

文章编号: 1000-5641(2018)03-0146-11

高光谱红外探测仪温湿度廓线在华东地区的 真实性检验

顾雅茹^{1,2}, 刘延安^{1,2}, 刘朝顺^{1,2}, 李正龙³

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241;

3. 威斯康星大学麦迪逊分校 空间科学与工程中心, 威斯康星 麦迪逊 53706, 美国)

摘要: 卫星高光谱红外资料可提供高时空分辨率的温湿度廓线信息, 是数值天气预报模式重要的数据源. 高光谱红外大气探测仪的温湿度产品资料的质量控制和观测误差描述是同化应用效果的关键. 探空资料是对温湿度垂直信息的直接测量, 具有较高精度, 而汛期加密探空观测(北京时14:00)具有与AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)卫星过境时间相匹配的优势, 可以较好地验证 AIRS 反演的廓线产品精度. 研究选取中国华东地区, 利用 2015 年夏季的加密探空资料与 AIRS 反演产品进行时空匹配处理. 研究结果表明, AIRS 反演的温度廓线精度较高, 整体 RMSE 分布区间为 $[1.02\text{ }^{\circ}\text{C}, 2.49\text{ }^{\circ}\text{C}]$; 而湿度廓线整体上呈现低层偏干高层偏湿现象, RMSE 分布区间为 $[12.91\%, 23.43\%]$; AIRS 和 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit)联合反演产品中, 随着云覆盖范围的增加, 温湿度廓线反演精度逐渐降低, 但整体上依然保证一定精度, 其为将来开展有云覆盖条件下的卫星资料同化应用提供依据.

关键词: AIRS; 温湿度廓线; 探空资料; 华东地区; 云覆盖

中图分类号: P414.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.03.016

Validation of temperature and relative humidity profiles with satellite hyperspectral infrared sounder over East China

GU Ya-ru^{1,2}, LIU Yan-An^{1,2}, LIU Chao-shun^{1,2}, LI Zheng-long³

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education),
East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. School of Geographic Sciences, East China Normal University,
Shanghai 200241, China;

3. Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison,
Madison WI 53706, USA)

Abstract: Satellite hyperspectral infrared data provide high temporal and spatial resolution information on atmospheric temperature and humidity profiles. They are

收稿日期: 2017-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(41601469); 上海市科委科研项目(15dz1207805); 上海市气象科技
联合中心合作基金(LHZX201601)

第一作者: 顾雅茹, 硕士研究生, 主要从事卫星资料质量控制和同化研究.

E-mail: guyaru1993@163.com.

通信作者: 刘延安, 博士, 主要从事卫星资料同化及应用研究. E-mail: yaliu@geo.ecnu.edu.cn.

important data source for numerical weather prediction models. Quality control of the data and correct characterization of observation errors are key to the successful application of assimilation. The radiosonde data is a direct measurement with high precision, which can be used to validate satellite retrievals. During the flood season of East China, high density radiosonde observations provide a valuable opportunity to examine the quality and quantify the error of Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) retrieved products, both of which have a similar observation time at 14:00 Beijing time. This study focuses on East China during the summer of 2015. Results show that the AIRS retrieved temperature profiles are in good agreement with the radiosonde data, whilst the AIRS retrieved relative humidity profiles show the phenomenon of wetter in higher layers and drier in lower layers. The RMSE difference of temperature and relative humidity range from 1.02 °C to 2.49 °C and from 12.91% to 23.43%, respectively. Under the AIRS and AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) joint inversion products, the accuracy of retrieved temperature and humidity profiles are gradually degraded with the increasing number of total cloud fraction, but the results maintain a certain accuracy as a whole. This study provides a basis for the satellite data assimilation application under cloud cover.

Keywords: AIRS; temperature and humidity profiles; radiosonde data; East China; total cloud fraction

0 引 言

卫星高光谱红外资料可提供高空间分辨率和高精度的温湿度垂直信息, 是对探空资料在时间和空间范围上的重要补充, 其直接或间接同化应用有助于改进数值天气预报水平. 根据全球多个数值天气预报中心的报告, 就单个仪器对模式贡献率而言, 高光谱红外探测仪对同化预报效果影响最大^[1]. 然而, 在有云和降水的条件下, 反演精度会受到很大影响. 因此, 为更好地利用卫星数据, 精度验证尤为重要. 大气探空实测数据(RAOB)是评价反演算法精确性的重要依据之一.

目前, 在轨工作的高光谱红外探测仪有 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)、IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、CrIS(Cross-track Infrared Sounder)以及我国刚发射的 FY-4A, 后者首次实现在静止卫星上搭载干涉式大气垂直探测仪(GIIRS)^[2]. AIRS 气候尺度的空间分布是 IASI 的两倍, 拥有光栅光谱仪^[3], AIRS 于 2002 年 5 月在 NASA 的 Aqua 卫星上装载发射. Aqua 卫星从 705 km 高度与太阳同步轨道运行, 每天约在 1:30 和 13:30(北京时间, 下同)过境中国, 与加密大气探空实测数据匹配良好, AIRS 结合微波探测器(Advanced Microwave Sounding Unit)和湿度探测器(Humidity Sounder for Brazil)运行. AIRS 共有 2 378 个光谱通道, 星下点分辨率 13.5 km, 可以提供高垂直分辨率和高精度的大气温湿度三维结构.

