

文章编号: 1672-8785(2019)09-0028-11

基于探空资料的上海台风季 GIIRS/FY-4A 卫星 温度廓线反演精度研究

黄艺伟¹ 刘 琼¹ 何 敏^{2*} 陈勇航^{1*}

赵兵科³ 夏卫祖⁴ 刘统强¹

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620;

2. 中山大学大气科学学院, 气候变化与自然灾害研究重点实验室,
南方海洋科学与工程广东

实验室(珠海), 广东珠海 519082;

3. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030;

4. 上海市宝山区气象局, 上海 201900)

摘 要: 利用上海宝山站 L 波段探空资料, 分析台风季无云、有云和全天空条件下不同质量控制以及台风登陆前后 24 h 内 FY-4A 干涉式大气垂直探测仪 (Geostationary Interferometric Infrared Sounder, GIIRS) 温度资料的反演精度。结果表明: (1) GIIRS 温度反演产品在无云条件下反演精度最高, 质量控制为 0 的数据均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 为 1.74 K, 表明该产品在对流层中上层具有一定可信度。(2) 云层降低了 GIIRS 温度反演的精度, 有云条件下质量控制为 0 的数据 RMSE 为 3.57 K, 超出了美国环境监测系统给出的标准误差范围。(3) 有云天空条件下, 当温度大于 230 K 时, GIIRS 反演温度均低于探空数据。(4) 台风“安比”、“云雀”登陆前 24 h 内, 在 500 hPa 高度至近地面附近和对流层顶, GIIRS 反演温度偏高; 台风“云雀”登陆后 24 h 内, GIIRS 在 800 hPa 高度至近地面附近反演温度偏低, 并且反演会产生大量无效值。

关键词: GIIRS/FY-4A; 探空资料; 温度廓线; 台风季

中图分类号: X4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.09.006

收稿日期: 2019-08-10

资助项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2018YFC1506305); 科技部国家重点研发计划项目 (2017YFA0603502); 国家自然科学基金面上项目 (41975029)

作者简介: 黄艺伟 (1995-), 女, 河北石家庄人, 在读硕士生, 主要从事大气环境与遥感研究。

E-mail: Lemonci123@163.com

*** 通讯作者:** 何敏, 博士后, 主要从事大气环境与遥感研究。E-mail: hemin23@mail.sysu.edu.cn

陈勇航, 教授, 博士生导师, 主要从事大气环境与遥感研究。E-mail: yonghangchen@126.com

Research on Inversion Precision of Temperature Profile of GIIRS/FY-4A Satellite in Shanghai Typhoon Season Based on Radiosonde Data

HUANG Yi-wei¹, LIU Qiong¹, HE Min^{2*}, CHEN Yong-hang^{1*},
ZHAO Bing-ke³, XIA Wei-zu⁴, LIU Tong-qiang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University,

Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster

Studies, Southern Marine Science and Engineering Guangdong

Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

3. Shanghai Typhoon Research Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;

4. Baoshan Meteorological Bureau, Shanghai 201900, China)

Abstract: Using the L-band sounding data from Shanghai Baoshan Station, the inversion of temperature data of GIIRS/FY-4A Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) with different quality control data was analyzed under clear sky, cloudy sky and all sky in typhoon season within 24 hours before and after typhoon landing. The results show that: (1) The inversion accuracy of GIIRS temperature is best under clear sky, and the data root mean squared error (RMSE) with quality control of 0 is 1.74 K, which indicates that the inversion product in the upper troposphere has a certain degree of credibility. (2) The cloud layer reduces the accuracy of GIIRS temperature inversion. The data RMSE with quality control of 0 is 3.57 K under cloudy sky, which exceeds the standard error range given by the US Environmental Monitoring System. (3) When the temperature is greater than 230 K under cloudy sky, the inversion temperature of GIIRS is lower than the sounding data detection temperature. (4) Within 24 hours before the landing of typhoon “Ampil” and “Jongdari”, at the tropopause layer and from the height of 500 hPa to the planetary boundary layer, GIIRS inversion temperature is higher; within 24 hours after the landing of typhoon “Jongdari”, from the height of 800 hPa to the planetary boundary layer, the inversion temperature of GIIRS is lower. The inversion will generate a large number of invalid values.

Key words: GIIRS/FY-4A; sounding data; temperature profile; typhoon season

0 引言

大气温度是大气热力学的重要参数之一。特定的温度结构有助于极端天气的孕育。台风作为极端天气之一, 主要影响大气对流层, 气旋运动会使大气层温度急剧变化。因此, 获取精准的大气温度特征对加深理解台风结构特征具有重要意义。

近年来, 国内外相继研发利用遥感技术来获取更加准确的大气廓线特征。搭载于极轨卫星 Aqua 上的 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder, AIRS) 是目前国际上先进的红外垂直探测仪之一, 可探测全球范围^[1-2]。其反演的大气温

度特征, 在沙漠、高原和海面^[1,3,4]等地与探空资料具有较高的一致性。AIRS 每天对同一地区只能探测两次^[3], 时间分辨率较低, 不能连续观测。我国静止卫星风云四号 A 星 (FY-4A) 搭载的 GIIRS, 分辨率高, 可大范围、高频次对大气和地表进行探测^[5], 为气象预报提供连续准确的遥感信息。

目前, 国内专家对 GIIRS/FY-4A 温度产品的反演精度已开展了一些研究^[6-9]。相关研究表明, 利用 GIIRS 和欧洲极轨卫星 Metop-A/IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI) 两种资料进行反演模拟试验, GIIRS

