

基于风云四号成像仪云产品的视场偏差订正和影响分析*

狄 迪¹ 周镭连² 赖睿泽³
DI Di¹ ZHOU Ronglian² LAI Ruize³

1. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044

2. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京, 210044

3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州, 510641

1. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510641, China

2021-10-18 收稿, 2022-03-24 改回.

狄迪, 周镭连, 赖睿泽. 2022. 基于风云四号成像仪云产品的视场偏差订正和影响分析. 气象学报, 80(4): 632-642

Di Di, Zhou Ronglian, Lai Ruize. 2022. Parallax shift effect correction and analysis based on Fengyun-4A advanced imager. *Acta Meteorologica Sinica*, 80(4):632-642

Abstract The new generation of geostationary weather satellite imagers has the advantage of high spatial and temporal resolution, and cloud observations from the imagers are widely used in various studies in the field of meteorology. Due to the observation mode of the satellite and the curvature of the Earth, it has a parallax problem, the impact of which needs to be considered when it is jointly applied with other information. To address the parallax problem of the Fengyun-4A imager, the Advanced Geosynchronous Radiation Imager (AGRI), a sensitivity analysis was first performed using the simulated cloud top height and the actual satellite zenith angle, and the results confirmed that the higher the cloud top height or the larger the satellite zenith angle, the greater the parallax, especially for the imager with higher spatial resolution. Cloud data from the Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) and three sets of typhoon best track sets were then used to examine the accuracy of AGRI cloud mask products and typhoon center positioning before and after the parallax correction. The results demonstrate the effectiveness of the parallax correction method used, and point out that parallax cannot be neglected in the accurate quantitative application of geostationary meteorological satellite datasets.

Key words AGRI, Parallax correction, Cloud mask, Typhoon best track

摘 要 新一代静止气象卫星成像仪具有高时、空分辨率的优势, 成像仪的云观测资料被广泛应用于气象领域的各项研究中。由于卫星的观测方式和地球曲率导致其存在视场偏差, 与其他资料联合应用时需要考虑其影响。针对风云四号 A 星成像仪的视差问题, 首先使用模拟的云顶高度和实际的卫星天顶角进行敏感性分析, 结果证实云顶高度越高或者卫星天顶角越大则视差越大, 尤其对具有更高空间分辨率的成像仪, 视差影响更需要被重视。随即分别使用 CALIPSO 云层数据和 3 套台风最佳路径集来检验视差订正前、后的多通道扫描辐射成像仪 (AGRI) 云检测产品和台风中心定位的精度, 结果证明所用的视差订正方法是有效的, 并指出在静止气象卫星资料的精确定量应用中, 视差不可忽视。

关键词 风云四号成像仪, 视差订正, 云检测, 台风中心定位

中图法分类号 P405

* 资助课题: 江苏省自然科学基金项目(BK20210662)、国家自然科学基金项目(42105126)。

作者简介: 狄迪, 主要从事大气辐射和气象卫星资料应用相关研究。E-mail: didi@nuist.edu.cn

1 引 言

气象卫星上搭载的成像仪为全面了解地球的大气状态、云及地表信息提供了丰富的数据(江吉喜, 1986; 李博等, 2018)。因静止气象卫星成像仪的观测具有高时、空分辨率的特点, 其资料被广泛应用于气象领域的各项研究中, 尤其是关于云和降水的研究, 如云检测、降水区定位、台风路径定位、强对流系统识别等研究。云在水分循环系统中有着举足轻重的作用, 同时也影响着辐射能量的传输过程。对云的研究有利于人类对气候的进一步了解。然而, 随着对云区资料应用研究的深入, 当需要从卫星云图中定位目标或者联合使用两个甚至更多平台上的仪器的观测数据时, 视差的影响变得不可忽视(Vicente, et al, 1998; Mikuš, et al, 2013)。由于卫星观测的方式和地球曲率的影响, 视差普遍存在于非垂直观测中。当卫星观测目标的视角较大, 即目标距离星下点较远时, 卫星测得的目标位置会向远离星下点的方向偏移, 这种现象就是所谓的视场偏差(以下简称视差)。视差影响在大气窗区波段尤为显著。因为大气在窗区波段的吸收辐射的能力较弱, 卫星探测得到的辐射基本来自于地表和云顶发射的辐射。因此, 当卫星获取云的位置时, 得到的并不是云的真实地理位置, 图1展示了这样的视差现象。静止卫星 S 定点在赤道上空, 除了对星下点的观测, 卫星都是沿倾斜路径(具有一定卫星天顶角)观测地球大气系统。云 C 距地表一定距离, 漂浮于大气中, 观测定位的 B 点并不是云垂直投影地表的真实位置, A 点与 B 点的距离即为视差。一般来说, 云的云顶高度越高, 距离星下点越远, 卫星观测到云位置的视差也就越大。

如上所述, 由于静止卫星观测的视差客观存在, 在使用卫星云图时不可避免地需要对其进行订正。Vicente等(2002)基于地球为椭球体模型建立了视差订正方法, 研究得出视差订正后有效提升了卫星云图评估降水技术的准确率。李五生等(2012)的方法则是基于地球为球体的假设, 并采用红外云顶亮温估算的云顶高度。Li等(2013)同样使用地球为球体的假设, 但更精细地考虑了目标的方位角。Bieliński(2020)改进了Vicente等(2002)的方法并将其应用到卫星资料和雷达资料交叉订正中, 显著提高了卫星资料的位置准确度。Putra

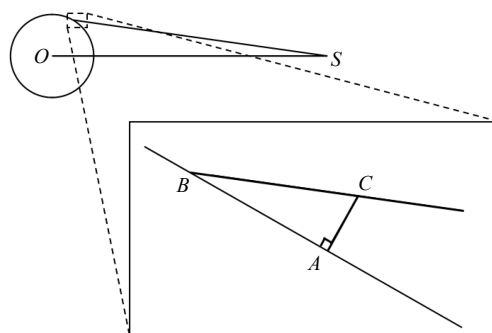


图1 视差的概念模型(O 为地球球心, S 代表卫星, C 表示云, A 、 B 分别表示云的垂直投影位置和卫星视角下的位置)

Fig. 1 Schematic diagram of the parallax shift problem (where O denotes the center of the earth, S indicates the position of satellite, C shows the spatial location of cloud, A shows virtual projection position of cloud and B reflects the cloud position viewed from the satellite)

等(2019)在订正 Himawari-8 的云图位置后, 用其追踪火山灰的位置相比于之前提高了近 10% 的精度。总而言之, 使用视差订正后的卫星云图能获得与实际情况更接近的结果。

发射于 2016 年的中国新一代静止轨道气象卫星——风云四号 A 星(FY-4A)定位于 104.7°E 的赤道上空。FY-4A 搭载的多通道扫描辐射成像仪(AGRI)的整体性能比风云二号可见光红外自旋扫描辐射计(VISSR)更高(Yang, et al, 2017)。静止卫星的云产品(如云检测产品)常被用于资料同化中的云清除步骤, 云检测产品的精度能对数值天气预报模式的同化效果产生重要的影响(Li J, et al, 2016; Li X, et al, 2020)。本研究重点不在于改进视差订正方法, 而是针对 AGRI 开展静止轨道卫星云区资料视差问题的影响分析, 使用一个简单模型, 即李五生等(2012)的方法, 结合 AGRI 云检测产品和 2019 年第 9 号台风“利奇马”分析视差对 AGRI 云区观测资料和产品的使用可能带来的影响。