根据 Nalli 等^[4]研究, 气溶胶含量可能会引起扰动, 影响红外光谱辐射, 对 AIRS 反演产生不利的影响. 前人也对 AIRS 反演的温湿度廓线的精度进行过很多验证. Divakarla 等^[5]发现, AIRS 反演的温度和水汽廓线与探空观测值相关性很好. Tobin 等^[6]使用从能量大气辐射观测部门(ARM)提供的最佳预测值后发现, 晴空条件下, AIRS 反演的温度和水汽廓线在热带海洋上均表现出很好的精确度. 高文华等^[7]把 AIRS 反演的温湿度廓线产品与国家气象中心数值预报产品 T213 进行比较, 发现温度差异一般在 2 K 以内, 湿度差异一般在 25%以内,

并将订正后的温湿度产品放入中尺度模式中,改进了模式初始场.朱文刚等^[8]将观测资料分别用晴空视场检测方案和晴空通道检测方案进行云检测,增加了资料的使用度.

但是,之前关于 AIRS 温湿度廓线的验证大多数在全球范围或均一下垫面的海洋上空,很少选取下垫面复杂的局地区间.华东地区云量高,气溶胶含量高,为了弄清廓线产品在不同区域的精度与全球的差异,分析复杂的下垫面是否会对 AIRS 反演产生影响,研究 AIRS 的温湿度廓线在华东区的精度很有必要.目前对于有云区域,利用云去除技术得到等效晴空辐射,实现了大量有云覆盖区域资料的反演应用.因此,研究华东地区 AIRS 温湿度廓线的精度,有利于进一步研究有云情况下同化 AIRS 廓线资料对分析场和预报场的影响.

本文采用下午 14 时的加密探空实测数据,与 AIRS 过境时间更接近,可以更准确地验证 AIRS 在华东区的精度.研究选取华东地区的 17 个探空站点,首先进行了下午 14 时加密探空资料和高光谱红外资料 AIRS 的一致性匹配,然后以华东地区单天为例,进行不同站点的温湿度廓线比较;接着将 AIRS 反演的三个月的大气温湿度廓线的数据与探空数据进行对比,通过散点图和每个层次之间的 Bias 和 RMSE 来验证 AIRS 产品(V6.0)的整体精度;最后,根据不同云覆盖信息对温湿度廓线的偏差进行比较,以分析不同云量对温湿度廓线反演精度的影响.

1 资料和方法

1.1 加密探空资料

研究选取华东地区为目标区域,该区域人口经济密度高,空气污染严重,台风、暴雨等自然灾害影响突出.如图 1 所示,研究区覆盖范围位于 $23^{\circ}\text{N}-37^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}-122^{\circ}\text{E}$,共涵盖上海、江苏、浙江、山东、福建、安徽、江西的 17 个探空站点.相比于卫星观测的反演计

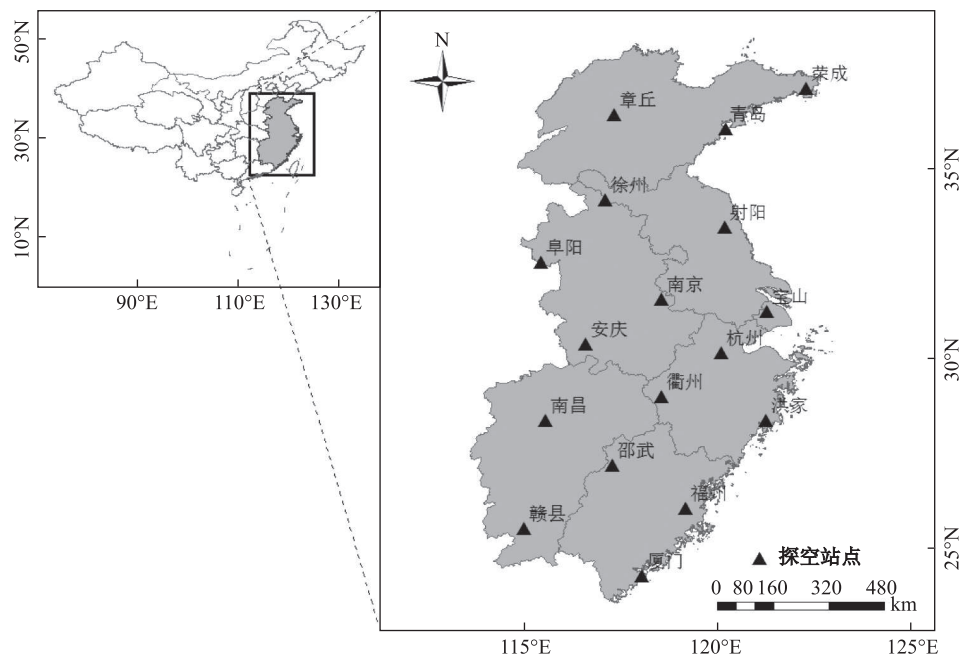


图1 华东地区探空站点分布图

Fig. 1 Distribution of radiosonde stations in East China

算, 探空资料为直接观测, 结果可靠, 精度较高, 可直接用于卫星大气廓线产品精度检验和质量控制过程。

由于仅在夏季汛期有加密探空数据, 故本研究选取 2015 年夏季(6—8 月)每日 14 时的探空观测数据, 该数据与 Aqua 卫星本地过境时间几乎匹配。如图2所示, 只有阜阳、福州、射阳、宝山、衢州这 5 个站点有数据的天数在 80 d 以上。由于厦门、徐州、赣县、章丘、荣成、青岛这 6 个站点无探空加密数据, 所以文章在评估温湿度反演廓线精度时, 并未考虑这些站点资料。

