

张艳品, 章文星, 吕达仁, 等. 2014. 卫星 (IASI 探测仪) 观测云顶高与地基云雷达观测的对比验证 [J]. 大气科学, 38 (5): 874–884, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13161. Zhang Yanpin, Zhang Wenxing, Lü Daren, et al. 2014. Cloud top heights measured by METOP-A IASI Instrument compared with ground-based cloud radar [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 874–884.

卫星 (IASI 探测仪) 观测云顶高与地基云 雷达观测的对比验证

张艳品^{1, 2, 3} 章文星¹ 吕达仁¹ 毕永恒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 成都信息工程学院, 成都 610225

3 石家庄市气象局, 石家庄 050081

摘要 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) 是搭载在欧洲 METOP-A 卫星上, 采用干涉分光技术的新一代超高光谱红外大气探测仪器, 其光谱测量范围涵盖了多个吸收带, 可用于反演大气、海洋、云和大气成分, 为地球大气遥感、气象业务和科学研究提供了丰富的遥感资料, 是各国学者关注的又一热点。为深入了解 IASI 在国内的云产品情况, 本文利用 2008 年 10 月 15 日~12 月 15 日期间 IASI 在安徽寿县地区的云参数观测资料和中美 [美国能源部大气辐射测量 (ARM) 计划] 联合在安徽省寿县进行大气辐射综合观测试验期间, 相同时段云雷达[ARM W-band (95 GHz) Cloud Radar, WACR]的观测资料进行了对比分析和验证。在以寿县 ARM 移动观测设施 (AMF) 为中心, 半径为 20 km 的范围内, IASI (2 次/d) 共有有效观测 129 次, 其中与 WACR (1 次/2 s) 匹配的 IASI 有效观测共 80 时次。结果表明: 对于单层云, 二者云高相关系数为 0.8312, 标准差为 1.8423 km; 对于双层及多层云, IASI 反演云顶高结果绝大多数在 WACR 的最上和最下层云之间, 且靠近较厚的云层。对比结果显示, 一般情况下, IASI 反演云顶高结果明显低于 WACR; IASI 反演云顶高结果受到视场中云量、云层厚度及云层中粒子浓度大小的影响: 视场中云量越大, 云层越厚, 云层中粒子浓度越大, IASI 反演云高的结果越接近真实云高。

关键词 IASI 云雷达 云顶高 对比

文章编号 1006-9895(2014)05-0874-11

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13161

Cloud Top Heights Measured by METOP-A IASI Instrument Compared with Ground-Based Cloud Radar

ZHANG Yanpin^{1, 2, 3}, ZHANG Wenxing¹, LÜ Daren¹, and BI Yongheng¹

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

2 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Shijiazhuang Meteorological office, Shijiazhuang 050081

Abstract The Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) is a new-generation super-high-spectrum sounding instrument based on the Michelson interferometer and is loaded on the METOP-A European meteorological polar-orbit satellite. IASI covers multiple absorption bands to retrieve atmosphere, ocean, cloud, and atmosphere components to

收稿日期 2013-04-25, 2014-02-28 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40775026, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200806031

作者简介 张艳品, 女, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星遥感研究。E-mail: xiaopin87@gmail.com

provide a wealth of remote sensing data for earth-atmosphere remote sensing, meteorological operations, and scientific research. Therefore, this instrument has gained increasing attention. To fully understand the applicability of IASI, a comparison is made in this study between the cloud top height products from IASI over Shouxian, Anhui Province, China, recorded from October 15 to December 15, 2008, and the cloud parameter information from W-band (95 GHz) Cloud Radar (WACR) supplied by the Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Mobile Facility (AMF) deployed in Shouxian. Within 20 km of AMF, a total of 129 measurements were synchronously made by the two instruments, 80 of which by IASI matched the data from WACR at the nearest distance. For the single-layer, the correlation coefficient and the standard deviations of the differences between IASI and WACR were 0.8312 and 1.8423 km, respectively. Moreover, for two- or three-layered measurements, the cloud top heights by IASI were, on average, within the WACR top and bottom cloud boundaries and close with thicker clouds. The comparison reveals that the cloud top heights by IASI are lower than by WACR in most cases. With increasing cloud cover, cloud thickness in the field of view, and the concentration of particles in the clouds, the result from IASI approach the true value.

Keywords IASI, WACR, Cloud top heights, Comparison

1 引言

云覆盖了地球表面 50%以上的面积, 对全球能量循环和水循环具有不可忽视的作用, 它是影响全球气候变化和大气辐射传输过程的重要因子(Ohringand Adler, 1978)。研究表明, 云顶高度在众多云物理参数中是十分重要的。因此, 如何及时获取准确的云高信息, 一直以来都是人们广泛研究的热点。云观测资料的获得主要分为空基遥感和地基观测两个方面。卫星探测云参数和地基探测云参数因为探测方式、探测范围和反演方法的精度和误差不同而各自存在优缺点(邱金桓等, 2005)。相对地基探测而言, 卫星遥感有覆盖范围广、信息量大、重复频率高等优势。但卫星探测存在空间分辨率不够高和时间不连续的缺点, 往往需要利用地基观测获得的高分辨资料对卫星探测结果进行验证与补充, 并由此形成了当前天—地基联合云观测的研究应用方向(吕达仁等, 2003)。对于天地联合遥感的研究, 国内外科学家们都已经作了很多研究工作。Kim et al. (2011) 进行了星载激光雷达(Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization, CALIOP) 云顶高产品和中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 云顶高产品的对比分析; 曹芸等(2012) 利用地面观测资料对 MODIS 云量产品进行了订正; 周非非等(2010) 对主要由 FY-2C/D 卫星观测资料反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系做了初步探讨; 陈延娣等(2008) 利用热带降水测量卫星 TRMM 对 Bonnie 飓风数据和机载雷达的数据进行对比分析, 印证了 TRMM 卫星数据的可靠性, 并同时验证了双束—立体雷达算法的可靠