2 数据和方法

2.1 数 据

2.1.1 AGRI 数据

AGRI 是多光谱扫描成像仪, 覆盖可见光波段至长波红外波段, 分别是 6 个可见/近红外通道、2 个中波红外通道、2 个水汽通道和 4 个长波红外通道, 共 14 个通道(Yang, et al, 2017; 董瑶海, 2016; 陆风等, 2017; 瞿建华等, 2019), 各通道的具

体信息见表1。通道11、12和13为大气窗区通道,其整层大气透过率比较高,而通道12的大气透过率最高(陆风等, 2017)。因吸收气体对大气窗区波

段的辐射吸收能力很微弱,大气窗区通道反映了云或地表状态的信息,因此选用整点全圆盘通道12的亮温表征台风的形状演变。

表1 AGRI 各通道的中心波长及空间分辨率

Table 1 Information on all bands of AGRI

通道号	中心波长(μm)	空间分辨率(km)	通道号	中心波长(μm)	空间分辨率(km)
1	0.470	1.0	8	3.750	4.0
2	0.650	0.5	9	6.250	4.0
3	0.825	1.0	10	7.100	4.0
4	1.375	2.0	11	8.500	4.0
5	1.640	2.0	12	10.80	4.0
6	2.250	2.0	13	12.10	4.0
7	3.750	2.0	14	13.50	4.0

AGRI 每日获取 40 幅全圆盘云图, 165 幅中国区域云图(中国区域观测范围为 3° — 55°N , 60° — 137°E)。原始的云图数据及后文提到的产品均采用 CGMS LRIT/HRIT 全球规范定义的静止轨道标称投影, 地理坐标基于 WGS84 参考椭球计算得到。

基于 AGRI 的一级数据可以反演得到二级产品(Min, et al, 2017; 张志清等, 2017), 如云检测 CLM(CCloud Mask)、云顶高度 CTH (Cloud Top Height)、云类型 CLT (Cloud Type)等产品。CTH 产品给出了 AGRI 每个观测像素的云顶高度, 此产品算法流程为: 首先利用 AGRI 的 2 个红外窗区通道($11.2\ \mu\text{m}$ 和 $12.4\ \mu\text{m}$)以及 1 个 CO_2 吸收通道($13.3\ \mu\text{m}$), 通过辐射传输模式和一维变分方法得到云顶温度, 再结合数值天气预报模式的大气温度场信息来推算得到云顶高度(崔林丽等, 2020)。CTH 是视差订正方法的重要输入参数。CLM 产品是基于阈值法并联用 AGRI 多个光谱通道生成的, 具体算法可以参考 Min 等(2017), 产品对每个有效像素给出了有云、可能有云、可能晴和晴 4 种分类结果。FY-4A 的 AGRI 云产品也与其他卫星云检测产品进行过交叉验证, 证实该产品有很高的精度(Wang, et al, 2019)。

2.1.2 CALIPSO 数据

极轨卫星 CALIPSO 携带的主要仪器为云-气溶胶正交极化激光雷达(CALIOP), 主要从 $532\ \text{nm}$ 和 $1064\ \text{nm}$ 两个波段上主动遥感云和气溶胶的状态(Winker, et al, 2009), 其资料具有较高的精度

(Hunt, et al, 2009)。而它直接观测星下点的观测方式和对云的存在有较高的敏感度, 是目前测云精度最高的仪器, 常被用于检验测试其他云检测产品(Liu, et al, 2021)。文中将使用 CALIPSO 二级产品中 $5\ \text{km}$ 分辨率的云层数据验证 AGRI 的云检测二级产品。包含于云层数据中的云层数识别变量(Number_Layers_Found)代表在每个星下点的垂直方向上探测到的云层数, 若等于 0 表示该点无云, 若大于 0 则表示该点有云, 由此可得到 CALIPSO 的衍生云检测数据。

2.1.3 台风最佳路径集

台风的最佳路径集一般由预报资料、再分析资料和多种观测资料(包括卫星云图和站点资料等)综合分析得出, 提供了台风中心经纬度、中心最低气压、强度等级等数据, 能较为准确地描述台风的移动路径和强度, 其记录间隔一般为 $6\ \text{h}$ 。在此选用中国气象局(CMA)、日本气象厅(JMA)和国际气候管理最佳路径档案(IBTrACS)提供的台风最佳路径集(Lu, et al, 2021; Knapp, et al, 2010)来验证视差订正分析对红外云图定位台风位置的效果。考虑到 3 种资料的记录间隔不一样, 统一使用三者每 $6\ \text{h}$ 一次的记录。

2.2 视差订正方法与二分类指标

选用李五生等(2012)的视差订正方法, 在此简要介绍其过程。假设地球半径为 r , 静止卫星位于赤道上空 H 处, 则其距地心的距离 R 为 $r+H$ 。如图 2 所示, O 为地球球心, S 为卫星所在位置, A 为星下点位置, 经纬度为 $(\lambda_s, 0)$; T 为云的实际位置, X 为

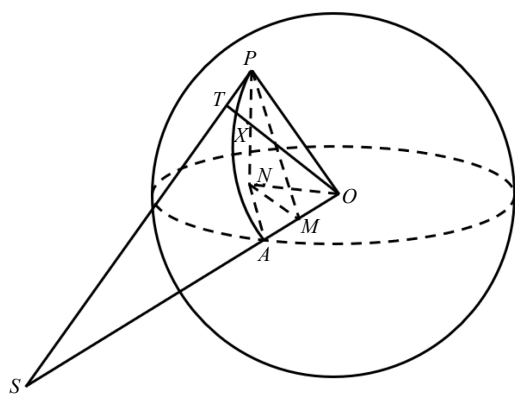


图2 视差订正模型的几何关系

Fig. 2 Schematic diagram of the geometry of parallax correction model

云垂直投影在地面上的真实位置, 云高 $TX = h$, 由 AGRI 的 CTH 产品提供; P 为观测云的位置, 经纬度为 (λ_P, φ_P) ; 视差为弧 PX 。为了清楚地解释算法, 需添加辅助线, 其中 N 为过 P 点与赤道平面相垂直的交点, M 为过 N 点的线段与星地连线 SO 垂直的交点。设卫星 S 到 P 的距离 $SP = L$, $\angle POX = \delta$ (视差角), $\angle OSP = \beta$, $\angle POA = \gamma$ 。根据立体几何理论可计算 γ

$$\cos \gamma = \cos \varphi_P \cos (\lambda_S - \lambda_P) \quad (1)$$

$$\gamma = \arccos [\cos \varphi_P \cos (\lambda_S - \lambda_P)] \quad (2)$$

在 $\triangle OSP$ 和 $\triangle OST$ 中, 根据正弦定理

$$\begin{cases} \frac{L}{\sin \gamma} = \frac{r}{\sin \beta} = \frac{R}{\sin \angle OPS} \\ \frac{r+h}{\sin \beta} = \frac{R}{\sin \angle OTS} \end{cases} \quad (3)$$