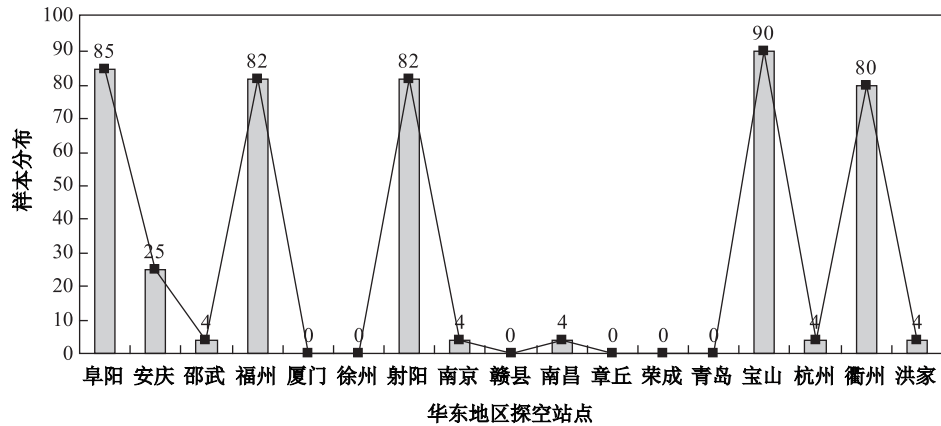


图2 华东地区 17 个探空站点 2015 年 6—8 月期间 14 时观测样本数分布

Fig. 2 The distribution of the number of observed samples at 14 o'clock in the period from June to August 2015 at 17 Radiosonde observing stations in East China

1.2 高光谱红外大气探测资料

目前, AIRS 反演的温湿度廓线产品种类较多, 但业务应用主要以 AIRS 和 AMSU 融合反演产品为主, 即本研究使用的 AIRX2RET 产品(下文简称为 AIRS 产品), 分辨率为 50 km, 融合 AMSU 资料后增加了大量有云覆盖区域资料的反演。Aqua 卫星每天过境两次, 考虑到加密探空观测资料的时间为下午 14:00, 研究选取白天过境资料。研究选取最新的 V6 版本产品, 根据数据使用说明^[9], 在对 V6 产品做质量控制时, 使用 0 表示 PBest 数据, 意为该层的廓线到大气层顶数据质量最好; 用 1 表示 PGood 数据, 意为廓线在 PBest 层数之下有较好的质量; 不能使用的数据用 2 表示。本文选用质量标志为 PBest 和 PGood 的数据。

1.3 资料处理与对比方法

为有效检验 AIRS 温湿度廓线产品精度, 需将加密探空资料的时间、空间位置、垂直层和湿度单位与 AIRS 进行匹配一致性处理。

AIRS 过境华东地区时间一般是从 12:35 至 15:35, 与探空资料 14:00 观测数据最大时间差为 ± 1.5 h。该比较在时间匹配上优于 Divakarla 等^[5]开展的 AIRS 温湿度廓线全球精度检验 ± 3 h 时间窗口。

探空观测的温湿度廓线资料一般为常规观测气压层(标准层), 从地面到 100 hPa, 而 AIRS 产品温度廓线为 28 层, 从 0.1 hPa—1 100 hPa, 湿度廓线为 14 层。为确保两者在垂直层进行准确比较, 温度选取共有的 1 000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa 和 100 hPa 共 12 层, 湿度选取 1 000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa 和 200

hPa 共 10 层作比较分析. 同时, 在空间位置上, 根据探空站点经纬度, 对 AIRS 资料采用最近点匹配方法, 研究中没有考虑探空气球在高空的位置漂移影响.

2 精度检验和分析

本文首先以 2015 年 7 月 28 日为示例, 详细分析比较了 AIRS 反演的温湿度廓线与探空资料的差异. 当日共有 5 个站有探空数据, 分别为阜阳、衢州、射阳、宝山和福州站. 如图 3 所示, 将探空站点位置与 MODIS(其与 AIRS 共同搭载于 Aqua 卫星)真彩色图像进行叠加显示, 云图分布清晰可辨, 每个站点云覆盖信息有所不同, 可客观判断天气条件对 AIRS 温湿度廓线反演精度的影响.

