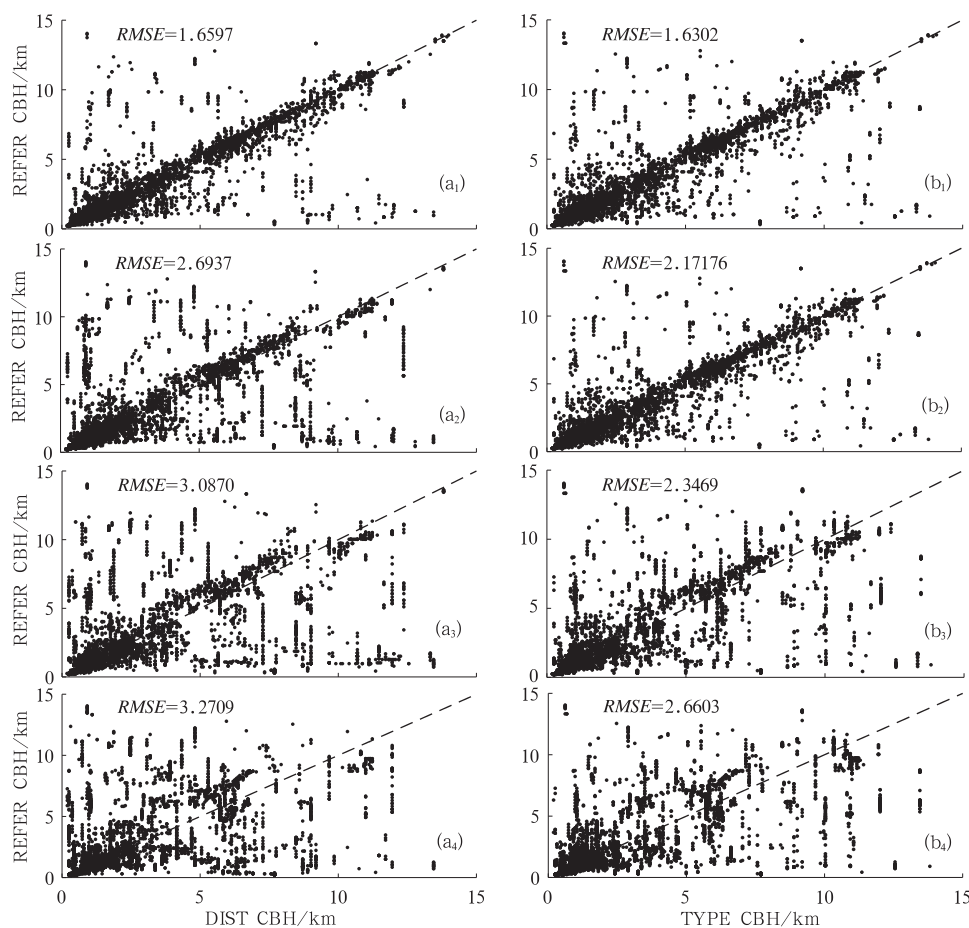


图 3 DIST(a)与 TYPE(b)估计 CBH 的比较

(图 3a,3b 中下角 1、2、3、4 分别表示筛选距离为 10、50、100 和 200 km)

Fig. 3 Comparison CBH estimation of DIST(a) and TYPE(b)

(1, 2, 3, 4 in Figs. 3a, 3b denote donor point distances of 10, 50, 100, 200 km, respectively)

数,具体计算公式为:

$$W(d) = \frac{1}{\sigma^2(d)} \quad (2)$$

式中, $\sigma(d)$ 表示 CBH 标准偏差随距离变化的三次拟合多项式,见图 4(通过 2010 年 1—12 月 48 组数据在不同距离上同类型云 CBH 样本点的标准偏差得到),然后对各观测点的 CBH 求加权平均,从而得到待测点的 CBH。

$$H = \frac{\sum_{i=1}^N H(i)W(d_i)}{\sum_{i=1}^N W(d_i)} \quad (3)$$

式中, N 代表与待测点同类的已知 CBH 的观测点数目, $H(i)$ 表示第 i 个观测点的 CBH, d_i 指第 i 个已知观测点与待测点的距离, $W(d_i)$ 代表了第 i 个观测点的权重。