在大气低层反演温度的精度高于 IASI,而在高层与 IASI 存在较大误差,并且 FY-4A 在中国区域的温度反演精度最高^[6-7]。杨雨晗^[8]对比了 Suomi-NPP/CrIS 与 GIIRS 反演温度通道,发现二者对温度反演敏感的通道相似,其温度探测的最优波段位置与 CrIS 具有较好的一致性。可见,GIIRS 温度反演通道具有较高的准确性,但反演产品在不同大气层高度和不同区域的可靠性和精准度还存在不确定性,尤其是该产品在上海地区的反演精度验证研究尚缺乏。上海地处中国东部沿海地区,每年夏季易受到台风侵袭。因此,验证 GIIRS/FY-4A 卫星温度产品在上海地区的反演精度,能够为进一步改进卫星产品反演算法提供科学事实。

探空仪可直接探测大气的温度、湿度和风速等气象要素,是研究天气变化和检验数据模拟预报的宝贵资源^[10]。宋云帆等^[11]利用探空资料分析了 FY-2E 湿度产品在四川区域的适用性,表明 FY-2E 随高度增高可靠性增大。顾雅茹等^[12]利用夏季的探空资料对 AIRS 在华东地区进行温度反演廓线产品精度分析,研究表明 AIRS 温度反演的精度较高,二者相关系数为 0.9982。蔡兆男等^[13]则通过探空资料验证了全球臭氧监测试验(Global Ozone Monitoring Experiment, GOME)卫星在拉萨、西宁和北京三地的月平均臭氧结果与探空数据具有很高的相关性。可见,探空数据是分析卫星产品反演精度的常用资料。因此,本文利用上海宝山站常规的探空资料,分析 2018 年台风季(5 月~9 月)GIIRS/FY-4A 卫星温度数据在无云、有云和全天空情况下不同质量控制的产品反演精度;并选取 2 个登陆上海的台风个例,研究台风登陆前后 24 h 内温度廓线的反演精度,为提高 GIIRS/FY-4A 温度反演精度提供依据。

1 数据与方法

1.1 资料介绍

FY-4A 卫星于 2016 年 12 月 11 日发射升

空,其主要载荷之一——GIIRS 以迈克尔逊干涉分光方式探测不同谱段的红外辐射,从而获取大气温度、湿度的垂直分布,为数值天气预报提供基础资料。目前,GIIRS 的区域探测目标主要是以晴空为主^[14]。GIIRS 的空间分辨率为 $16\text{ km}\times 16\text{ km}$,时间分辨率为 60 min,光谱范围为长波 $700\sim 1130\text{ cm}^{-1}$ ($8.85\sim 14.29\text{ }\mu\text{m}$)、中波 $1650\sim 2250\text{ cm}^{-1}$ ($4.44\sim 6.06\text{ }\mu\text{m}$)^[15]。GIIRS 的工作模式主要为中国区、全圆盘、区域、太阳回避、定标和指向模式,可根据地面指令灵活安排^[16]。

每年的 5~9 月是台风影响我国东南沿海地区的主要时间,通常将该时间段定义为台风季。本研究选取上海宝山站 L 波段(1 型)自 2018 年 5 月 24 日至 2018 年 9 月 30 日的常规探空资料,此探空资料可以显示雷达方位和仰角值,具备在放球过程中查看温、压、湿曲线以及球坐标曲线的秒级数据能力。上海宝山站每日释放探空气球 2 次,分别在北京时间 7:15 和 19:15,气球固定释放点的地理经纬度坐标为(121.45°E , 31.4°N)。气球上升至爆炸的全过程大约历时 1.5 h,气球的漂移距离随季节变化有所不同。

根据中国台风网(<http://tcdata.typhoon.org.cn>)和上海台风研究所提供的台风数据,选取 2018 年登陆上海及其周边地区 24 h 前后的 2 个台风个例(表 1)为台风资料。

1.2 卫星资料处理与对比分析方法

本研究下载 FY-4A 卫星 GIIRS 载器上的中国区大气温湿度廓线(Atmosphere Vertical Profile, AVP)反演产品(<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx>),并根据相应的数据说明,读取经纬度信息(MW_Latitude、MW_Longitude)、气压层(Pressure)、温度(Atmospheric Temperature Profile of GIIRS, AT_Prof)、温度质量控制(Quality Flag of GIIRS Atmospheric Temperature profile, AT_Prof_QFlag)和云检测(Cloud Mask, CLM)相关数据。其中,质量控制 0 为“perfect”,质量

表 1 台风登陆信息及台风登陆前后 24 h 内探空数据与 GIIRS 数据时空匹配表^[17]

名称编号	登陆时间 (北京时间)	登陆地	登陆时强度	登陆前 24 h 时空 匹配 (北京时间)	登陆后 24 h 时空 匹配 (北京时间)
1810 安比	2018. 7. 22 12:30	上海	强热带风暴	2018. 7. 21 19:15~20:37	— —
1812 云雀	2018. 8. 3 10:30	浙江—上海	热带风暴	2018. 8. 2 19:15~20:30	2018. 8. 3 19:15~20:05

控制 1 为“good”, 质量控制 2 为“bad”, 质量控制 3 和 4 为“do not use”, 在质量控制时将质量控制为 3 和 4 的数据剔除, 不做讨论。