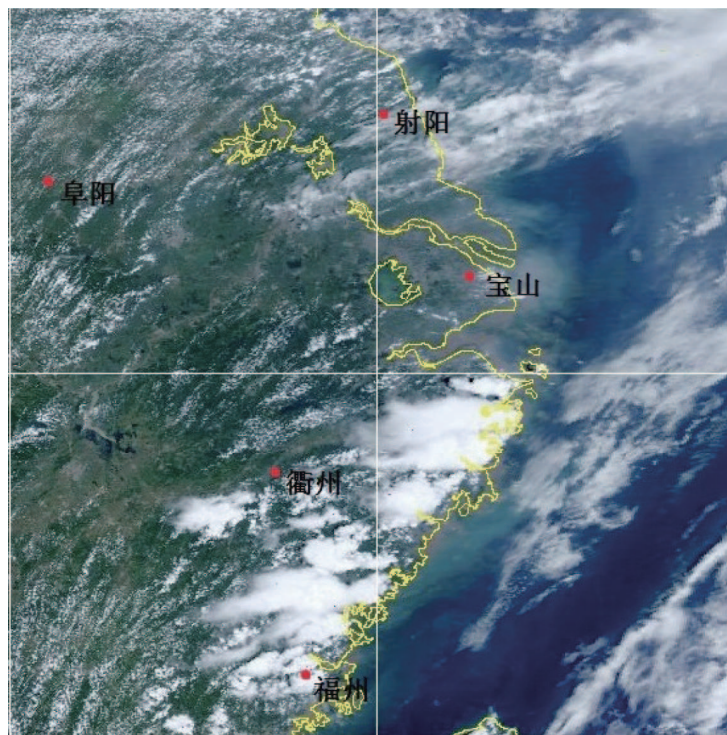
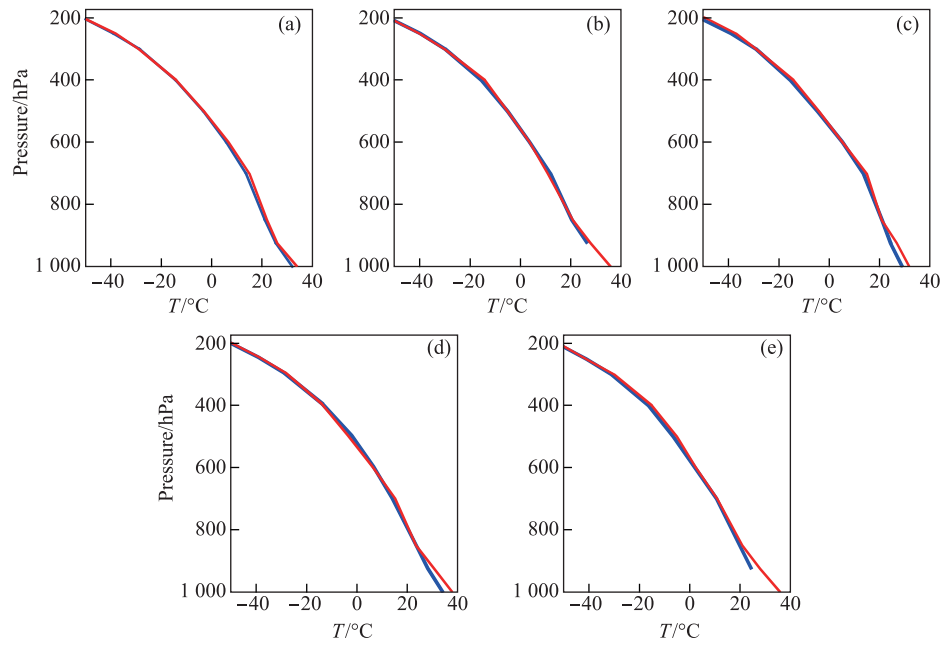


图3 2015 年 7 月 28 日探空站点与 MODIS 真彩色图像叠加显示图

Fig. 3 Radiosonde stations and MODIS true color image superposition on 28 July 2015

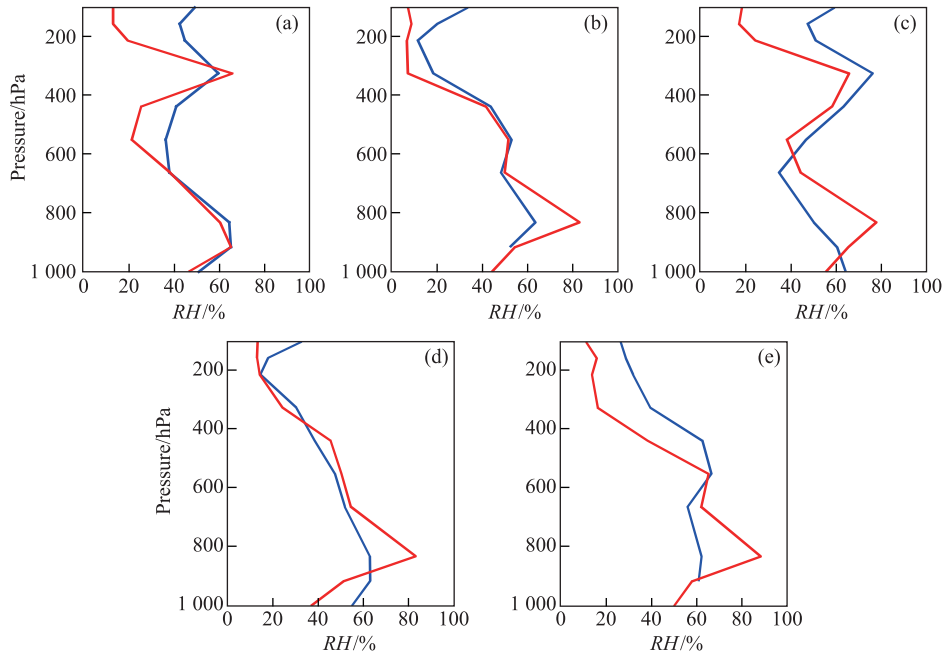
如图 4 所示, (a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别表示阜阳、衢州、射阳、宝山、福州站点, 其中, 蓝色线是 AIRS 温度廓线数据, 红色线是探空观测. 从图中可以看出, 在对流层高层位置 AIRS 温度廓线与探空数据差异很小, 基本一致; 而在对流层中层以下存在 2°C 以内的误差, AIRS 温度廓线表现为偏冷; 总体来说, AIRS 温度反演产品具有较高精度, 该结论与 Wu^[10]研究结果一致. 图 5 为两者湿度廓线图, 与探空数据相比, 平均而言, AIRS 湿度廓线在对流层中低层偏干, 而在中高层 AIRS 表现偏湿, 可能是探空数据在对流层中高层存在相对湿度观测偏干的现象^[11]; AIRS 湿度廓线在垂直变化上比探空资料更趋平稳, 转折性信息体现不足; 同时发现, 探空资料在 925 hPa 相对湿度达到 80%时, 两者存在约 20%的偏差, AIRS 反演湿度明显偏干. 与 Wu^[10]得出的结论一致, AIRS 反演的相对湿度在 700 hPa 和 900 hPa 之间表现为偏干层, 除了阜阳站点以外, 其余四个站点的逆温层并未反演出. 再结合图 3 的