性。近年来, 随着高光谱探测技术的快速发展和数据处理能力不断提高, 星载或机载高光谱大气探测仪器的研发和应用越来越受到各国的广泛关注, 如光栅式红外大气探测仪 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 和干涉式红外大气探测仪 CrIS (Cross-track Infrared Sounder)(刘辉等, 2006)。而装载在欧洲极轨气象卫星 METOP 上的 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) 是新一代超高光谱探测仪器, 其采用迈克尔逊干涉技术, 红外光谱范围为 3.62~15.5 μm , 可获得 8461 个光谱通道的数据, 光谱分辨率为 0.25^{-1} cm , 同时附有一个成像系统, 可用于反演大气、海洋、云和大气成分。其获得的大气温湿廓线垂直分辨率为 1 km, 测温精度为 1 K, 测湿精度为 10%, 故真正实现了高光谱和高精度红外探测(Lavanant et al., 2011)。目前 IASI 反演产品已作为业务产品实时发布。欧洲气象卫星开发组织(EUMETSAT)持续对 IASI 产品的反演算法进行了改进, 并利用地基、空基观测结果和其他卫星的反演产品进行了对比验证(Augustet al., 2012), 其中, 利用德国林登贝格气象站 35.5 GHz 云雷达对 IASI 云顶高产品进行的对比表明, 对于高云(即使有效云量很少)和不透明阴沉的较低云, IASI 与云雷达有很好的一致性, 而对于中云和低云, 二者的一致性会随着视场内有效云量的减少而降低。虽然国内已有相关文章对 IASI 仪器的先进性、探测能力和数据产品的应用进行了介绍(张磊等, 2008; 刘毅等, 2011), 但目前还没有对 IASI 云产品进行实际验证的相关研究。2008 年 5 月至 12 月, 中美(美国能源部大气辐射测量(ARM)计划)联合利用 ARM 移动观测设施(AMF)在安徽省寿县进行了综合

观测。ARM W-band (95 GHz) Cloud Radar 云雷达（以下简称 WACR）是地基云参数观测的主要仪器（彭亮，2011）。本文选取 2008 年 10 月 15 日～12 月 15 日期间 IASI 在安徽寿县上空的云参数（云顶高）观测资料和相同时段 WACR 观测资料进行了对比分析，给出了对比分析结果，并对两种观测产生差异的原因进行了分析，以期 IASI 云产品在实时气象业务和气象科学的研究中发挥更大的作用。

2 仪器、数据及方法

2.1 干涉式红外大气探测仪（IASI）

METOP 系列卫星共有 3 颗，其中 METOP-A 和 METOP-B 已分别于 2006 年 6 月和 2012 年 9 月发射，METOP-C 计划于 2016 年年底发射，其主要任务是提供天气服务、支持实用气象学研究和对气候学的监测。METOP 卫星运行在高为 800～850 km、倾角为 98.7° 的太阳同步轨道上，每天 09:30（协调世界时，下同）从北向南（降交点）经过赤道上空，轨道周期为 101 min，每天大约绕地球转 14 圈。

IASI 是 METOP-A 卫星上重要的探测仪器之一，它在 817 km 的高空上进行分步扫描，扫描频率为 8 s，视场为 48.3 度，扫面幅宽为 2200 km，可每天提供两次全球数据。每一条扫描线有 30 个有效视场，每一个有效视场由 2×2 个圆形瞬时视场组成。瞬时视场星下点直径为 12 km，沿轨道和扫描方向分别逐渐增大至 39 km 和 20 km (August et al., 2012)。根据国际卫星对地观测委员会（CEOS）的标准，IASI 的数据产品划分为 5 级产品，分别为 L0、L1A、L1B、L1C、L2A、L2B、L3、L4。在本文的研究中，卫星数据资料是 IASI L2B 产品中的云参数产品，主要包括云顶气压、云顶温度、云量等参数，其中云顶高产品精度为 300 m，云顶温度产品精度为 2 K 云量产品精度为 10%。

云顶气压、云顶温度和云量等云参数产品的反演算法为 CO₂ 切片算法。CO₂ 切片算法最早是由 Menzel et al. (1983) 提出，并由 Smith and Frey (1990) 等进行了应用发展。2007 年该算法被应用于 IASI，且欧洲气象卫星开发组织（EUMETSAT）持续对其进行改进（EUMETSAT Technical Report, 2009）。反演云顶气压所用的 CO₂ 波段为 707.5～756 cm⁻¹，共 41 个通道。而云量的反演通道

为 900.5 cm⁻¹。由于 CO₂ 波段获得的辐射对不同大气层是敏感的，故通过测量其向上红外辐射，就可以得到云顶气压。

由于 IASI 观测方式的特殊性，在同一观测时段情况下，有时会出现卫星观测扫描带覆盖了寿县地区，而寿县 ARM 移动观测设施（AMF）观测站点恰好在 4 个瞬时有效视场之间，不被有效视场覆盖的情况，所以我们所用的数据是以安徽寿县 AMF 观测站点（32.558°N, 116.781°E）为中心的 20 km 范围内 IASI 有效瞬时视场所能覆盖区域的所有样本点数据。

2.2 95 GHz 地基云雷达（WACR）

云雷达数据是由安徽寿县 AMF 提供的地基毫米波云雷达（WACR）获得。该雷达是一个 W 波段 95.04 GHz 多普勒雷达，工作在同极化和交叉极化两种模式，能够获得反射率、平均多普勒速度、谱宽等信信息。该雷达探测高度为 15 km，最小垂直分辨率为 45 m，观测方向为单一天顶方向，峰值功率为 1500 W。本文使用的 WACR 数据为时间间隔约 2 s 的反射率廓线 1b 资料，该资料经过 ARM 数据中心处理，并通过质量检验。

2.3 对比方法

通过对对比分析毫米波雷达与新一代多普勒天气雷达、晴空风廓线雷达的差异（仲凌志等，2009），得出：毫米波雷达具有穿透云层，给出多层云结构信息的能力，时空分辨率高，能够更精确地反映云的垂直和水平结构，比普通天气雷达更适合监测云的变化。由于毫米波雷达回波在云层处较强，如图 1a, b 所示，红线为天空有云时连续数次 WACR 反射率廓线平均值减去雷达晴空背景后回波廓线的情况，因此我们利用 WACR 反射率廓线进行各层云的云底高、云顶高、回波积分值的提取和计算，以此作为云宏观参数的真值（章文星和吕达仁，2012）。具体步骤是，首先选择晴空背景，2008 年 11 月 29 日是比较稳定的晴天，因此选取清晨 07:00 起 100 次反射率廓线的平均值作为晴空背景（取平均值是为降低噪声影响）；以卫星过境时刻为准，计算 WACR 前 8 次和后 7 次共计 15 次反射率廓线的平均值；将反射率廓线的平均值减去晴空背景反射率廓线，以 5 dBZ 为阈值，高出阈值的部分认为是有云部分。

卫星对于云的红外遥感，传感器感测到的是全部云层和路径大气的热红外辐射，给出的云顶高度

实际上是等效云顶高度(李俊和曾庆存, 1997a, 1997b)。如果最顶层云层很薄, 传感器感测到的辐射也有下层云的贡献, 相应云顶高度就低; 如果顶层云很厚, 并且云粒子浓度很高, 可以当作黑体辐射, 那么反演得到的云顶高度就接近真实云顶高度。由于各个云层的WACR反射率强度的积分值对于了解云粒子的浓密和云的厚薄有一定代表性, 为了更好地分析评估卫星反演的云顶高度, 我们计算了各观测时次WACR感测到的各云层反射率强度的积分值($Clint_1, Clint_2, Clint_3\cdots$), 这对于评估卫星反演云高的精度有一定参考价值。云层回波强度积分值计算公式为

$$C_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots, \quad (1)$$

其中 C_i 即为 $Clint_i$, 表示第*i*层云的反射率强度积分值($Clint$ 也可表示单层云反射率强度积分值), R_i 为该层云云底高度到云顶高度之间的所有反射率强度值。

