

风云三号双星联合反演日平均OLR能力评估

张婉春, 刘健, 徐娜, 陈林, 徐寒列

1. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

2. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

3. 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要: 大气顶射出长波辐射 (OLR) 是大气顶辐射能量平衡的重要分量。风云三号D星和E星 (FY-3D和FY-3E) 上搭载的中分辨率成像光谱仪 (MERSI) 均可用于OLR反演。为研究日变化特征对OLR日平均精度的影响, 基于美国Aqua CERES OLR瞬时观测数据, 采用等经纬度投影匹配统计方法, 分别对FY-3D和FY-3E MERSI瞬时OLR反演精度进行一致性比对。结果表明: 两颗星OLR反演精度基本一致, FY-3D和FY-3E MERSI OLR与Aqua CERES OLR相比, RMSE均在 $6\sim 7\text{ W/m}^2$; 相比于单颗星每日两次计算的日平均OLR, 基于两颗卫星每日四次观测计算的日平均OLR的精度提高 $3\sim 4\text{ W/m}^2$ 。因此, 利用两颗极轨气象卫星观测数据, 可更精确地反映OLR日变化特征。

关键词: 风云三号, 多星联合, 大气顶射出长波辐射, 日变化, 中分辨率成像光谱仪, 云和地球辐射能量系统中图分类号: P4/P2

引用格式: 张婉春, 刘健, 徐娜, 陈林, 徐寒列. 2024. 风云三号双星联合反演日平均OLR能力评估. 遥感学报, 28(10): 2600-2610
Zhang W, Liu J, Xu N, Chen L, Xu H L. 2024. Evaluation of daily mean OLR by combining FY-3 dual-satellites. National Remote Sensing Bulletin, 28(10): 2600-2610 [DOI: 10.11834/jrs.20243046]

1 引言

大气顶射出长波辐射 OLR (Outgoing Longwave Radiation) 是地球大气系统在大气顶向外空辐射出去的热辐射能量密度, 是地球辐射收支的重要组成部分 (Bowman 等, 2013; Lee 等, 2004; Taylor, 2012; Dewitte 和 Clerbaux, 2018)。OLR 反映云顶及下垫面的热辐射变化, 广泛应用于降水 (Liu 等, 2021; 柳苗和李栋梁, 2007)、台风、热带大气季节内振荡 MJO (Madden-Julian Oscillation) (Hu 和 Li, 2021; Kim 等, 2006; Chen 等, 2015; Kim 等, 2015)、厄尔尼诺—南方涛动 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) (Liu 等, 2020; Wang 等, 1999), 以及沃克环流等天气气候研究 (雷亚栋等, 2017; Wang 等, 2002; Rajab 等, 2018)。

根据卫星仪器特点, 估算 OLR 的方法可分为两类: 一是基于宽波段观测数据直接计算, 如 Terra/Aqua 卫星上的云和地球辐射能量系统 CERES

(Clouds and Earths Radiant Energy System) (Barkstrom 和 Wielicki, 1996)。该方法符合 OLR 物理意义, 通常被用做检验源评估其他卫星反演的 OLR。二是基于窄波段观测数据如美国国家海洋和大气管理局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的改进型甚高分辨率扫描辐射计 AVHRR (Very High Resolution Radiometer), NOAA 高分辨率红外辐射探测仪 HIRS (High-resolution Infrared Sounder), 日本的第三代气象卫星“向日葵”-8 (Himawari-8) 先进向日葵成像仪 AHI (Advanced Himawari Imager), 以及风云三号 (FY-3) 的可见光红外扫描辐射计 VIRR (Visible and Infrared Radiometer) 和风云二号 (FY-2) 的扫描辐射计 VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) 等, 经反演模式估算 OLR (Ohning 等, 1984; Clerbaux 等, 2020; Lee 等, 2007; Schreck 等, 2018; Kim 和 Lee, 2019; Kim 等, 2018; Zhan 等,

收稿日期: 2023-02-21; 预印本: 2024-03-27

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFC2803300, 2021YFC2803303); 风云卫星应用先行计划项目 (编号: FY-APP-2021.0505)

第一作者简介: 张婉春, 研究方向为大气辐射参数反演与应用。E-mail: zhangwc@cma.gov.cn

通信作者简介: 刘健, 研究方向为大气物理与大气环境遥感。E-mail: liujian@cma.gov.cn

2022; Wu 和 Yan, 2011; 吴晓和白文广, 2017; 吴晓等, 2018; 张婉春等, 2020; Zhang等, 2022)。

辐射日均值通常可由每日多次观测的辐射算术平均值获得。辐射具有昼夜变化特征, 基于卫星瞬时观测计算的日平均值的代表性与卫星每日观测次数和观测时间间隔密切相关。静止气象卫星因其高时间分辨率(分钟到小时级)特点, 基于每日小时频次的瞬时观测数据计算的日平均数据可以较为真实地代表观测对象的日特征。极轨气象卫星时间分辨率较低(12 h), 基于单颗星每日两次观测计算获得的日平均值, 其代表性受到限制。对于晴空区, 基于一天两次的瞬时观测计算日平均值受到的影响因素较少, 计算结果具有一定的代表性。但对云区而言, 由于云特性变化较快, 导致计算获得的日平均OLR代表性受到制约。已有研究表明, 多颗卫星的联合使用可以改善OLR对日变化特征的表达, 提高日均OLR产品精度(Lee等, 2004; Clerbaux等, 2020; Schreck等, 2018)。NASA发布了一套美国地球观测系统Aqua卫星(下午星)和Terra卫星(上午星)CERES仪器联合的OLR气候数据集(Barkstrom和Wielicki, 1996)。NOAA发布了极轨与静止卫星观测联合反演的HIRS OLR气候数据集(Lee等, 2007)。

风云三号极轨气象卫星D星(FY-3D)和E星(FY-3E)分别于2017年11月和2021年7月发射, 其上分别搭载的中分辨率光谱成像仪MERSI(Medium Resolution Spectral Imager) II型和微光型(LL)仪器均可实现两个水汽通道和两个窗区通道组合的OLR反演算法。为研究日变化特征对OLR日平均精度的影响, 本研究基于MERSI OLR反演算法, 首先对FY-3D MERSI-II和FY-3E MERSI-LL单星反演OLR精度开展评估, 比较两颗星单星反演差异, 并对FY-3D和FY-3E单星日平均及两星联合计算的日平均OLR精度进行对比, 以期给出多星多时次日平均OLR的定量差异描述。

2 数据与方法

2.1 数据

本文使用的数据包含风云卫星OLR数据、Aqua CERES OLR数据和CERES日平均OLR数据。风云卫星数据包括FY-3D、FY-3E和FY-2H OLR数据。FY-3D卫星过境观测时间为地方时14:00和

2:00(下文均为地方时)左右, 其OLR产品区分白天夜间(由太阳天顶角确定)存储。FY-3E卫星过境观测时间为地方时17:30和5:30(下文均为地方时)左右, 其OLR产品区分升轨降轨存储。对2022年12月FY-3D和FY-3E基于瞬时轨道观测的OLR数据进行反演精度评估, 选用2022年6月至2022年12月FY-3D和FY-3E OLR数据进行OLR时间序列质量评估。FY-2H OLR覆盖范围55°E—155°E, -50°N—50°N, 等经纬度投影, 空间分辨率5 km(张婉春等, 2020)。2022年7月30日FY-2H小时OLR数据被用于分析OLR格点值日变化规律。

OLR数据质量评估主要是与同类卫星数据互比, 通过其相对稳定性和平均偏差来检验。本文采用Aqua卫星CERES仪器瞬时观测OLR数据(下文称Aqua CERES OLR), 对FY-3D/3E单星瞬时反演OLR进行检验。采用CERES日平均OLR数据(以下简称: CERES OLR)对2022年6月—2022年12月FY-3D/3E单星及双星联合日平均OLR(以下简称: FY-3D+E OLR)数据展开检验验证, CERES OLR在处理中融合了Aqua和Terra CERES及静止卫星信息(Dewitte和Clerbaux, 2018)。

2.2 OLR反演算法

选用FY-3D MERSI-II和FY-3E MERSI-LL载荷共有的7.2 μm、8.55 μm、10.8 μm和12.0 μm通道用于OLR反演。图1为MERSI OLR反演流程图。基于欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)资料, 整理出代表全球各种天气状况的2521条大气廓线, 包括晴空(云覆盖率为0)廓线859条, 有云(云覆盖率为100%)廓线901条, 部分云(云覆盖率介于0—100%)廓线761条。每条廓线包含温度、水汽混合比、O₃体积混合比、地面温度、地面气压等参数, 通过辐射传输模式计算其大气顶射出长波辐射通量和卫星通道辐射率 $I_{\nu_0}(\theta)$, 利用多元回归方法生成反演系数, 实现OLR估算(吴晓等, 2018; 吴晓和白文广, 2017)。

通道辐射率 $I_{\nu_0}(\theta)$ 由下式拟合得到:

$$I_{\nu_0}(\theta) = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} I_{\nu}(z, \theta) f(\nu) d\nu}{\int_{\nu_1}^{\nu_2} f(\nu) d\nu} \quad (1)$$

式中, ν_0 是通道中心波数, $f(\nu)$ 是通道光谱响应函数, ν_1 、 ν_2 是通道起始波数。

大气顶射出长波辐射通量和 MERSI 参与计算通道辐射率多元拟合回归方程如下:

$$\begin{aligned} \text{OLR} = & a_0(\theta) + a_1(\theta)I_{7.2}(\theta) + a_2(\theta)I_{8.5}(\theta) + \\ & a_3(\theta)I_{10.8}(\theta) + a_4(\theta)I_{12}(\theta) + b_1(\theta)I_{7.2}^{0.5}(\theta) + \\ & b_2(\theta)I_{8.5}^{0.5}(\theta) + b_3(\theta)I_{10.8}^2(\theta) + b_4(\theta)I_{12}^2(\theta) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为统计回归系数, θ 是卫星天顶角。FY-3D MERSI-II 和 FY-3E MERSI-LL 通道光谱响应函数有所不同(图2), 每颗卫星需按上式生成各自反演系数。

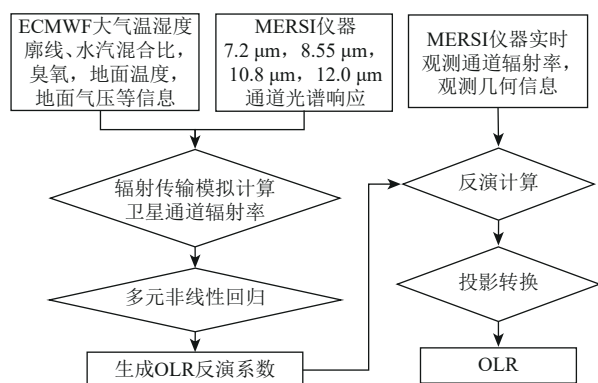


图1 MERSI反演OLR算法流程图

Fig. 1 Flow chart of MERSI OLR algorithm

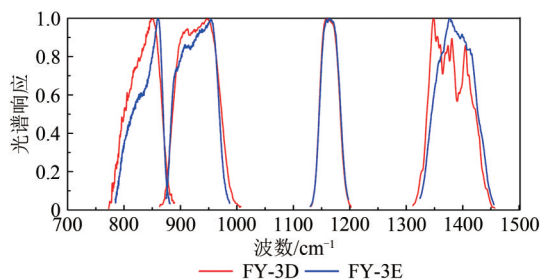


图2 FY-3D和FY-3E MERSI仪器光谱响应结果

Fig. 2 Spectral response function of FY-3D and FY-3E MERSI instruments

2.3 检验方法

FY-3反演OLR的检验涉及两部分: 一是对单星瞬时OLR进行检验; 二是对日平均OLR的精度展开讨论。

FY-3D/E和Aqua CERES瞬时OLR是轨道观测数据, FY-3D/E OLR星下点空间分辨率1 km, Aqua CERES OLR星下点空间分辨率20 km, 空间匹配采用将两种数据统一投影转换, 生成空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的全球OLR数据。时间匹配采用

两套数据观测时差小于30分钟的样本。Aqua与FY-3D过境时间相近, Aqua CERES OLR数据与FY-3D卫星MERSI OLR匹配数据在全球均有分布。FY-3E与Aqua观测时间的差异决定了两者间数据时空匹配后得到匹配样本集中在南北半球高纬度区域。为方便FY-3D与FY-3E间OLR比对, 选择可同时与Aqua相匹配的南北半球高纬地区。

FY-3和CERES日平均OLR数据均为等经纬度投影, 但空间分辨率不同。为匹配空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ CERES OLR, 将FY-35 km空间分辨率的日平均OLR通过求算术平均方法处理为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。检验指标包括计算均方根误差(RMSE)、相关系数以及平均偏差(Bias)。

3 OLR精度检验

3.1 FY-3 MERSI瞬时观测OLR

选取2022年12月FY-3D和FY-3E瞬时观测MERSI OLR数据, 与Aqua CERES OLR瞬时OLR对比进行反演精度评估, 评估结果如图3所示。图3(a)(b)分别是南北纬 60° 以上区域FY-3D与Aqua CERES OLR匹配样本统计, 其RMSE分别为 7.151 W/m^2 和 7.03 W/m^2 , 相关系数为0.95, 平均偏差约为 -5 W/m^2 。图3(c)(d)分别是南北纬 60° 以上区域FY-3E与Aqua CERES OLR匹配样本统计, 其RMSE分别为 7.385 W/m^2 和 7.346 W/m^2 , 相关系数为0.96。由图4可见FY-3D和FY-3E OLR值分布在 $100\text{--}250 \text{ W/m}^2$, FY-3D和FY-3E OLR间偏差接近正态分布, FY-3D OLR小于FY-3E OLR。除了载荷性能不完全一致的因素外, 观测时间的不同也会引起两颗星瞬时观测反演OLR间差异。总体来看, 与Aqua CERES OLR相比, FY-3D和FY-3E MERSI OLR, 数据质量一致性较好, FY-3D和FY-3E MERSI OLR数据精度相当。

3.2 FY-3日平均OLR

以2022年7月30日数据为例分析FY-3日均OLR精度。按照观测时间, 分别给出2022年7月30日FY-3E降轨(图5(a), 地方时05:30)、FY-3D白天(图5(b), 地方时14:00)、FY-3E升轨(图5(c), 地方时17:30)和夜间FY-3D(图5(d), 地方时02:00)等4个时刻OLR全球分布图。

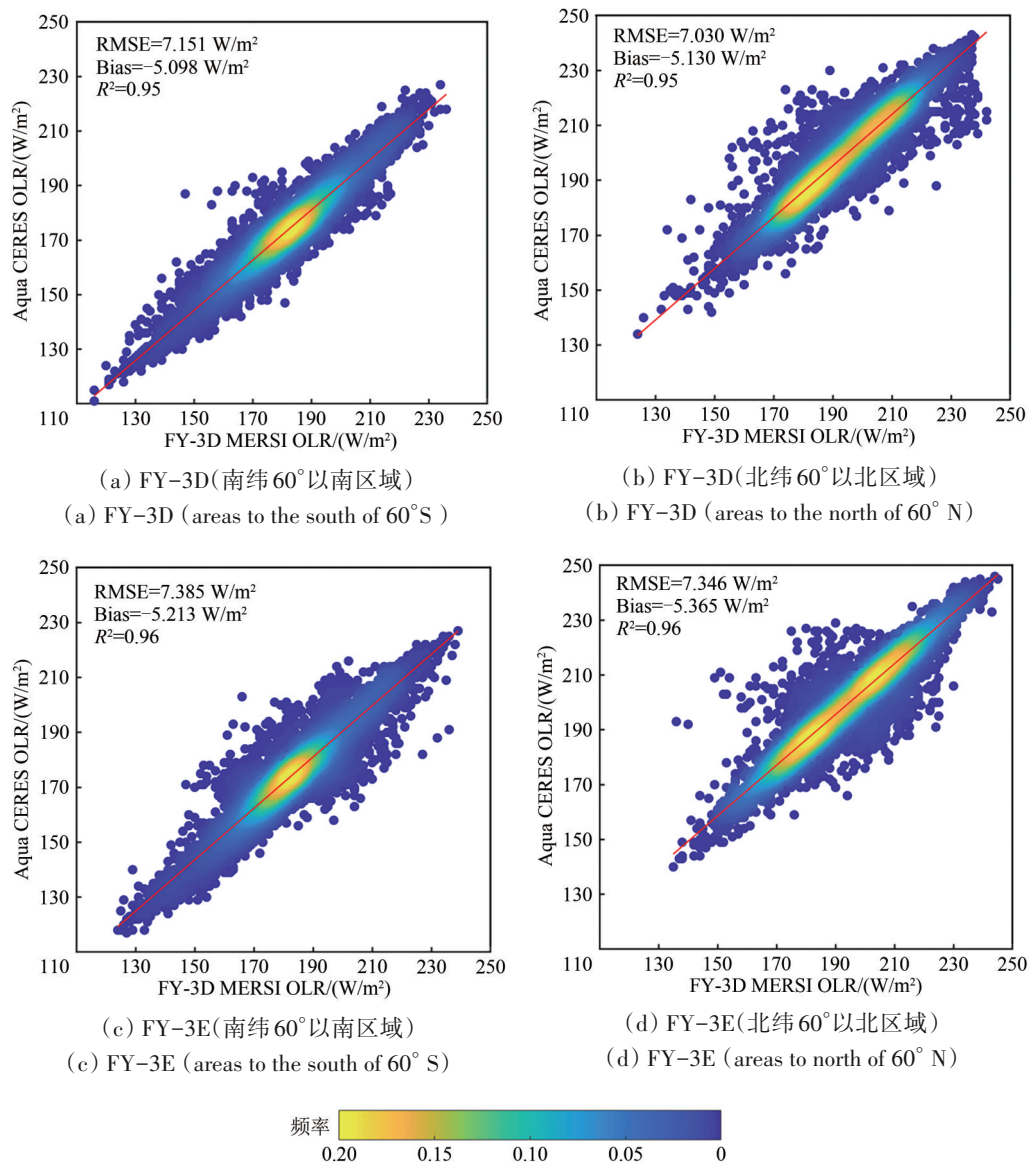


图3 2022年12月FY-3D、FY-3E MERSI与Aqua CERES瞬时OLR对比检验

Fig.3 Validation of FY-3D、FY-3E MERSI OLR compared with Aqua CERES instantaneous OLR in December, 2022

FY-3D以太阳天顶角区分白天夜间，对于极昼和极夜区域不能完全覆盖。由图5(b)可见：在太阳辐射驱动下，地球向外发射的长波辐射具有日变化特征，下午14时观测OLR整体偏高，尤其在低纬区域，部分区域超过300 W/m²。由图5(d)可见：夜间同一区域的OLR值偏低，大多分布在260—280 W/m²。此外，由于早晨和傍晚大气活动相对较弱，该时段FY-3E OLR分布(图5(b)和(c))特征介于中午(图5(a))和午夜(图5(d))之间。

图5展示了OLR具有较为明显的日变化特征。其中，单颗极轨卫星日平均OLR由每日两次瞬时

观测求算术平均得到。可见：无云条件下可以较好地代表OLR的日平均状态，在对流活跃的低纬地区，由于云和水汽的快速无规则运动，导致OLR的波动较大，使得单颗极轨卫星每天两次观测的平均值不能准确描述OLR日变化特征。2022年7月30日FY-3D和FY-3E单星及双星联合计算日平均OLR与CERES OLR的进行比对的结果如图6和表1所示。由图6(e)可见：FY-3D和FY-3E双星计算的日平均OLR与CERES OLR差值较FY-3D或FY-3E单星计算的日平均OLR与CERES OLR的差值(图6(a)(c))均有不同程度的减小，30°S以北区域偏差减小效果明显。区域统计结果

同样显示, 双星日平均 OLR 与 CERES 日平均 OLR 散点密度图 (图 6 (f)) 拟合线的聚拢程度优于 FY-3D 或 FY-3 单星 (图 6 (b) (d)), 双星计算

的日平均 OLR 与 CERES OLR 间 RMSE 和相关系数均好于单星计算的日均值 (表 1)。

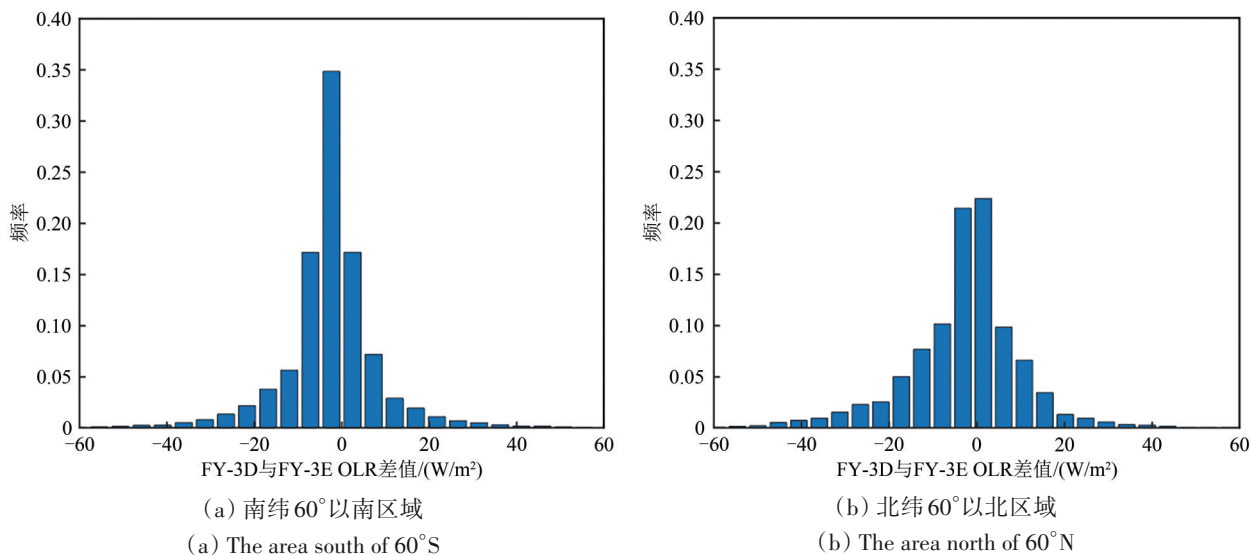


图 4 2022 年 12 月不同区域 FY-3D 与 FY-3E 瞬时 OLR 差值频率变化比较

Fig.4 Comparison of frequency variation in instantaneous OLR differences between FY-3D and FY-3E in different regions in December 2022

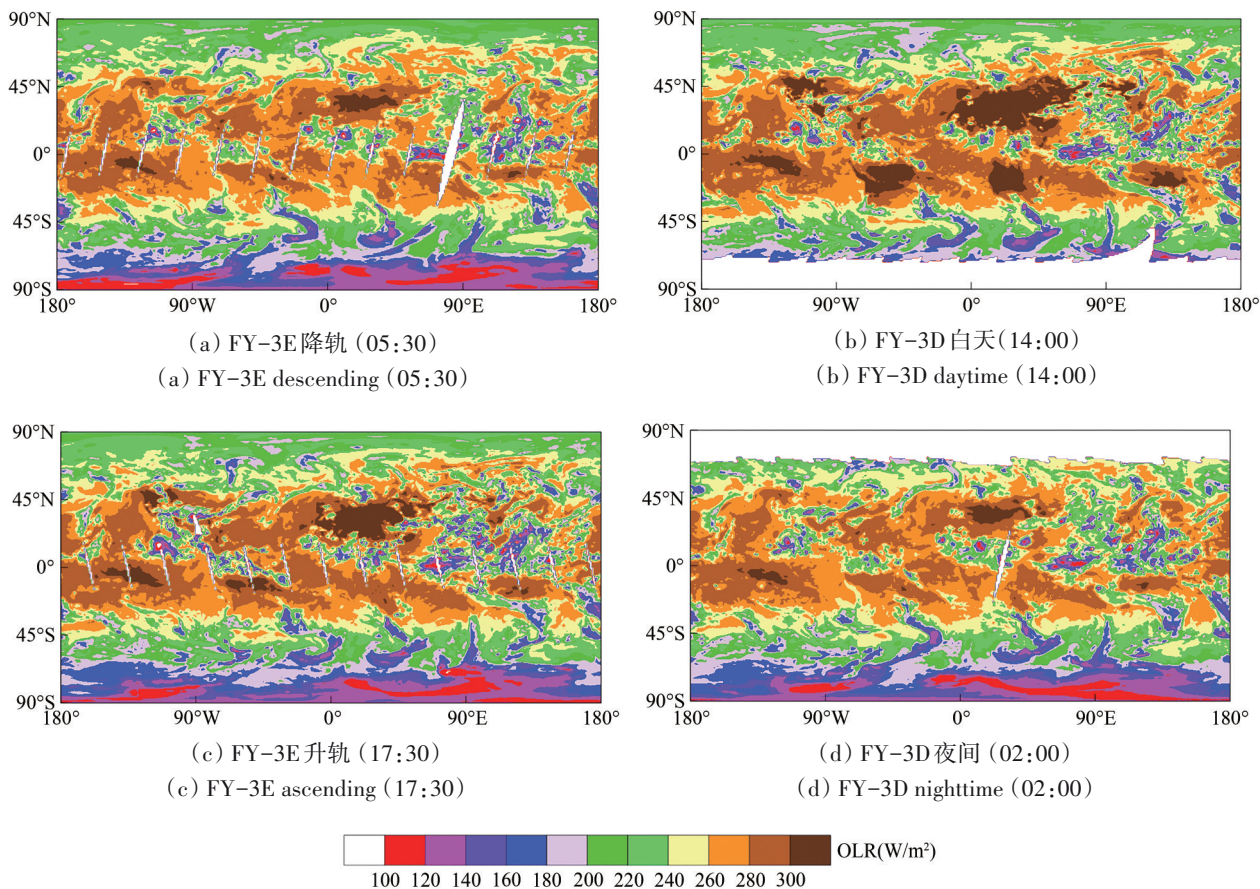


图 5 2022 年 7 月 30 日 FY-3 不同观测时间 MERSI 瞬时 OLR

Fig. 5 FY-3 MERSI instantaneous OLR at different time on July 30, 2022

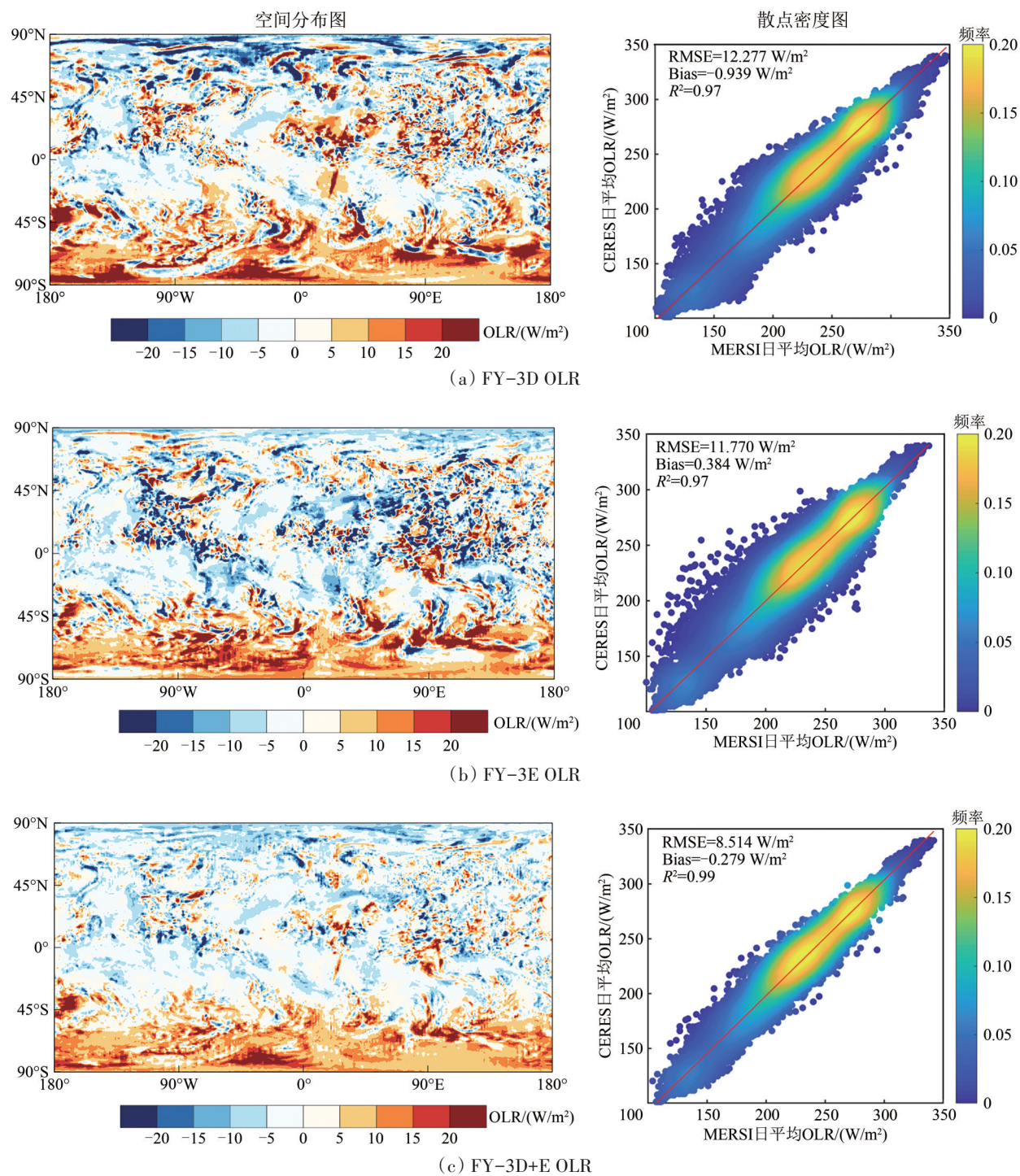


图6 2022年7月30日FY-3与CERES日平均OLR差值对比

Fig. 6 Comparison of the deviations between FY-3 and CERES daily average OLR on July 30, 2022

为进一步说明云对日均OLR计算的影响，选取同一天的FY-2H静止气象卫星OLR。FY-2H每日24次观测，其基于小时的日均可认为真实代表日均OLR特征。图7是2022年7月30日FY-2H、FY-3D和FY-3E瞬时OLR在晴空格点[30°N, 117°E]和有不同程度的短期云覆盖或对流天气过

程格点[-26°N, 135°E]和[24°N, 129°E]上随时间变化情况。图7中黑线代表FY-2H小时OLR格点值，红点分别是FY-3D和FY-3E瞬时OLR格点值。对于晴空点，FY-2H显示了晴空条件下随日照变化的OLR日变化特征。FY-3D观测时间对应有一天中OLR的高低值，基于FY-3D的日均

OLR 与 FY-2H 日均 OLR 较为贴合 (表 2)。FY-3E 观测时间缺少了 OLR 最值时刻, 因此 FY-3E 日均 OLR 与 FY-2H OLR 的差异较大。有云情况下, FY-3D 和 FY-3E 两颗单星的 OLR 日均值与 FY-2H 日均值均有显著差异。其中 $[-26^{\circ}\text{N}, 135^{\circ}\text{E}]$ 格点上 FY-3D 观测的两个时刻 OLR 处于一天中的两个高值时段, 反映在日均值上, FY-3D OLR 日均值明显高于 FY-2H (图 7 (b), 表 2)。而 $[24^{\circ}\text{N}, 129^{\circ}\text{E}]$ 格点 (图 7 (c)), FY-3D 与 FY-3E 的观测时段 OLR 均处于一天当中 OLR 相对高值时段,

两颗星的日均值差异不大, 而与 FY-2H 相比, 出现明显高估 (表 2)。

表 1 2022 年 7 月 30 日 FY-3 日平均 OLR 与 CERES OLR 比对结果

Table 1 Comparison of FY-3 daily mean OLR with CERES OLR on July 30, 2022			
卫星	RMSE/(W/m ²)	相关系数	平均偏差/(W/m ²)
FY-3D	12.277	0.969	0.940
FY-3E	11.770	0.972	-0.384
FY-3D+E	8.514	0.986	0.279

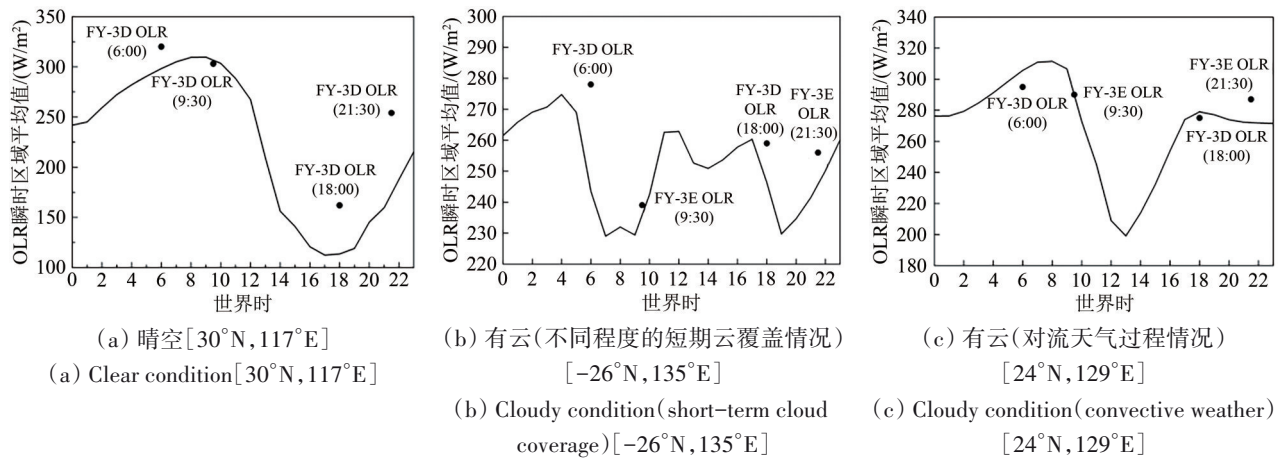


图 7 2022 年 7 月 30 日 FY-2H、FY-3D 和 FY-3E 在晴空及不同程度的短期云覆盖或对流天气过程的瞬时 OLR 分布
Fig. 7 Scenario analyses of FY-2H, FY-3D and FY-3E instantaneous OLR observations on clear and cloudy or convective weather conditions on July 30, 2022

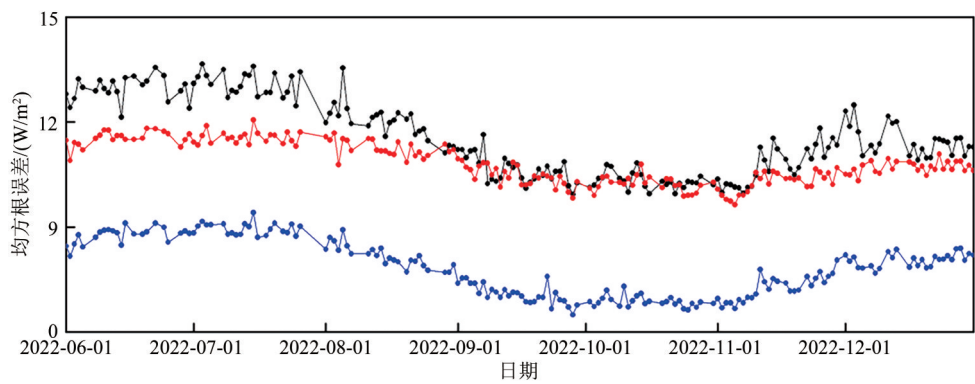
表 2 2022 年 7 月 30 日不同天气情况下 FY-3 日平均 OLR 值统计

Table 2 Statistics of daily mean OLR calculated in different scenarios on July 30, 2022			
卫星	OLR		
	晴空	有云(不同程度的短期云覆盖情况)	有云(对流天气过程情况)
FY-2H	223.06	252.10	270.32
FY-3D	241.00	268.50	285.00
FY-3E	278.50	247.50	288.50
FY-3D+E	259.75	258.00	286.75

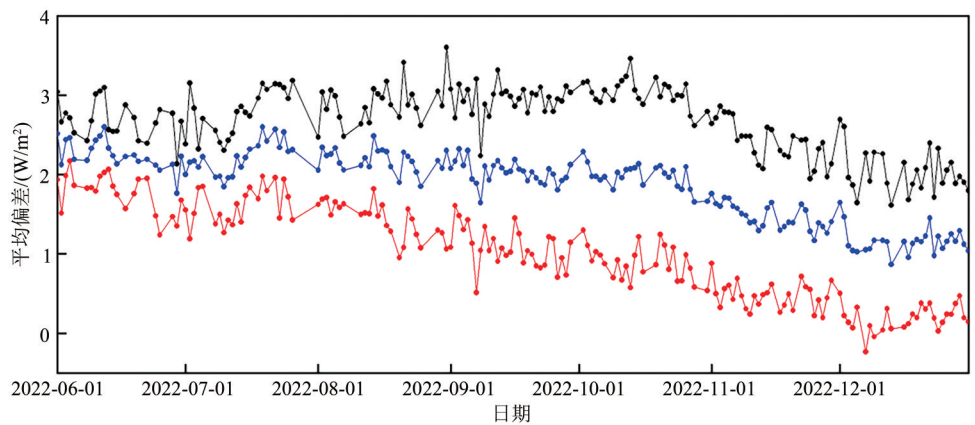
为了讨论不同季节的日变化特征差异, 统计 2022 年 6 月—2022 年 12 月期间全球区域 FY-3D、FY-3E 以及两星联合日平均 OLR 与 CERES 日平均 OLR 的 RMSE (图 8 (a)) 和 Bias (图 8 (b))。可见: FY-3D 单星日平均 OLR 的 RMSE 在 10—14 W/m², Bias 在 2—4 W/m², FY-3E RMSE 在 10—12 W/m², Bias 在 0—2 W/m², 双星联合日平均 OLR 的 RMSE

在 7—9 W/m², Bias 在 1.5—2.5 W/m², 因此双星联合计算的日均 OLR 的 RMSE 与单星相比, 明显降低 3—4 W/m²。总体来看, 两星四时次联合日平均 OLR 可以一定程度上减小由于卫星观测时次少而引起的辐射日平均状态描述性差的问题。双星联合计算的日均 OLR 与 CERES 相比, 偏差大值区与探测目标低温区相吻合, 如云区和冬季的南北半球的高纬度区域 (图 8 和图 9)。图 8 显示 6—8 月, 单星和双星的 RMSE 值均呈现升高的趋势, 反映了夏季对流活动增强, 大气状态不稳定, 使得 OLR 的日变化增强, 利用单日低频次的 OLR 平均计算所得到的日均值的代表性有所降低。图 9 为 2022 年 6 月 1 日和 12 月 1 日的 FY-3 MERSI 联合反演日平均 OLR 与 CERES OLR 差值对比结果。可见: 6 月份为北半球夏季, 北半球陆地分布广泛, 地表对大气加热明显, 赤道及其以北区域对流活动旺盛, MERSI OLR 与 CERES OLR 相比北半球偏差较大, 且多以负偏差为主。南半球 30°S 以南的正偏差分

布均匀，南半球高纬处于冬季，探测目标温度较低，出现正偏差；12月份为北半球冬季，尽管全球大气活动较夏季稳定，偏差以大范围系统偏差为主，但在高纬区域同样出现正偏差。



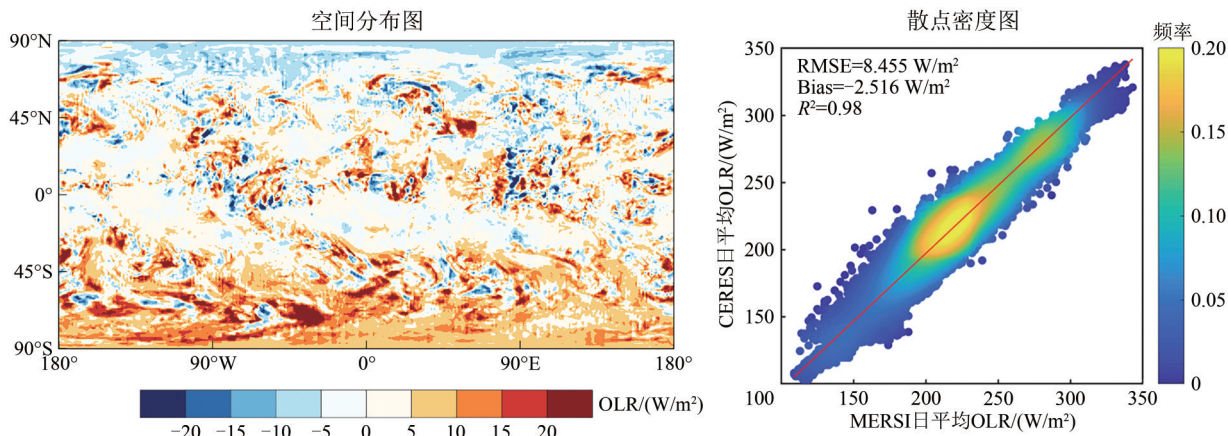
(a) MERSI 与 CERES 日平均 OLR 检验 RMSE 时序图
(a) Time series of RMSE of MERSI and CERES daily mean OLR



(b) MERSI 与 CERES 日平均 OLR 检验 Bias 时序图
(b) Time series of Bias of MERSI and CERES daily mean OLR

—●— FY-3D —●— FY-3E —●— FY-3D+E

图 8 2022 年 6—12 月 MERSI 与 CERES 日平均 OLR 检验 RMSE 时序图和 Bias 时序图
Fig. 8 Time series of RMSE and Bias of MERSI and CERES daily mean OLR during June to December 2022



(a) 2022 年 6 月 1 日
(a) June 1, 2022

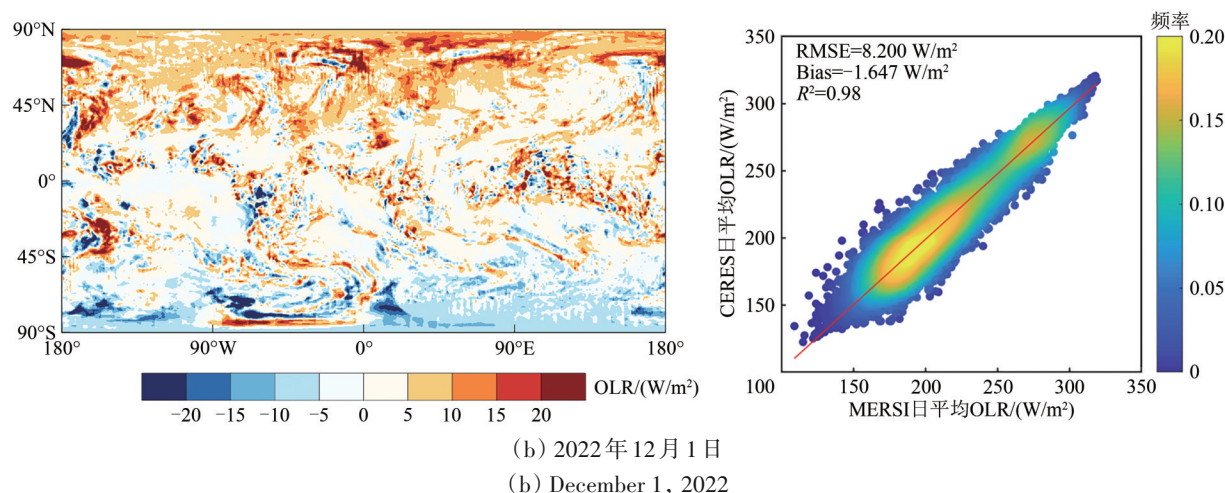


图9 FY-3D+E MERSI OLR与CERES OLR差值对比

Fig. 9 Comparison of the deviations between FY-3D+E MERSI and CERES daily mean OLR

4 结 论

本文在介绍风云卫星 MERSI OLR 反演算法的基础上, 首先分析 FY-3D 和 FY-3E 卫星瞬时轨道 OLR 反演精度, 进而讨论 FY-3D 和 FY-3E 双星联合计算对日平均 OLR 计算精度的影响。主要结论如下:

(1) 尽管 FY-3D 和 FY-3E 两颗卫星的观测时间有所不同, MERSI 仪器的性能存在差异, 但两颗卫星的 OLR 反演能力相当。

(2) 利用 FY-3D 和 FY-3E 两颗星四次观测数据计算日均 OLR 较单颗星计算日均 OLR 精度有所提升。双星获取的日均 OLR 较单星计算的日均 OLR, 与 CERES 日均 OLR 相比, 均方根误差有明显改进。

本文仅针对 FY-3D/3E 与 CERES 在 OLR 反演数据层面开展了一致性比对, 比对过程涉及了数据间的时空匹配, 不同的匹配策略以及重投影、重采样方案等均会对结果有所影响。无论基于风云三号单星还是双星计算得到的日均 OLR, 对于低温目标的反演值与 CERES OLR 的反演差异高于高温目标。其中原因是多方面的, 可能是由于云盖变化的影响, 也有可能是观测仪器性能引发的, 或者是在建立统计回归模型时所使用的 ECMWF 廓线在南北两极的代表性和准确性带来的引入误差。多颗且具有一定瞬时观测间隔的极轨卫星联合应用, 可有效提高云区日均 OLR 的计算精度。如何基于辐射传输模式的仿真计算开展反

演精度评估以及针对云区, 如何构建 OLR 日变化模型深化日均 OLR 的计算方法, 有待进一步的研究。

志 谢 衷心感谢美国 NASA 兰利研究中心大气科学数据中心提供的 CERES 数据 (<https://ceres.larc.nasa.gov/>)。

参考文献(References)

- Barkstrom B R and Wielicki B A. 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) algorithm theoretical basis document. Atmospheric Sciences Division, NASA Langley Research center, Hampton, Virginia. 1-97
- Bowman K W, Shindell D T, Worden H M, Lamarque J F, Young P J, Stevenson D S, Qu Z, De La Torre M, Bergmann D, Cameron-Smith P J, Collins W J, Doherty R, Dalsøren S B, Faluvegi G, Folberth G, Horowitz L W, Josse B M, Lee Y H, Mackenzie I A, Myhre G, Nagashima T, Naik V, Plummer D A, Rumbold S T, Skeie R B, Strode S A, Sudo K, Szopa S, Voulgarakis A, Zeng G, Kulawik S S, Aghedo A M and Worden J R. 2013. Evaluation of ACCMIP outgoing longwave radiation from tropospheric ozone using TES satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(8): 4057-4072 [DOI: 10.5194/acp-13-4057-2013]
- Chen X, Li C Y and Tan Y K. 2015. The influence of El Niño on MJO over the equatorial pacific. *Journal of Ocean University of China*, 14(1): 1-8 [DOI: 10.1007/s11802-015-2381-y]
- Clerbaux N, Akkermans T, Baudrez E, Velazquez Blazquez A, Moutier W, Moreels J and Aebi C. 2020. The climate monitoring SAF outgoing longwave radiation from AVHRR. *Remote Sensing*, 12(6): 929 [DOI: 10.3390/rs12060929]
- Dewitte S and Clerbaux N. 2018. Decadal changes of earth's outgoing longwave radiation. *Remote Sensing*, 10(10): 1539 [DOI: 10.

- 3390/rs10101539]
- Hu F and Li T M. 2021. Effects of MJO vertically tilted structure on its phase speed from the moisture mode theory perspective. *Journal of Climate*, 34(11): 4505-4520 [DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0732.1]
- Kim B M, Lim G H and Kim K Y. 2006. A new look at the midlatitude-MJO teleconnection in the Northern Hemisphere winter. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(615): 485-503 [DOI: 10.1256/qj.04.87]
- Kim B Y and Lee K T. 2019. Using the himawari-8 ahi multi-channel to improve the calculation accuracy of outgoing longwave radiation at the top of the atmosphere. *Remote Sensing*, 11(5): 589 [DOI: 10.3390/rs11050589]
- Kim B Y, Lee K T, Jee J B and Zo I S. 2018. Retrieval of outgoing longwave radiation at top-of-atmosphere using Himawari-8 AHI data. *Remote Sensing of Environment*, 204: 498-508 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.006]
- Kim D, Ahn M S, Kang I S and Del Genio A D. 2015. Role of long-wave cloud-radiation feedback in the simulation of the Madden-Julian oscillation. *Journal of Climate*, 28(17): 6979-6994 [DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00767.1]
- Lee H T, Gruber A, Ellingson R G and Laszlo I. 2007. Development of the HIRS outgoing longwave radiation climate dataset. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(12): 2029-2047 [DOI: 10.1175/2007JTECHA989.1]
- Lee H T, Heidinger A, Gruber A and Ellingson R G. 2004. The HIRS outgoing longwave radiation product from hybrid polar and geosynchronous satellite observations. *Advances in Space Research*, 33(7): 1120-1124 [DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00750-6]
- Lei Y D, Zhang F, Yang Q, Zhang J X, Jiang L and Liu R Q. 2017. Long-term memory behaviors for outgoing longwave radiation in the Tropics. *Journal of Tropical Meteorology*, 33(3): 426-432 (雷亚栋, 张峰, 杨全, 张敬昕, 蒋磊, 刘仁强. 2017. 热带地区出射长波辐射的长程持续性研究. *热带气象学报*, 33(3): 426-432) [DOI: 10.16032/j.issn.1004-4965.2017.03.013]
- Liu J, Da Y Q, Li T M and Hu F. 2020. Impact of ENSO on MJO pattern evolution over the maritime continent. *Journal of Meteorological Research*, 34(6): 1151-1166 [DOI: 10.1007/s13351-020-0046-2]
- Liu L, Zhang W C, Chen W, Wu R G and Wang L. 2021. Evaluation of FY-3B reprocessed OLR data in the Asian—Australian monsoon region during 2011-2019: comparison with NOAA OLR. *Journal of Meteorological Research*, 35(6): 964-974 [DOI: 10.1007/s13351-021-1086-y]
- Liu M and Li D L. 2007. Change characteristic and correlation of OLR and precipitation over east Qinghai-Xizang Plateau in rainy season. *Plateau Meteorology*, 26(2): 249-256 (柳苗, 李栋梁. 2007. 青藏高原东部雨季OLR与降水变化特征及相关分析. *高原气象*, 26(2): 249-256) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0534.2007.02.005]
- Ohring G, Gruber A and Ellingson R. 1984. Satellite determinations of the relationship between total longwave radiation flux and infrared window radiance. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(3): 416-425 [DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<0416:SDOTRB>2.0.CO;2]
- Rajab J M, Abdulfattah I S, Mossa H A and Sleeman S Y. 2018. Spatial and temporal distributions of outgoing longwave radiation over Iraq: 2007-2016. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 454: 012030 [DOI: 10.1088/1757-899X/454/1/012030]
- Schreck C J III, Lee H T and Knapp K R. 2018. HIRS outgoing longwave radiation—Daily climate data record: application toward identifying tropical subseasonal variability. *Remote Sensing*, 10(9): 1325 [DOI: 10.3390/rs10091325]
- Taylor P C. 2012. Tropical outgoing longwave radiation and longwave cloud forcing diurnal cycles from CERES. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(12): 3652-3669 [DOI: 10.1175/JAS-D-12-088.1]
- Wang C Z, Weisberg R H and Virmani J I. 1999. Western Pacific inter-annual variability associated with the El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C3): 5131-5149 [DOI: 10.1029/1998JC900090]
- Wang P H, Minnis P, Wielicki B A, Wong T and Vann L B. 2002. Satellite observations of long-term changes in tropical cloud and outgoing longwave radiation from 1985 to 1998. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 37-1-37-4 [DOI: 10.1029/2001GL014264]
- Wu X and Bai W G. 2017. Development of nonlinear regression model to estimate OLR based on FY-3/IRAS. *Journal of Applied Meteorological Science*, 28(2): 189-199 (吴晓, 白文广. 2017. 基于FY-3/IRAS利用非线性模式反演OLR. *应用气象学报*, 28(2): 189-199) [DOI: 10.11898/1001-7313.20170206]
- Wu X, Bai W G and Zhang W C. 2018. Improved FY-3B OLR retrieval model and its application effect. *Meteorological Monthly*, 44(6): 844-849 (吴晓, 白文广, 张婉春. 2018. 改进的FY-3B/VIRR OLR反演模式及其应用效果. *气象*, 44(6): 844-849) [DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.012]
- Wu X and Yan J J. 2011. Estimating the outgoing longwave radiation from the FY-3B satellite visible infrared radiometer Channel 5 radiance observations. *Chinese Science Bulletin*, 56(32): 3480-3485 [DOI: 10.1007/s11434-011-4686-6]
- Zhan C, Jiang Y Z, Chen Y, Miao Z H, Zeng X Y and Li J. 2022. A direct method for the estimation of top-of-atmosphere outgoing longwave radiation from Himawari-8/AHI data. *Remote Sensing*, 14(22): 5696 [DOI: 10.3390/rs14225696]
- Zhang W C, Liu J, Zhang P, Sun L, Xu H L, Wang Y J and Chen L. 2022. Evaluation of reprocessed Fengyun-3B global outgoing longwave radiation data: comparison with CERES OLR. *Journal of Meteorological Research*, 36(3): 417-428 [DOI: 10.1007/s13351-022-1132-4]
- Zhang W C, Xu X, Bai W G, Cao G Z, Sun L and Zhang P. 2020. The OLR estimation from FY2H VISSR data with an improved regression Model. *Meteorological and Environmental Sciences*, 43(3): 1-8 (张婉春, 吴晓, 白文广, 曹广真, 孙凌, 张鹏. 2020. 应用改进模式从FY2H卫星数据估算OLR. *气象与环境科学*, 43(3): 1-8) [DOI: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2020.03.001]

Evaluation of daily mean OLR by combining FY-3 dual-satellites

ZHANG Wanchun, LIU Jian, XU Na, CHEN Lin, XU Hanlie

1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081, China;

2. Fengyun Meteorological Satellite Innovation Center, Beijing 100081, China;

3. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: The Outgoing Longwave Radiation (OLR) of the top of the atmosphere is an important component of radiation energy balance. The FY-3D and FY-3E polar-orbiting meteorological satellites, launched in November 2017 and July 2021 respectively, carry the medium resolution spectral imager (MERSI) II and low light instruments. Both instruments can retrieve OLR using two water vapor channels and two window channels. In this study, on the basis of the introduction of the MERSI OLR inversion algorithm of the Fengyun satellite, the instantaneous OLR retrieval accuracy of FY-3D and FY-3E MERSI is compared by using the instantaneous observation data of Aqua CERES OLR. Comparison results show that the instantaneous OLR retrieval accuracy of FY-3D and FY-3E is basically the same as the instantaneous OLR data of Aqua CERES. The Root Mean Square Error (RMSE) of FY-3D and FY-3E MERSI OLR is between 6 and 7 W/m² compared with that of Aqua CERES OLR. This result reflects that although the performance of the MERSI instruments of the FY-3D and FY-3E satellites have differences, the OLR retrieval capabilities of the two satellites are comparable. The comparison results of the daily average OLR data based on CERES between the single and joint calculations of FY-3D and FY-3E show that the daily average OLR calculated on the basis of the four times of the two satellites per day is 3—4 W/m² higher than that calculated twice a day for a single satellite. The global daily average OLR data from June to December 2022 were selected as an example. Compared with the daily average OLR of CERES, the daily average OLR obtained by two FY-3 satellites is remarkably improved in comparison with the RMSE of the daily average OLR calculated by a single satellite. This result shows that the daily observation data of multiple polar-orbiting meteorological satellites can reflect the diurnal variation characteristics of OLR well. The comparison involves the spatiotemporal matching of data, reprojection, and resampling schemes affects the validation results. Compared with CERES, the difference between the retrieval OLR of the low-temperature target is higher than that of the high-temperature target regardless of the daily average OLR calculated on the basis of the single or double satellites of FY-3. The reasons for this are multifaceted and must be further analyzed. Research results show that the joint application of multiple polar-orbiting satellites with a certain instantaneous observation interval can effectively improve the calculation accuracy of the daily average OLR in the cloud area. However, how to construct the daily variation model of OLR and deepen the calculation method of the daily average OLR must be further studied.

Key words: FY-3, multi-satellites, outgoing longwave radiation, assessment, diurnal variation; medium resolution spectral imager, cloud and earth radiant energy system, cloud cover

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2803300, 2021YFC2803303); Fengyun Application Pioneering Project (No. FY-APP-2021.0505)