注: (a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别是阜阳、衢州、射阳、宝山、福州站点;
其中, 蓝色实线表示AIRS, 红色实线表示探空观测

图4 2015年7月28日探空站点和AIRS数据温度廓线比较图

Fig. 4 Comparison of temperature profiles between radiosonde stations (red) and AIRS retrievals (blue) on 28 July 2015



注: (a)、(b)、(c)、(d)、(e)分别是阜阳、衢州、射阳、宝山、福州站点;
其中, 蓝色实线表示AIRS, 红色实线表示探空观测

图5 2015年7月28日探空站点和AIRS数据湿度廓线比较图

Fig. 5 Comparison of relative humidity profiles between radiosonde stations (red) and AIRS retrievals (blue) on 28 July 2015

天气形势分析,发现衢州和福州站点的温度、湿度在近地层数据缺失,可能是由于大量云团覆盖导致近地层反演精度没有达到质量控制要求;相比于其他站点,阜阳和射阳站在 400 hPa 高度上相对湿度有明显增加,对照云图分析可能受高空卷云影响,AIRS 能较好地反演其增湿特征.

基于 2015 年 6—8 月 AIRS 各个层次的温度廓线与探空观测的统计分析发现(见图 6),两者温度廓线比较一致,相关系数超过 0.99, RMSE 约为 1.4 °C,这个结果与 Pu 等^[12]的研究结果一致.而观察图 7 可以发现, AIRS 反演的大气湿度廓线与探空观测差异较大,离散度也很大, RMSE 达到了 15.44%, AIRS 反演的大气湿度廓线偏湿.这与 Pu 等^[12]相比有些不同,可能是因为 Pu 等^[12]的研究以海面的热带气旋为依据,研究区域在海上,而本文基于华东地区,复杂的下垫面潜在增加了偏差. Chahine 等^[13]在比较了 AIRS 全球降水水汽廓线和探空数据后,也得到了经过云处理后洋面上数据的 RMSE 大约比陆地云处理后的数据小 10% 左右的结论.

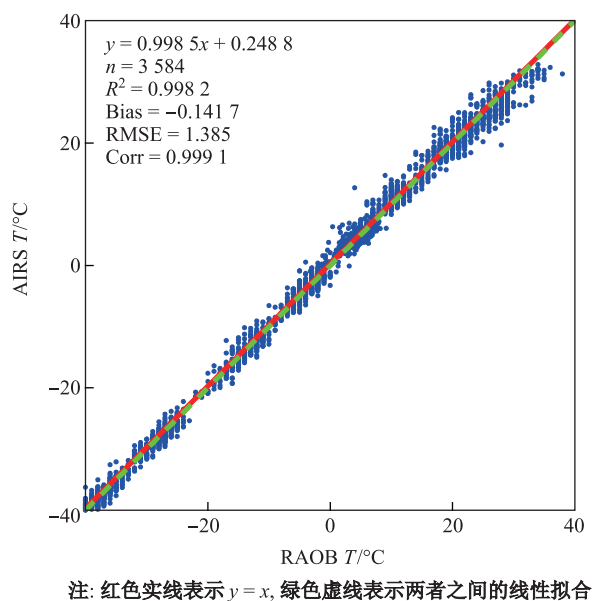
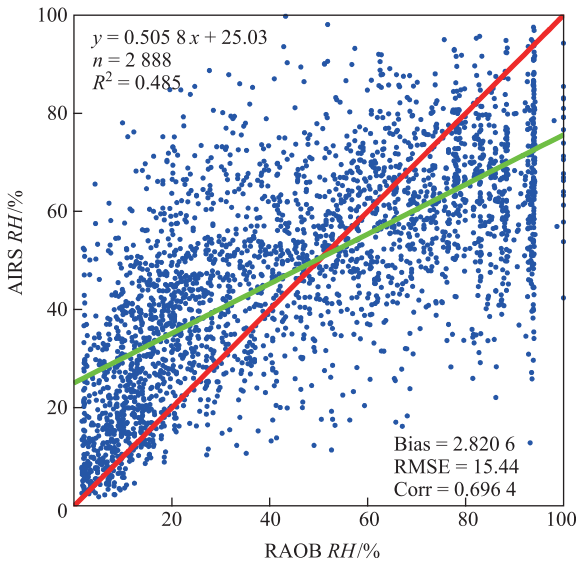