图1c, d分别给出的是2008年10月25日和11月1日的WACR反射率廓线随时间变化的情况, 横坐标为时间, 纵坐标为高度, 颜色表示强度, 黑色五角星为IASI反演的云顶高(以下简称IASI_cth)。图a, b分别对应图c, d当天卫星过境时刻, 即2008年10月25日04:07:20单层云和2008年11月1日03:04:55双层云时的WACR回波廓线。图中横坐标为反射率, 纵坐标为高度, 红色曲线为减去晴空背景后的WACR反射率廓线。浅蓝色竖线为5 dBZ阈值线, 用于进行各层云云顶高度和云底高度的提取, 数值由黑色数据给出。蓝色数据为各层云从云底到云顶之间的反射率强度的积分值。IASI_cth由玫红色数值给出。

3 对比结果分析

由于WACR和IASI观测云高的能力不同, 对于天空是否真实有云的判断不同, 因此对比仅包括云顶高度15 km以下的观测结果。如果WACR的反射率廓线没有云层回波, 则此时为晴空天气; 如果在观测时刻附近, 连续15次WACR反射率廓线都出现较强的回波, 则此时天空有云, 并依据反射率廓线来区分单层或多层云情况; 如果WACR出现故障, 则没有观测值。

2008年10月15日~12月15日期间, 在以寿县AMF为中心的20 km范围内, 与WACR(1次/2 s)观测时间匹配的IASI(2次/d)有效观测共有129

次, 按时间分为80时次, 每一时次均为距AMF最近的样本数据。表1和表2分别给出了80个时次在IASI有效瞬时视场的分布情况和两仪器同步观测情况。以下分3种情况进行对比分析。

表1 80个时次有效瞬时视场分布情况

Table 1 The distribution of 80 samples in different effective in instantaneous fields of view

瞬时视场数	1	2	3	4
时次数	43	29	4	4

表2 两仪器同步观测情况

Table 2 The occasions of clear or cloudy sky observed by two instruments respectively

	IASI&WACR 有云	IASI&WACR 无云	IASI 无云, WACR 有云	IASI 有云, WACR 无云
时次	43	9	20	8
百分比	54%	11%	25%	10%

3.1 WACR和IASI同时观测到云的情况

以WACR回波区分, 在WACR和IASI共同观测有云的43时次中单层云27次, 双层云11次, 三层及多层云5次。为详细了解IASI云顶高观测情况, 须针对不同云层情况, 分类进行对比分析。

3.1.1 单层云情况

2008年10月15日~12月15日期间, WACR和IASI同时观测到单层云有27次。图2a给出的是各时次WACR观测的云层状况(W1_cth为单层云云顶高或上层云云顶高, W1_cbh为单层云云底高或上层云云底高)及相应时刻的IASI_cth, 按W1_cth从小到大次序排列, 图2b给出的是相应时刻IASI瞬时视场的有效云量, 图2c为各观测时次WACR反射率强度的积分值Clint。

从图2可看到, 大多数情况下, IASI_cth与W1_cth比较一致, 说明IASI_cth的观测结果较好。对于云顶高度高于5 km以上的单层云, IASI_cth大都低于W1_cth, 高于W1_cbh, 处在云层中间。云量越大, Clint越高, IASI_cth相对更接近W1_cth。为了更清楚地说明情况, 以第18和24时次为例进行分析。图3a, b分别对应第18和24观测时次当天即2008年12月4日和11月6日WACR回波图, 黑色星为IASI_cth。从图3a可看出, 12月4日凌晨到中午12时在WACR天顶上空维持中低层云, 6时左右云层开始由厚变薄, 12时后完全晴空。在03:24卫星过境时刻, 云层较厚, 约有6 km, 同时WACR回波较强, 表明云层中云粒子浓度较高或粒

子尺寸较大，并且由图2b可知，此时IASI瞬时视场内的有效云量较高，接近满云。而图3b为一降水云系，卫星过境时为强降水，云层较厚，WACR

回波较强，且IASI视场内为满云。由于这两个观测时次IASI观测视场内接收到的红外辐射主要来自于云层，所以IASI_cth与W1_cth吻合较好。相

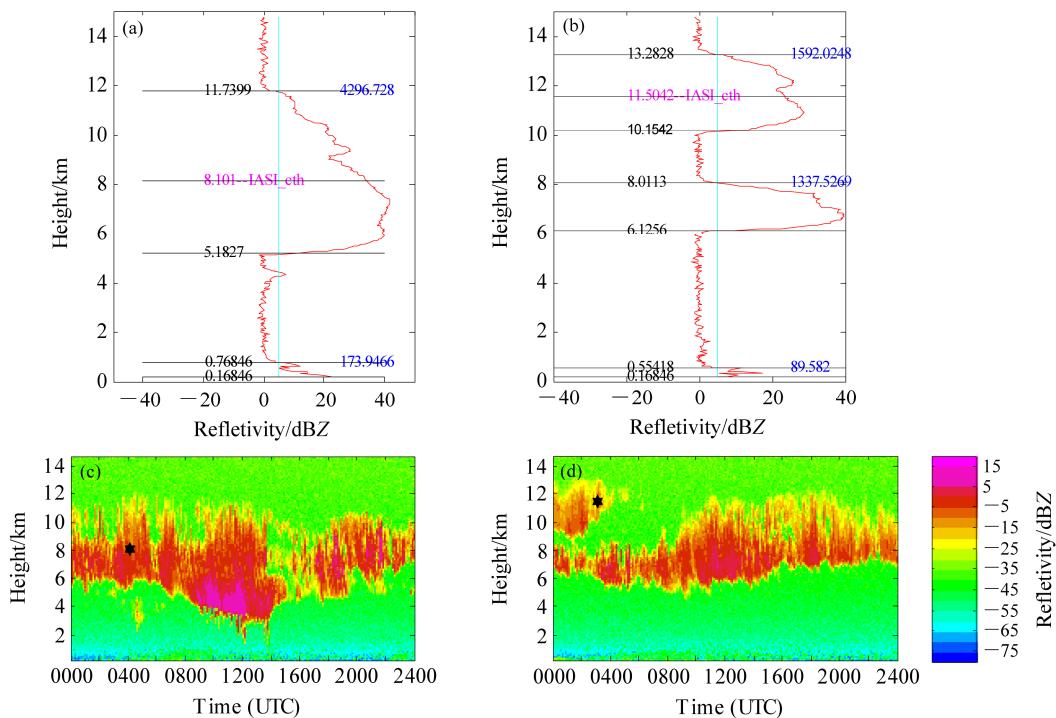


图1 2008年10月25日、11月1日两种仪器云高观测结果的比较：(a, c) 单层云；(b, d) 双层云

Fig. 1 Comparisons of cloud heights from two instruments on 25 Oct and 1 Nov 2008: (a, c) Single-layer cloud; (b, d) two-layer cloud