为了有效准确地进行探空资料和 GIIRS 的反演温度廓线对比, 需要将 GIIRS 的时间、空间位置、大气垂直气压层与探空资料进行一致匹配。本研究在时间范围匹配上采用与探空气球释放到爆炸同时段的 GIIRS 的探测数据。空间位置上, 根据上海宝山站所提供的 L 波段(1 型)数据处理软件, 计算、读取探空气球漂移轨迹。根据探空气球漂移的经纬度, 采用最邻近点匹配方法, 以探空气球漂移轨迹的中点和漂移最远点的距离为半径划圆, 以此作为 GIIRS 反演数据的筛选规则。由于本站点所提供的探空资料可探测到 1 hPa 的气象要素值, 故大气垂直气压层以 GIIRS 数据气压层为基准。由于探空气球很少能漂移到 10 hPa 以上的高度, 故选取高度 10~1100 hPa 进行研究。本实验对无云、有云和全天空条件下对质量控制为 0、1、2 的反演温度产品精度进行分析, 对台风登陆前后 24 h 内 GIIRS 反演温度廓线和探空数据进行对比。

为了更好地进行两种数据的对比, 采用平均偏差^[3](Mean Bias, MB)、RMSE^[3]进行更精确的说明, 公式为

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

式中, x_i 为探空数值, y_i 为反演数值, N 为

样本总数, i 为样本。

2 结果与讨论

2.1 不同云天条件下的 GIIRS 温度反演数据对比

2.1.1 不同云天条件下的样本统计和离群点百分比

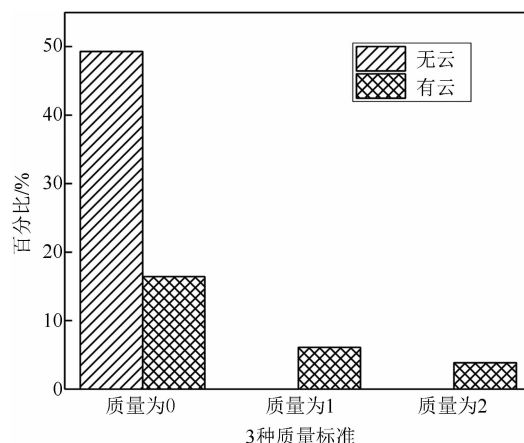


图 1 样本统计百分比图

经过探空数据与 GIIRS 时间匹配、空间匹配统计后发现, 在无云天空下只有质量控制为 0 的数据, 且这一比例高达 49.3%。但在有云天空下, 这一比例下降到 16% 左右, 并也出现了质量控制为 1 和 2 的数据, 分别为 6.1% 和 3.9%。随着质量控制逐渐变差, 样本数据所占百分比逐渐降低, 说明云对 GIIRS 反演大气温度有一定影响。结合质量控制和云天空条件得出, 质量控制为 0 的数据所占的百分比最高, 可见 GIIRS 反演温度产品数据的质量较好。

根据数学拉依达准则法, 将大于平均值加 2 倍标准差和小于平均值减 2 倍标准差的数据定义为离群值。本实验将大气层中有且只有一

个有效数据的大气层高度剔除,这部分数据不在实验计算分析中。从图 2 可以发现,离群值多出现在平流层以及对流层上层,分布较密,小部分出现在对流层下层。其中质量控制为 0 的数据离群值所占百分比较少,但出现频率最高。这是由于质量控制为 1 和 2 的部分气压层高度数据为无效值,使样本量减少,导致离群值频率下降。由图 2(b)可以看出,云层可影响 GIIRS 对温度的反演。总体而言,GIIRS 反演对流层的数据比平流层的可信度高。

2.1.2 无云天空

对探空数据与 GIIRS 反演温度数据进行时空匹配对比分析,发现在无云天空下,只有质量控制为 0 的数据存在 MB 和 RMSE。在 10~1100 hPa 气压层高度范围内(图 3(a)),MB 的范围约在 $-2.6 \sim 1.1$ K,平均值为 -0.15 K。其中最大值和最小值分别出现在 706 hPa 和 29 hPa 高度。对流层反演误差大致均匀分布在 0 K 附近,整体变化浮动较小,仅有 2.5% 的 MB 超过了 1 K,反演精度较高。在大约 500~650 hPa 高度附近,所测数据的精度最高,MB 皆小于 0.12 K。与探空气球探测的气温相比,GIIRS 反演温度在高层偏高,而在

中高层和中低层偏低。

在 10~1100 hPa 气压层高度范围内(图 3(b)),RMSE 的范围大约为 $0.7 \sim 3.5$ K,最小值出现在 247 hPa 高度。在 150 hPa 以上高度, RMSE 出现不断增加的趋势;而在 150 hPa 高度以下, RMSE 的变化幅度较小,大约在 1.5 K 附近。仅在 151 hPa、235 hPa、247 hPa、259 hPa、286 hPa、343 hPa 和 358 hPa 这 7 层高度, RMSE 在 1 K 以内,所占比例为 10.6%。整个高度范围内的 MB 和 RMSE 的变化趋势大致相同。当 MB 出现较大波动时,对应气压层高度的 RMSE 也会出现相同变化。对流层反演温度的精度比平流层高,这与鲍艳松研究得出的结果一致^[7]。为了更进一步研究无云条件下的误差分析,绘制了散点图和误差图(图 4)。图 4 中,拟合线与“ $y=x$ ”线基本重合,探测到的探空数据与 GIIRS 反演的温度数据均匀地分布在“ $y=x$ ”直线两侧。RMSE 为 1.74 K,二者的相关系数达到 0.998,具有较高的相关性,该数据可以很好地反映与探空资料的一致性。但当研究误差随温度变化的趋势时发现,随着温度的升高,反演误差存在一定差距,仅有 42% 的数据误差