图 6 AIRS 大气温度廓线和与之匹配的探空观测散点图

Fig. 6 Temperature scatterplot of AIRS retrievals and radiosonde stations

为了更详细地比较 AIRS 与探空实测的差异,表 1 列出了两者在每一层数据的样本数,以及 Bias 和 RMSE. 根据表 1 可以发现, AIRS 温度廓线的匹配性较好. 所有层次的 Bias 范围在 $[-0.88\text{ }^{\circ}\text{C}, 0.51\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 之间,无明显变化规律,数据离散度很小,并且温度廓线的 RMSE 均维持在 $[1.02\text{ }^{\circ}\text{C}, 2.49\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 之间. RMSE 最大值 $2.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 出现在 1 000 hPa,主要可能由于近地面层温度变化剧烈,地表参数也不确定所致^[14]. 除 1 000 hPa 外,其余 11 个层次的 RMSE 平均值为 $1.33\text{ }^{\circ}\text{C}$. 在 700 hPa 处,温度廓线的卫星反演值与探空值相比, RMSE 大于 600 hPa 和 850 hPa 上下两个特性层,这与 Divakarla 等^[5]发现的现象一致. 和温度廓线相比, AIRS 与探空数据的相对湿度廓线在所有层中均存在很大差异. 其中,除了 200 hPa 和 925 hPa 以及 1 000 hPa 的 RMSE 在 20% 以内,其余层次的 RMSE 都分布在 20% 以上. 相对湿度的 Bias 在 600 hPa 及以上均表现为正值, 600 hPa 以下表现为负值,说明 AIRS 的相对湿度在对流

层中高层偏大, 在对流层中低层偏小. 这里要注意的是, 1 000 hPa 高度层 RMSE 最小, 这也与 Divakarla 等^[5]比较 AIRS 和探空数据得到的结论匹配. 相对湿度的 RMSE 范围在[12.91%, 23.43%]之间, 维持在25%以内.



注: 红色实线表示 $y = x$, 绿色实线表示两者之间的线性拟合

图 7 AIRS 大气湿度廓线和与之匹配的探空观测散点图

Fig. 7 Relative humidity scatterplot of AIRS retrievals and radiosonde stations

表 1 2015 年 6—8 月 AIRS 和探空数据的温湿度廓线精度比较

Tab. 1 Temperature and relative humidity differences between AIRS retrievals and radiosonde observations from June to August 2015

层数 /(hPa)	温度 Bias/(°C)	温度 RMSE/(°C)	温度 样本数	相对湿度 Bias/%	相对湿度 RMSE/%	相对湿度 样本数
100	0.23	1.44	347	/	/	/
150	-0.88	1.42	348	/	/	/
200	-0.07	1.02	344	10.34	18.26	344
250	0.06	1.17	336	12.90	21.90	336
300	-0.20	1.05	334	14.05	23.22	334
400	-0.21	1.19	320	7.31	21.28	320
500	-0.06	1.24	309	3.79	22.52	309
600	0.17	1.25	298	1.44	22.77	298
700	0.51	1.50	289	-7.91	23.43	289
850	-0.26	1.39	265	-12.13	23.24	265
925	-0.57	1.93	265	-10.36	18.80	265
1 000	-0.77	2.49	129	-1.03	12.91	128

根据上文研究结果, 本文对 AIRS 温湿度廓线在晴空和不同云覆盖条件下开展具体的精度检验分析. 首先, 将云覆盖情况分为四类. 把晴空定义为云覆盖(total cloud fraction)小于 10%, 因为在 50 km×50 km 范围内保证绝对晴空, 几乎没有样本可以使用, 而且对于10%以内云覆盖对反演精度影响有限^[15]. 少云定义有效云覆盖为 10%~40%, 中云定义为 40%~70%, 多云定义为 70%~95%(业务中对于云覆盖大于 95% 的情况均不反演). 然后进行精度比较分析. 对四种不

同云覆盖分类的 AIRS 和探空匹配温度样本占比进行统计, 分别为 7.5%, 22%, 29% 和 41.5%, 对应的相对湿度样本占比与温度数据基本一致. 从图 8 温湿度廓线 Bias 分布可以看出, 对于不同云覆盖类型下, 温度廓线偏差并没有规律性差异, 而湿度廓线在中低层明显存在较大的偏差, 即 AIRS 湿度反演偏干, 并且随着云覆盖比例的增加而偏差增大. 从图 9 的 RMSE 统计结果可以看