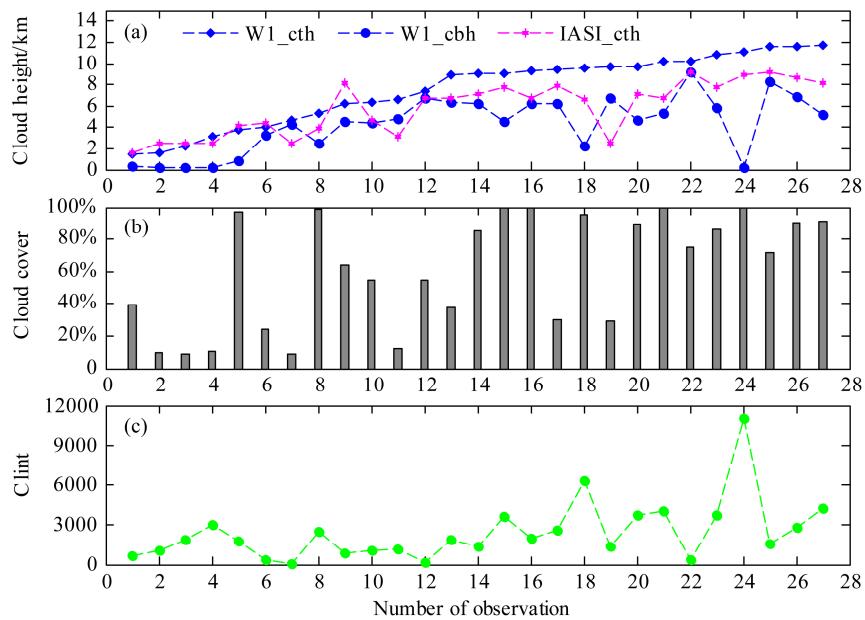


图2 干涉式红外大气探测仪（IASI）和云雷达（WACR）单层云观测情况：(a) 云底、云顶高；(b) IASI 瞬时视场有效云量；(c) 云雷达回波积值（Clint）

Fig. 2 (a) Cloud base/top heights from ARMW-band Cloud Radar (WACR) and Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI); (b) the effective cloud cover from IASI; (c) the Clint(integration of reflectivities from WACR) for single layer cloud cases

反, 有效云量越少, 云粒子浓度越低尺寸越小, IASI_cth 与 W1_cth 偏差就会越大, 如图 2 第 19 次, 对应图 3c 即 2008 年 11 月 4 日 WACR 观测回波图。可以看出, 当天的 WACR 上空为一完全破碎的高层云系, 在 03:47, 即卫星过境时刻, WACR 上空云层回波强度弱, 云层薄且破碎, 表明上空云层松散, 云粒子浓度低或尺寸较小, 不能被完全看作黑体, 并且近地表云雷达回波强度较其他时刻偏高, 表明有雾层或霾层出现; 同时 IASI 瞬时视场内有效云量也较低, 为 30%, 此时 IASI 观测视场内接收到的红外辐射并非主要来自于云层, 而是有地表雾层或霾层的贡献, 故 IASI_cth 较 W1_cth 低。一般情况下, 云层越厚, 云粒子浓度越高或尺寸越大, 卫星通过红外通道探测反演的云顶高越接近真实云高情况, 此结果与 Dong et al. (2008) 结论一致。

图 2 显示, 对于 W1_cth 低于 5 km 的观测时次, 除第 9 次外, IASI_cth 大都低于 W1_cth。图 3d 为第 9 次对当天即 2008 年 10 月 27 日 WACR 全天观测回波图。可以看到, 10 月 27 日凌晨至 8 时在 WACR 天顶上空维持较薄较松散的高层云, 08 时后云高逐渐降低, 云层加厚。11 时云层开始消散。18 时后又逐渐形成较厚的中低云。在 12:35 卫星过境时刻, WACR 回波较弱, 云层较薄, IASI 瞬时视场内有效云量为 63%, Clint 为 880, 表明云层中云粒子浓度偏低或尺寸较小, 此时 IASI 观测视场接收到的红外辐射受到云层以上大气的影响, 故 IASI_cth 较 W1_cth 偏高。

图 4 给出的是全部单层云 IASI_cth 与 W1_cth 的散点图及拟合直线(蓝色直线), 图 4a 中色标为 IASI 瞬时视场有效云量, 图 4b 中的色标为 Clint, 图 4c 中色标为 IASI 瞬时视场距寿县 WACR 站点的距离。可以看到, 总体而言, IASI_cth 较 W1_cth 系统偏高; 云顶高度高于 7 km 时, IASI 视场中的云量越多, Clint 值越大, 二者云高结果的总趋势越趋于稳定; 二者观测结果的一致性与观测点距离的关系不是很明显。IASI 视场中有效云量超过 70% 时, 两仪器的云顶高偏差标准差为 1.09 km; 低于 70% 为 2.31 km。表 3 给出了全部单层云的对比情况, 二者相关系数为 0.8312, 标准差为 1.8423 km。

实际上, 对于所有云高反演方法, 当云量很少时, 反演云高的精度都会急剧下降 (Lavanant, 2002; Lavanant et al., 2011)。

3.1.2 双层及三层云情况

以 WACR 回波区分, 在 IASI 和 WACR 共同观测有云的 43 时次中, 还有双层云 11 次, 3 层云 5 次。从图 5 中可以看到, 对于三层云, IASI_cth 大都在上层云和下层云之间, 但第 3 次例外, 分析原因是由于当天卫星过境时刻天空中的三层云都较薄较破碎, 且此时 IASI 视场内有效云量为 31.49%, Clint 平均为 460, 说明此时云层很薄且粒子浓度很低或尺寸很小, 故 IASI_cth 出现了较大的偏差。两层云时, IASI_cth 大都接近较厚的云层; 当两层云都较薄时, IASI_cth 更接近较低的云层, 如图 6, 对应图 5 第 16 次, 为 2008 年 11 月 1 日 WACR 反射率回波图。可以看到, 在 03:50 即卫星过境时, WACR 上空为双层云, 上层云较厚, 下层云较薄, IASI 视场内为满云, IASI_cth 落在 WACR 上层云的强回波区。这是主要是由于卫星从上向下探测时, 若上层云很厚, 粒子浓度很高或尺寸很大, 可以认为是黑体, 则 IASI 接受到的辐射强度主要来自于上层云的贡献, 等效云顶高就接近真实上层云云顶的高度; 若上层云很薄很破碎, 下层云很厚且粒子浓密很高或尺寸很大, 则 IASI 接受到的辐射强度主要来自于下层云的贡献, 相应云顶高就接近下层云。