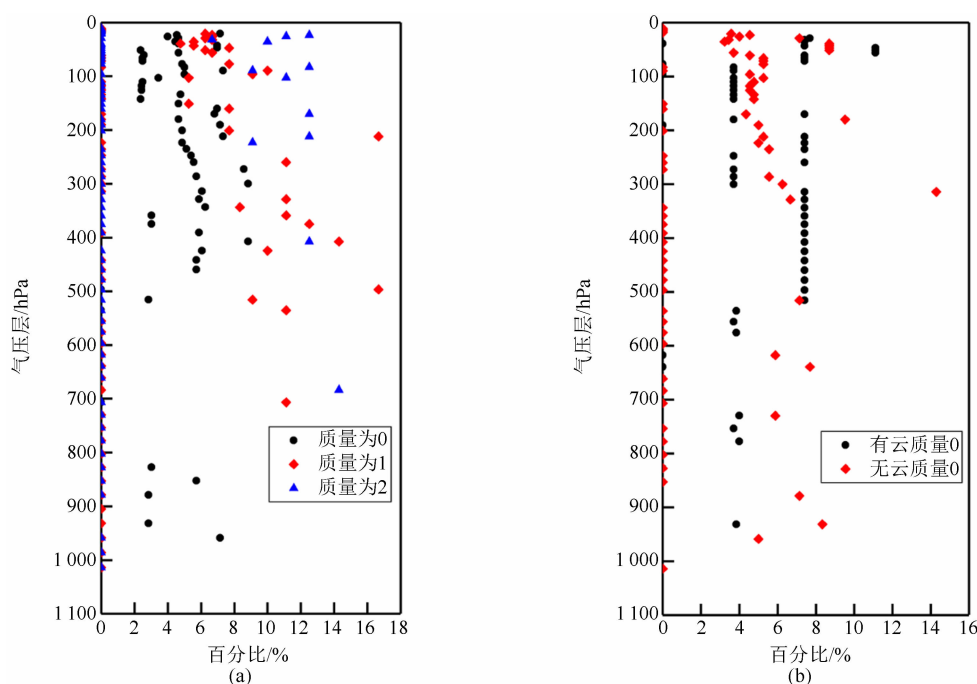


图 2 不同温度反演质量控制(a)和不同云天条件下(b)的离群值百分比图

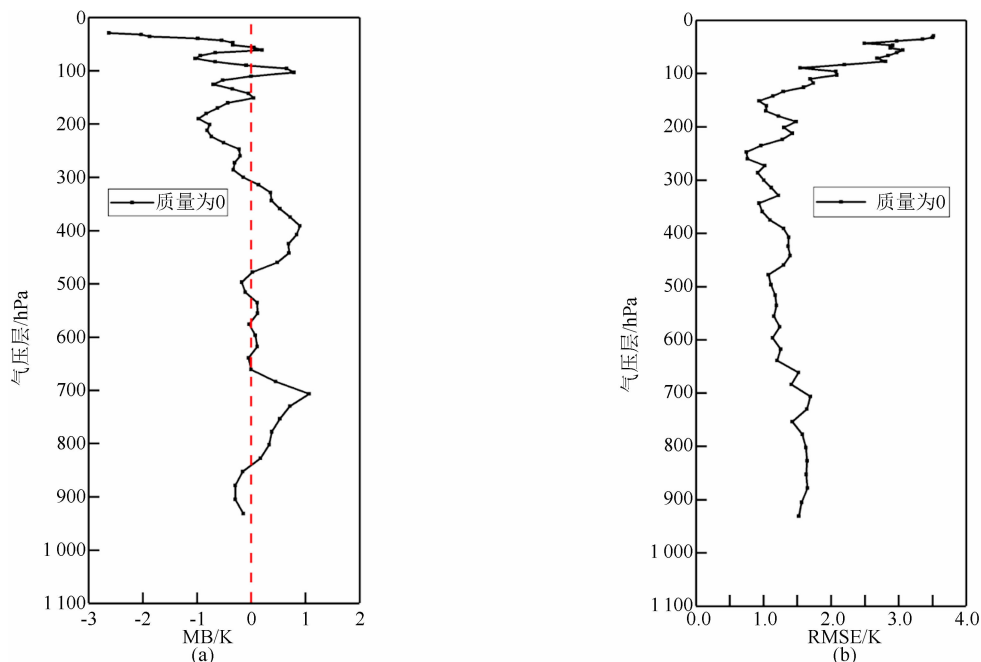


图 3 无云天空条件下 10~1100 hPa 高度范围内温度反演质量控制为 0 的 MB (a)和 RMSE (b)

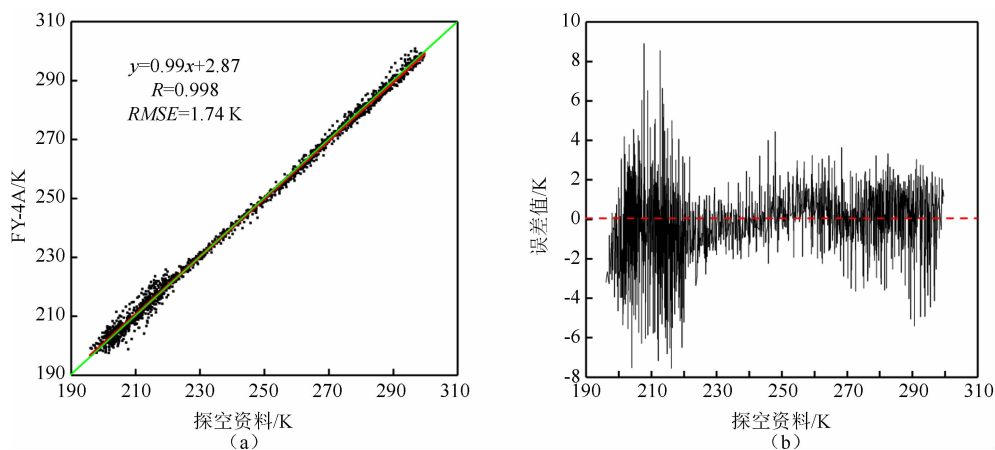


图 4 无云天空条件下 10~1100 hPa 高度范围内温度反演质量控制为 0 的散点图(a)和误差图(b)(红色直线为拟合线,绿色直线为 $y=x$ 直线)