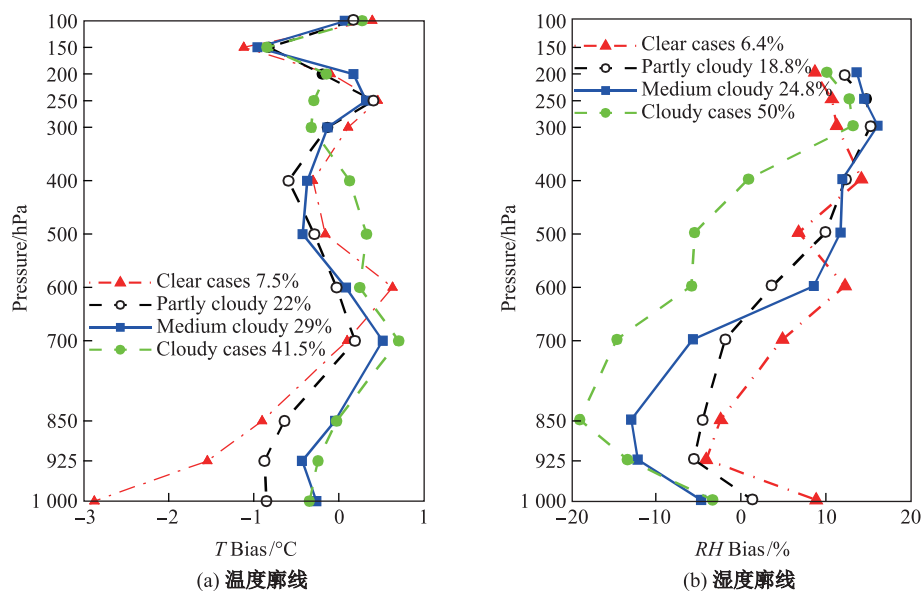


图 8 四种云覆盖分类情况下的温湿度 Bias 分布图

Fig. 8 Distribution of bias of (a) temperature and (b) relative humidity profiles between radiosonde observations and AIRS retrievals under different total cloud fractions

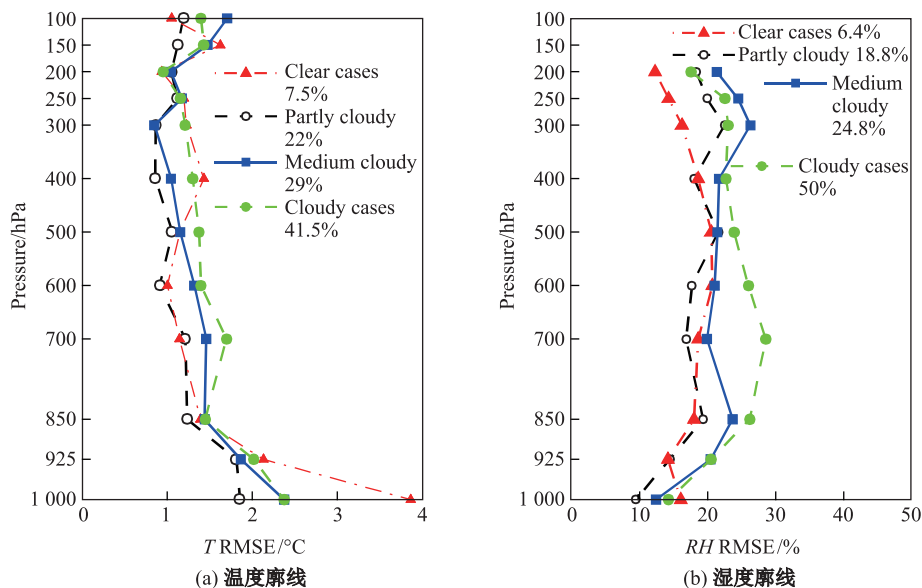


图 9 四种不同云覆盖分类情况下的温湿度 RMSE 分布图

Fig. 9 Distribution of RMSE of (a) temperature and (b) relative humidity profiles between radiosonde observations and AIRS retrievals under different total cloud fractions

出,相比于其他高度,近地层的温度 RMSE 较大,而相对湿度较小.对于不同云覆盖情况下,除了晴空廓线,其他三种类型的温度和湿度 RMSE 基本是随着云覆盖范围的增加而增大.说明云覆盖范围在一定程度上会降低温湿度廓线的反演精度,尤其是在多云情况下.从 Bias 和 RMSE 都可以看出,对湿度廓线反演精度影响明显,这可能是因为反演中缺乏对云形成凝结放热过程的准确描述.对于统计结果中,晴空区反演精度表现较差可能因为样本数有限,为 16 个,结果缺乏代表性和稳定性.而且 1 000 hPa 高度上有 15 个为 PGood,直接导致统计结果误差较大.

3 结果和讨论

本文通过选取 2015 年夏季华东地区与 AIRS 温湿度廓线资料相匹配的加密探空资料,检验 AIRS 温湿度廓线产品整体精度和不同云覆盖情况下的反演精度差异,得到了如下结论.

(1) AIRS 温度廓线反演产品整体精度较高,每个层次的 RMSE 均分布在 $[1.02\text{ }^{\circ}\text{C}, 2.49\text{ }^{\circ}\text{C}]$ 之间;而湿度廓线与探空观测存在较大差别,整体上呈现低层偏干高层偏湿现象, RMSE 分布区间为 $[12.91\%, 23.43\%]$.

(2) 基于 AMSU 可穿透云层的特性优势, AIRS 与 AMSU 融合可实现更大云覆盖范围内的资料反演;随着云覆盖范围增加,温湿度廓线反演精度逐渐降低,但整体上即使对于中多云情况下,其依然保证了一定反演精度.

需要说明的是,由于探空资料是基于点观测,而 AIRS 反演产品是 $50\text{ km}\times 50\text{ km}$ 的面域代表,两者之间直接比较,可能会因代表性误差产生误差较大的个例,将来还需结合更高分辨率的 MODIS 云产品进行深入细化比较分析.同时,以后的研究中还应进一步分析不同月份反演精度差异,定量描述反演精度时间变化特征.本文不仅为 AIRS 反演廓线资料同化应用奠定了质量控制基础,同时为开展我国自主研发的高光谱红外探测仪资料应用研究提供科学参考.