由表 1 可知, 当卫星过境时, 与 WACR 匹配的样本可能发生在多个有效瞬时视场中, 下面以 2008 年 11 月 1 日 03:50 卫星过境时刻(图 5 第 16 次)两个仪器匹配样本点分布及仪器观测情况(表 4)为例进行分析。表 4 中, Clint1、Clint2 分别为 WACR 测得的上层云和下层云的回波积分值, W1_cth、W1_cbh、W2_cth、W2_cbh 分别为上层云云顶高度、上层云云底高度、下层云云顶高度、下层云云底高度。由 4 个样本点的分布、IASI 瞬时视场有效云量和 Clint1、Clint2 可知, 该时刻 WACR 站点上空云量接近 100%, 上层云较下层云厚, 云雷达回波也较下层云强, 表明上层云粒子浓度较高或尺寸较大。由于卫星从上向下探测, 故此时 IASI 观测

表 3 WACR、IASI 单层云云顶高情况

Table 3 The comparison of cloud height observation between WACR and IASI

相关系数 R	标准差 σ	$ W1_{cth}-IASI_{cth} $ 最小值	$ W1_{cth}-IASI_{cth} $ 最大值	IASI_cth 平均值	W1_cth 平均值	W1_cbh 平均值
0.8312	1.8423 km	0.2449 km	7.2321 km	5.8414 km	7.5780 km	4.298 km

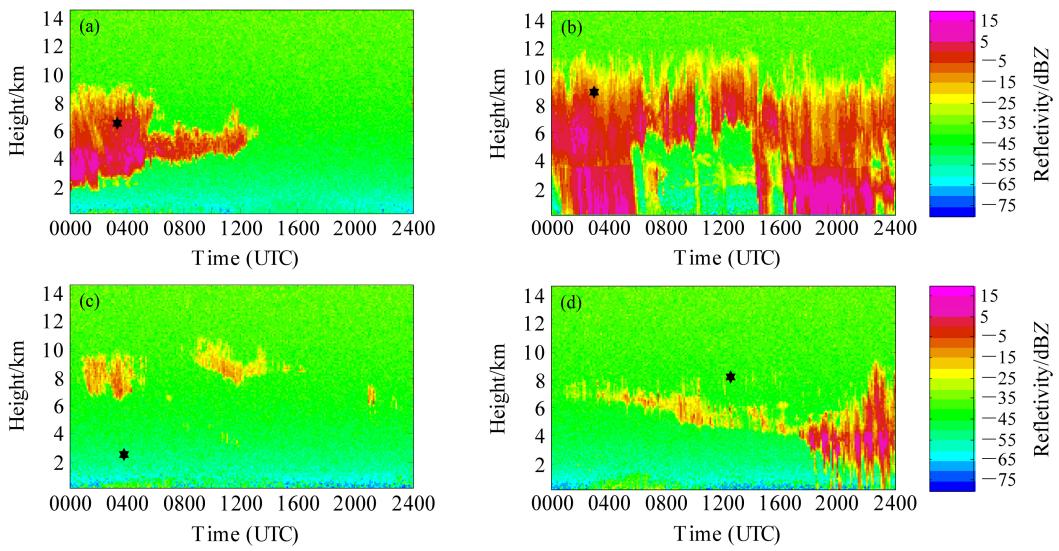


图3 云层厚度不同时，WACR的反射率廓线及对应时刻IASI观测的云顶高（IASI_cth）

Fig. 3 Reflectivity from WACR and the cloud top heights detected by IASI (IASI_cth) when the cloud thickness is different

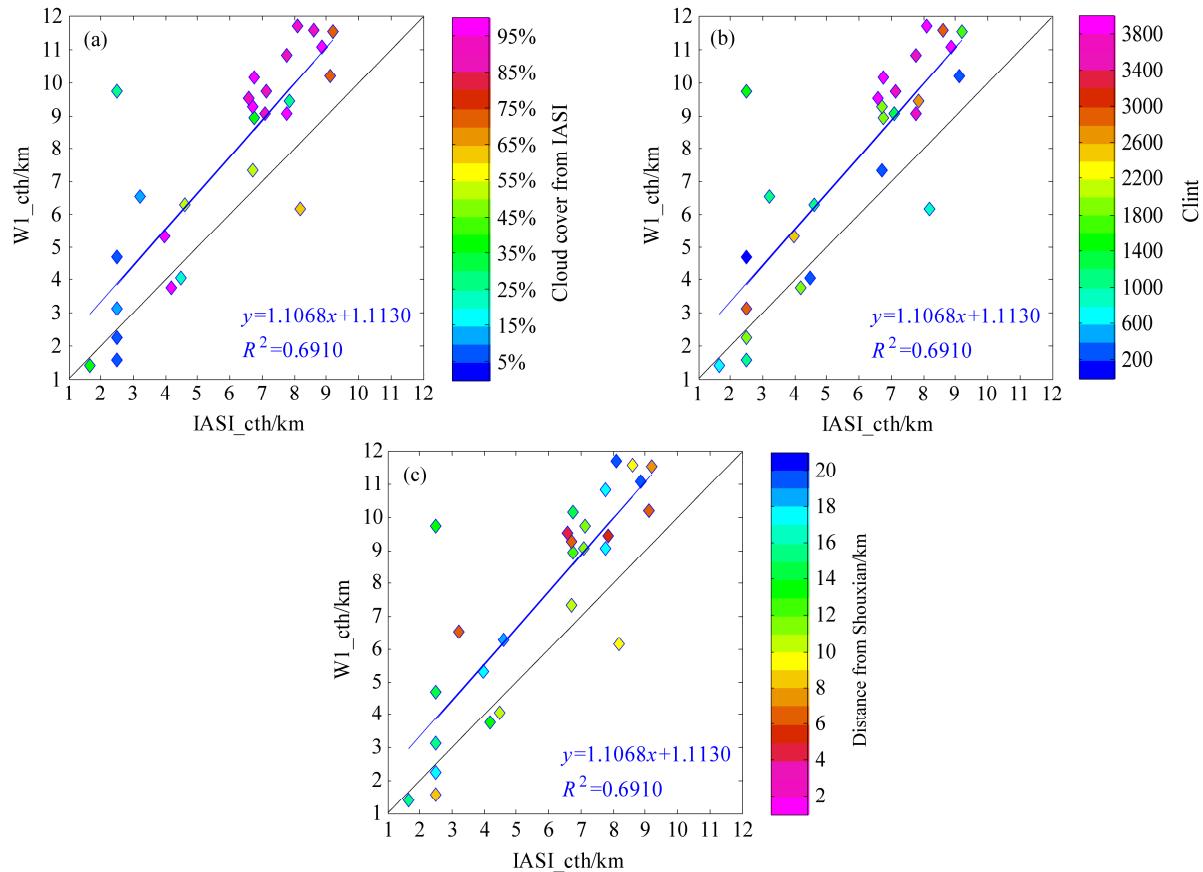


图4 WACR、IASI云顶高散点图：(a) 色标表示对应时次IASI瞬时视场的有效云量；(b) 色标表示对应时次WACR回波积分值Clint；(c) 色标表示对应时次IASI瞬时视场与WACR站点距离

Fig. 4 The comparison of cloud top height observation between WACR and IASI, scatterplot: (a) The color scale represents the effective cloud cover from IASI; (b) the color scale represents the Clint from WACR; (c) the color scale represents the distances between IASI and WACR

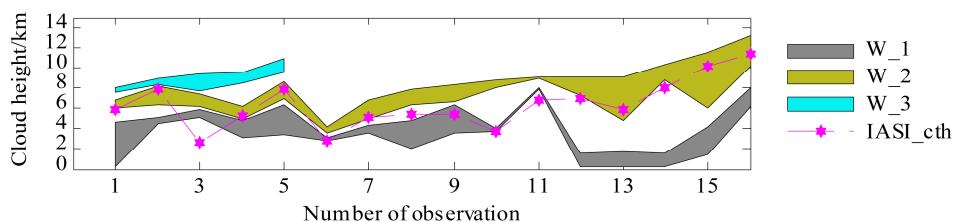


图 5 两仪器共同观测到有云时的情况(灰色 W_1, 黄色 W_2, 蓝色 W_3 分别代表上、中、下层云的厚度。红色曲线为相同时刻 IASI_cth)

Fig. 5 The comparisons of cloud base heights between WACR and IASI for the clouds of top, middle, and bottom layers. Gray (W_1), yellow (W_2), and blue (W_3) respectively represent the upper, middle, and lower clouds. Red line represents IASI_cth

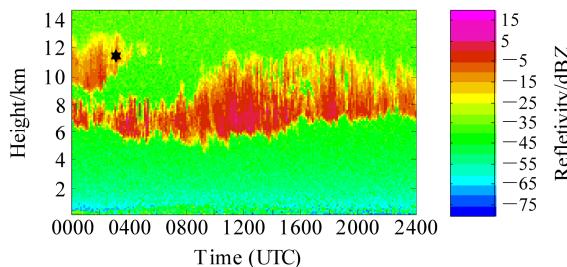


图 6 2008 年 11 月 1 日 WACR 回波图及 IASI_cth

Fig. 6 Reflectivity from WACR and IASI_cth on 1 Nov 2008

视场内接收到的红外辐射主要来自于上层云, 所以 IASI_cth 与 W1_cth 较一致。由此说明, 在同一时刻, 分布在多个瞬时视场中的样本观测情况相差不大时, IASI_cth 更接近寿县移动观测站上空真实的云顶高度。

3.2 WACR 观测无云而 IASI 观测有云的情况

在以寿县 AMF 为中心的 20 km 范围内与 WACR 匹配的卫星反演云顶高产品中, WACR 观测无云而 IASI 观测有云的情况有 8 个时次。图 7 为这 8 个时次 WACR 全天 24 小时的回波图及卫星过境时 IASI_cth 的情况。表 5 为对应时次 IASI 瞬时视场中心位置距 AMF 站点的距离、IASI_cth 及瞬

时视场有效云量。结合图 7 和表 5 可以看出, 除去第 5 次, IASI 云顶高大都在 2~4 km 之间, 平均值为 3.03 km; IASI 瞬时视场有效云量都较低, 最大值为 14.85%, 最小值为 9.02%, 平均值为 10.30%; IASI 瞬时视场中心点距 AMF 站点的最大距离为 19.38 km, 最小距离为 7.05 km, 平均值为 14.13 km。综上所述, 二者不一致的原因可总结为: 由于这 8 个时次瞬时视场内有效云量都很少, 可能会导致 IASI 反演的云顶高不准确; 由于二者观测方式及观测视场角不同, 当天顶云层变化较快时, 也可能出现两者不一致的情况; 当 WACR 天顶方向无云, 而 IASI 瞬时视场中心距离 WACR 站点较远, 且其瞬时视场恰有少量云量, 因此就可能出现 WACR 无云而 IASI 有云的情况。

3.3 WACR 观测有云而 IASI 观测无云的情况

在以 AMF 为中心的 20 km 范围内与云雷达匹配的卫星反演云顶高产品中, WACR 观测有云而 IASI 观测无云的情况为 20 时次。分析数据和 WACR 回波图发现, 除去偏差明显的 3 时次外, 剩余的 17 时次 WACR 观测得到的大都是较低的云高度, 其平均值为 0.5167 km, 分析原因可能是这些时次当天的近地面有较厚的霾层或雾层出现导致 WACR 误

表 4 2008 年 11 月 1 日 03:05 样本分布及两仪器观测情况

Table 4 The distribution of cases and the observations by IASI and WACR at 0305 UTC on 1 Nov 2008

瞬时视场 IFOV	与站点距离/ km	样本位置	IASI_cth/km	W1_cth/km	W1_cth/km	W2_cth/km	W2_cth/km	Clint1	Clint2	瞬时视 场云量
1	13.57	32.63°N, 116.66°E	10.42	13.28	10.15	8.011	6.12	1592	1337	96.13
2	17.85	32.47°N, 116.62°E	11.50	13.28	10.15	8.011	6.12	1592	1337	100
3	14.62	32.43°N, 116.82°E	11.06	13.28	10.15	8.011	6.12	1592	1337	100
4	8.87	32.59°N, 116.86°E	11.37	13.28	10.15	8.011	6.12	1592	1337	100

表 5 8 个时次的 IASI 瞬时视场中心位置与 WACR 站点距离、IASI_cth 及瞬时视场有效云量

Table 5 The distance between IASI and WACR, IASI_cth, and effective cloud cover in IASI field of view for the eight cases

距 WACR 站点距离/km	17.17	19.38	10.68	19.36	14.76	8.03	16.67	7.05
IASI_cth/km	2.48	2.46	2.49	2.44	6.88	2.53	2.50	2.48
IASI 瞬时视场云量	9.77%	9.02%	10.60%	7.71%	14.85%	10.5%	10.72%	9.22%

判。由于上述3时次样本天气情况类似,故举一例分析。图8a, b分别为2008年10月23日WACR回波图及当天卫星过境时WACR回波廓线图。2008

年10月23的场景是一个较薄较松散的中高云系,且午后转为晴空;卫星过境时刻即02:55,距离AMF 20 km内与WACR匹配的IASI样本有两个,

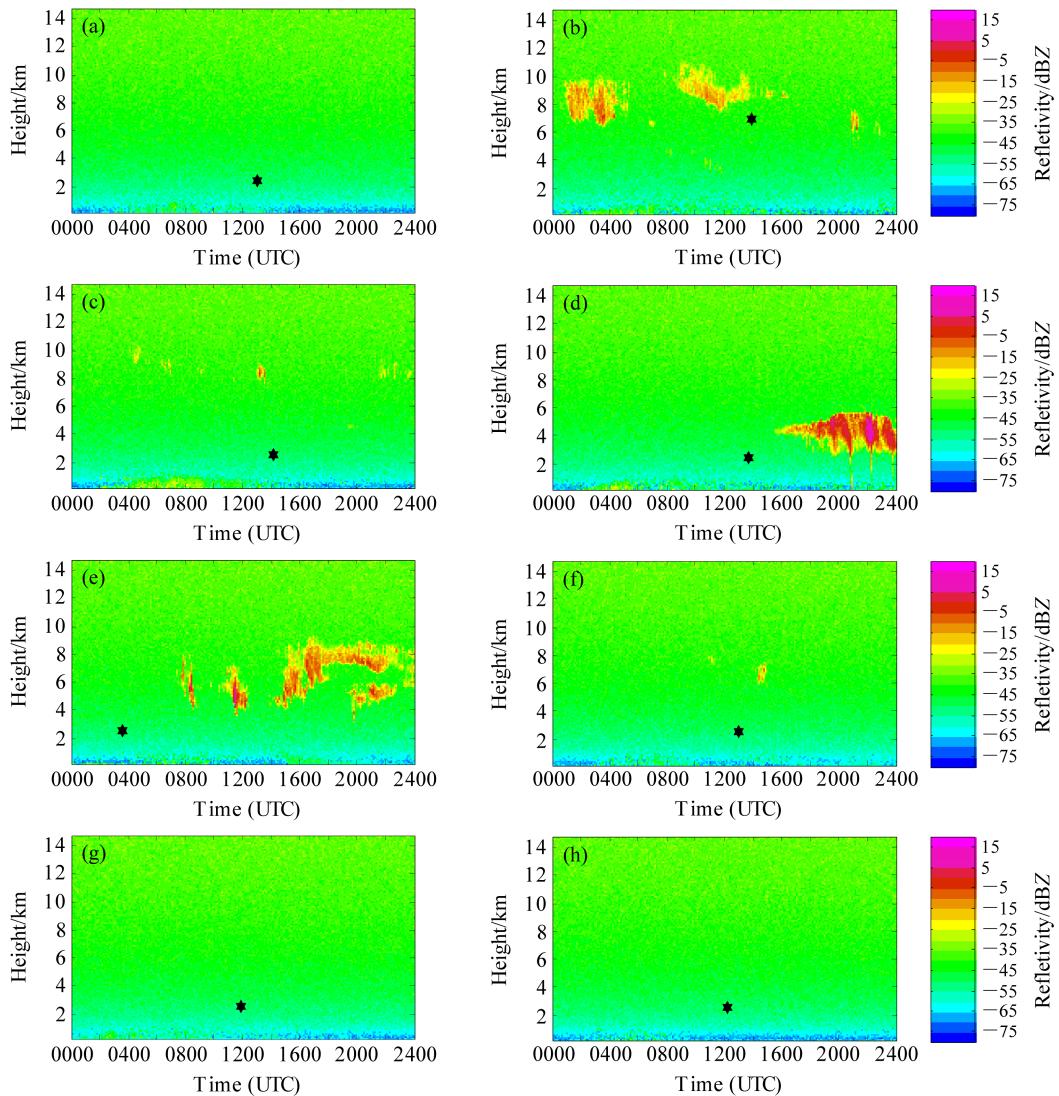


图7 WACR观测无云而IASI观测有云时,WACR反射率及IASI_{cth}(黑星高度为IASI_{cth})

Fig. 7 Reflectivity from WACR and IASI_{cth} (the height of the black star represents IASI_{cth}) when WACR failed to sense cloud and IASI can sense cloud

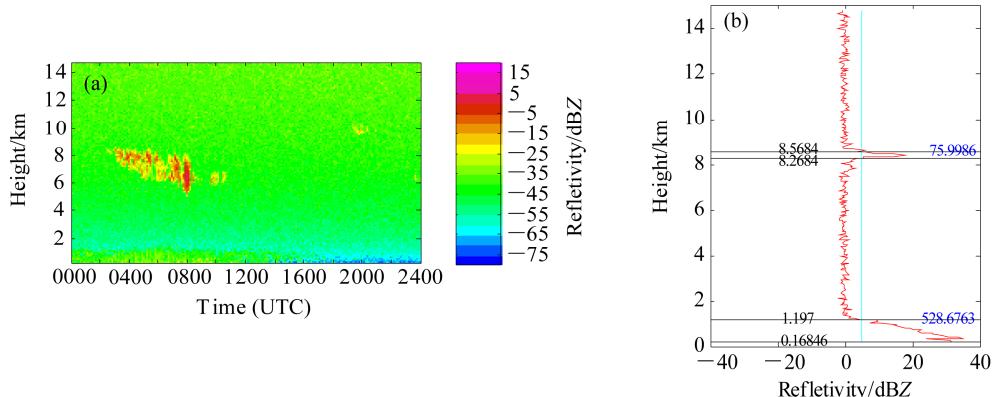


图8 2008年10月23日(a)WACR回波以及(b)卫星过境时刻WACR反射率廓线

Fig. 8 (a) Reflectivity and (b) reflectivity profile at from WACR on 23 Oct 2008 at the satellite passing time

分别距 WACR 站点为 14.5 和 17.0 km, 且此时 IASI 瞬时视场内的有效云量均低于 10%, 故在此情况下, IASI 视场内有可能为晴空。

4 结论

通过对 2008 年 10 月 15 日~12 月 15 日期间 IASI 仪器对安徽寿县的云参数 (云顶高) 的观测资料和 WACR 相同时间段对寿县的观测资料进行对比分析, 得出如下结论:

(1) IASI 和 WACR 共同观测有云为 43 个时次, 无云为 9 个时次。对于观测有云情况, IASI 反演云顶高结果明显低于 WACR, 其中单层云时, IASI 反演云顶高平均较云雷达低 1.73 km, 二者相关系数与标准差分别为 0.8312 和 1.8423 km; 两层云时, IASI 反演云顶高大都接近较厚的云层, 且当两层云都较薄时, IASI 反演云顶高更接近较低的云层; 三层云时, IASI 反演云顶高大都在最上层云和最下层云之间, 并且接近较厚的云层。这主要是由 IASI 的观测方式、反演算法及处理数据的精度所决定的。

(2) 一般情况下, IASI 反演云高的结果受到视场中云量、云层厚度和云层中粒子浓度大小及粒子尺寸的影响: 视场中云量越大, 云层越厚, 云层中粒子浓度越高, IASI 反演云高的结果越接近真实值; 视场中云量越少, 云层越薄越破碎, 云层中粒子浓度越低, IASI 反演云高的结果偏差较大, 且此时容易受到近地雾或霾的影响。

综上所述, 由于在云参数观测方面卫星遥感和地基观测都存在优势和局限性, 故为了准确获得云信息, 综合二者的优势进行联合观测是十分必要的。另外, 为了使 IASI 云产品能更好地服务于实时气象业务和气象科学研究, 需要继续开展将 IASI 产品与由其他卫星或地基仪器观测反演得到的云产品进行对比验证、反演算法的优化等深入细致的工作。

致谢 作者在此对美国能源部大气辐射计划 (ARM) 和欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT) 数据的公开表示感谢。

参考文献 (References)

- August T, KlaesD, Schlüssel P, et al. 2012. IASI on METOP-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 113: 1340–1371.
- 曹芸, 何永健, 邱新法, 等. 2012. 基于地面观测资料的 MODIS 云量产
品订正 [J]. 遥感学报, 16 (2): 325–342. Cao Yun, He Yongjian, Qiu Xinfia, et al. 2012. Correction methods of MODIS cloud product based on ground observation data [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 16 (2): 325–342.
- 陈延婷, 王连仲, 窦贤康. 2008. TRMM 卫星与机载雷达在降雨反演中的数据对比个例研究 [J]. 应用气象学报, 19 (4): 454–462. Chen Yandi, Wang Lianzhong, Dou Xiankang. 2008. A case comparison between the TRMM data and airborne radar data in rainfall retrieval [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (4): 454–462.
- Dong X Q, Minnis P, Xi B K, et al. 2008. Comparison of CERES-MODIS stratus cloud properties with ground-based measurements at the DOE ARM Southern Great Plains site [J]. J. Geophys. Res., 113: D03204, doi:10.1029/2007JD008438.
- EUMETSAT Technical Report. 2009. CO₂ Slicing Algorithm for the IASI L2 Product Processing Facility [R]. EUM/MET/REP/07/0305.
- Kim S W, Chung E S, Yoon S C, et al. 2011. Intercomparisons of cloud-top and cloud-base heights from ground-based Lidar, CloudSat and CALIPSO measurements [J]. Int. J. Remote Sen., 32 (4): 1179–1197.
- Lavanant L. 2002. Cloud processing in IASI context [C]// Proceedings of the 12th International TOVS Study Conference. Lorne, Australia.
- Lavanant L, Fourrié N, Gambacorta A, et al. 2011. Comparison of cloud products within IASI footprints for the assimilation of cloudy radiances [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137: 1988–2003.
- 李俊, 曾庆存. 1997a. 有云时大气红外遥感及其反演问题 I. 理论研究 [J]. 大气科学, 21 (3): 341–347. Li Jun, Zeng Qingcun. 1997a. Study of infrared remote sensing of the cloudy atmosphere and the inversion Problem. Part I: Theoretical study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (3): 341–347.
- 李俊, 曾庆存. 1997b. 有云时大气红外遥感及其反演问题 II. 反演实验研究 [J]. 大气科学, 21 (4): 396–400. Li Jun, Zeng Qingcun. 1997b. Study of infrared remote sensing of cloudy atmosphere and the inversion Problem. Part II: Experimental study [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 21 (4): 396–400.
- 刘辉, 董超华, 张文健. 2006. 国际卫星红外大气探测器发展新特点 [J]. 气象科技, 34 (5): 600–605. Liu Hui, Dong Chaohua, Zhang Wenjian. 2006. New characteristics of satellite infrared atmospheric detector development over the world [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 34 (5): 600–605.
- 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 2011. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述 [J]. 遥感技术与应用, 26 (2): 247–254. Liu Yi, Lü Daren, Chen Hongbin, et al. 2011. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ [J]. Remote Sensing Technology and Application (in Chinese), 26 (2): 247–254.
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾 [J]. 大气科学, 27 (4): 553–565. Lü Daren, Wang Pucai, Qiu Jinhan, et al. 2003. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 553–565.
- Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. 1983. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22 (3): 377–384.
- Ohring G, Adler S. 1978. Some experiments with a zonally averaged climate

- model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35 (2): 186–205.
- 彭亮. 2011. ARM 云雷达及其他相关仪器观测资料综合分析研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Peng Liang. 2011. Comprehensive analysis of data observed by ARM cloud radar and relevant instruments [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Graduate University, Chinese Academy of Sciences.
- 邱金桓, 陈洪滨, 王普才, 等. 2005. 大气遥感研究展望[J]. 大气科学, 29 (1): 132–136. Qiu Jinhuan, Chen Hongbin, Wang Pucai, et al. 2005. A prospect on future atmospheric remote sensing [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (1): 132–136.
- Smith W L, Frey R. 1990. On cloud altitude determinations from high resolution interferometer sounder (HIS) observations [J]. *J. Appl. Meteor.*, 29 (7): 658–662.
- 张磊, 董超华, 张文健, 等. 2008. METOP 星载干涉式超高光谱分辨率红外大气探测仪 (IASI) 及其产品 [J]. 气象科技, 36 (5): 639–642. Zhang Lei, Dong Chaohua, Zhang Wenjian, et al. 2008. METOP on Board super high spectrum resolution infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 36 (5): 639–642.
- 章文星, 吕达仁. 2012. 地基热红外云高观测与云雷达及激光云高仪的相互对比 [J]. 大气科学, 36 (4): 657–672. Zhang Wenxing, Lü Daren. 2012. Comparison of cloud base heights by ground based sky IR brightness temperature measurements with cloud radar and ceilometer in Shouxian [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (4): 657–672.
- 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 2009. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望 [J]. 地球科学进展, 24 (4): 383–391. Zhong Lingzhi, Liu Liping, Ge Runsheng. 2009. Characteristics about the millimeter-wavelength radar and its status and prospect in and abroad [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 24 (4): 383–391.
- 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 Yuquan, 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.