在 1 K 以内, 误差值总体呈现“升-降-升”的趋势。温度处于 220~270 K 之间时反演误差较小, GIIRS 在温度过低或过高时反演误差增大。

2.1.3 有云天空

GIIRS 不同质量控制的温度反演数据的变化各不相同(图 5)。与质量控制为 0 的数据相比, 质量控制为 1 和 2 的反演数据变化较剧烈, 偏差较大。45~170 hPa 高度范围内, 这三种质量控制的 MB 先增大后减小, 且均为负值; 170 hPa 以下高度, MB 均为正值。这说明在有云天空条件下, 与探空数据相比, GIIRS

总体的反演温度偏低。三种质量标准的温度数据的 RMSE 变化浮动较大, 质量标准为 0、1、2 的 RMSE 的范围分别为 2.1~6.8 K、3.2~9.1 K 和 2.6~9.0 K。比较三者在有云时的反演精度, 质量控制为 0 的数据反演最好, 质量控制为 1 和 2 的数据反演差距不大。在近地面附近 RMSE 有所增加, 可能是由于云层覆盖或下垫面影响, 近地面温度反演数据部分缺失, 样本数据量减少, 从而导致在计算分析时反演精度有所下降。

为了更进一步地分析三种温度质量控制的

数据与探空资料探测的差异,图6绘制出了三者与探空数据的离散程度。质量控制为0的数据与探空资料相关系数最高为0.992,反演数据离散程度最小,整个高度范围内RMSE为3.58 K。三种不同质量控制的反演数据都随着温度的升高,逐渐分布在绿色直线下侧,反演温度较低,并且随着质量控制的下降,样本有效数据量也逐渐减少。

2.2 全天空条件下 GIIRS 不同质量控制反演温度数据对比

全天空既包含无云天空,也包含有云天空。在这种条件下,继续分析不同质量控制的反演精度差异。图7反应了全天空条件下三种

质量控制的偏差差异。三者的MB和RMSE都具有明显差异,在170 hPa以下高度MB均为正值,相比于探空气球探测到的温度,GIIRS反演温度偏低。质量控制为0的数据最靠近真值,MB和RMSE变化较平和,51.3%的数据MB小于1 K。其余两种质量控制数据的MB和RMSE变化频率快,特别在400 hPa以上高度,变化区间和频率达到最大。但二者的MB相差不大,分别仅有14.5%(质量控制为1)和13.7%(质量控制为2)的数据MB小于1 K。由图7(b)可发现,200~900 hPa高度之间呈现很明显的分离状态,与最好的质量控制数据相比,质量控制为1和2的数据存在较大的

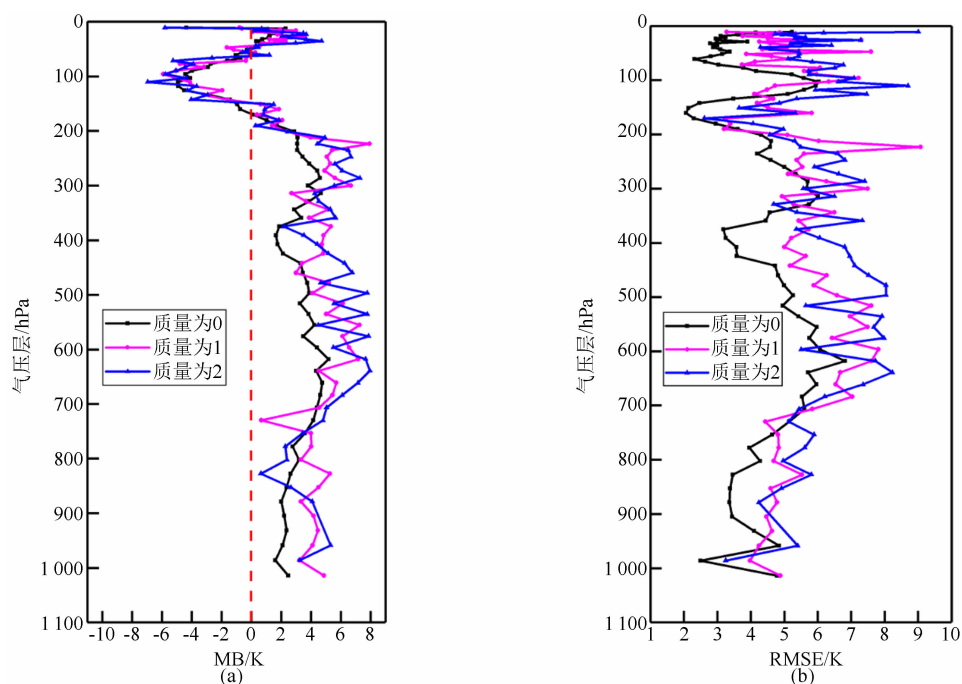


图5 有云天空条件下在10~1100 hPa高度范围内温度反演质量控制为0、1、2的MB (a) 和RMSE (b)