致谢 感谢上海市气象局气象环境研究所崔林丽博士为本文研究提供加密探空资料.

[参 考 文 献]

- [1] 漆成莉,顾明剑,胡秀清,等.风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用[J].气象科技进展,2016,6(1): 88-93.
- [2] 刘延安.高光谱红外辐射资料在区域模式中的直接同化及应用研究[D].上海:华东师范大学,2015.
- [3] SMITH N, SMITH W L, WEISZ E, et al. AIRS, IASI, and CrIS retrieval records at climate scales: An investigation into the propagation of systematic uncertainty[J]. International Journal of Mathematical Education in Science & Technology, 2015, 39(1): 23-33.
- [4] NALLI N R, STOWE L L. Aerosol correction for remotely sensed sea surface temperature from the National Oceanic and Atmospheric Administration advanced very high resolution radiometer[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2002, 107(C10): 1-18.
- [5] DIVAKARLA M G, BARNET C D, GOLDBERG M D. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D9): 9-15.
- [6] TOBIN D C, REVERCOMB H E, KNUTESON R O. Atmospheric Radiation Measurements site atmospheric state best estimates from Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrieval validation[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2006, 111(D9): 831-846.
- [7] 高文华,赵凤生,盖长松.大气红外探测器(AIRS)温、湿度反演产品的有效性检验及在数值模式中的应用研究[J].气象学报,2006,64(3): 271-280.
- [8] 朱文刚,李刚,张华,等.高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究[J].气象,2013,39(5): 633-644.
- [9] KAHN B H, IRION F W, DANG V T, et al. The atmospheric infrared sounder version 6 cloud products[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2013, 13(6): 14477-14543.
- [10] WU L. Comparison of atmospheric infrared sounder temperature and relative humidity profiles with NASA African Monsoon Multidisciplinary Analyses (NAMMA) dropsonde observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D19): 5577-5594.

- [11] SUN B, REALE A, SEIDEL D J, et al. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to 5quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D23): 6696-6705.
- [12] PU Z, ZHANG L. Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and moisture profiles over tropical oceans and their impact on numerical simulations of tropical cyclones[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D24): 9-12.
- [13] CHAHINE M T, PAGANO T S, AUMANN H H, et al. AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases[J]. Bulletin American Meteorological Society, 2006, 87(7): 911-926.
- [14] 刘辉, 董超华, 张文建, 等. AIRS 晴空大气温度廓线反演试验[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 513-519.
- [15] SUSSKIND J, BARNET C D, BLAISDELL J M. Accuracy of geophysical parameters derived from Atmospheric Infrared Sounder/Advanced Microwave Sounding Unit as a function of fractional cloud cover[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D9): 9-17.

(责任编辑: 李万会)

(上接第 108 页)

- [15] 王国胤, 于洪, 杨大春. 基于条件信息熵的决策表约简 [J]. 计算机学报, 2002, 25(7): 759-776.
- [16] 杨明. 决策表中基于条件信息熵的近似约简 [J]. 电子学报, 2007, 35(11): 2156-2160.
- [17] 张清华, 肖雨. 新的信息熵属性约简 [J]. 计算机科学与探索, 2013, 7(4): 359-367.
- [18] 潘瑞林, 李园沁, 张洪亮, 等. 基于 α 信息熵的模糊粗糙集属性约简方法 [J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 340-348.
- [19] 江峰, 王莎莎, 杜军威, 等. 基于近似决策熵的属性约简 [J]. 控制与决策, 2015, 30(1): 65-70.
- [20] QIAN Y H, LIANG J Y, PEDRYCZ W, et al. Positive approximation: An accelerator for attribute reduction in rough set theory [J]. Artificial Intelligence, 2010, 174(9): 597-618.
- [21] 蒋瑜, 刘胤田, 李超. 基于 Bucket Sort 的快速属性约简算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 207-212.

(责任编辑: 李 艺)

(上接第 135 页)

- [19] YANG X L, YANG J X, CHEN G, et al. Magneto-impedance effect in field and stress-annealed Fe-based nanocrystalline alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1997, 175(3): 285-289.
- [20] RODIONOVA V, KUDINOV N, ZHUKOV A, et al. Interaction of bistable glass-coated microwires in different positional relationship[J]. Physica B:Condensed Matter, 2012, 407(9): 1438-1441.
- [21] 何济洲, 缪贵玲. 两个磁偶极子间的相互作用[J]. 南昌大学学报, 1996, 18(3): 96-98.
- [22] 易建宏, 李丽娅, 彭元东. 微波场作用下非晶合金 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 的纳米晶化[J]. 材料研究学报, 2007, 21(6): 632-636.
- [23] 王宗麓, 杨燮龙, 宫峰飞, 等. 纵向驱动巨磁阻抗效应的相位特性[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2000(2): 49-53.
- [24] AMALOUA F, GIJS M A M. Giant magnetoimpedance in trilayer structures of patterned magnetic amorphous ribbons [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(9): 1654-1656.
- [25] 林宏, 袁望治, 赵振杰. FeCuNbSiB 多层膜的磁特性和巨磁阻抗效应[J]. 功能材料与器件学报, 2007, 13(6): 666-670.

(责任编辑: 李 艺)