3.2 验证 CBH 估计效果

为了定量描述该算法估计 CBH 的效果,选取 2010 年 1—12 月的 CloudSat 和 MODIS 的 48 组数据进一步分析估计误差。在 CloudSat 观测轨迹上选择 MODIS 识别的单层云廓线,以 2B-CLD-CLASS-LIDAR 的 CBH 值为真实值,再分别在 0~100 km、101~200 km、201~400 km、401~600 km 的范围内寻找同类型云加权获得估计的 CBH,其中若同类型云观测点少于 3 个时,做舍弃处理,得到 CBH 估计值与实测值的二维散点分布(图 5),并求出 CBH 在各个高度上的正负偏差线,正偏差线指估计值大于真实值时不同高度估计值的平均值的连线,负偏差线指估计值小于真实值时估计值的平均

值的连线。从图中可以看到,真实值与估计值的散点分布集中在 1:1 线附近,随着估计距离的增加,散点相对逐渐分散,但大部分始终聚集在 1:1 线周围,估计效果很好。另外,也能看到低云(0~3 km)出现的次数最多,偏差也较小。偏差在 CBH 为 4~7 km(图 5b 和 5d)和 9~12 km(图 5c 和 5d)高度附近分别出现较大值,CBH 为 4~7 km 的高度考虑受到多层云的影响,导致云类型识别有误;而 CBH 在 9~12 km 的高度,偏差大主要考虑卷云在距离较大的情况下云底信息变化尺度大所致。

同时,从不同距离上对真实值与估计值之差的分布频率也做了统计(图 6)。可以看到,大部分情况下绝对误差都在 1 km 以内,概率密度函数近似正态分布,估计距离在 0~100 km 的情况下 CBH 绝对误差在 1 km 以内达到了 90% 以上,即使是估计距离在 400~600 km 的情况下 CBH 绝对误差在 1 km 以内也有 50%。

李浩然等(2015)基于 CTH 和 CWP 进行模板匹配的方法估计 CBH,并与 Miller et al(2014)的云分类方法的 RMSE 进行了比较。图 7 为本文估计 CBH 的 RMSE 随估计距离的变化,RMSE 算法见式(1),通过以 10 km 作为一个基本单位计算得到。RMSE 在 0~500 km 估计距离范围内近似对数变化,最大 RMSE 没有超过 3 km,最小不到 1 km。

4 个例分析

前面用偏差和均方误差等验证了基于 ISCCP 云类型法估计 CBH 的效果,现在以一次锋面云系为例,重建其三维几何结构。2009 年 6 月 10 日 06 UTC 左右,在东亚地区有一锋面云系,恰好被 A-Train 观测到。图 8 为该锋面云系按 ISCCP 云分类标准给出的分类结果,可以看到锋面云系主要识别为卷层云(Cs)和深对流云(Dc),同时夹杂有雨层云(Ns)和高层云(As),卷层云的外围还有许多卷云(Ci)。

图 9 为锋面云系三维结构的重建图。图 9a 为锋面云系的 MODIS 光学厚度灰度图,(1)为 CloudSat 扫过的轨迹,(2)~(5)分别表示与(1)的距离为 100,200,300 和 400 km 的估测轨迹。图 9b 中(1)为 CloudSat 实测剖面图,并进行 ISCCP 云分类。

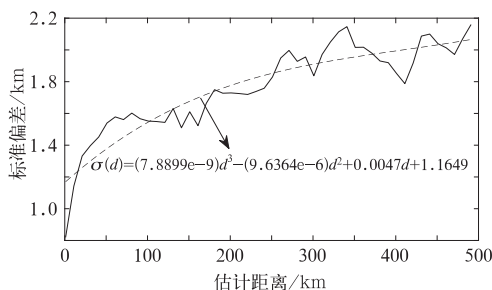


图 4 CBH 标准偏差随距离的变化
(虚线表示三次拟合线)