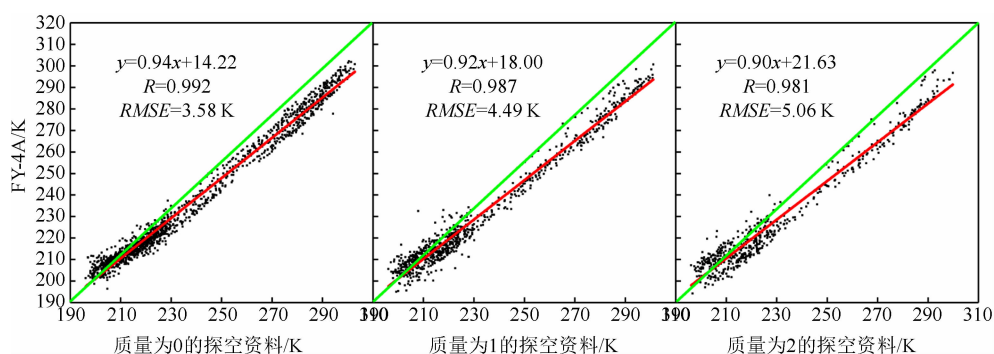


图6 有云天空条件下10~1100 hPa高度范围内温度反演不同质量控制的散点图(红色直线为拟合线,绿色直线为 $y=x$ 直线)

误差。

对全天空条件下三种温度质量控制的数据进行统计对比可发现(图 8), 质量控制为 0 的数据与探空资料的相关性最高, 离散度小, 相关系数可达 0.997, RMSE 为 2.53 K。三种不同质量控制的反演数据在 190~230 K 温度范围内, 较均匀地分布在 $y=x$ 直线两侧。然而随着温度的升高, 反演数据逐渐分布在绿色直线下侧, 反演温度偏低; 并随着质量控制的下降, 样本的有效数据量与温度较低时的样本量对比, 逐渐减少。

世界气象组织和美国环境监测系统明确指

出^[7,18], 卫星探测大气温度 RMSE 须在 1 K 以内, 达到无线电探空资料的水平, 才能给数值天气预报研究带来可靠的数据。在无云天空下 10~1100 hPa 高度范围内, 尽管质量控制为 0 的数据总体 RMSE 为 1.74 K, 但在对流层中上层高度(230~350 hPa)内温度数据 RMSE 小于 1.00 K, 所以在无云天空下质量控制为 0 的温度反演数据可以保证上海台风季这段研究时间内对流层中上层 GIIRS 的精准度。而在有云天空下, 质量控制为 0、1、2 的 RMSE 分别为 3.58 K、4.49 K 和 5.06 K, 均超出 1.00 K。可见云层一定程度上降低了 GIIRS 的反演精

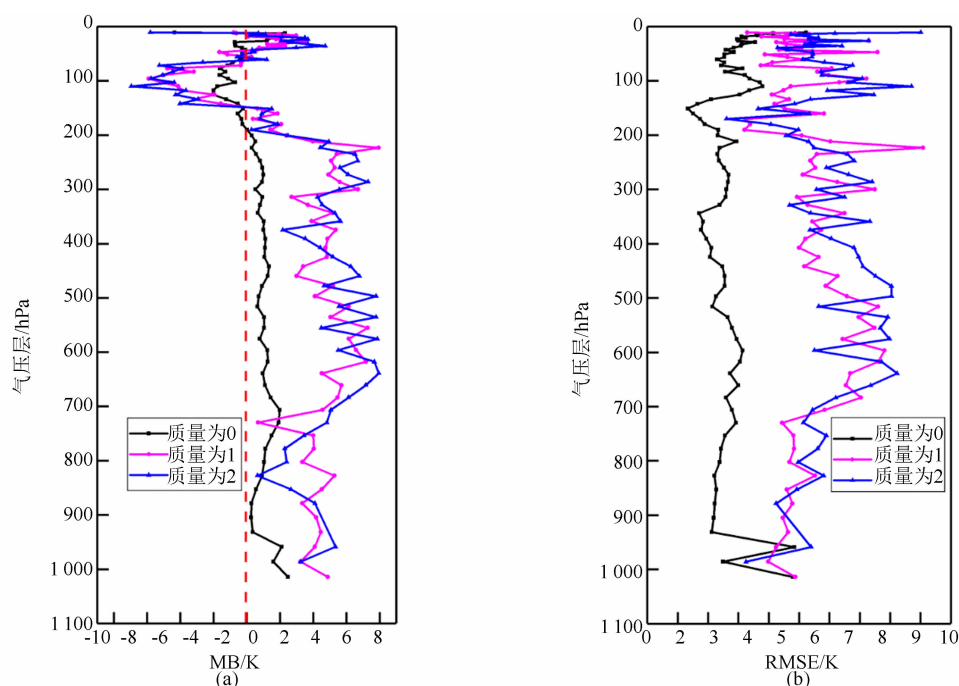


图 7 全天空条件下 10~1100 hPa 高度范围内温度反演质量控制为 0、1、2 的 MB (a) 和 RMSE (b)

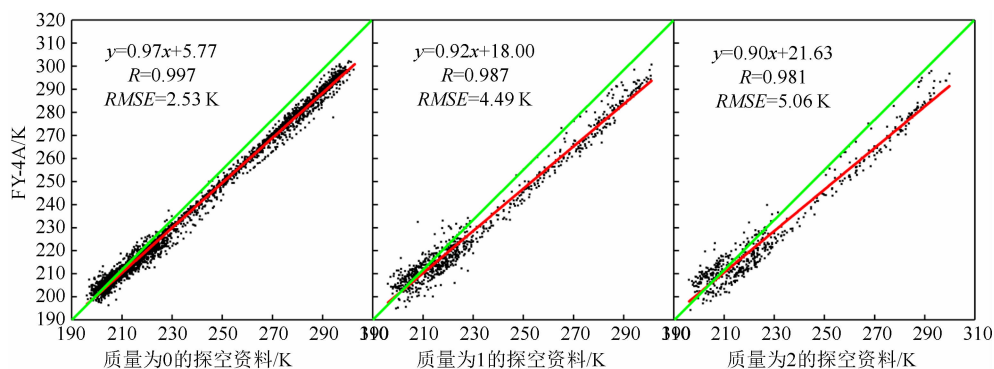


图 8 全天空条件下 10~1100 hPa 高度范围内温度反演不同质量控制的散点图(红色直线为拟合线, 绿色直线为 $y=x$ 直线)

度^[9],其反演精度有待提高;并且当温度高于 230 K 时,GIIRS 温度反演偏低,这说明 GIIRS 低估了这片研究区域的气温。

这里需要特别说明的是,尽管以探空资料为真值,以此为基础,与 GIIRS 的反演精度对比,其自身存在一定的误差。随着大气高度的增加,GIIRS 反演误差值也随之增加。Zeng^[19]在研究中国区域对流层中由探空气球运动引起的不同高度处的漂移如何变化时发现,在 200 hPa、500 hPa 和 850 hPa 高度各自最大水平漂移距离分别小于 70 km、25 km 和 10 km。这表明探空数据本身会随着气压层高度升高,探测误差变大。探空气球还会受当地的气候条件、气球性能和人为因素等影响^[20],特别是在有云条件下,这些因素会导致探空仪探测气温的垂直层面不准确^[19],给验证 GIIRS 反演温度精度带来不确定性。因此本文工作尚需完善,接下来将对低层高度范围进行进一步的研究。

2.3 台风登陆前后 24 h 内 GIIRS 反演温度数据与探空数据对比

为了更直观地反映 GIIRS 卫星与探空数据的探测差异,减少由时间匹配带来的误差,在台风“安比”登陆前 24 h 内,仅 2018 年 7 月

21 日 19:15 的探空数据与 GIIRS 反演数据在时间、空间上可相互匹配。由此绘制了图 9 所示的温度廓线对比图。图中,黑色点线为探空数据,红色点线是 GIIRS 反演温度廓线数据。从图中可以清楚地看到,卫星反演数据的趋势与探空资料探测的基本一致。103~160 hPa、390~477 hPa、515 hPa 高度至近地面的高度范围内,GIIRS 反演的温度偏高;而在 190~223 hPa 高度范围内和平流层,反演温度偏低。223~374 hPa 高度范围内误差值小于 1 K,二者廓线基本重合。

台风“云雀”登陆前 24 h 内(图 9(b)),仅 2018 年 8 月 2 日 19:15 的探空数据与 GIIRS 卫星反演数据在时间和空间上相互匹配。可以清楚地看到,卫星反演数据的趋势与探空数据探测的基本一致。平流层和 212~407 hPa 高度之间卫星反演温度偏低,且相对误差较大,最大误差值为 8.4 K。在其余气压层高度卫星反演温度偏高。从 500 hPa 高度到近地面,误差值先增大后减小,在 770 hPa 高度附近出现极大值,在 800 hPa 高度附近出现缺测现象。

通过对比两条台风登陆前的温度廓线可发现,在对流层顶和 500 hPa 高度至近地面附近,

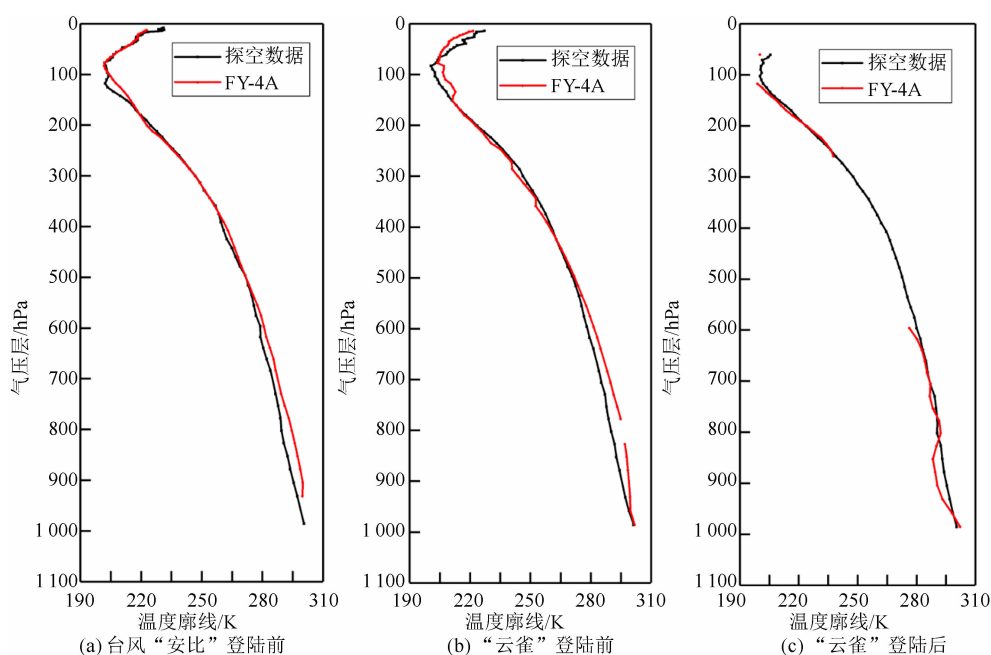


图 9 GIIRS 与探空数据温度廓线的对比

与探空资料相比, GIIRS 反演温度均偏高, 这可能是由于台风移动过程时受外围螺旋云带变化影响, 卫星对处于快速变化的温度反演不准确。在近地面层反演时受下垫面的影响, 出现部分无效值, 导致反演精度大幅下降。