得视差角

$$\delta = \angle OTS - \angle OPS = \arcsin \frac{R \sin \gamma}{L} - \arcsin \frac{Rr \sin \gamma}{L(r+h)} \quad (4)$$

式中,

$$L = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \cos \gamma} \quad (5)$$

接下来将观测云的位置 P 沿大圆路径向卫星的星下点方向移动至真云云下点 X 。根据上述推导可以计算云的实际位置的纬度:

$$\varphi_X = \arcsin \frac{\sin \varphi_P \sin (\gamma - \delta)}{\sin \gamma} \quad (6)$$

计算云的实际位置的经度

$$\lambda_X = \lambda_S \pm \arccos \frac{\cos (\gamma - \delta)}{\cos \varphi_X} \quad (7)$$

其中, 当观测云的经度小于星下点的经度时, 取正号; 当观测云的经度大于星下点的经度时, 取负号。

为了检验 AGRI 云检测视差订正前后相对于 CALIPSO 衍生云检测数据的一致程度, 采用一些定量的分类指标进行评价, 其描述如表 2。

表2 CALIPSO/AGRI 云检测结果评估指标
Table 2 Assessment indexes for CALIPSO/AGRI cloud mask product

CALIPSO/AGRI	mask product	
	AGRI云检测判定有云	AGRI云检测判定无云
CALIPSO云检测判定有云	E	G
CALIPSO云检测判定无云	F	H

表 2 中, E 表示 CALIPSO 和 AGRI 云检测产品一致判别为有云视场的样本数; H 表示 CALIPSO 和 AGRI 云检测产品一致判别为晴空视场的样本数; G 则表示 CALIPSO 判断为有云视场, 而 AGRI 判断为晴空视场的样本数; F 代表 CALIPSO 判断为晴空视场, 而 AGRI 判断为有云视场的样本数。由上述可知, F 和 G 越小代表 AGRI 的云检测结果与 CALIPSO 衍生云检测结果越接近。于是, 可以用精确率 $U = \frac{E}{E+F}$ 和召回率 $V = \frac{E}{E+G}$ 两个指标评价 AGRI 云检测产品与 CALIPSO 的衍生云检测数据的一致程度。精确率可以解释为 AGRI 云检测判定有云的样本中, 有多少样本 CALIPSO 云检测判定有云; 召回率可以解释为 CALIPSO 判定有云的样本中, 有多少样本 AGRI 云检测判定有云。

3 理论分析

基于 2.2 节的公式, 可知视差与云顶高度、卫星天顶角有关, 因此基于 AGRI 实际天顶角和模拟云顶高度资料 (1—15 km) 进行视差的敏感性分析。

3.1 视差与卫星天顶角

从卫星天顶角为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 时视差随云高变化的情况 (图 3) 可以看出, 当卫星天顶角为 15° 时, 高、中、低云产生的视差都没有超过 AGRI 像元的空间分辨率 (4 km)。当卫星天顶角为 30° 时, 虽然 6 km 以下的中、低云产生的视差未超过 1 个像元, 但 6 km 以上的高云引起的视差能超过 1 或 2 个像元。当卫星天顶角为 45° 时, 2 km 以下的低云产生的视差不超过 1 个像元, 中云引起的视差有可能超过 1 个像元, 高云引起的视差可达

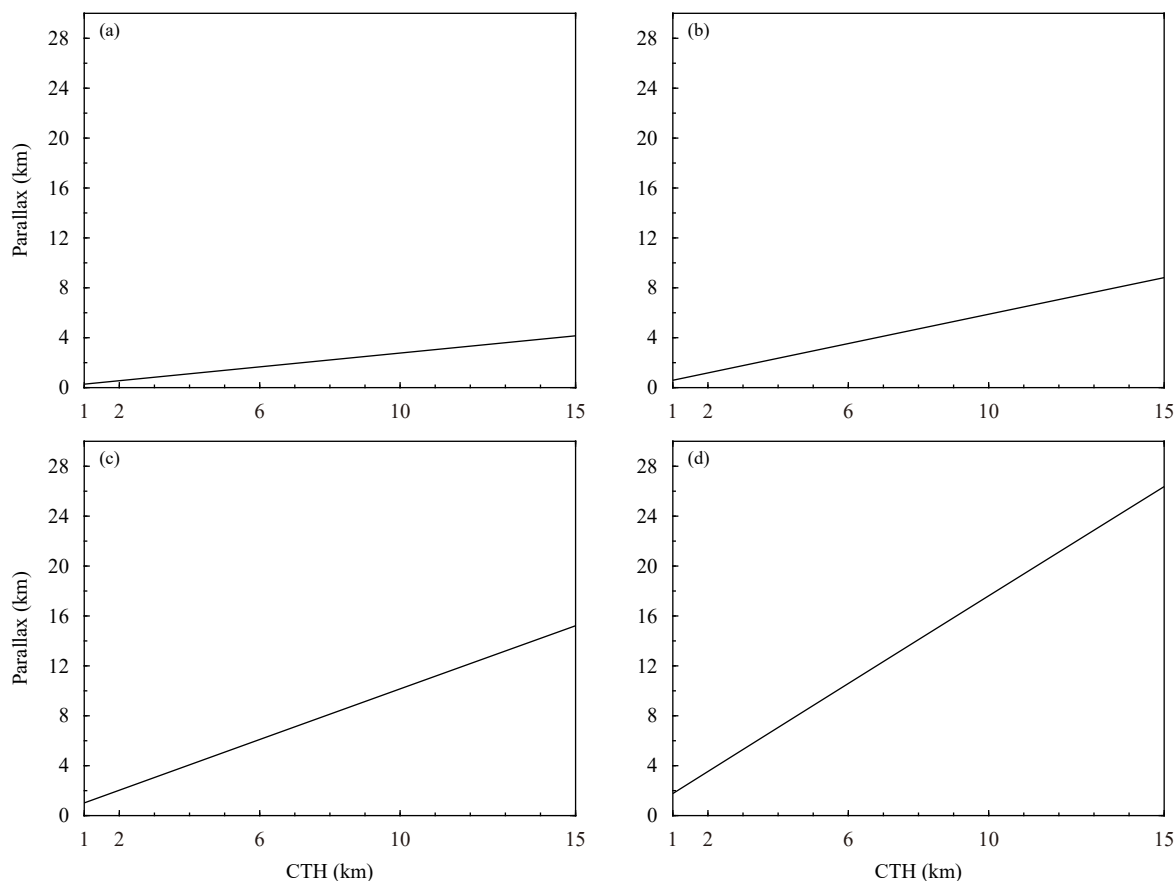


图3 当卫星天顶角为(a) 15°、(b) 30°、(c) 45°和(d) 60°时视差随云顶高度的变化

Fig. 3 Relationship between parallax shift and cloud top height when satellite zenith angle is (a) 15°, (b) 30°, (c) 45° and (d) 60° respectively

4个像元。当卫星天顶角为60°时,低云产生的视差不超过1个像元,中、高云产生的视差在1—7个像元。如果考虑更高空间分辨率(如2 km)的成像仪,如日本Himawari-8/9的成像仪AH1和未来中国的风云四号C星的成像仪AGRI,当卫星天顶角为60°时,即使是1 km高的低云也会产生1个像元的误差。这表明更高空间分辨率的成像仪在任何有云区域都需考虑视差订正问题。简而言之,上述结果表明云发生、发展得越高,产生的视差越大,同时这也说明了静止卫星在大的天顶角下对云进行监测时,尤其是监测发展较高的深对流云时,进行视差订正的必要性。随着仪器空间分辨率的提高,视差问题越来越不容忽视。

3.2 视差与云高

从云高为1、5、10、15 km时视差随天顶角变化的情况(图4)可以看出,视差在各个云高层都随卫星天顶角的增大而增大,在对流云典型高度

10 km条件下,偏移甚至可以超过50 km,接近于10个像元的偏移,这种误差对于尺度较小的对流云监测有重要影响,同时这也无法为预报模式提供定位准确的云信息。同时也在低云条件下(云高为1、5 km),视差也随卫星天顶角的增大而增大,因当前风云静止卫星成像仪空间分辨率为4 km,受低云产生的视差影响不那么明显,但这种偏移对未来分辨率达到500 m的静止卫星成像仪而言,即使在小角度观测情况下,仍会造成2个像元以上的偏移,给云检测及地表参数反演造成一定影响。

4 实例分析

4.1 视差与成像仪云检测

选取2019年8月7日CALIPSO云层数据和当天整点的AGRI云检测产品,利用最近邻匹配方法使CALIPSO各路径点匹配最近的一个AGRI像素点,并控制每个CALIPSO路径点与AGRI像素

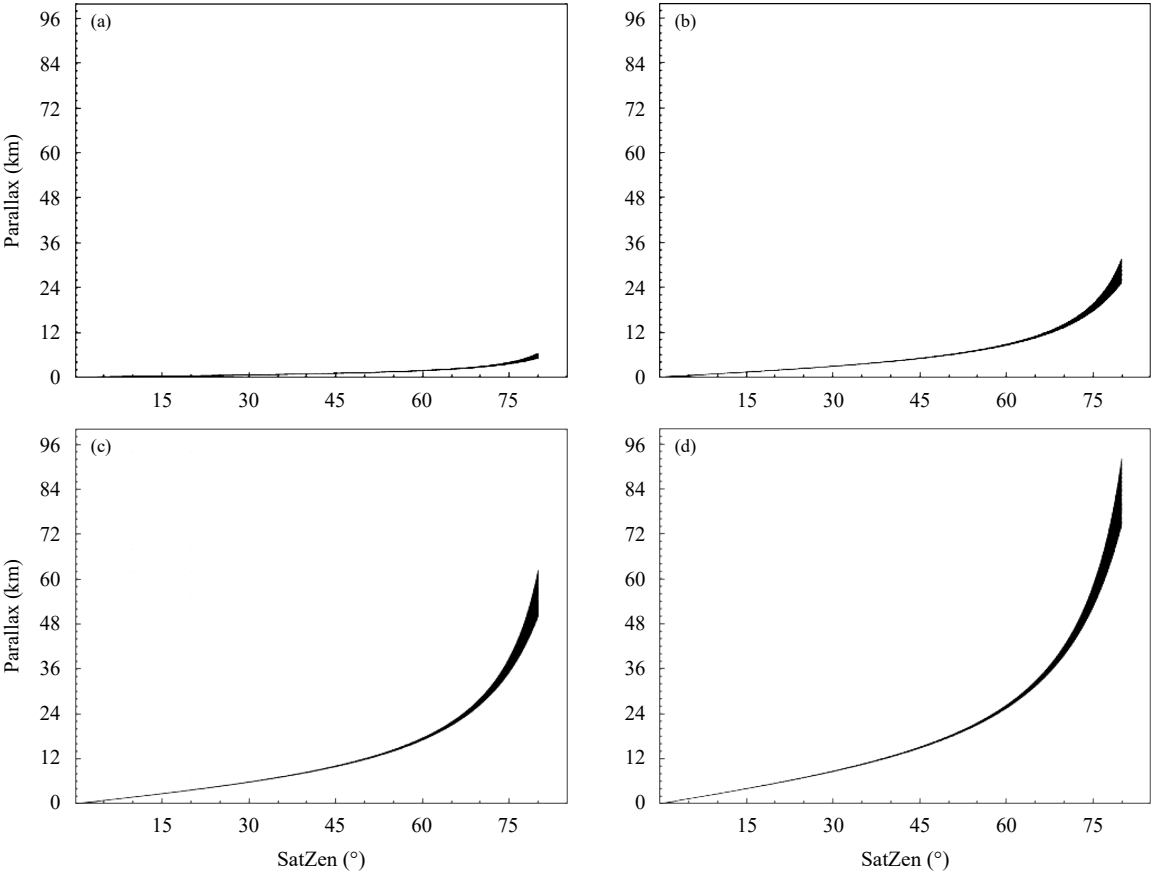


图 4 当云顶高度为 (a) 1 km、(b) 5 km、(c) 10 km 和 (d) 15 km 时视差随卫星天顶角的变化

Fig. 4 Relationship between parallax shift and satellite zenith angle when cloud top height is (a) 1 km, (b) 5 km, (c) 10 km and (d) 15 km respectively

点时间间隔不超过 7 min, 该做法的目的在于限制二者在一定时段内观测目标的位置相差不能过大。本次匹配共得到 6835 对相邻点。对匹配到的 AGRI 像素点进行视差订正, 并利用上文提到的两个分类指标——精确率 (U) 和召回率 (V), 评价结果如表 3。由于 AGRI 云检测产品中存在“可能”的判定结果, 因此特别考虑了将“可能有云”当成“有云”和“可能晴”当成“晴”以及去除所有含有“可能”的样本对两种情况。由表 3 可知, 无论考虑“可能”与否, 经过视差订正的 AGRI 云检测都与 CALIPSO 衍生云检测更接近。虽然精确率和召回率的提升大概在 1% 左右, 但考虑更大的样本量时, 这样的提升对资料同化或辐射传输模式的云清除来说, 带来的益处是值得引起重视的。

4.2 视差与台风定位

静止卫星的红外云图资料还被广泛应用于台风、强对流等灾害天气的监测。对于台风监测来

表 3 视差订正前、后 AGRI 云检测产品与 CALIPSO 衍生云检测数据判定有云的一致程度

Table 3 Assessment results for AGRI cloud mask product with and without correction using CALIPSO as a reference

	考虑AGRI云检测的 “可能”状态	不考虑AGRI云检测的 “可能”状态
视差订正前	$U=0.7456, V=0.4701$	$U=0.8087, V=0.4254$
视差订正后	$U=0.7534, V=0.4835$	$U=0.8159, V=0.4345$
样本数	5841	5105

说, 对台风中心的准确定位不仅影响台风后期降水和路径的预报, 还影响台风强度的估测。但是台风的红外云图只能展示云顶亮温的信息, 因视差的影响, 台风的真实位置并不能被正确显示。值得注意的是, 目前中国大部分使用卫星云图研究台风定位的方法尚未考虑视差的影响(李妍等, 2010; 王筱, 2017; 蒋众名, 2018; 王晓霞, 2020; 刘佳等, 2020)。一般来说, 台风的垂直结构能发展至对流层顶, 而且 AGRI 在观测台风的高发地西北太平洋时, 卫星

天顶角最大能达到 60° , 如此大的云顶高度和卫星天顶角产生的视差会给台风的精确定位带来很大影响。本研究以利奇马台风为例, 探讨视差会给台风的精确定位带来多大影响。

利奇马台风于 2019 年 8 月 4 日 06 时(世界时, 下同)在 $(16.7^\circ\text{N}, 131.5^\circ\text{E})$ 获得日本气象厅命名, 之后沿西北路径向中国移动, 8 月 7 日开始快速增强, 卫星云图中的台风眼逐渐清晰。8 月 8 日, 联合台风警报中心(JTWC)将利奇马升格为超强台风, 在卫星云图中可以看到其对称的台风眼, 之后不久, 利奇马出现眼墙替换过程, 台风发展出同心眼

壁。于 8 月 9 日 18 时在中国浙江温岭市登陆, 最终于 8 月 11 日在渤海海面消亡。对于有眼台风而言, 由于台风中心盛行下沉气流, 导致该区域的云量低于其周围的云量, 强大的台风眼处甚至有可能出现晴朗天气, 因此, 台风中心的亮温应该明显高于其周边外围云系区域的亮温, 从红外卫星云图中也可以判断出有眼台风中心的大概位置。

基于上述观测事实, 主要选取可从风云四号红外云图上分辨出利奇马台风眼的区间(即 8 月 7 日 12 时至 8 月 9 日 12 时)开展视差影响研究。从视差订正前、后 AGRI 的 12 通道红外亮温图(图 5)

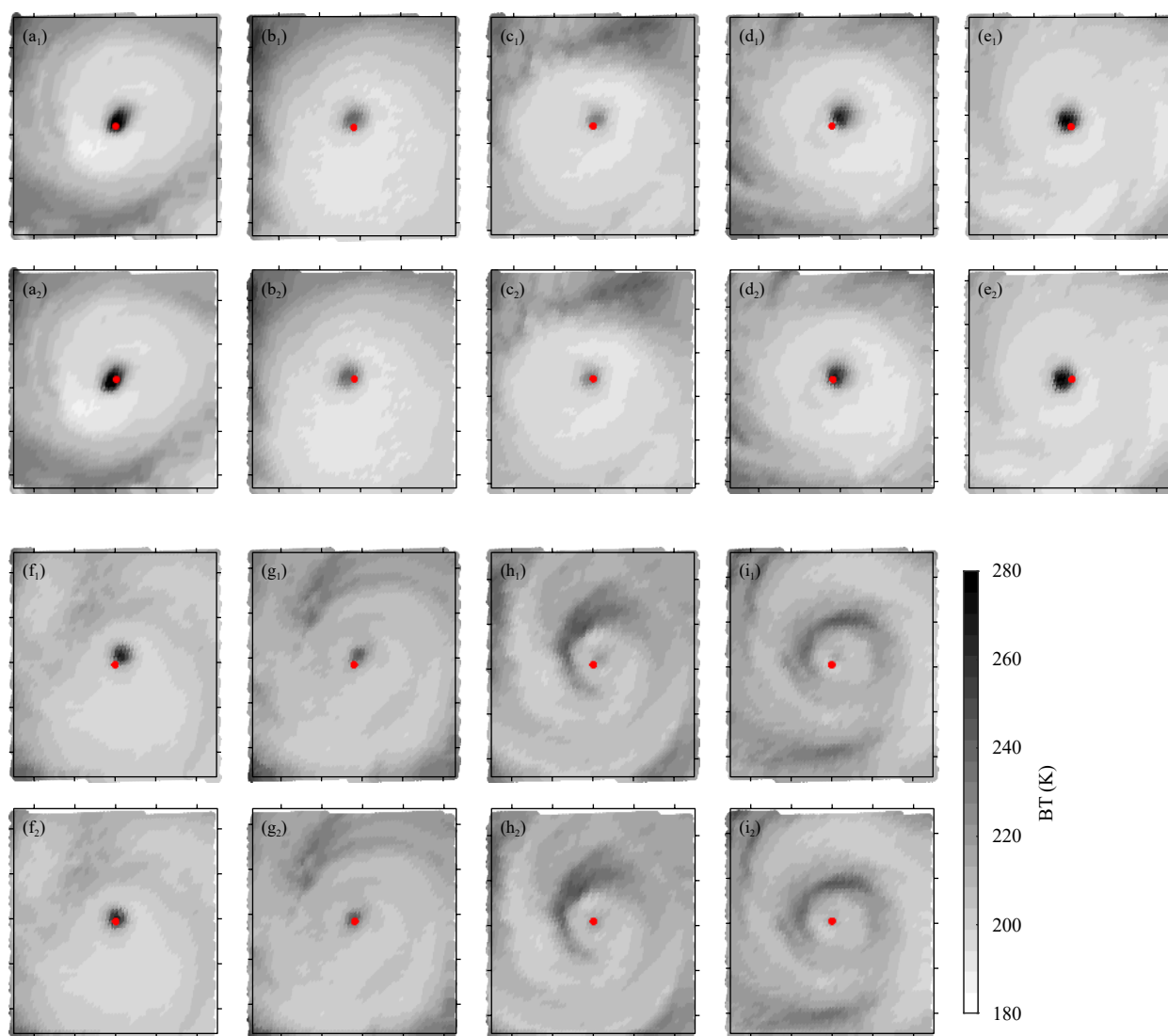


图 5 视差订正前 (a_1-i_1)、后 (a_2-i_2) AGRI 通道 12 显示的利奇马台风红外亮温 (红点代表 IBTrACS 路径集的台风中心位置; a-i. 7 日 12 时至 9 日 12 时, 间隔 6 h)

Fig. 5 Spatial patterns of bright temperature of AGRI Band 12 with (a_2-i_2) and without (a_1-i_1) parallax correction from 12:00 UTC 7 to 12:00 UTC 9 (a-i) at 6-hour intervals (the red dots denote the IBTrACS best track)

可以明显区分亮温更高的台风眼和外围螺旋云带，红点标注了对应时刻的 IBTrACS 最佳台风路径位置。从图 5 也可以直观地看到视差订正后卫星云图的台风眼更靠近 IBTrACS 最佳台风路径位置，这一结论也可以从图 6 的台风云顶高度图中得出，订正后台风中心的云顶高度更符合实际情况。为了具体定量地展示改进结果，分别从视差订正前、后的卫星云图上提取台风中心位置(选取台风眼区亮温最高处作为台风中心位置)，并且与 3 个最佳路径集的台风中心做距离计算，结果见图 7。图 7a 给出了 8 月 7 日 12 时至 8 月 9 日 12 时 CMA、JMA 和

IBTrACS 数据集的路径和对应时间下从视差订正前、后卫星云图所提取的台风路径，可以发现订正后的台风路径(绿线)相较订正前(黑线)明显更接近于最佳台风路径集。此外，可以看出相较最佳台风路径集，订正前的台风路径整体呈现东北方向的偏移，而风云四号卫星星下点在 104.7°E，所以这样的偏差一定程度上与视差有关。图 7b、c 和 d 也说明了以最佳路径集为参考，视差订正后某些时刻台风位置路径能改进十几千米。因为 9 日 12 时和 16 时利奇马台风眼已经不太清晰，台风中心位置提取效果变差，所以与最佳路径集偏离较大。此外，

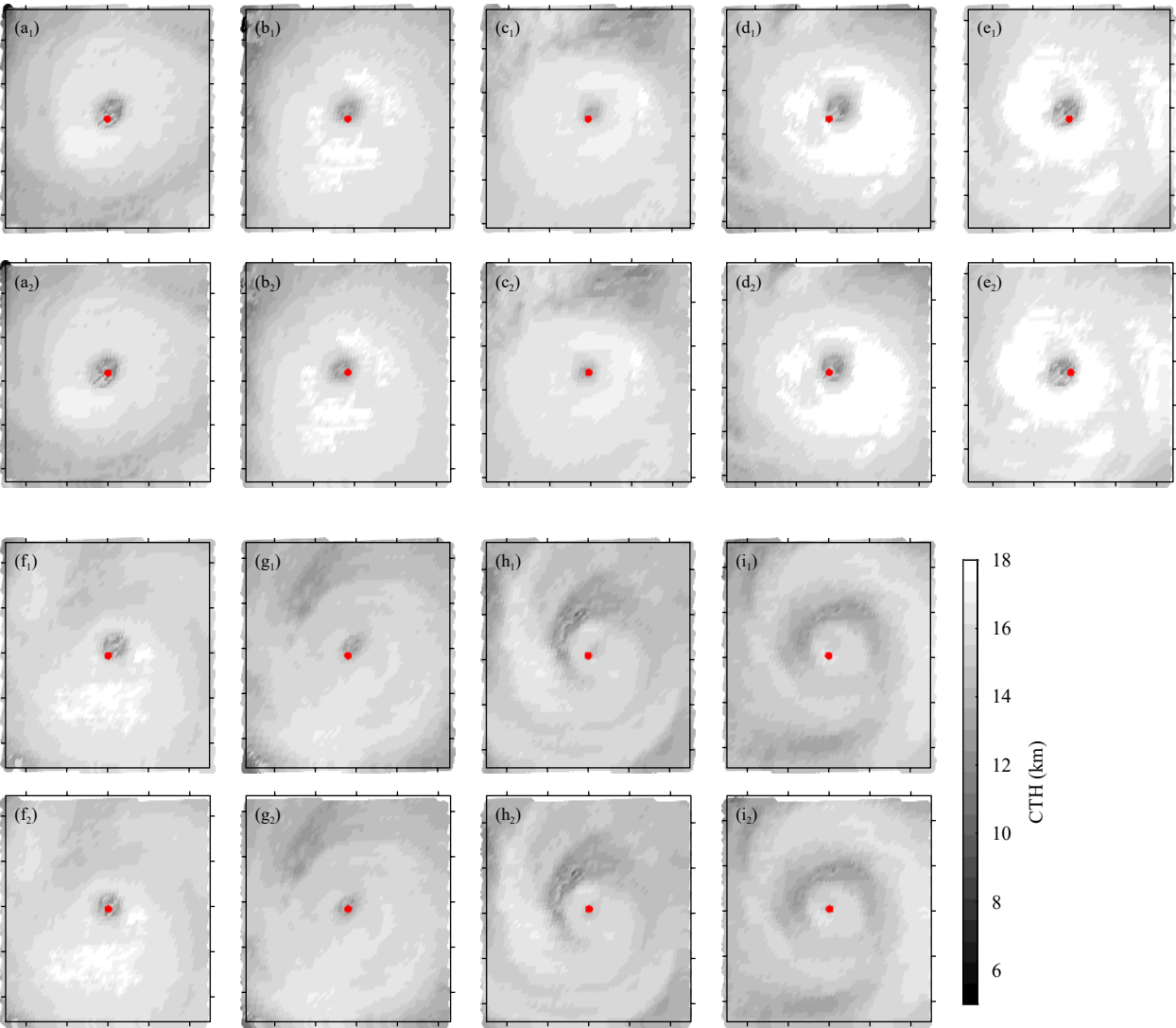


图 6 视差订正前 (a₁—i₁)、后 (a₂—i₂)AGRI 云高产品显示的利奇马台风云顶高度 (红点代表 IBTrACS 路径集的台风中心位置; a—i. 7 日 12 时至 9 日 12 时, 间隔 6 h)

Fig. 6 Spatial patterns of cloud top height of CTH product of AGRI with (a₂—i₂) and without (a₁—i₁) parallax correction from 12: 00 UTC 7 to 12: 00 UTC 9 (a—i) at 6-hour intervals (the red dots denote the IBTrACS best track)

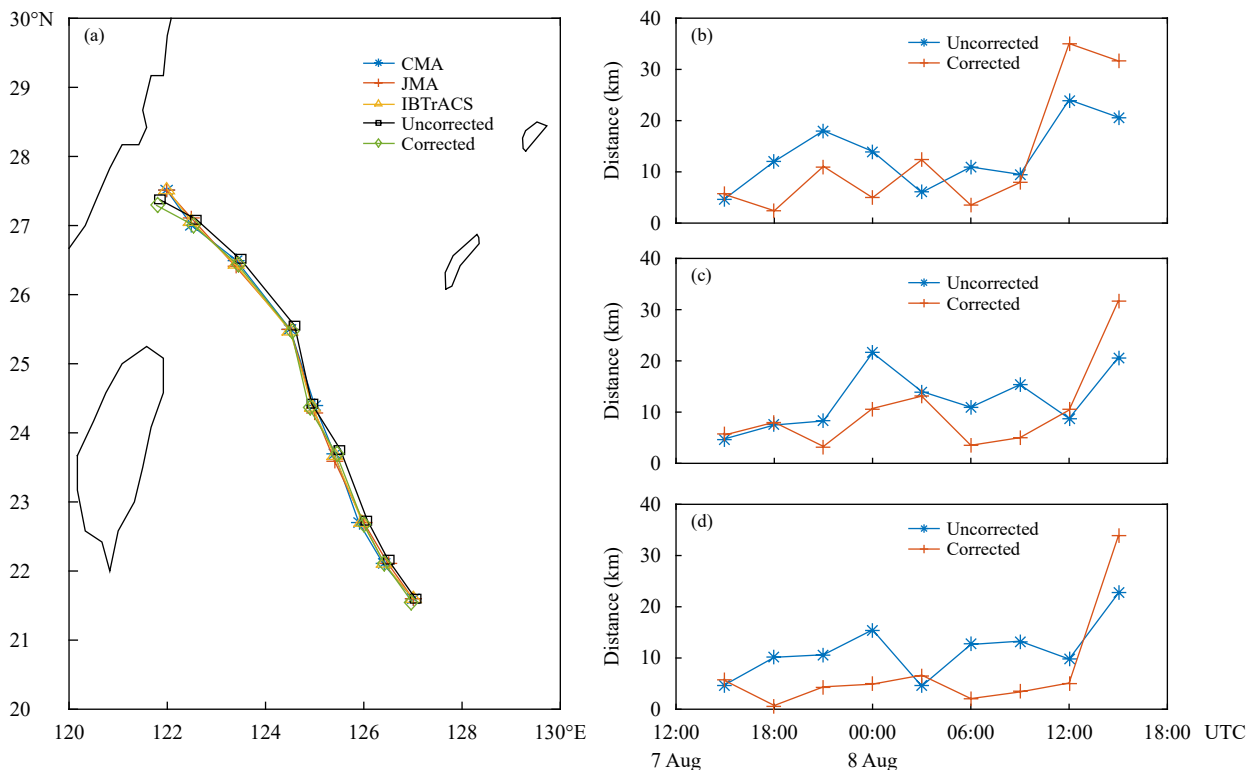


图 7 (a) 三个最佳路径集和视差订正前、后卫星云图提取的台风移动路径及视差订正前、后卫星云图台风路径分别与 (b) CMA、(c) JMA 和 (d) IBTrACS 台风最佳路径集的距离

Fig. 7 (a) The track of Typhoon Lekima from three best track datasets and from bright temperature observations of AGRI band 12 with and without correction, the track distances of original and corrected observations with respect to datasets of (b) CMA, (c) JMA and (d) IBTrACS

也比较了视差订正前、后卫星云图上的台风最佳路径处亮温数据(图 8), 可见视差订正后不同最佳路径处的通道亮温普遍高于订正前, 从亮温方面证实订正云图可提升台风定位效果。另外, 订正前、后亮温差最大可接近 50 K, 这严重影响了后续的研究。综上所述, 结合 3 种最佳路径资料的分析可以确定, 对卫星云图进行视差订正可以有效提高台风定位的准确度, 为了更好地利用红外卫星云图资料, 需要重视其视差影响。

5 结 论

随着对新一代静止气象卫星成像仪红外云区资料的研究和应用的深入, 静止气象卫星观测时视角带来的偏差是否影响卫星资料应用值得深入研究。因此, 针对 FY-4A 的成像仪 AGRI 采用一种视差订正方法, 重点分析视差对成像仪云区资料应用的可能影响。本研究首先使用模拟的云顶高度数据和实际卫星天顶角开展敏感性试验, 得到以下结论:

(1) 卫星天顶角越大, 云顶高度越高, 观测的视差越大。这也说明了在使用卫星对云进行监测时, 尤其是监测发展较高的对流云时, 进行云图视差订正的必要性; 在使用中、高纬度地区的云图资料时视差影响不能忽视。

(2) 值得注意的是, 当前日本的 Himawari-8/9 和未来中国的风云四号 C 星成像仪的红外波段的空间分辨率设计指标为 2 km。也就是说对于未来的成像仪而言, 当卫星天顶角达到 60°, 无论是 2 km 以下的低云、2—6 km 的中云或是 6 km 以上的高云都会产生不可忽视的视差。

利用 CALIPSO 二级云层数据证实了 AGRI 云检测产品视差订正后准确度有部分的提高。除此之外, 还利用实时卫星资料和 3 个台风最佳路径集, 针对 2019 年第 9 号台风利奇马开展了视差订正方法的检验, 证实了视差订正对提高台风定位准确度的有效性。上述实例说明, 为了更好地发挥卫星资料的作用, 利用卫星观测资料进行台风相关的定

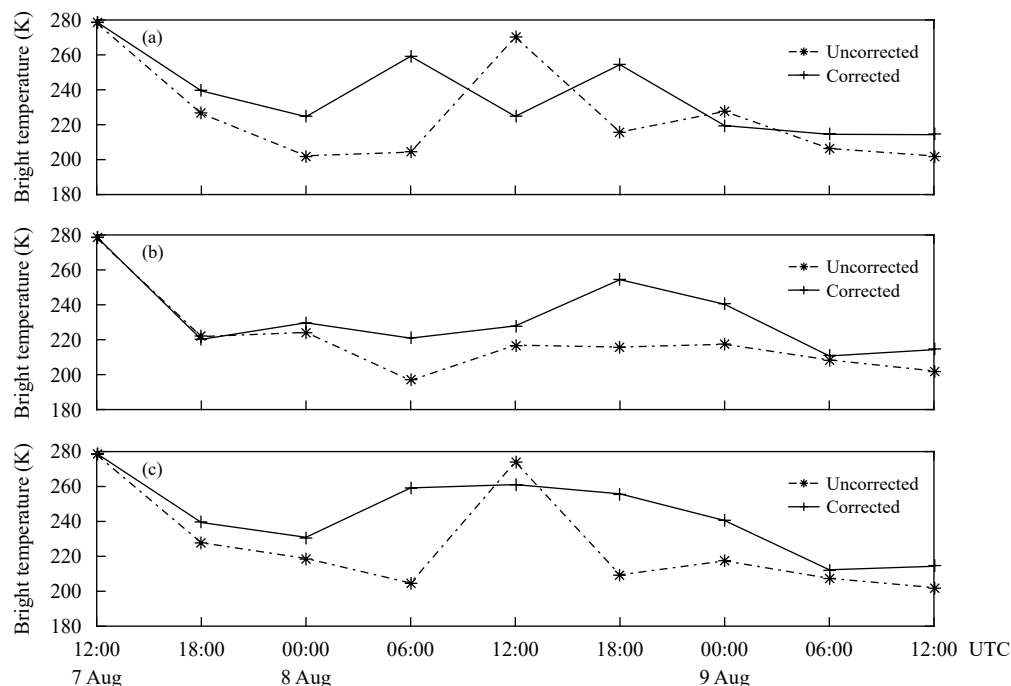


图8 云图视差订正前、后最佳路径点 (a. CMA, b. JMA, c. IBTrACS) 通道 12 的亮温比较

Fig. 8 Bright temperatures of best track from (a) CMA, (b) JMA and (c) IBTrACS using original and parallex corrected observations from AGRI band 12

量研究(如台风定位或台风路径预报等研究),需要重视卫星资料的视差问题。无论卫星 L1 级辐射(或亮温)资料或 L2 级云产品(如云检测、云顶温度等云参数相关产品)都一定程度上受视差影响,但不同产品受视差的影响程度需要后续更深入的研究。

最后,本研究只使用了基于地球为球体假设的视差订正模型,未来可考虑使用地球为椭球体的模型来改进算法,以期实现更高精度的视场偏差订正。

致谢: 本研究所涉及的风云四号成像仪观测资料、产品和数据说明均可从中国国家卫星气象中心官网 (<http://www.nsmc.org.cn/NSMC/Home/Index.html>) 下载。CMA、JMA 和 IBTrACS 台风路径集分别下载自中国气象局热带气旋资料中心(https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html)、区域专业气象中心(东京)(<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/trackarchives.html>)和国际气候管理最佳路径档案官网 (<https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/>)。CALIPSO 云层数据下载自 https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1556717899-LARC_ASDC.html。

参考文献

- 崔林丽, 郭巍, 葛伟强等. 2020. FY-4A 卫星云顶参数精度检验及台风应用研究. 高原气象, 39(1): 196-203. Cui L L, Guo W, Ge W Q, et al. 2020. Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research. Plateau Meteor, 39(1): 196-203 (in Chinese)
- 董瑶海. 2016. 风云四号气象卫星及其应用展望. 上海航天, 33(2): 1-8. Dong Y H. 2016. FY-4 meteorological satellite and its application prospect. Aerosp Shanghai, 33(2): 1-8 (in Chinese)
- 江吉喜. 1986. 增强显示红外卫星云图在热带气旋分析中的应用. 气象学报, 44(4): 482-487. Jiang J X. 1986. The application of enhanced infrared imagery to the tropical cyclone analysis. Acta Meteor Sinica, 44(4): 482-487
- 蒋众名. 2018. 基于遥感数据的台风识别与中心定位方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. Jiang Z M. 2018. Research on typhoon recognition and centering based on remote sensing data [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology (in Chinese)
- 李博, 杨柳, 唐世浩. 2018. 基于静止卫星的青藏高原及周边地区夏季对流的气候特征分析. 气象学报, 76(6): 983-995 Li B, Yang L, Tang S H. 2018. The climatic characteristics of summer convection over the Tibetan Plateau revealed by geostationary satellite. Acta Meteor Sinica, 76(6): 983-995 (in Chinese)
- 李五生, 王洪庆, 吴琼等. 2012. 静止卫星云图的云位置偏差及其几何校正. 北京大学学报(自然科学版), 48(5): 732-736. Li W S, Wang H Q, Wu Q, et al. 2012. The position deviation of geostationary satellite image and

- the geometric correction. *Acta Sci Nat Univ Pekinensis*, 48(5): 732-736 (in Chinese)
- 李妍, 陈希, 费树岷. 2010. 基于红外卫星云图的台风中心自动定位方法研究. *红外*, 31(3): 11-14. Li Y, Chen X, Fei S M. 2010. Study of automatic location of typhoon center based on IR satellite cloud images. *Infrared*, 31(3): 11-14 (in Chinese)
- 刘佳, 王旭东. 2020. 一种利用 FY-2 卫星数据的台风中心定位方法. *遥感信息*, 35(2): 25-29. Liu J, Wang X D. 2020. A method of typhoon center positioning using FY-2 satellite data. *Remote Sens Inf*, 35(2): 25-29 (in Chinese)
- 陆风, 张晓虎, 陈博洋等. 2017. 风云四号气象卫星成像特性及其应用前景. *海洋气象学报*, 37(2): 1-12. Lu F, Zhang X H, Chen B Y, et al. 2017. FY-4 geostationary meteorological satellite imaging characteristics and its application prospects. *J Mar Meteor*, 37(2): 1-12 (in Chinese)
- 王晓霞. 2020. 基于多源卫星数据的台风定位方法比较研究 [D]. 北京: 国家海洋环境预报中心. Wang X X. 2020. Comparative analysis on typhoon center location methods based on multi-source satellite data [D]. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center (in Chinese)
- 王筱. 2017. 基于卫星云图与微波散射计的台风中心定位研究 [D]. 杭州: 杭州师范大学. Wang X. 2017. Positioning research of typhoon center based on satellite images and microwave scatterometer [D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University (in Chinese)
- 瞿建华, 张琅, 陆其峰等. 2019. 基于 ERA5 的快速辐射传输模式与 FY-4A 成像仪观测结果的偏差分析. *气象学报*, 77(5): 911-922. Qu J H, Zhang L, Lu Q F, et al. 2019. Characterization of bias in FY-4A advanced geostationary radiation imager observations from ERA5 background simulations using RTTOV. *Acta Meteor Sinica*, 77(5): 911-922 (in Chinese)
- 张志清, 陆风, 方翔等. 2017. FY-4 卫星应用和发展. *上海航天*, 34(4): 8-19. Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al. 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite. *Aerosp Shanghai*, 34(4): 8-19 (in Chinese)
- Bieliński T. 2020. A parallax shift effect correction based on cloud height for geostationary satellites and radar observations. *Remote Sens*, 12(3): 365
- Hunt W H, Winker D M, Vaughan M A, et al. 2009. CALIPSO lidar description and performance assessment. *J Atmos Ocean Technol*, 26(7): 1214-1228
- Knapp K R, Kruk M C, Levinson D H, et al. 2010. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone data. *Bull Amer Meteor Soc*, 91(3): 363-376
- Li J, Wang P, Han H J, et al. 2016. On the assimilation of satellite sounder data in cloudy skies in numerical weather prediction models. *J Meteor Res*, 30(2): 169-182
- Li S M, Sun D L, Yu Y Y. 2013. Automatic cloud-shadow removal from flood/standing water maps using MSG/SEVIRI imagery. *Int J Remote Sens*, 34(15): 5487-5502
- Li X, Zou X L, Zhuge X Y, et al. 2020. Improved Himawari-8/AHI radiance data assimilation with a double cloud detection scheme. *J Geophys Res: Atmos*, 125(13): e2020JD032631
- Liu C, Yang S, Di D, et al. 2021. A machine learning-based cloud detection algorithm for the Himawari-8 spectral image. *Adv Atmos Sci*, doi: 10.1007/s00376-021-0366-x
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western north Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration. *Adv Atmos Sci*, 38(4): 690-699
- Mikuš P, Mahović N S. 2013. Satellite-based overshooting top detection methods and an analysis of correlated weather conditions. *Atmos Res*, 123: 268-280
- Min M, Wu C Q, Li C, et al. 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series. *J Meteor Res*, 31(4): 708-719
- Putra R M, Saputro A H, Arazak L, et al. 2019. Automatic detection of volcanic ash from Himawari-8 satellite using artificial neural network. *AIP Conf Proc*, 2202(1): 020112
- Vicente G A, Scofield R A, Menzel W P. 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(9): 1883-1898
- Vicente G A, Davenport J C, Scofield R A. 2002. The role of orographic and parallax corrections on real time high resolution satellite rainfall rate distribution. *Int J Remote Sens*, 23(2): 221-230
- Wang X, Min M, Wang F, et al. 2019. Intercomparisons of cloud mask products among Fengyun-4A, Himawari-8, and MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 57(11): 8827-8839
- Winker D M, Vaughan M A, Omar A, et al. 2009. Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms. *J Atmos Ocean Technol*, 26(11): 2310-2323
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bull Amer Meteor Soc*, 98(8): 1637-1658