

梁进秋,申彦波,胡丽琴,等,2020. FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究[J]. 气象,46(12):1575-1585.  
Liang J Q, Shen Y B, Hu L Q, et al, 2020. Applicability of FY-4A surface solar irradiance products in the loess plateau of Shanxi [J]. Meteor Mon, 46(12):1575-1585 (in Chinese).

# FY-4A 地表太阳入射辐射产品在 山西高原的适用性研究\*

梁进秋<sup>1,2</sup> 申彦波<sup>1,3</sup> 胡丽琴<sup>4</sup> 吴林栋<sup>5</sup> 施占军<sup>2</sup>

1 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

2 山西省大同市气象局,大同 037010

3 中国气象局风能太阳能资源中心,北京 100081

4 国家卫星气象中心,北京 100081

5 山西省气象信息中心,太原 030002

**提 要:** 以山西高原为研究区域,利用区域内 3 个国家级气象站的逐分钟辐射观测数据,对 FY-4A 的地表太阳入射辐射产品质量进行对比检验。结果表明:该产品与地面观测数据的相关性很高,能够较好地反映气象因素变化对太阳辐射的影响;但总辐照度数值总体偏高,相对误差随地面观测总辐照度的升高而降低,早晚误差大,中午误差小;3 个站横向对比来看,年总辐射曝辐量越高,相对误差越小;由于 FY-4A 地表太阳入射辐射反演算法中太阳天顶角的临界值设为  $70^\circ$ ,导致全年白天无观测时次约占 1/3,且冬季多于夏季,使得冬季的月总辐射曝辐量偏低而夏季偏高。FY-4A 地表太阳入射辐射的上述特点基本都源自其反演算法或参数设置,因此具有普适性;由于相对误差呈现出较强的规律性,使得下一步对该产品进行订正、大幅降低误差水平成为可能。

**关键词:** FY-4A,地表太阳入射辐射产品,总辐照度,适用性

**中图分类号:** P422, P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.005

## Applicability of FY-4A Surface Solar Irradiance Products in the Loess Plateau of Shanxi

LIANG Jinqiu<sup>1,2</sup> SHEN Yanbo<sup>1,3</sup> HU Liqin<sup>4</sup> WU Lindong<sup>5</sup> SHI Zhanjun<sup>2</sup>

1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Datong Meteorological Office of Shanxi Province, Datong 037010

3 CMA Wind and Solar Energy Resources Centre, Beijing 100081

4 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

5 Shanxi Meteorological Information Centre, Taiyuan 030002

**Abstract:** In this paper, the Loess Plateau of Shanxi was selected as the research area, and the quality of FY-4A surface solar irradiance (SSI) was comparatively tested by using the minutely global irradiance data of three national meteorological stations in the region. The results show that SSI is highly correlated with ground observation data in Loess Plateau of Shanxi, which can better reflect the influence of meteorological factors on solar radiation. The global irradiance is generally high, and the relative error decreases with the

\* 国家重点研发计划(2018YFB1500901)和中国气象局“风云四号科研试验星专业气象服务应用示范系统”项目共同资助

2020 年 3 月 6 日收稿; 2020 年 10 月 26 日收修定稿

第一作者:梁进秋,主要从事太阳能资源应用研究. E-mail: dtliangjq@163.com

通讯作者:申彦波,主要从事太阳能资源及气象卫星应用研究. E-mail: shenyb@cma.gov.cn

increase of the global irradiance observed on the ground. The morning and evening errors are large but the noon errors are small. From the transverse comparison of Datong, Taiyuan and Houma stations, the higher the annual global radiation exposure, the smaller the relative errors. The critical value of sunset zenith angle is set at  $70^\circ$  in FY-4A SSI algorithm, resulting in about 1/3 of the whole year's non observed time in daytime. The total radiation exposed in winter is lower than that in summer, which makes the monthly global radiation exposure lower in winter but higher in summer. The above characteristics of SSI are basically derived from its algorithm or parameter settings, so it has universality. Due to the strong regularity of relative errors, it is possible to revise the data and reduce the error level substantially in the next step.

**Key words:** FY-4A, surface solar incident irradiance products, total irradiance, applicability

## 引 言

太阳辐射是地球上主要的能量来源,对地面太阳辐射的准确测量是气象、农业、建筑、太阳能发电等领域的重要基础(石广玉,2007)。长期以来,我国的国家级地面辐射观测站点始终保持在 100 个左右,为获取较高分辨率的空间分布,研究者往往采用地面观测的其他气象要素(如日照时数、气温等)推算地面太阳辐射(申彦波等,2014;申彦波,2017;王炳忠等,1980;王炳忠和申彦波,2012)或借助卫星遥感资料采用统计或物理方法反演各辐射要素(申彦波,2010;陈渭民等,2000;陈仁升等,2006),研究成果对支撑各领域的技术发展发挥了重要作用。但受限于地面气象站的数量或卫星遥感的科技发展水平,上述研究成果的时空分辨率往往不能完全满足各领域需求。

风云气象卫星资料在天气、气候、生态、环境等领域得到广泛应用,2014 年通过 ECMWF 的严格测试评估,标志着风云气象卫星部分仪器数据质量达到或接近国际先进水平(唐世浩等,2016)。风云四号系列首颗光学气象卫星(FY-4A)于 2016 年 12 月 11 日成功发射,搭载先进的静止轨道辐射成像仪(AGRI)、静止轨道干涉式红外探测器(GIIRS)、闪电成像仪(GLI)、空间环境监测仪器包(SEP),是世界上最先进的新一代静止气象卫星之一(Yang et al,2017;张志清等,2017),国家卫星气象中心于 2017 年 9 月开始稳定提供定量反演产品。地表太阳入射辐射是 FY-4A L2 定量反演产品之一,包括总辐射、水平面直接辐射、散射辐射等 3 个要素,空间分辨率为 4 km,时间分辨率可达 15 min(全天共 40 个观测时次,除每个整点时次的观测外,每 3 h 整点前后 15 min 各有一次观测),为进一步开展高

时空分辨率的地面太阳辐射相关研究提供了可能。

山西高原地处黄河中游、黄土高原东缘,居太行山之西,是典型的被黄土广泛覆盖的山地高原,地势东北高、西南低,是黄土高原的重要组成部分。山西高原属于暖温带半湿润大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥,也是黄河流域生态环境保护的重要区域。研究 FY-4A 遥感产品在山西高原的适用性,有利于获得该区域高时空分辨率、高精度的气象要素和生态环境指标等,而地表太阳入射辐射作为基础气象要素,在生态环境评价、太阳能资源开发、农业气候资源利用、建筑工程设计、交通气象服务以及气候与气候变化研究、地球辐射平衡研究等领域有很大的应用潜力。本文以分钟级的地面太阳辐射观测资料为基础,对山西高原区域 FY-4A 地表太阳入射辐射产品的适用性进行研究,分析其质量特点及误差产生原因,为下一步基于 FY-4A 遥感产品开展相关科学研究提供基础。

## 1 数据资料及处理方法

### 1.1 气象站总辐射观测数据

本文选取大同、太原和侯马 3 个国家级气象观测站作为山西高原的代表站,基于 3 个站观测的逐分钟总辐射数据分析 FY-4A 地表太阳入射辐射产品的适用性。3 个国家级气象站的空间分布如图 1 所示,其海拔自北向南依次降低(表 1),降水和日照特征也明显不同。近 30 年(1989—2018 年)大同、太原、侯马站年平均降水量分别为 384.6、431.2 和 489.9 mm,自北向南依次递增;3 个站年平均日照时数分别为 2692.5、2460.1、2054.3 h,自北向南依次递减。因此,虽然同处山西高原,但 3 个站的局地

地形和气候特征有明显差异,可以较全面地反映 FY-4A 地表太阳入射辐射产品的适用性。

国家级辐射观测站目前采用 TBQ-2 型总辐射表观测总辐照度,按照 GB/T 35231—2017(中国气象局,2017)要求(辐照度数据每分钟采样不低于 6 次)计算有效样本数的平均值,用 1 min 的平均值作为每分钟的辐照度。本文所用数据包括 3 个国家级气象站 2018 年全年整点时刻(北京时,下同)的 1 min 平均总辐照度,数据来源于山西省气象信息中心。

## 1.2 FY-4A 地表太阳入射辐射产品

FY-4A 的 AGRI 扫描圆盘范围如图 2 所示,标称图上的经纬度边界范围为:80.5667°N~80.5667°S,174.7166°E~24.1166°W,大约覆盖地球 1/3 区域。国家卫星气象中心 FY-4A 地表太阳入射辐射产品覆盖范围为全圆盘,无投影,空间分辨率为 4 km,时间分辨率一般为 1 h(最高可达 15 min),光谱范围为 0.2~5.0  $\mu\text{m}$ ;产品输出要素包括总辐照度、水平面直接辐照度、散射辐照度,有效测量范围为 0~1500  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。根据地面观测资料的收集情况,本文只对 FY-4A 总辐照度的适用性进行检验分析。

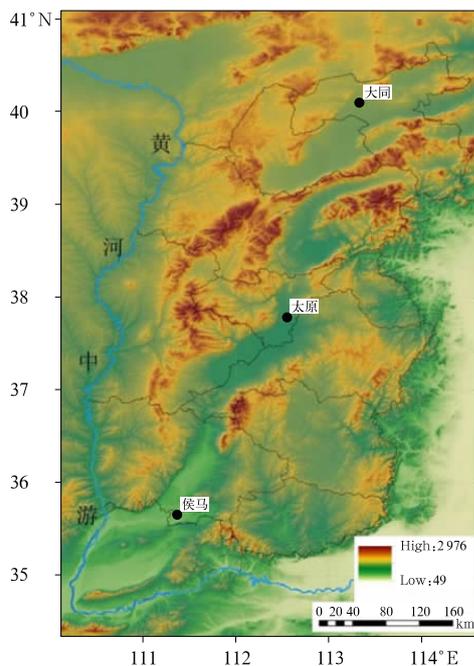


图 1 山西高原具备总辐射观测的国家级气象站分布  
Fig. 1 Distribution of national meteorological stations with radiation observation over the Loess Plateau of Shanxi

产品算法采用离散纵标法辐射传输软件包(吴北婴等,1999),在辐射传输计算的基础上,以 AGRI 短波范围多个反射通道的观测值作为输入及约束条件,反演得到瞬时地表太阳入射辐射值。算法在辐射传输计算过程中采用了一个垂直非均匀的平面平行理想大气模型,针对晴空大气状况,考虑的主要辐射过程包括:①水汽、臭氧等吸收性气体的吸收作用;②大气分子的瑞利散射作用;③气溶胶的多次散射和吸收作用;④地表和大气之间的多次反射作用。针对有云大气状况,除了上述 4 种辐射过程外,还需要考虑对地表太阳辐射影响最大的一种辐射物理过程——云滴的多次散射和吸收作用。目前,由单一的被动遥感手段难以准确获取取的所有宏观和微观特征信息,因此,产品算法借鉴了国际上同类算法的研究工作,在有云状况下引入云层为单层均匀水云的假定。此外,由于目前所采用的辐射传输软件包平面平行算法的局限性,当太阳天顶角大于 70°时,受地球曲率的影响,平面平行模式已不适用,因此在反演过程中,为保证计算结果的准确性,将太阳天顶角的临界值设为 70°,超过该临界值时,无辐照度产品输出。为对比分析 FY-4A 总辐照度适用性,本文以 3 个地面辐射观测站坐标为基准,从 FY-4A 圆盘图中匹配距离最近的像素点(坐标如表 1 所示),提取 3 个像素点 2018 年全年整点时刻瞬时总辐照度,数据来源于国家卫星气象中心。

在 FY-4A 地表太阳入射辐射反演算法中,太阳天顶角临界值的设置对数据的有效样本数影响较大。以 2018 年 6 月 20 日(晴天)为例,FY-4A 的总辐照度监测圆盘(图 2)显示,06 时(日出)和 18 时(日落)的扫描区域均未覆盖到山西高原,因此大同气象站的 FY-4A 总辐照度有效数据在当日是始于 07 时,终于 17 时(图 3)。而从图 3 中大同气象站地面观测总辐照度的时间变化曲线来看,地面观测数据是始于 05 时[由于环日辐射和散射辐射,比地外太阳辐射还早 1 h(王炳忠等,2018)],终于 19 时。由此,FY-4A 总辐照度的有效数据全天比地面观测少 4 个时次,全年因此所产生的 FY-4A 无观测时次一共 1461 个;此外,由于卫星姿态调整、数据传输等因素引起的缺测时次有 44 个。综合统计可知,大同气象站全年 FY-4A 总辐照度有效数据一共比地面观测少 1505 个时次,约占地面观测有效总时次的 1/3,春、夏、秋、冬季分别为 348、347、361 和 449 个,冬季明显高于其他季节。

FY-4A 卫星观测资料已逐渐投入业务运行,但

还没有对其观测资料偏差特征进行分析,如偏差分布特征、偏差主要来源以及影响因子等,为卫星资料更有效的应用提供基础条件(瞿建华等,2019);在检验卫星产品时,通常是采用空间和时间相匹配的探空观测来对卫星反演产品进行检验(李光伟等,

2018)。本文进行小时数据对比时,挑选 FY-4A 和地面观测同时具有有效数据(总辐照度 $>0$ )的时刻,3 个国家级站点整点时次有效样本数如表 1 所示。日、月、年总辐照量做对比时,各自按照实际有效数据时次进行累加。

表 1 山西高原 3 个国家级气象站及对应的 FY-4A 像素点地理信息  
Table 1 Geographic information of three national meteorological stations and their FY-4A pixel points over the Loess Plateau of Shanxi

站点	气象站 海拔/m	经度/ $^{\circ}$ E		纬度/ $^{\circ}$ N		全年整点时次 有效样本数/个
		气象站	FY-4A 像素	气象站	FY-4A 像素	
大同	1067.2	113.4167	113.4265	40.0833	40.0904	2892
太原	778.3	112.5833	112.5637	37.6167	37.6248	2929
侯马	433.8	111.3667	111.3690	35.6500	35.6735	3024

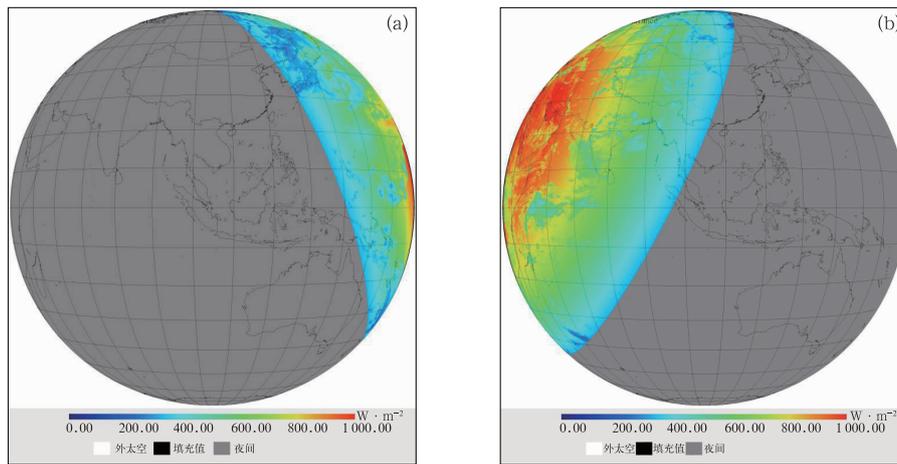


图 2 2018 年 6 月 20 日 06 时(a)和 18 时(b)FY-4A 总辐照度覆盖区域空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of global irradiance of FY-4A at 06:00 BT (a) and 18:00 BT (b) 20 June 2018

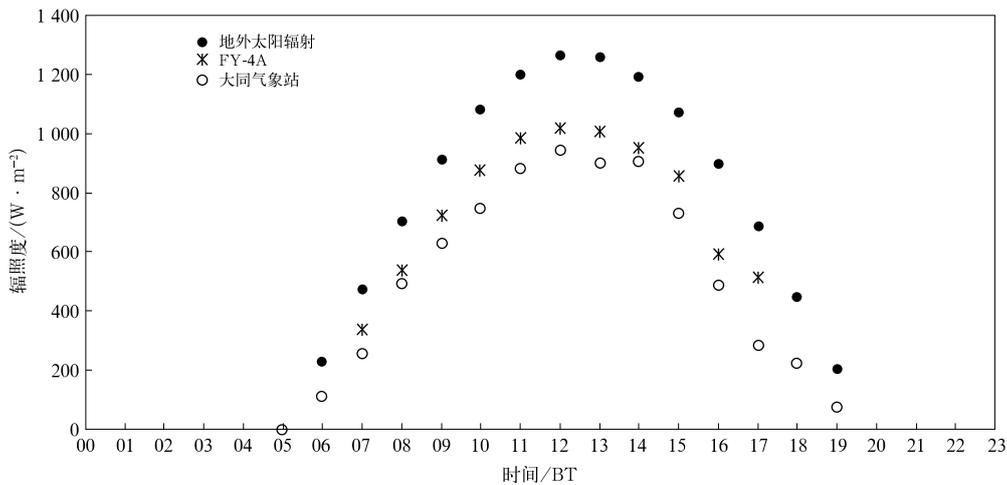


图 3 2018 年 6 月 20 日大同气象站整点地外太阳辐照度、FY-4A 总辐照度、地面观测总辐照度随时间变化  
Fig. 3 Hourly extraterritorial solar irradiance, FY-4A global irradiance and ground observation global irradiance at Datong Weather Station on 20 June 2018

## 2 检验结果分析

本文先以大同气象站为例,检验不同时间尺度下 FY-4A 的总辐照度产品质量与特性,进而横向对比 3 个国家级气象站的总辐照度特点,对 FY-4A 总辐照度产品在不同辐照度情况下的表现进行分析。FY-4A 产品质量检验方法和其他定量遥感产品一样,可以通过和地面实际观测或者国外同类遥感产品的交叉比对来进行(尹延通等,2017;胡菊旸等,

2017),使用的评价指标有均方根误差、相关系数、平均偏差以及绝对误差等,这些指标能够直接反映反演值和真值的差异(吴琼等,2020)。

### 2.1 整点瞬时总辐照度

#### 2.1.1 逐时资料

图 4 是 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 整点总辐照度随时间的变化曲线,图 5 给出了相应的全年整点地外太阳辐照度随时间变化(不含夜间零值)。从图中可以看出,地面观测主要反映气象因

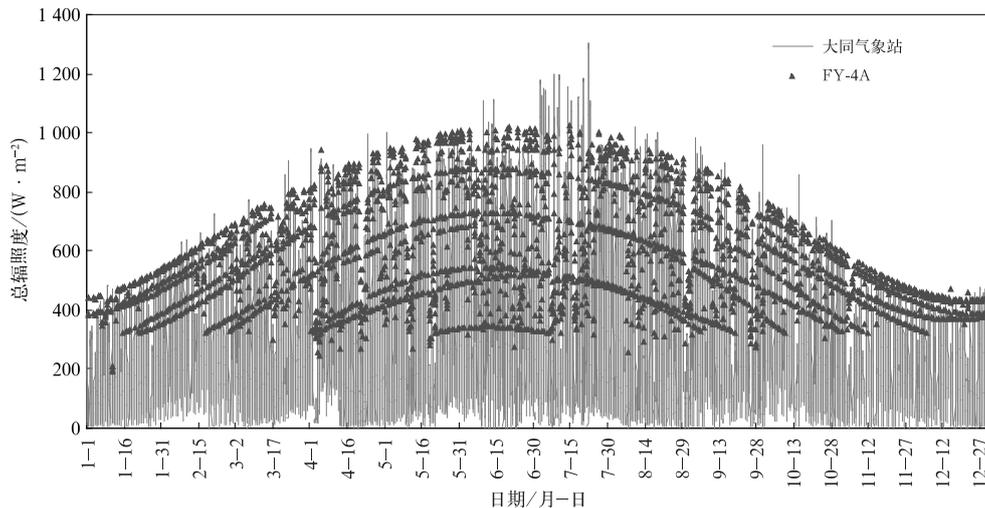


图 4 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 的整点总辐照度随时间变化  
Fig. 4 Temporal variation of hourly global irradiance from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

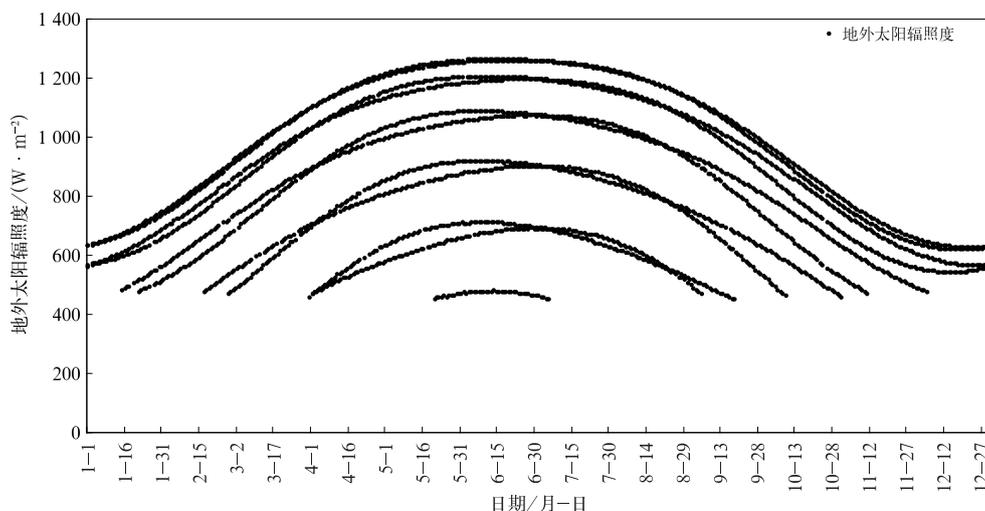


图 5 2018 年大同气象站整点地外太阳辐照度随时间变化  
Fig. 5 Temporal variation of hourly extraterritorial solar irradiance at Datong Weather Station in 2018

素变化的影响,而 FY-4A 的总辐照度变化则主要是基于地外太阳辐照度的变化,但同时在地面观测值下降时,也能同步波动下降,较好地反映气象因素变化对辐照度产生的影响。从数值范围看, FY-4A 的整点总辐照度最小值为  $187.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,最大值为  $1022.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,而地面观测的最小值为  $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,最大值达到  $1285 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,这也反映出 FY-4A 地表太阳入射辐射反演算法中太阳天顶角阈值设定对计算结果的影响。

图 6 给出了大同气象站 FY-4A 与地面观测整点总辐照度相关关系,从图中可以看出,两者的一致性很高,总体线性相关系数达到 0.863。

统计全年整点总辐照度发现,在相同样本下, FY-4A 的年平均值为  $585.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,大同气象站观测值为  $478.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,前者总体偏高 22.3%。进一步统计逐时相对误差分布可以看出(图 7),相对误差在 0~30% 的占比超过 50%,其中 10%~30% 占比最高,将近 30%,但不容忽视的是,相对误差在

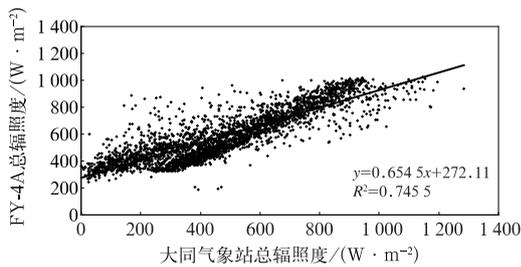


图 6 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 整点总辐照度相关关系

Fig. 6 Correlation between hourly global irradiance from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

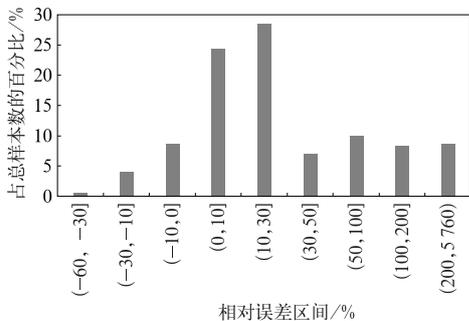


图 7 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 整点总辐照度相对误差区间分布

Fig. 7 Distribution of relative error interval of hourly global irradiance from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

200% 以上的情形也占有 8.6% 的比例,这对于 FY-4A 的年平均值偏高有较大贡献;而相对误差为负,也就是 FY-4A 总辐照度低于地面观测的情况,全年仅有 383 个时次,占总样本数的 13%,且负偏差越大,占比越低。由此可见,从总辐照度数值来看, FY-4A 明显偏高。

### 2.1.2 逐时年平均资料

对每个整点的总辐照度数据求年平均,得到大同气象站总辐照度的年平均日变化特征,如图 8 所示。从图中可以看出,求平均后, FY-4A 的总辐照度始终高于地面观测值,两者的绝对偏差较为稳定,各时次均维持在  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右,两者之间的相对误差随时间变化很有规律,早晚误差大,中午误差小,17 时和 07 时, FY-4A 总辐照度偏高 50%~60%,12—13 时,则偏高不到 15%。由于总辐照度的日变化特征是早晚低、中午高,上述变化规律说明在低辐照度时, FY-4A 总辐照度偏高比例较大,而在高辐照度时,偏高比例较小。

此外,由于地面气象站周边或多或少存在遮挡(地形、建筑、树木等),在早晚太阳高度角较低时,可能会使辐照度观测值出现一定程度的偏低现象(申彦波等, 2015),而卫星是自上而下观测, FY-4A 总辐照度反映的是  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  像元内的平均状况,几乎不受地面遮挡因素的影响,这也可能是导致 FY-4A 总辐照度早晚偏高较多的原因之一。

### 2.1.3 相对误差分析

为进一步分析不同辐照度情形下 FY-4A 总辐照度的误差特点,图 9 给出了逐时相对误差随地面观测总辐照度的分布,为表述方便,将相对误差分为正、负两种情形分别绘图,并将相对误差的绝对值取对数。由图 9 可见,相对误差为正时,总样本数为

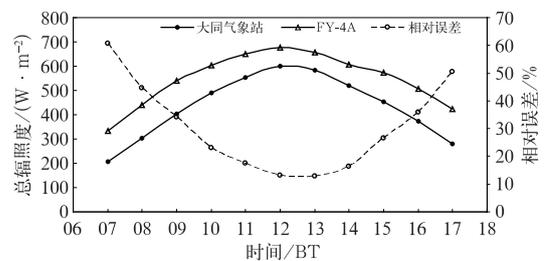


图 8 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 年平均整点总辐照度及相对误差变化

Fig. 8 Annual mean hourly global irradiance from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

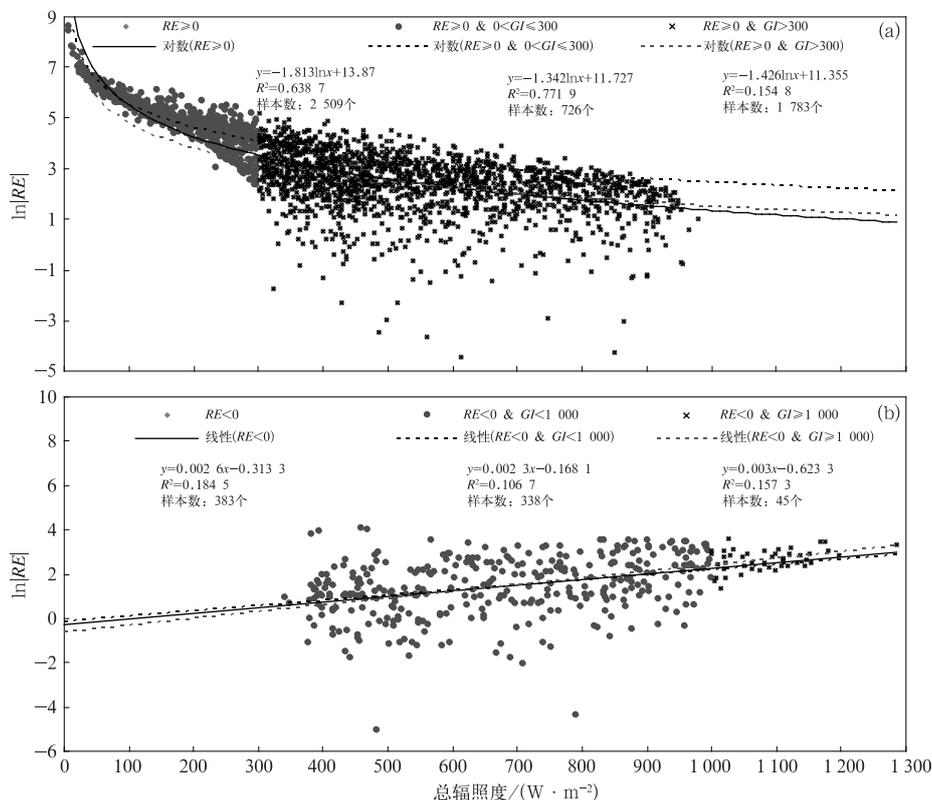


图 9 大同气象站地面观测和 FY-4A 整点总辐照度(GI)相对误差(RE)随地面观测总辐射度的变化 (a)  $RE \geq 0$ , (b)  $RE < 0$

Fig. 9 Variation of relative error of hourly global irradiance from ground observation and FY-4A with ground observation irradiance at Datong Weather Station in 2018 (a)  $RE \geq 0$ , (b)  $RE < 0$

2509 个,相对误差的对数随地面观测总辐照度的分布呈对数递减趋势,辐照度越高,相对误差越小,即 FY-4A 总辐照度偏高越少,其中总辐照度低于  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时的对数关系更为显著,相关系数达到 0.8786;相对误差为负时,其绝对值的对数随地面观测总辐照度的分布呈线性递增趋势,辐照度越高,相对误差的绝对值越大,即 FY-4A 总辐照度偏低越多。但这种情形下的总样本数仅有 383 个,且相关系数也不高。

综合两种情形来看,总辐照度低于  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,样本数为 726 个,相对误差全部为正,且相关性很强,相对误差的平均值为 232.2%;总辐照度高于  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,样本数为 45 个,相对误差全部为负,但相关性较弱,相对误差的平均值为 -15.8%;总辐照度介于  $300 \sim 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,总样本数为 2121 个,相对误差有正有负,正的居多(1783 个),相关性均较弱,相对误差的平均值为 14.5%(即正负抵消后)。

由此可见,FY-4A 总辐照度总体比地面观测值

偏高,其相对误差随地面观测总辐照度的升高而降低,地面观测辐照度越低,FY-4A 总辐照度偏高越多,但当地面观测总辐照度升高到一定程度时,则 FY-4A 总辐照度又会比地面观测值偏低,呈现出“低不下来、高不上去”的特点。

## 2.2 日总辐射曝辐量

将大同气象站地面观测和 FY-4A 各自的整点瞬时辐照度积分并累加后,得到 2018 年逐日总辐射曝辐量,二者随时间的变化曲线如图 10 所示,相关关系如图 11 所示。从图 11 中可以看出,二者的相关性比逐时数据进一步提高,相关系数达到 0.898。FY-4A 年平均日曝辐量为  $16.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,地面观测则为  $15.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,前者比后者偏高 9.1%,相对误差比逐时数据明显降低。

由统计逐日相对误差的分布区间(图 12)可以看出,虽然相对误差在  $0 \sim 30\%$  的比例(43%)低于逐时数据,但相对误差超过 200%的比例则仅有 3.3%,比逐时数据有明显下降,而由于 FY-4A 的有

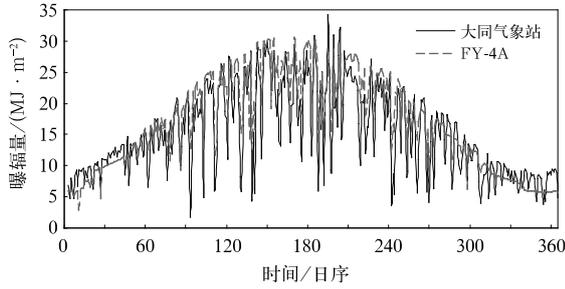


图 10 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 日总辐射曝辐量随时间变化  
Fig. 10 Temporal variation of daily global irradiation from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

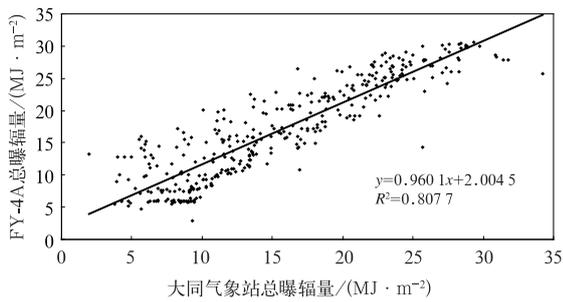


图 11 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 日总辐射曝辐量相关关系  
Fig. 11 Correlation between daily global irradiation from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

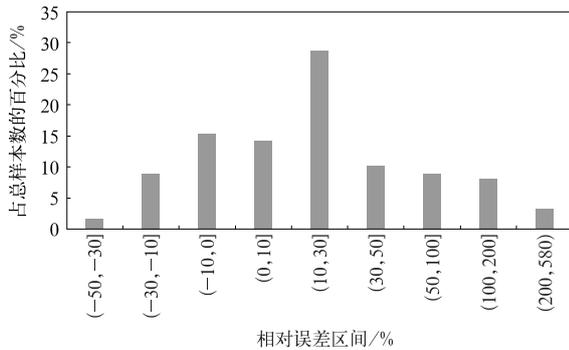


图 12 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 日总辐射曝辐量相对误差区间分布  
Fig. 12 Distribution of relative error interval of daily global irradiation from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

效时次少于地面观测,使得日值相对误差为负的比例(26%)明显高于逐时数据,这“一降一升”使得日值相对误差比逐时数据明显降低。

### 2.3 月和年总辐射曝辐量

将逐日总辐射曝辐量累加后得到 2018 年逐月曝辐量(图 13),由图可见,就月总辐射曝辐量而言, FY-4A 与地面观测的相对误差呈现出 3—11 月偏高、11 月至次年 2 月偏低的特点,其主要原因在于 FY-4A 反演算法中,太阳天顶角  $70^\circ$  临界值的设置,使得冬季 FY-4A 的有效样本数远低于大同气象站的地面观测,因而导致总辐射曝辐量偏低。统计最大值和最小值发现,8 月 FY-4A 偏高最多为 20.8%,明显低于逐时和逐日的相对误差最大值,12 月 FY-4A 偏低最多为 -20%。统计年总辐射曝辐量得到, FY-4A 为  $6098.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,地面观测为  $5592.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,前者比后者偏高 9.1%。

### 2.4 山西高原 3 个气象站横向对比

以上详细分析了大同气象站 FY-4A 的整点总辐照度、日/月/年总辐射曝辐量等与地面观测的相关性和误差分布特点。经统计,太原、侯马两站的误差分布特点与大同站基本相同,但具体数值上有差异,大同、太原、侯马整点总辐照度平均值的相对误差分别为 22.3%、31.1%、47.1%,总有效样本的相关系数分别为 0.863、0.881、0.889;年总辐射曝辐量的相对误差分别为 9.1%、18.8%、35.4%(表 2、表 3)。

统计 3 个国家站的 2018 年地面观测年总辐射曝辐量,大同站为  $5592.4 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,太原站为  $5296.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,侯马站为  $4778.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此可见,3 个站的相对误差随年总辐射曝辐量的降低而增加,这与前述大同站相对误差与整点总辐照度、日/月总辐射曝辐量的相关关系一致。

进一步分档统计 3 个国家站地面观测的整点总辐照度出现时次所占比例(图 13),  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以

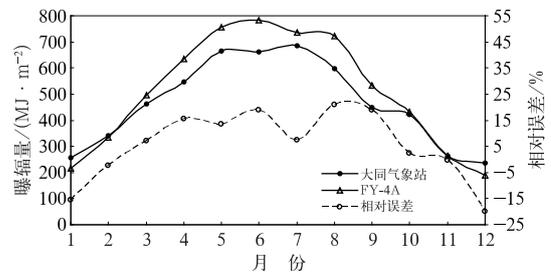


图 13 2018 年大同气象站地面观测和 FY-4A 总辐射曝辐量及相对误差月变化  
Fig. 13 Monthly variation of global irradiation and relative error from ground observation and FY-4A at Datong Weather Station in 2018

表 2 大同、太原、侯马气象站地面观测、FY-4A 年平均整点总辐照度统计值  
Table 2 Annual mean hourly global irradiance statistics from ground observation and FY-4A at Datong, Taiyuan and Houma weather stations in 2018

台站	统计量	时间/BT															
		05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	07—17
大同	样本数	—	—	47	169	244	313	360	362	360	359	296	228	154	—	—	2 892
	FY-4A 辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	—	—	333.5	438.7	539.2	603.9	650.1	677.0	657.2	605.5	572.3	507.1	421.9	—	—	585.6
	气象站辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	2.0	40.2	207.5	303.2	402.4	490.9	553.1	598.7	582.2	520.2	452.4	373.0	280.4	106.6	38.0	478.9
	相对误差/%	—	—	60.7	44.7	34.0	23.0	17.5	13.1	12.9	16.4	26.5	36.0	50.5	—	—	22.3
	相关系数	—	—	0.435	0.785	0.801	0.858	0.867	0.862	0.873	0.829	0.791	0.760	0.685	—	—	0.863
太原	样本数	—	—	—	170	251	341	359	362	360	360	322	241	163	—	—	2 929*
	FY-4A 辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	—	—	—	430.8	529.0	581.7	657.8	694.4	687.2	633.9	579.4	517.0	422.2	—	—	596.6
	气象站辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	—	28.7	86.5	248.3	358.4	428.9	519.3	583.0	572.0	508.9	439.9	353.3	253.0	90.9	28.5	455.1
	相对误差/%	—	—	—	73.5	47.6	35.6	26.7	19.1	20.1	24.6	31.7	46.3	66.9	—	—	31.1
	相关系数	—	—	—	0.733	0.808	0.853	0.877	0.903	0.867	0.849	0.855	0.781	0.675	—	—	0.881
侯马	样本数	—	—	—	165	253	356	359	361	360	360	358	255	174	23	—	3 024*
	FY-4A 辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	—	—	—	424.2	525.7	574.1	656.2	702.2	692.9	650.3	566.2	519.9	431.2	321.0	—	594.5
	气象站辐照度 ( $W \cdot m^{-2}$ )	—	19.7	71.6	221.0	322.6	378.7	459.7	527.7	513.9	464.0	371.5	331.8	248.4	113.6	31.1	404.1
	相对误差/%	—	—	—	92.0	63.0	51.6	42.7	33.1	34.8	40.2	52.4	56.7	73.6	182.6	—	47.1
	相关系数	—	—	—	0.606	0.798	0.872	0.890	0.902	0.886	0.882	0.870	0.830	0.717	0.421	—	0.889

注: \* 所示太原和侯马的采样时间分别为 08—17 时和 08—18 时。

Note: \* represent the time of sampling of Taiyuan and Houma is between 08—17 BT and 08—18 BT, respectively.

表 3 同表 2, 但为逐月总辐射曝辐量  
Table 3 Same as Table 2, but for monthly global irradiation

台站	统计量	月份												年值
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
大同	FY-4A 曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	217.2	334.4	497.1	632.9	754.9	784.3	734.5	723.8	533.4	433.2	264.1	189.0	6 098.7
	气象站曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	256.7	342.5	463.6	547.9	665.1	660.3	684.9	599.1	448.7	422.7	264.8	236.2	5 592.4
	相对误差/%	-15.4	-2.4	7.2	15.5	13.5	18.8	7.2	20.8	18.9	2.5	-0.3	-20.0	9.1
太原	FY-4A 曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	262.9	367.6	522.7	664.4	743.6	734.8	734.7	733.7	542.3	454.5	304.1	225.7	6 291.0
	气象站曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	225.1	338.9	439.5	522.8	580.7	612.5	599.5	586.6	446.7	427.4	271.7	245.3	5 296.8
	相对误差/%	16.8	8.5	18.9	27.1	28.0	20.0	22.5	25.1	21.4	6.4	11.9	-8.0	18.8
侯马	FY-4A 曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	281.6	389.1	538.0	637.9	718.4	751.4	751.9	768.9	532.3	485.8	326.5	290.0	6 471.9
	气象站曝辐量 ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	144.1	241.3	353.4	387.6	555.9	606.0	590.0	612.3	403.3	443.2	231.6	210.1	4 778.7
	相对误差/%	95.4	61.3	52.2	64.6	29.2	24.0	27.4	25.6	32.0	9.6	41.0	38.0	35.4

下的总辐照度出现时次, 侯马站占比最高, 接近 60%, 而大同站占比最低, 不足 50%;  $300 \sim 1000 W \cdot m^{-2}$  的总辐照度出现时次, 则是大同站最高, 侯马站最低; 而  $1000 W \cdot m^{-2}$  以上的总辐照度出现时次, 3 个站占比都很低, 大同为 1%, 太原为 0.1%, 侯马为 0.3%, 对总体特征影响有限。由此可见, 对

于不同气候背景的地域而言, 年总辐射曝辐量越低, 低辐照度出现时次占比越高, 中高辐照度出现时次占比越低, 则 FY-4A 的相对误差越大。

但就 FY-4A 与地面观测之间的相关性而言, 3 个国家站的相关系数都很高, 侯马站甚至最高, 并未受到低辐照度的影响, 主要原因在于 FY-4A 地表太阳

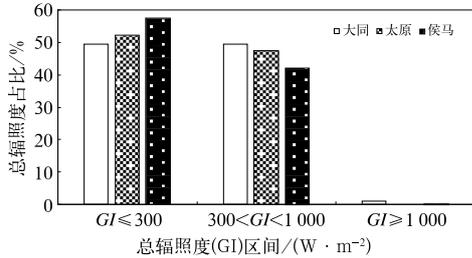


图 14 2018 年大同、太原、侯马气象站地面观测整点总辐照度(GI)各区间占比  
Fig. 14 Ground observation integral global irradiation ratio of Datong, Taiyuan and Houma weather stations in 2018

入射辐射产品的反演算法中综合考虑了短波范围内云、气溶胶、地表、观测几何等重要参数的影响,这些参数在地外太阳辐射穿越大气到达地面的传输过程中起到了至关重要的作用,使得反演产品能够较好地反映天气变化对地面辐射的影响,因而与地面观测的相关性很好。但是,基于辐射传输理论,在短波范围内,与这些参数有关的辐射物理过程极其复杂,如何通过卫星观测,更准确地获取辐射传输路径上的大气状态信息,进而更准确地获取入射到地表的太阳辐射信息,是未来 FY-4A 地表太阳入射辐射反演算法需要进一步研究和优化的内容。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

以大同、太原、侯马 3 个国家级地面气象站为代表站,对 FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性进行了研究,主要得到结论如下:

(1) 总体而言 FY-4A 反演算法以地外太阳辐射变化为基础,较好地考虑了气象因素变化的影响,所得到的地面总辐射产品与地面观测的相关性很好,但总辐照度数值偏高。从整点辐照度对比来看,相对误差随地面观测总辐照度的升高而降低,早、晚相对误差大,中午相对误差小,当辐照度低于  $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,相对误差全部为正;当辐照度高于  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时,相对误差全部为负,与地面观测相比, FY-4A 反演的总辐照度“低不下来、高不上去”。

(2) 大同、太原、侯马 3 个站横向对比发现,大同站年总辐射曝辐量最高, FY-4A 相对误差最小,侯马站年总辐射曝辐量最低, FY-4A 相对误差最大,从 3 个站的地面观测总辐照度分档来看,与结论(1)一致。

(3) 在 FY-4A 地表太阳入射辐射反演算法中,

太阳天顶角的临界值设为  $70^\circ$ ,对地面总辐射的有效观测影响较大,全年白天因此共产生大约 1/3 的无观测时次,且冬季多于夏季,由此使得冬季的月总辐射曝辐量低于地面观测值,而夏季则高于地面观测值。

(4) 从整点、日、月值的统计特征来看, FY-4A 平均值的相对误差是整点值大于日值,相关系数是整点值小于日值,最大相对误差是月值  $<$  日值  $<$  整点值,即统计时间越长,相对误差越小,相关系数越高。按照 GB/T 37526-2019(中国气象局,2019)对于太阳能资源评估而言,主要关注地面总辐射曝辐量的月和年统计值,结果表明: FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原有较好的适用性。

#### 3.2 讨论

(1) 本文将地面观测数据作为基准,分析 FY-4A 地表太阳入射辐射产品的质量。事实上,星-地之间观测方式的不同也是产生误差的原因之一,具体包含两个方面。

空间上的差异:如正文所述, FY-4A 地表太阳入射辐射产品的空间分辨率是  $4 \text{ km}$ ,每个数值反映的是  $16 \text{ km}^2$  内的平均天气状况,而地面观测则是反映仪器所在点位的天气状况,这在天空状况不均匀(有云)的情况下可能会产生较大误差,以 2018 年 9 月 11 日 14 时的极端情况为例,地面观测的总辐照度为  $0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,而 FY-4A 则为  $360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,结合当时的天气现象(有阵雨、轻雾)来看,很可能是地面观测场上空受云的遮挡很严重,但其周围  $16 \text{ km}^2$  范围内则并不全都受到云的遮挡。

时间上的差异: FY-4A 对地观测需要对全圆盘(图 2)进行扫描,每个完整的扫描过程需要  $15 \text{ min}$ ,对于具体的点位而言,整点时刻的辐照度并非是绝对的整点,而是整点到整点 +  $15 \text{ min}$  之内某个时刻的瞬时辐照度,而本文所用的地面观测数据则是整点时刻  $1 \text{ min}$  的平均辐照度,因此,两者在时间上并非完全对应,如果天气过程变化很快,则有可能产生较大误差。

上述空间和时间上差别,是星-地对比的固有问题,在极端情况下会带来较大不确定性,但从全年数据来看,则不会影响到对基本特征判断。

(2) 上述关于 FY-4A 地表太阳入射辐射产品质量的结论基本上都能从其反演算法、参数设置、卫星遥感的特点或数据统计方式等方面得到解释,并非局地性特点,因此,尽管本文只是以山西高原的 3 个国家级气象观测站为例进行分析,但所得主要结论

对描述 FY-4A 地表太阳入射辐射产品的特点具有普适性。今后还将收集更多的逐分钟地面观测辐照度数据,进一步验证上述结论。

(3)对 FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性做分析,目的是为了在使用该产品时进行合理的订正。本文的分析结论,特别是 FY-4A 总辐射相对误差随时间和辐照度强弱的变化特征,为进一步开展误差订正提供了基本依据,后续还将针对订正方法进行专题研究。

## 参考文献

- 陈仁升,康尔酒,李新,等,2006.任意地形实际天气条件下小时入射短波辐射模型——以黑河流域为例[J].中国沙漠,26(5):773-779. Chen R S, Kang E S, Li X, et al, 2006. Hourly incident solar radiation model under actual weather and terrain conditions: a case study in Heihe River Basin[J]. J Desert Res, 26(5): 773-779(in Chinese).
- 陈渭民,边多,郁凡,2000.由卫星资料估算晴空大气太阳直接辐射和散射辐射[J].气象学报,58(4):457-469. Chen W M, Bian D, Yu F, 2000. Estimation of solar direct and scattering radiations in a clear sky atmosphere from satellite data[J]. Acta Meteor Sin, 58(4): 457-469(in Chinese).
- 胡菊吻,唐世浩,刘海磊,等,2017. FY-3C VIRR 大气可降水产品生成和检验[J].遥感学报,21(6):842-852. Hu J Y, Tang S H, Liu H L, et al, 2017. Production and validation of FY-3C VIRR total precipitable water products[J]. J Remote Sens, 21(6): 842-852(in Chinese).
- 李光伟,黄彦彬,敖杰,等,2018. GPS 探测与 FY-2 反演大气可降水量对比分析[J].气象,44(8):1082-1093. Li G W, Huang Y B, