

王帅辉,姚志刚,韩志刚,等. CloudSat 云底高度外推估计的可行性分析[J]. 气象,2012,38(2):210-219.

CloudSat 云底高度外推估计的 可行性分析^{*}

王帅辉 姚志刚 韩志刚 赵增亮

北京应用气象研究所,北京 100029

提 要: 云底高度对于全球辐射平衡以及航空飞行均具有重要影响。针对 CloudSat 与 MODIS 主、被动观测的优缺点,本文提出了利用 MODIS 云分类信息进行 CloudSat 云底高度外推估计的技术。首先使用 MODIS 和 CloudSat 数据,利用回归分析方法比较了基于云类型(CSAT)与基于距离(MSAT)的云底高度估计方法的优劣。此外,分析了中国及周边地区 CloudSat 各类云云底高度的均一性特征。最后,利用 CloudSat 各类云云底高度的统计特征,建立了一种基于云类型和距离权重的云底高度估计方法,并对该方法进行了验证和分析。结果表明,利用该方法得到的 MODIS 各类云云底高度估计误差的标准差均小于 1.5 km,除了积雨云在观测点与待测点距离大于 400 km 的估计误差均值稍大于 1.5 km 外,各种情况下其他各类云的云底高度估计误差的均值均小于 1.5 km。

关键词: 云底高度, 外推, 估计, CloudSat, MODIS

Feasibility Analysis of Extending the Spatial Coverage of Cloud-Base Height from CloudSat

WANG Shuaihui YAO Zhigang HAN Zhigang ZHAO Zengliang

Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

Abstract: The height of the cloud base has significant effects on the global radiation balance and the aviation. In allusion to the merit and demerit of active and passive observations, a technique of spreading cloud-base height from CloudSat, using the MODIS classification, is advanced. Firstly, based on MODIS and CloudSat data, the method (CSAT) using satellite classification to extend the CloudSat data is compared with a traditional distance-weighted approach (MSAT) using regression analysis method. Then, the uniformity of cloud base over China and its neighborhood is analyzed. Eventually, using the statistic features of cloud base heights for different cloud types from CloudSat, a method combining the MODIS classification with distance-weighted to estimate cloud-base height is established and validated. The result indicates that the standard deviations of cloud-base height errors for all MODIS cloud types are totally less than 1.5 km, and the average values are also less than 1.5 km for all MODIS cloud types except cumulonimbus, of which the mean in the case of the distance between observed and predicted sites being greater than 400 km is slightly greater than 1.5 km.

Key words: cloud-base height, estimation, extrapolation, CloudSat, MODIS

* 2011 年 4 月 23 日收稿; 2011 年 11 月 18 日收修定稿

第一作者: 王帅辉,从事云的卫星资料处理与分析研究. Email:wsh91876@sina.com

通讯作者: 姚志刚,主要从事卫星遥感技术与应用研究. Email:yzg_biam@163.com

引 言

云常年覆盖约一半以上的地球表面,其三维结构对全球辐射平衡具有重要的影响^[1-3]。此外,航空飞行也需要进行云高度的估计,诸多飞机起降等需要清晰的视场条件,其中云顶、云底高度是其重要的影响要素^[4]。卫星遥感是把握云结构全球和区域特征不可或缺的手段,其中卫星被动遥感有利于把握云的水平分布特征,主动遥感有利于把握云的垂直分布特征。利用被动卫星资料,能够得到大部分云相对准确的云顶高度^[5],而对于云底高度的探测存在相当大的困难^[6]。随着卫星云雷达(CloudSat)和激光雷达(CALIPSO)的成功发射,国际上实现了对云垂直结构客观和准确的探测^[7-11]。然而,由于 CloudSat/CALIPSO 的观测轨道很窄,并且重复观测周期比较长,难以得到较大范围、高时间分辨率的云底高度数据^[3]。但与 CloudSat 协同观测的 Aqua 上的 MODIS 视场较大,能够得到较大范围的云的水平分布信息。因此,如何有效地利用主被动卫星资料,扩大和提高云底高度观测和预报的覆盖范围及时空分辨率成为了亟待解决的问题。

对于如何将有限观测点的云底高度扩展到其他区域,通常的做法是对观测到的云底高度基于距离进行插值^[12]。但是,由于云底高度不像温度、气压等其他气象要素是连续变化的,所以这种基于距离进行云底高度估计的方法必然存在非常大的误差。2000 年, Forsythe 等^[6]研究指出同类云具有相同或相近的云底高度,并使用地面云底高度报告与 GOES 卫星遥感云分类数据初步验证了基于云类型的云底高度估计优于基于距离的估计。另外, Miller 等^[13]对利用 GOES 卫星云分类信息进行 CloudSat 云底高度的外推估计技术进行了研究,并通过个例初步说明了该技术的应用潜力,但是由于静止卫星和极轨卫星运行轨道的差异, GOES 和 CloudSat 卫星不能够协同观测,从而难以将 CloudSat 云底高度进行充分的扩展。因此,本文在前人的这些研究基础上,利用 A-Train 卫星编队飞行的优势,研究联合 MODIS 与 CloudSat 观测数据得到较大范围云底高度的可行性。当然,由于 MODIS 是被动遥感传感器,其难以穿透较厚的云层,不能很好地观测到多层云系中的下层云,因此,本文只针对 CloudSat 的上层云数据与 MODIS 数据进行匹配和

外推扩展研究。

为了研究利用 MODIS 云分类信息进行 CloudSat 云底高度外推估计的可行性,本文首先比较了基于 CloudSat 和 MODIS 云类型与基于距离进行云底高度估计方法的优劣。随后,分析了基于 CloudSat 云分类的各类云云底高度的均一性。最后,建立了一种基于云类型和距离权重的云底高度估计方法,并对估计结果进行了验证分析。

1 数 据

1.1 CloudSat

作为 CloudSat 卫星上的惟一有效载荷,云雷达(CPR)的星下点足迹尺度约为 2.5 km(沿轨)×1.4 km(跨轨),垂直方向能探测到地面以上 30 km 高度的空间,垂直分辨率为 240 m。CPR 环绕地球一圈观测得到的数据称为一轨数据,由约 36383 条观测廓线组成,存放在一个数据文件中。CloudSat 的原始观测数据经数据处理中心(DPC)处理后生成两类数据产品:标准数据产品和辅助数据产品。其中,标准数据产品包括一级经校准的雷达反射率产品和二级云几何廓线(2B-GEOPROF 和 2B-GEOPROF-LIDAR)、云分类(2B-CLDCLASS 和 2B-CLDCLASS-LIDAR)以及云光学厚度、液水含量等微物理参数产品。本文主要用到的是标准数据产品中的云几何廓线产品(2B-GEOPROF-LIDAR)和云分类产品(2B-CLDCLASS)。其中,2B-GEOPROF-LIDAR 联合使用云雷达、激光雷达探测数据得到云的层数、各层的顶高和底高等云属性信息,其最多可探测到 5 层云。2B-CLDCLASS 云分类产品是针对 CloudSat 每条观测廓线的各距离库内观测到的云进行的,垂直分辨率为 240 m。2B-CLDCLASS-LIDAR 中包含了激光雷达的观测数据,但由于该产品还未公开发布,所以本文选用 2B-CLDCLASS 云分类产品。关于 2B-GEOPROF-LIDAR 和 2B-CLDCLASS 数据详细的格式说明可参阅 CloudSat 相关产品手册(<http://cloudsat.cira.colostate.edu/>)。

在 CloudSat 的 2B-CLDCLASS 产品中,云分类算法根据云的水平 and 垂直属性、是否产生降水、温度以及 MODIS 测得的向上辐射等信息将云区分为高云、高层云(As)、高积云(Ac)、层云(St)、层积云(Sc)、积云(Cu)、雨层云(Ns)和深对流云(Dc)8 类,

其中高云包括卷云、卷层云和卷积云,通称为卷云(Ci)。图 1a 所示为与图 1b 中 MODIS 视场内 CloudSat 轨迹相对应的 CloudSat 云分类结果。

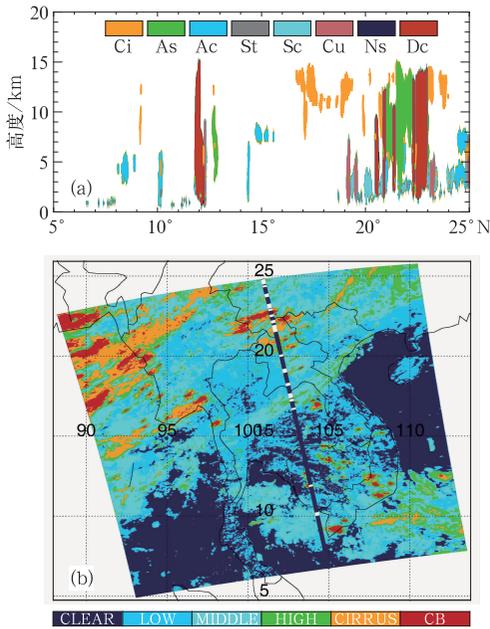


图 1 2008 年 8 月 15 日的 CloudSat (a) 和 MODIS (b) 云分类结果

(图 1b 中蓝白相间的实线为 CloudSat 的轨迹,白色线段为 MODIS 和 CloudSat 各自同类的廓线)

Fig. 1 Cloud classification for CloudSat (a) and MODIS (b) on 15 August 2008

(In 1b, the blue and white solid line is CloudSat track, and the white segments show that MODIS and CloudSat classes are both the same)

1.2 MODIS

MODIS 是搭载于 Terra 和 Aqua 太阳同步极地轨道卫星上的中分辨率成像光谱仪,其在 $0.4 \sim 14.4 \mu\text{m}$ 的范围内以 36 个波段进行探测,共有 250、500 和 1000 m 三种空间分辨率。由于 Aqua 与 CloudSat 飞行轨道相同,并且对地观测时间比较接近,因此,为了实现与 CloudSat 的数据匹配,本文使用 Aqua 卫星的 MODIS 数据。MODIS 的产品比较丰富,本文用到的主要是 1B 级地理定位校正产品 (MYD02) 和云检测产品 (MYD35) 数据。

目前,针对卫星云图的分类方法有很多种,主要分为两类:无监督和有监督分类方法。其中无监督分类方法包括:K 均值聚类法 (HCM)、模糊 C 均值聚类 (FCM) 方法和半监督模糊 C 均值聚类方

法^[14-15];有监督分类方法包括:最大似然估计法、支持向量机^[16]、决策树法^[17]和神经网络法^[8-19]等。这些分类方法各有利弊,其中,最大似然法具有严密的理论基础,其分类错误概率相对较小,是风险很小的判决分析方法。因此,本文选择了最大似然估计法对 MODIS 数据进行了分类^[20-21]。分类过程中,首先利用 MOD35 产品将晴空像元和有云像元进行区分,然后利用阈值法将有云像元划分为低云 (Low)、中云 (Middle)、高云 (High)、卷云 (Cirrus) 和积雨云 (Cb) 等 5 个初始类别,最后将初始云类型和选定的样本特征向量作为输入,通过最大似然法迭代得到最终的分类结果。其中,选定的样本特征向量主要用到了 MODIS 的 7 个观测通道信息,它们分别是:第 2 ($0.87 \mu\text{m}$)、20 ($3.7 \mu\text{m}$)、26 ($1.38 \mu\text{m}$)、27 ($6.7 \mu\text{m}$)、29 ($8.7 \mu\text{m}$)、31 ($11 \mu\text{m}$) 和 32 ($12 \mu\text{m}$) 波段。而 Miller 等^[13]使用的 GOES 卫星云分类方法^[22]仅使用了可见光 ($0.65 \mu\text{m}$)、近红外 ($3.9 \mu\text{m}$) 和长波红外 ($11 \mu\text{m}$) 3 个通道的信息。图 1b 所示为 2008 年 8 月 15 日 06:40 的 MODIS 数据通过最大似然估计法得到的云分类结果。

需要说明的是,由于 MODIS 和 CPR 观测方式的差异,利用两种观测数据得到的云分类结果不可能非常一致。然而,要将 CloudSat 观测轨迹上的云底高度数据外推到 MODIS 视场内的其他区域,就需要借助于 MODIS 的分类信息,因为这些区域没有 CloudSat 的观测信息。由此可见,要实现云底高度的外推估计,需要同时借助于两种云分类数据。

2 基于云类型进行云底高度估计的可行性分析

2.1 基于云类型与基于距离进行云底高度估计的比较

对于 CloudSat 观测轨道上云底高度的扩展,一般的做法是基于距离进行估计 (简记为 MSAT)。另外,有研究表明^[6],云底高度在一定程度上依赖于云类型的变化,因此也可以根据云类型得到云底高度的估计结果,即基于 CloudSat 和 MODIS 云类型的云底高度估计 (简记为 CSAT)。为了选择有效的方法进行云底高度的估计,有必要对两种方法的估计效果进行对比,以确定相对比较合理的云底高度估计方法。为此,选取了 2008 年 8 和 12 月的各 25

组 MODIS 和 CloudSat 匹配数据,设计了如下比较方案。

(1) 对 50 幅 MODIS 云图利用最大似然法进行云分类处理。

(2) 将 CloudSat 观测廓线内得到的最上层云的云底高度和云类型作为各观测廓线的云底高度值和云类,使用最上层云云底高度和云类的合理性,下文进行了说明。

(3) 依据距离最近原则进行 CloudSat 与 MODIS 数据的匹配,得到匹配数据集。

(4) 在 CloudSat 的观测廓线内寻找满足下列条件的廓线段(例如图 1b CloudSat 轨迹中的白色类段示):(a)CloudSat 和 MODIS 都判识为有云的廓线;(b)廓线段的长度大于 20 km;(c)廓线段内的每条廓线属于同一 MODIS 云类型的同时也同属于某一 CloudSat 云类。

(5) 在步骤(4)选定的廓线段内每次选择一条廓线(记为 CONTROL),然后在其他所有的 CloudSat 观测廓线内寻找两条廓线:(a)与 CONTROL 距离最近,但具有与 CONTROL 不同 MODIS 云类别的廓线(记为 MSAT);(b)与 CONTROL 距离最近,但大于 CONTROL 与 MSAT 之

间的距离,且具有与 CONTROL 相同 MODIS 云类的廓线(记为 CSAT)。如果对于一个 CONTROL,找不到满足条件的 MSAT 或者 CSAT,那么放弃 CONTROL,然后在其他廓线段内继续寻找。

(6) 对步骤(5)找到的数据集(CONTROL、MSAT 和 CSAT)进行处理分析。

在多层云系中,当上层云的厚度比较大时,MODIS 不能够穿透上层云而得到中下层云的探测数据,然而,CloudSat 是主动遥感探测,穿透能力比较强,可以得到基本完整的云结构信息。因此,考虑将 CloudSat 观测到的最上层云的云底高度作为各观测廓线的云底高度。通过上述步骤,能够比较分析出基于距离的云底高度估计与基于云类型估计的优劣。

基于距离的云底高度估计在本文中的处理方式是给予 MSAT 廓线距离上的优势,即始终保持 MSAT 廓线离 CONTROL 廓线的距离比 CSAT 廓线离 CONTROL 廓线的距离近。两种估计方法的比较结果以 CONTROL 与 MSAT 和 CONTROL 与 CSAT 的散点图形式表现(图 2)。图 2 所示为根据上述步骤得到的所有 50 组 CONTROL、MSAT 和 CSAT 数据集画出的散点图。图 2a 为 CONTROL

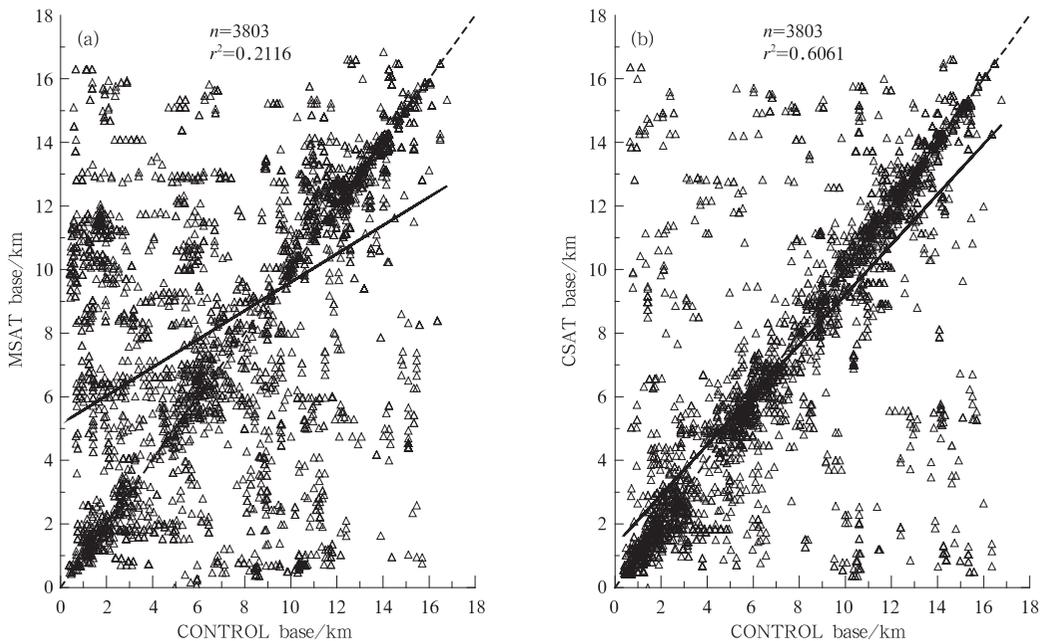


图 2 CSAT (b) 与 MSAT (a) 的结果比较

[图中给出了数据点个数(n)和判定系数(r^2),虚线代表 1 : 1 线,实线是最小二乘拟合线]

Fig. 2 Comparison of CSAT (b) and MSAT (a) results

[Number of data points (n) and coefficient of determination (r^2) are indicated, and the 1 : 1 line (dashed) and least squares fit line (solid) are shown]

与 MSAT 的散点图,图 2b 为 CONTROL 与 CSAT 的散点图,并且每个图中也给出了数据点数、判定系数、1:1 线和最小二乘拟合线。通过对数据的线性拟合分析发现,CSAT 较 MSAT 具有较好的云底高度估计。判定系数代表了回归模型的拟合优度,其值越大说明拟合优度越好,反之亦然。因此,可以通过比较判定系数来对比 MSAT 与 CSAT 的优劣。从图 2 可以看到,CSAT 较 MSAT 有了显著改善。MSAT 与 CONTROL 和 CSAT 与 CONTROL 回归分析得到的判定系数分别为 0.2116 和 0.6061。由此可见,基于云类型的云底高度估计方法较基于距离的云底高度估计有了显著的改善。

2.2 CloudSat 各类云的云底高度统计特征

为了利用云类型进行云底高度的估计,需要定量得到各类云云底高度的均一性,以确定基于云类型进行云底高度估计的可行性。为此,利用 2008 年 8 和 12 月与 2006 年 7 月至 2007 年 6 月的 CloudSat 2B-CLDCLASS 云分类数据分别对中国及周边地区(0°~60°N、70°~140°E)CloudSat 各类云云底高度的月均一性和年均一性进行了统计,结果如图 3 和图 4 所示。图 3 为 2008 年 8 和 12 月 CloudSat 各同类云的云样本之间云底高度差的标准偏差随样本距离的变化曲线。从图中可以看出,在任意距离上

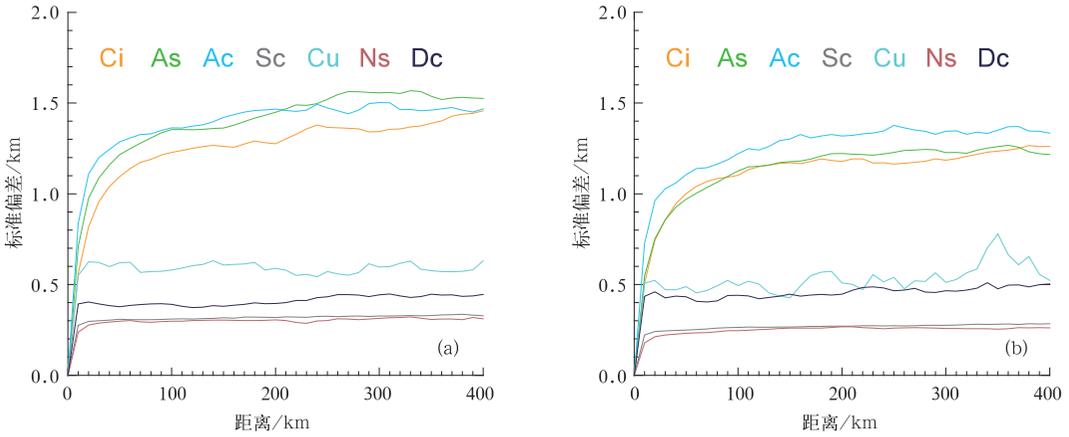


图 3 CloudSat 各类云云底高度的月均一性分析
(a) 2008 年 8 月, (b) 2008 年 12 月

Fig. 3 Monthly uniformity analysis of cloud-base height for all CloudSat classes
(a) August 2008, (b) December 2008

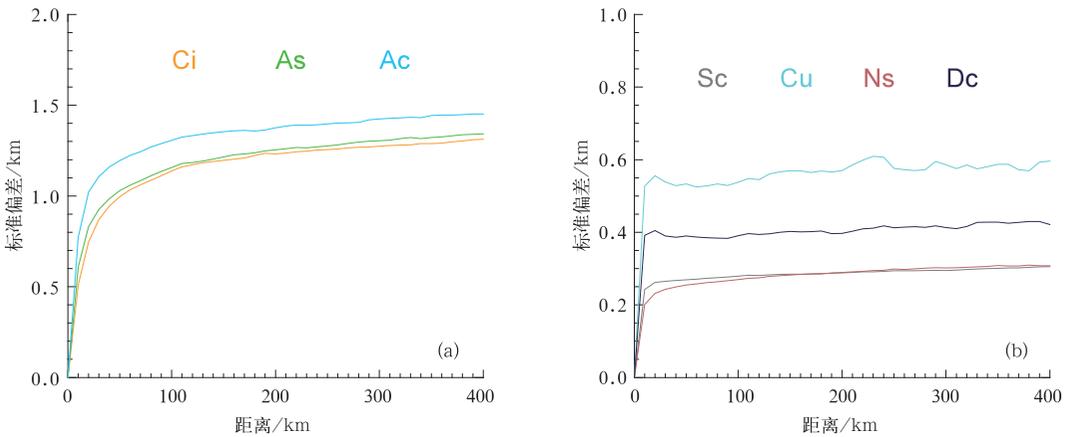


图 4 2006 年 7 月至 2007 年 6 月 CloudSat 各类云云底高度的年均一性分析
(a) 中高云, (b) 低云

Fig. 4 The same as Fig. 3, but for annual uniformity from July 2006 to June 2007
(a) middle and high cloud, (b) low cloud

的各类云云底高度的标准偏差都小于 2 km, 其中除了深对流云外, 其他各类云 8 月的标准偏差值均稍高于 12 月。此外, 卷云、高层云和高积云等中高云的标准偏差随着样本距离的增加而增大, 且样本距离大于 50 km 后标准偏差均大于 1 km, 而低云中除了积云随距离稍有变化外, 其他几类低云的标准偏差随距离几乎没有变化, 标准偏差值均小于 0.5 km。从图 4 的 CloudSat 云底高度年均一性分析中可以发现, 各类云云底高度标准偏差随距离的变化具有与月均一性相似的特征, 但是前者的变化曲线更加平滑。

通过以上分析可以得出, 各类云的云底高度都具有较好的均一性, 其中中高云的均一性稍差于低云, 随着样本距离的增加, 中高云云底高度的标准偏差会稍有增加, 但是基本上都小于 1.5 km, 这为基于云类型进行云底高度的外推估计奠定了统计基础。

3 基于云类型和距离权重的云底高度估计方法的建立与验证

通过第 2.2 节中对 CloudSat 资料的统计分析发现, 各类云的云底高度均具有较好的均一性, 这为利用 MODIS 云分类信息进行 CloudSat 云底高度的估计扩展提供了依据。在不同距离上, 各类云云底高度差的标准偏差具有不同的变化规律。因此, 在基于类型进行云底高度估计时须考虑距离的因素, 且针对不同的云类型需要根据其统计特征建立各自的云底高度估计模型。为此, 建立了一个基于

云类型和距离权重的云底高度估计方法。该方法的主要思路是寻找与待测点具有相同云类型的各已知云底高度观测点, 然后对各观测点的云底高度求加权平均, 从而得到待测点的云底高度。具体计算公式为:

$$H = \frac{\sum_{n=1}^N H_n / D_n^2(d_n)}{\sum_{n=1}^N 1 / D_n^2(d_n)} \quad (1)$$

式中, N 代表与待测点同类的已知云底高度的观测点数目, H_n 表示第 n 个观测点的云底高度, d_n 指第 n 个已知观测点与待测点的距离, $\frac{1}{D_n^2}$ 代表了第 n 个观测点的权重。其中, D_n 是各类云云底高度标准差随距离变化曲线的二次拟合多项式。根据各类云的统计特征(图 3 和图 4), 对卷云、高层云和高积云分三段进行拟合, 而其他低云直接进行拟合。此外, 从图 3 可以发现, 冬季和夏季的云底高度统计特征存在一定的差别, 因此对冬季和夏季各类云的曲线分别进行了拟合。图 5 所示为 2008 年 8 月高积云和 2008 年 12 月对流云的二次多项式拟合曲线, 图中也给出了二次拟合多项式。

为了验证该方法的可行性, 对 MODIS 视场内 CloudSat 轨迹上每条廓线的云底高度进行估计, 然后与 CloudSat 的实测云底高度进行比较。考虑到 MODIS 云分类可能存在的误差, 在使用 MODIS 云分类信息的同时也增加了 CloudSat 的云分类数据, 即在寻找与待测点同类的观测点时既要求其待测点具有相同的 MODIS 类也具有相同的 CloudSat 类。此外, 出于对 CloudSat 云底高度的扩展应用考虑, 根据 MODIS 视场范围内 CloudSat 轨道上观测

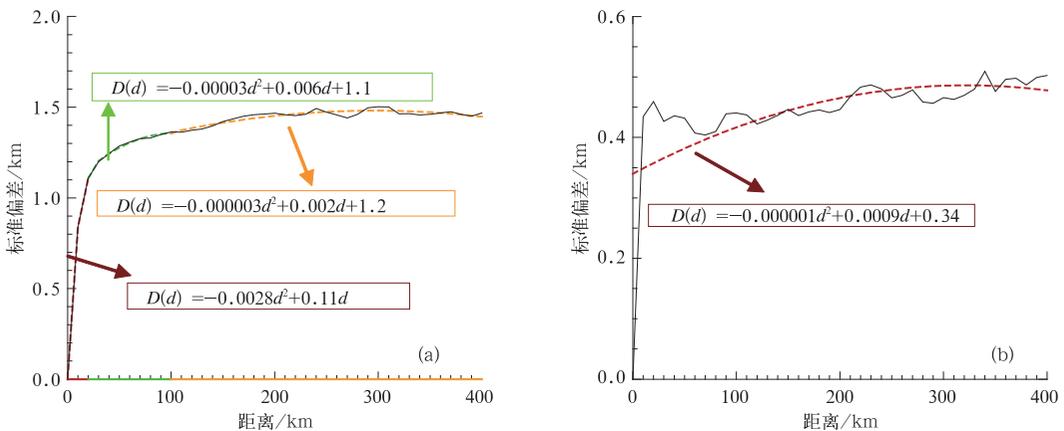


图 5 云底高度标准偏差的拟合曲线
(a)2008 年 8 月的 Ac 拟合曲线, (b)2008 年 12 月的 Dc 拟合曲线

Fig. 5 Standard deviations fits of cloud base height
(a) altocumulus for August 2008, (b) deep convective cloud for December 2008

点与待测点的距离分四种情况进行云底高度估计,即分别大于 0、100、200 和 400 km 的情况。采用这种方法,对 2008 年 8 和 12 月的 50 组 MODIS 和 CloudSat 匹配数据进行了云底高度估计。图 6 为云底高度估计值与实测值的散点分布图,从图中可以看到,在使用所有与待测点严格同类的观测点进行云底高度估计时(图 6a),云底高度的估计值与实测值的散点集中分布于 1:1 线附近。而在使用与

待测点距离大于 100、200 和 400 km 的观测点进行云底高度估计时,估计值与实测值的散点相对较分散,并且距离大于 100 km 的散点分布较 200 和 400 km 的分布相对集中,这与上文利用 CloudSat 资料得到的云底高度统计特征相一致。但是,这三种情况下云底高度估计值与实测值分布于 1:1 线附近的点仍然占绝大多数,这说明该方法对云底高度的估计是比较理想的。

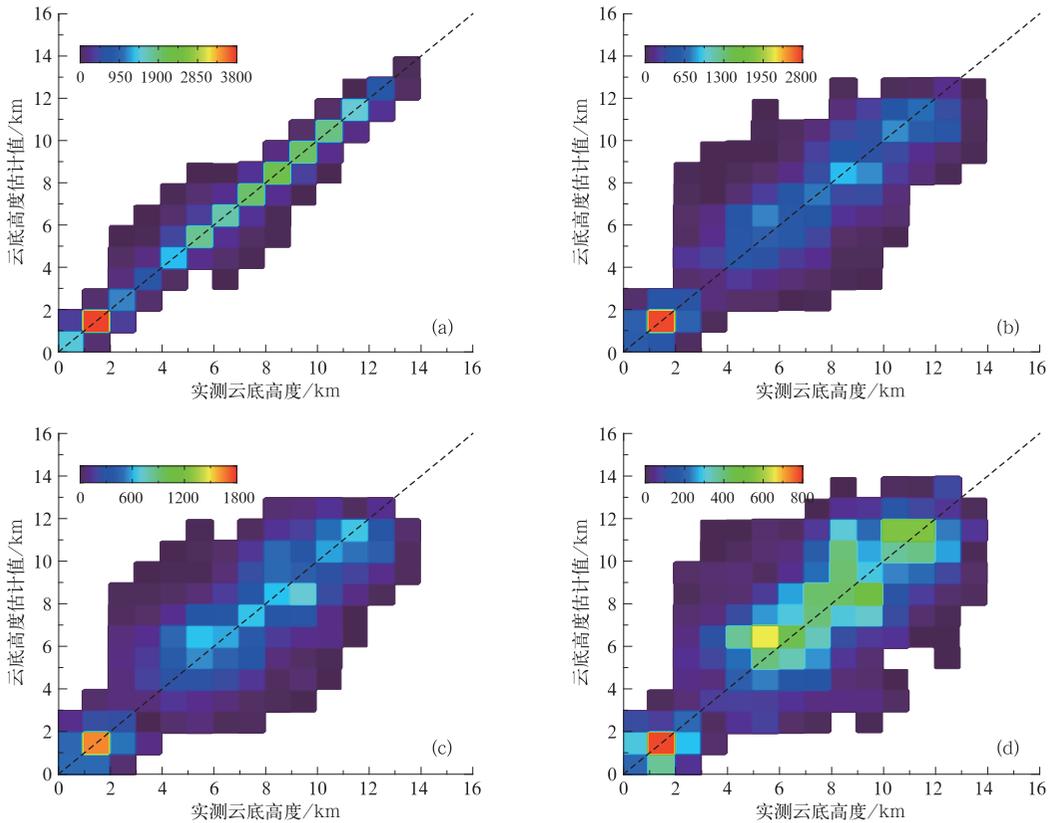


图 6 云底高度估计值与实测值的二维散点分布(色标指示数据点个数)

(a)大于 0 km,(b)大于 100 km,(c)大于 200 km,(d)大于 400 km

Fig. 6 Two-dimensional scatter distributions of cloud-base height

(estimated versus observed), (a) >0 km, (b) >100 km, (c) >200 km, and

(d) >400 km, color bars indicate the number of data points

为了定量说明云底高度的估计误差,也计算了估计值与实测值之差,并对其频率分布进行了分析。同时,按照 MODIS 的云类型对各类云云底高度估计误差的频率分布进行了比较,如图 7 所示。可以看到,观测点与待测点距离大于 0 km 时,各类云的云底高度估计值与实测值之差位于 ± 0.5 km 之间的频率均达到了 85% 以上,云底高度的估计效果非常理想。当距离大于 100 km 时,各类云云底高度估计值与实测值差的峰值频率位于 ± 0.5 km 之间,频率值也都大于 32%。其中,积雨云的峰值频率最

大,达到了 50% 左右。但是,可以看到,在 $-4.5 \sim -3.5$ km 之间,积雨云云底高度估计误差的频率存在一个次高值。分析表明,在某些深厚积雨云系统中,CloudSat 的 CPR 雷达信号受到云的削弱,加之地面杂波的影响,算法对积雨云云底高度的确定存在误差,导致某些深厚积雨云的 CloudSat 云底高度观测值偏高,从而造成在 $-4.5 \sim -3.5$ km 之间存在次高值现象。在观测点与待测点距离分别大于 200 和 400 km 的情况下(图 7c 和图 7d),各类云云底高度估计值与实测值之差位于 ± 1.5 km 之间的

频率均达到了 50%左右。其中,积雨云云底高度估计误差在-4.5~-3.5 km 之间的频率也存在一个相对高值,且频率值随着距离的增加而略有增大,这种情况在多层云存在的情况下更加明显。根据中国及周边地区多层云出现频率的研究结果^[23]可知,中

国西北地区多层云出现频率较低,而南海地区多层云出现频率较高。本研究选取的 50 组数据中包括中国西北地区和南海地区的各 25 组数据。利用上述方法对两个地区进行云底高度估计结果的验证,得到如图8和图9所示的结果。对比两个地区的结

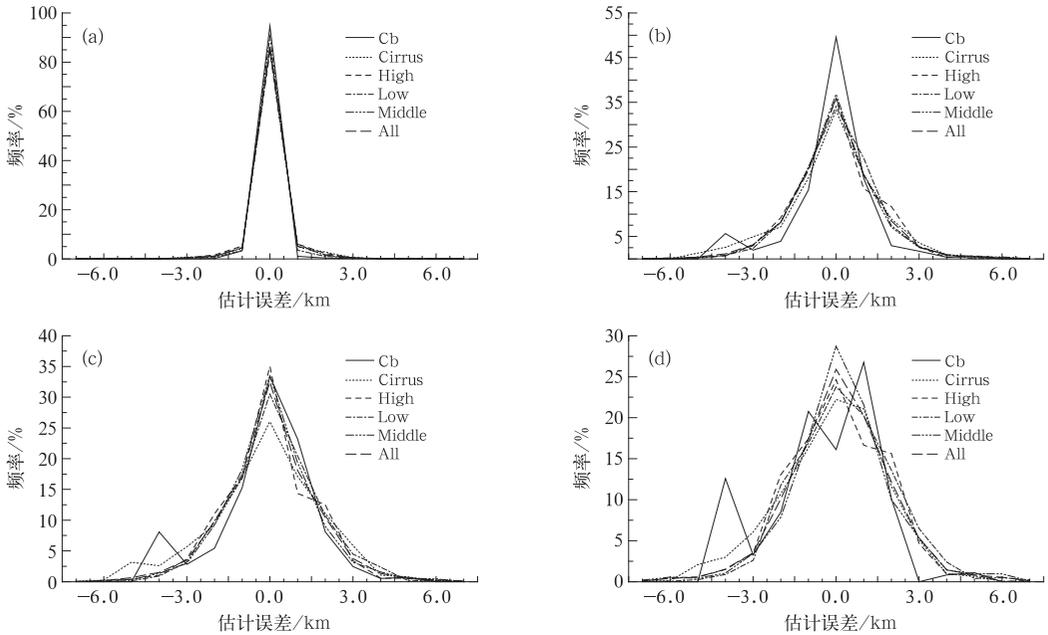


图 7 MODIS 各类云云底高度估计值与实测值差的频率分布

(a)大于 0 km.(b)大于 100 km.(c)大于 200 km.(d)大于 400 km

Fig. 7 Frequency distributions of differences between cloud-base heights estimated and observed for all MODIS cloud types

(a) >0 km, (b) >100 km, (c) >200 km, (d) >400 km

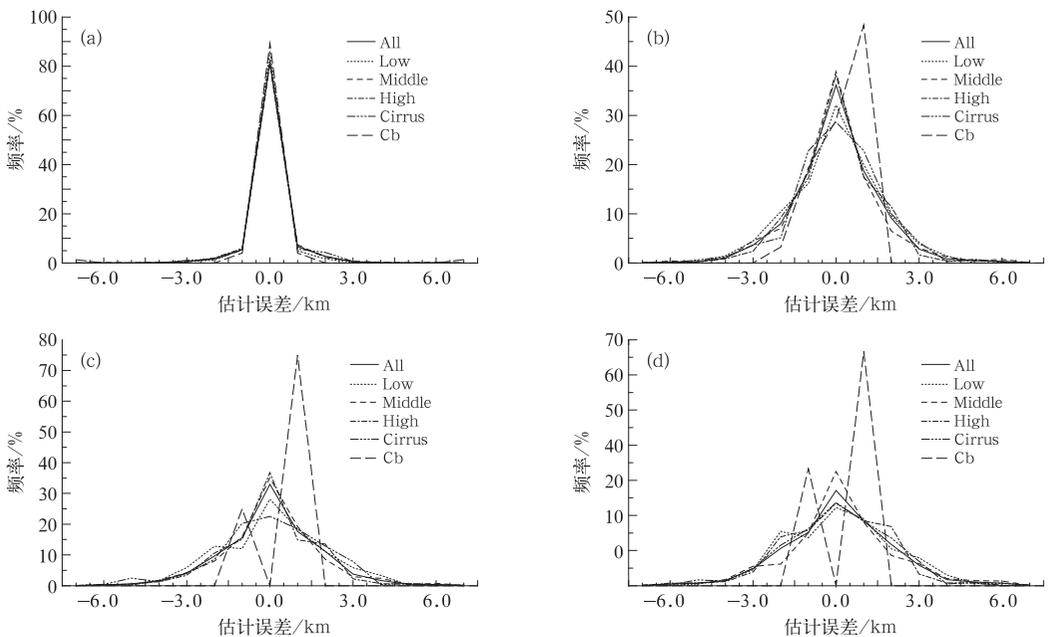


图 8 中国西北地区 MODIS 各类云云底高度估计值与实测值差的频率分布

Fig. 8 The same as Fig7, but for the Northwest China

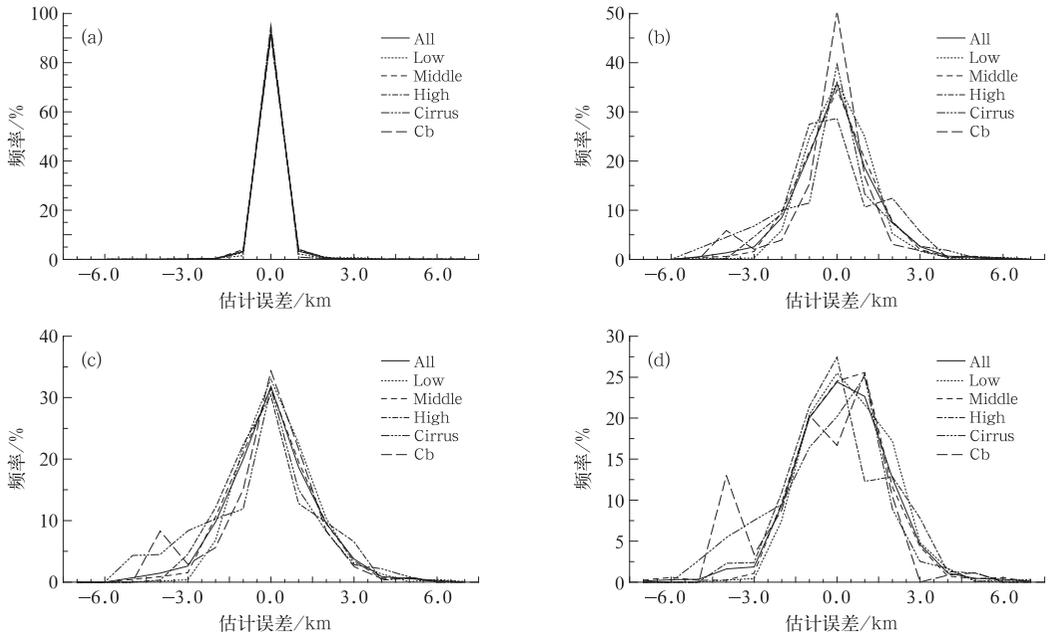


图 9 南海地区 MODIS 各类云云底高度估计值与实测值差的频率分布

Fig. 9 The same as Fig. 7, but for the South China Sea

果表明,图 7 所示积雨云的云底高度估计偏差在 $-4.5 \sim -3.5$ km 之间存在次高值的现象主要存在于南海地区,而西北地区积雨云的云底高度估计误差基本分布于 ± 1.5 km 之间。由此可见,多层云对 CloudSat 积雨云云底高度的准确确定有一定程度的影响,因此,本文方法更加适用于多层云出现频率较小的地区,如中国西北地区。

对观测点与待测点不同距离上各类云云底高度估计误差均值和标准差的统计表明(表 1),云底高

度估计误差的均值和标准差均随着距离的增加而稍有增大,其中低云(Low)云底高度估计误差的标准差在各个距离上都小于中、高云和卷云,这与上文统计得到的 CloudSat 各类型云云底高度的统计特征相一致。从估计误差的数值上来看,各类云云底高度估计误差的标准差都小于 1.5 km,而除了积雨云在距离大于 400 km 时的误差均值稍大于 1.5 km 外,其他各距离上的各类云云底高度估计误差也都小于 1.5 km。

表 1 MODIS 各类云云底高度估计误差的均值和标准差(单位:km)

Table 1 Means and standard deviations of cloud-base height errors for all MODIS cloud types (unit: km)

| 云底高度/km | 项目 | Cb | Cirrus | High | Low | Middle | All |
|---------|-------|------|--------|------|------|--------|-------|
| 0 | 样本数 | 1349 | 4335 | 7307 | 4703 | 11208 | 28902 |
| | 误差均值 | 0.20 | 0.30 | 0.31 | 0.24 | 0.33 | 0.30 |
| | 误差标准差 | 0.41 | 0.52 | 0.51 | 0.43 | 0.59 | 0.53 |
| 100 | 样本数 | 817 | 3603 | 6770 | 4358 | 10440 | 25988 |
| | 误差均值 | 0.92 | 1.19 | 1.09 | 1.04 | 1.05 | 1.08 |
| | 误差标准差 | 1.09 | 1.13 | 1.00 | 0.94 | 1.03 | 1.03 |
| 200 | 样本数 | 569 | 2751 | 5985 | 3886 | 9661 | 22852 |
| | 误差均值 | 1.23 | 1.46 | 1.20 | 1.22 | 1.17 | 1.22 |
| | 误差标准差 | 1.19 | 1.28 | 1.07 | 1.03 | 1.10 | 1.11 |
| 400 | 样本数 | 366 | 1741 | 3979 | 3557 | 8125 | 17768 |
| | 误差均值 | 1.58 | 1.45 | 1.40 | 1.38 | 1.32 | 1.37 |
| | 误差标准差 | 1.22 | 1.20 | 1.12 | 1.09 | 1.23 | 1.18 |

4 结论与讨论

本文通过对 CloudSat 云底高度外推估计的可行性分析,可以得出以下结论:

(1) 基于云分类的云底高度估计(CSAT)较基于距离(MSAT)的云底高度估计方法得到了显著的改善,回归分析得到 CSAT 和 MSAT 的判定系数分别为 0.6061 和 0.2116。

(2) 高云(Ci)、中云(Ac, As)云底的空间变化

较大,在 100~400 km 范围内,云底高度变化的均方差约为 1.5 km,而低云和其他云种的云底高度的空间变化较小,在 400 km 范围内其均方差小于 1 km。

(3) MODIS 各类云云底高度估计误差的标准差都小于 1.5 km,云底高度估计误差的均值除了积雨云在大于 400 km 的情况下稍大于 1.5 km 外,其他各类云在各种情况下都小于 1.5 km。

本文的工作仅仅对 CloudSat 云底高度的外推应用进行了初步探讨,为其实际应用提供了一定的依据。在该技术实际应用之前,还需要进一步考虑以下问题:首先,MODIS 与 CloudSat 云分类的一致性是影响 CloudSat 云底高度外推估计准确度最重要的因素。本文对 CloudSat 各类云云底高度的均一性分析表明,各类云具有较好的水平均一性,因此要借助 MODIS 云分类信息进行 CloudSat 云底高度准确的外推估计,就需要 MODIS 的云分类最大程度的与 CloudSat 的云类型一致。其次,CloudSat 云底高度估计方法对于单层云具有较好的效果,而在多层云存在的情况下,CloudSat 云底高度估计准确性会受到一定的影响。MODIS 等被动观测仪器对于多层云的识别和分类存在困难,尤其是当上层云为较薄的云时。正如本文所指出的,积雨云云底高度的估计值与实测值存在相对较大的偏差就是由于 MODIS 漏掉了多层云中的上层薄云造成的。再者,CloudSat 观测轨迹上捕捉到云类型信息的多寡会影响云底高度的外推估计范围。由于 CloudSat 的观测轨道比较窄,其轨迹上捕捉到的云信息是有限的,在整个 MODIS 观测视场内可能包含 CloudSat 没有观测到的云类型,这种情况下就不能够得到 MODIS 视场内完整的云底高度信息。因此,要实现 CloudSat 云底高度准确的外推估计,下一步需要对 MODIS 云分类与 CloudSat 云分类的一致性进行定量的分析,同时对多层云对 CloudSat 云底高度外推估计方法的影响作出评估,然后利用飞机探测或地基激光雷达资料进行云底高度外推估计结果的验证分析。

致谢:感谢美国 NASA CloudSat Data Processing Center 提供的 CloudSat 数据。

参考文献

- [1] Slingo A, Slingo J M. The response of a general circulation model to cloud longwave forcing, Part 1: Introduction and initial experiments[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1988, 114: 1027-1062.
- [2] 霍娟,吕达仁. 三维辐射传输模式分析非均匀云对天空辐射场影响[J]. *大气科学*, 2009, 33(1):168-178.
- [3] 周毓荃,欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. *气象*, 2010, 36(11):50-58.
- [4] Vislocky R L, Fritsch J M. An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility[J]. *Wea Forecasting*, 1997, 12: 31-43.
- [5] 周非非,周毓荃,王俊,等. 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*, 2010, 36(4):43-50.
- [6] Forsythe J M, Vonder Harr T H, and Reinke D L. Cloud-base height estimates using a combination of meteorological satellite imagery and surface reports[J]. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 2336-2347.
- [7] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The CloudSat mission and the A-Train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83(12): 1771-1790.
- [8] Winker D M, Pelon J, McCormick M P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds[J]. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 2003, 5575: 8-15.
- [9] 马占山,刘奇俊,秦琰琰. 云探测卫星 CloudSat[J]. *气象*, 2008, 34(8):104-111.
- [10] 陈英英,武文辉,唐仁茂,等. 利用 CloudSat 卫星资料分析冻雨天气的云结构[J]. *气象*, 2011, 37(6):707-713.
- [11] 吴伟,邓莲堂,王武功. “0911”华北暴雪的数值模拟及云微物理特征分析[J]. *气象*, 2011, 37(8):991-998.
- [12] Macpherson B, Wright B J, Hand W H, et al. The impact of MOPS moisture data in the U. K. Meteorological Office mesoscale data analysis scheme[J]. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 1746-1766.
- [13] Miller S D, Bankert R, Mitrescu C. 2008. Extending CloudSat/CALIPSO Observations to Regional Domains Via Type-Dependent Statistics[OL/R]. http://cira.colostate.edu/cira/cidm_09_docs/2009_cidm_directors_posters.pdf (5 Sep, 2009).
- [14] 朱亚平,刘建文,白洁. 云分类中逐个修改聚类 and 模糊聚类分类性能的对比研究[J]. *气象*, 2007, 33(2):15-22.
- [15] 周著华,白洁,刘健文,等. MOIDS 多光谱云相态识别技术的应用研究[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(5):678-684.
- [16] Lee Y, Wahba G, Ackerman S A. Cloud classification of satellite radiance data by multicategory support vector machines[J]. *J Atmos Oceanic Techno*, 2004, 21: 159-169.
- [17] 刘勇洪,牛铮,王长耀. 基于 MODIS 数据的决策树分类方法研究与应用[J]. *遥感学报*, 2005, 9(4):405-412.
- [18] 师春香,翟建华. 用神经网络方法对 NOAA-AVHRR 资料进行云客观分类[J]. *气象学报*, 2002, 60(2):250-255.
- [19] 白慧卿,方宗义,吴蓉璋. 基于人工神经网络的 GMS 云图四类云系的识别[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(4):402-409.
- [20] Li J, Menzel W P, Yang Z D, et al. High-spatial-resolution surface and cloud-type classification from MODIS multi-spectral band measurements[J]. *J Appl Meteorol*, 2003, 42: 204-226.
- [21] 刘志刚,李元祥,王昌雨. 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*, 2007, 44(z2).
- [22] Bankert R L, Mitrescu C, Miller S D, et al. Comparison of GOES cloud classification algorithms employing explicit and implicit physics[J]. *J Appl Meteor*, 2009, 48(7):1411-1421.
- [23] 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等. 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*, 2011, 30(1):38-52.