台风“安比”登陆后 24 h 内不存在时间和空间相互匹配的数据。在“云雀”登陆后 24 h 内, 仅 2018 年 8 月 3 日 19:15 的探空数据与 GIIRS 卫星反演数据在时间和空间上相互匹配。由图 9(c) 很明显地看到, 卫星反演温度廓线时平流层和对流层中层出现了大量的无效值。存在有效值的数据范围内 72.7% 的卫星数据反演温度偏低, 最大误差值为 5.4 K。与台风登陆前相比, 台风登陆后卫星反演得到相反的结果: GIIRS 在对流层中下层至近地面附近反演温度偏低; 对流层上层反演较好, 误差平均值为 0.96 K, 中下层反演误差有所增加, 为 1.6 K。

3 结论

通过选取台风季上海宝山站的常规探空资料, 检验了同时段 GIIRS 温度廓线反演产品在不同云天条件下和台风登陆前后的反演精度, 得到了如下几条结论:

(1) 无云天空下, GIIRS 质量控制为 0 数据的反演精度最高, 总体 RMSE 为 1.74 K。对流层中上层高度(230~350 hPa)内的温度数据的 RMSE 小于 1 K, 处于世界气象组织和美国环境监测系统给出的标准误差范围内(RMSE 小于 1 K); 平流层的反演精度低于对流层, 且其反演误差随高度升高逐渐增大。

(2) 云对 GIIRS 温度反演会产生很大的影响。有云天空下, 与探空资料相比, GIIRS 反演温度的变化幅度大, 存在较大偏差, 质量控制由 0 到 2 的 RMSE 分别为 2.53 K、4.49 K 和 5.06 K, 均超出允许的误差范围, 反演精度有待提高; 当温度大于 230 K 时, GIIRS 比探空资料反演温度低。

(3) 台风对 GIIRS 反演温度廓线具有较大的影响。台风“安比”、“云雀”登陆前, 与探

空资料探测到的气温相比, 在 500 hPa 高度至近地面附近和对流层顶, GIIRS 反演温度偏高。台风“云雀”登陆后, GIIRS 在对流层上层反演较好; 与台风登陆前相比, 对流层中下层至近地面反演温度偏低, 并且在对流层中上层 GIIRS 反演温度会产生较多无效的数据。

致谢

感谢上海宝山气象站提供的探空资料和国家卫星气象中心(National Satellite Meteorological Center, NSMC)提供的 FY-4A 反演数据。

参考文献

- [1] 马玉芬, 潘红林, 张海亮, 等. 大气红外探测器(AIRS)资料在塔克拉玛干沙漠的适用性检验与评估[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 908-922.
- [2] 官莉. AIRS 与 COSMIC 反演大气温湿廓线比较[C]. 扬州: 第五届苏皖两省大气探测、环境遥感与电子技术学术研讨会, 2009.
- [3] 程海艳, 余晔, 陈晋北, 等. 大气红外探测器(AIRS)温、湿廓线反演产品及边界层高度在黄土高原的验证[J]. 高原气象, 2018, 37(2): 432-442.
- [4] Pu Z X, 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. Atmospheres*, 2010, 115(24): D24114.
- [5] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19.
- [6] 周爱明. 基于风云四号高光谱红外模拟资料反演大气温湿廓线试验研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [7] 鲍艳松, 汪自军, 陈强, 等. FY-4A 星 GIIRS 大气温度廓线反演模拟试验研究[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 28-37.
- [8] 杨雨晗. FY-4A 大气垂直探测仪(GIIRS)温度探测通道优选[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [9] He M, Wang D, Ding W, et al. A Validation of Fengyun4A Temperature and Humidity Profile Products by Radiosonde Observations[J].

- Remote Sensing*, 2019, **11**: 2039.
- [10] 陈哲. 中国探空气球水平漂移总体特征分析[J]. *气象*, 2010, **36**(2): 22-27.
- [11] 宋云帆, 闵文彬. 四川区域 FY-2F 卫星和探空相对湿度数据的对比分析[J]. *高原山地气象研究*, 2019, **39**(2): 70-75.
- [12] 顾雅茹, 刘延安, 刘朝顺, 等. 高光谱红外探测仪温湿度廓线在华东地区的真实性检验[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **64**(3): 146-156.
- [13] 蔡兆男, 王永, 郑向东, 等. 利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据[J]. *应用气象学报*, 2009, **20**(3): 337-345.
- [14] 彭艺, 张志清, 冯小虎, 等. 风云四号 A 星 GHIRS 晴空观测介绍[C]. 北京: 第 35 届中国气象学会年会, 2018.
- [15] 国家卫星气象中心. FY-4A Satellite [EB/OL]. <http://fy4.nsmc.org.cn/portal/cn/theme/FY-4A.html>, 2019.
- [16] 华建文, 毛建华. “风云四号”气象卫星大气垂直探测仪[J]. *科学*, 2018, **70**(1): 24-29.
- [17] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An Overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 2014, **31**: 287-301.
- [18] 董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [19] Zeng Z, Mao F, Wang Z, et al. Preliminary Evaluation of the Atmospheric Infrared Sounder Water Vapor over China Against High-resolution Radiosonde Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(7): 3871-3888.
- [20] 张俊茹. 影响探空气球投放高度的因素[J]. *吉林农业*, 2017, **29**(9): 91.