Fig. 4 Dependence of standard deviation of CBH on range from the point of observation

(Dashed curve indicates the three-order fitted line)

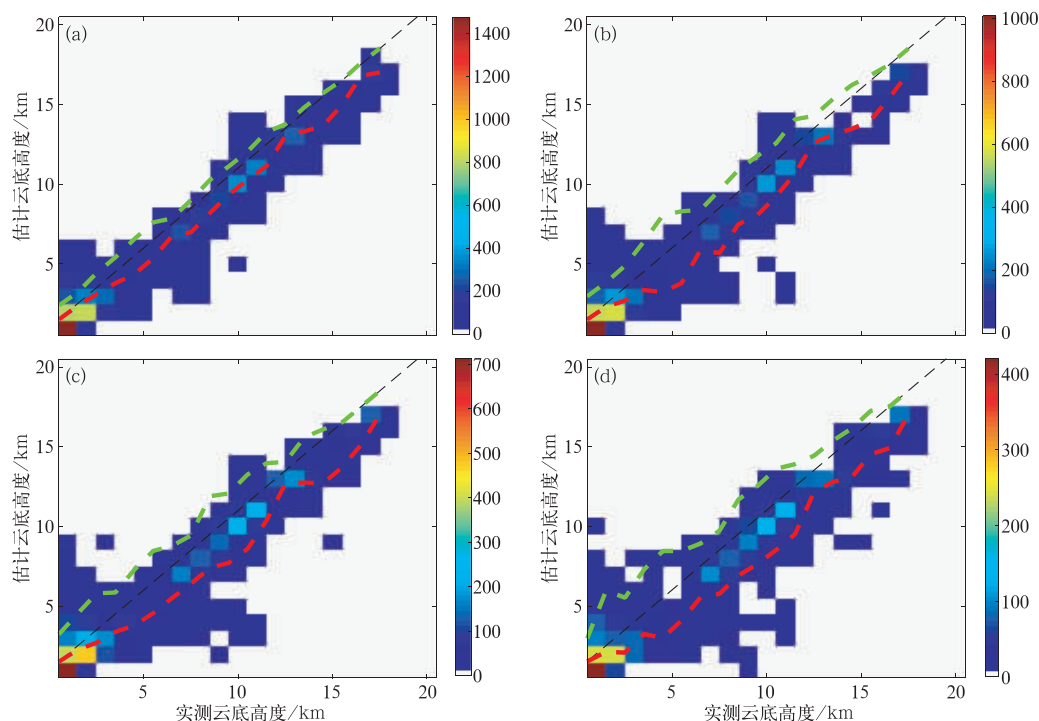


图 5 CBH 估计值与实测值的散点分布

(a) 0~100 km, (b) 101~200 km, (c) 201~400 km, (d) 401~600 km

(色标指示数据点个数,绿色虚线表示正偏差,红色虚线表示负偏差)

Fig. 5 Scatterplots of the estimated and observed CBHs

(a) 0—100 km, (b) 101—200 km, (c) 201—400 km, (d) 401—600 km

(Color bars indicate the number of data points, green dashed lines indicate positive deviation, red dashed lines are negative deviation)

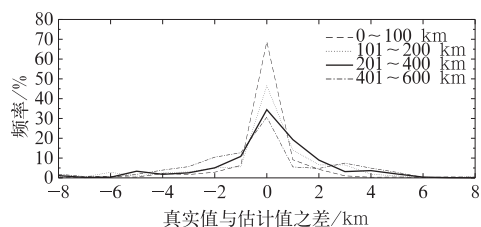


图 6 CBH 实测值与估计值之差的频率分布

Fig. 6 Probability density functions of differences between the estimated and observed CBHs

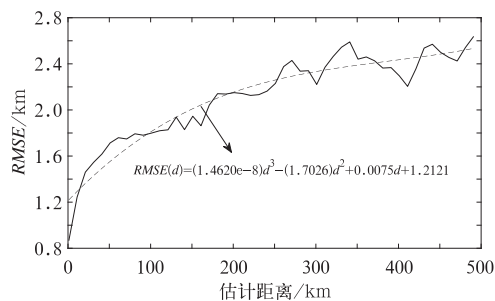


图 7 RMSE 随估计距离变化情况

(虚线表示三次拟合线)

Fig. 7 Dependence of RMSE on estimating distance

(Dashed curve indicates the three-order fitted line)

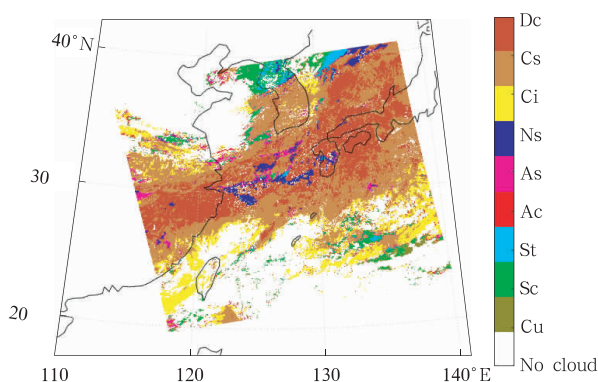


图 8 2009 年 6 月 10 日 06 UTC 锋面云系的 ISCCP 云分类结果

Fig. 8 ISCCP cloud-type classification of the frontal cloud at 06 UTC 10 June 2009

(3)为根据该算法估计的垂直剖面图(其中 CTH 由 MODIS 的 MYD06 提供,CBH 根据本文算法求得)。同样方法得到轨迹(2)、(4)、(5)的垂直剖面图,从而得到重建的基于 ISCCP 云类型的锋面云系三维结构(图 9c),其中(1)~(5)对应图 9a 中 CloudSat 和估计云结构的轨迹。可以看到整个锋

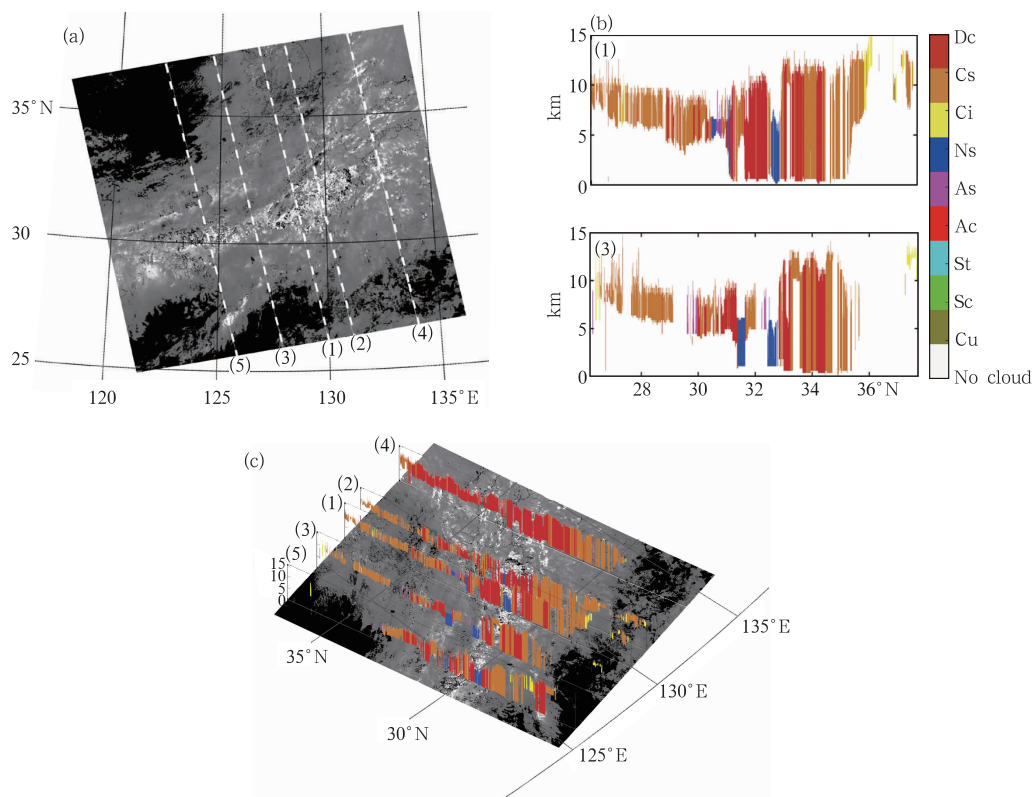


图 9 锋面云系三维结构的重建

(a) MODIS 观测的光学厚度灰度图[其中(1)为 CloudSat 轨迹,(2)~(5)为估计云结构所在轨迹];

(b)垂直剖面图[(1)和(3)对应图 9a 中 CloudSat 和估计云结构的轨迹];

(c)重建的锋面云系三维结构[(1)~(5)对应图 9a 中 CloudSat 和估计云结构的轨迹]

Fig. 9 Reconstruction of 3D structure of the frontal cloud presented in Fig. 8

(a) MODIS COT gray-scale image of the frontal cloud [(1) CloudSat track, (2)–(5) denote the selected scans for reconstruction of the frontal cloud]; (b) vertical profiles [(1) and (3) have the same meanings as those of Fig. 9a]; (c) 3D view of the frontal cloud [(1)–(5) have the same meanings with those of Fig. 9a]

面的水平尺度达上千千米,垂直尺度达十多千米。在获取云结构效果来看,图 9c 中(2)~(5)剖面获取的云垂直信息比较完整,锋面的楔状结构和各类型云系十分清楚。由于 CloudSat 观测轨迹(1)未处在锋面最强盛处,加上 CPR 信号在降水情况下衰减较大,导致重构的锋面剖面连续性较差,但整体的锋面形态清晰可见。

5 结论与讨论

本文结合 CloudSat/CPR 和 Aqua/MODIS 主被动遥感资料建立了基于 ISCCP 云类型和距离权重的 CBH 估计算法,利用 2010 年 1—12 月数据验证了该算法的有效性,并重建了一次锋面云系的三维结构,主要结论如下:

(1) 基于 ISCCP 云分类标准的 CBH 云类型匹配估计法(TYPE)较基于距离(DIST)的 CBH 估计方法得到了显著的改善。

(2) 低云(CBH 在 0~3 km)情况下 CBH 估计误差较小,CBH 在 4~7 和 9~12 km 的估计误差稍有增加,考虑是受到多层云影响和卷云云底变化尺度大所致。CBH 估计误差概率密度分布函数近似正态分布,绝对误差主要在 1 km 以内。在 0~500 km 的范围上均方根误差随着估计距离近似对数增长,最小为 0.8 km,最大不超过 3 km。

(3) 在获取锋面云系三维几何结构中,云垂直信息比较完整,锋面的楔状结构和各类型云系十分清楚。由于 CloudSat 观测轨迹未处在锋面最强盛处,加上 CPR 信号在降水情况下衰减较大,导致重构的锋面剖面连续性较差,但整体的锋面形态清晰

可见。

虽然本文能在一定误差范围内估计 CBH,但仅就 MODIS 识别的单层云进行了验证,在多层云的 CBH 估计上还存在较大困难,另外 CloudSat 对确定降水云的云底高度存在困难。下一步的工作中考虑加入微波资料,辅助识别多层云并能探测降雨云信息,从而提高云底信息反演的普适性和准确性。

致谢:感谢美国 NASA CloudSat DPC 和 Goddard Space Flight Center 为本文提供数据支持。

参考文献

- 李浩然,孙学金,刘磊,等,2015. 基于模板匹配的云底高度估计[J]. 气象科学,35(5):610-615.
- 李积明,黄建平,衣育红,等,2009. 利用星载激光雷达资料研究东亚地区云垂直分布的统计特征[J]. 大气科学,33(4):698-707.
- 刘洪利,朱文琴,宜树华,等,2003. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报,61(4):466-473.
- 刘奇,傅云飞,冯沙,2010. 基于 ISCCP 观测的云量全球分布及其在 NCEP 再分析场中的指示[J]. 气象学报,68(5):689-704.
- 刘雪梅,张明军,王圣杰,等,2016. 中国降水云云底高度的估算和分析[J]. 气象,42(9):1135-1145.
- 刘志刚,李元祥,王昌雨,2007. 一种改进的基于最大似然法的 MODIS 云分类算法[J]. 计算机研究与发展,44(S2):12-16.
- 彭杰,张华,沈新勇,2013. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究[J]. 大气科学,37(1):91-100.
- 唐英杰,马舒庆,杨玲,等,2015. 云底高度的地基毫米波云雷达观测及其对比[J]. 应用气象学报,26(6):680-687.
- 陶法,马舒庆,秦勇,等,2013. 基于双目成像云底高度测量方法[J]. 应用气象学报,24(3):323-331.
- 王帅辉,姚志刚,韩志刚,等,2012. CloudSat 云底高度外推估计的可行性分析[J]. 气象,38(2):210-219.
- 严卫,韩丁,陆文,等,2012a. 基于 COSMIC 掩星探测资料的云底高反演研究[J]. 地球物理学报,55(1):1-15.
- 严卫,韩丁,赵现斌,等,2012b. 基于毫米波雷达、无线电掩星和探空仪资料的云边界高度对比研究[J]. 地球物理学报,55(7):2212-2226.
- 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.
- 赵静,曹晓钟,代桃高,等,2017. 毫米波雷达与探空测云数据对比分析[J]. 气象,43(1):101-107.
- 赵仕伟,赵增亮,姚志刚,等,2009. 利用 EOS/MODIS 数据反演水云云底高度的初步研究[J]. 遥感技术与应用,24(3):341-345.
- 周非非,周毓笙,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.
- Barker H W, Jerg M P, Wehr T, et al, 2011. A 3D cloud-contruction algorithm for the EarthCARE satellite mission[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(657):1042-1058.
- Doutriaux-Boucher M, Sèze G, 1998. Significant changes between the ISCCP C and D cloud climatologies[J]. Geophys Res Lett, 1998, 25(22):4193-4196.
- Forsythe J M, Vonder Haar T H, Reinke D L, 2000. Cloud-base height estimates using a combination of meteorological satellite imagery and surface reports[J]. J Appl Meteor, 39(12):2336-2347.
- IPCC, 2013. Climate Change 2013: The physical science basis[M] //Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 571-657.
- Li J, Menzel W P, Yang Z D, et al, 2003. High-spatial-resolution surface and cloud-type classification from MODIS multispectral band measurements[J]. J Appl Meteor, 42(2):204-226.
- Li J M, Yi Y H, Stamnes K, et al, 2013. A new approach to retrieve cloud base height of marine boundary layer clouds[J]. Geophys Res Lett, 40(16):4448-4453.
- Miller S D, Forsythe J M, Partain P T, et al, 2014. Estimating three-dimensional cloud structure via statistically blended satellite observations[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(2):437-455.
- Norris J R, Allen R J, Evan A T, et al, 2016. Evidence for climate change in the satellite cloud record[J]. Nature, 536(7614):72-75.
- 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.
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al, 2002. The CloudSat mission and the A-TRAIN: new dimension of space-based observations of clouds and precipitation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 83(12):1771-1790.
- Sun X J, Li H R, Barker H W, et al, 2016. Satellite-based estimation of cloud-base heights using constrained spectral radiance matching[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 142(694):224-232.
- Wang Tao, Fetzer 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.
- Webster P J, Stephens G L, 1980. Tropical upper-tropospheric extended clouds: inferences from winter MONEX[J]. J Atmos Sci, 37(7):1521-1541.
- Welliver E A, 2009. Remote detection of cloud base heights using CloudSat and CALIPSO[D]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School.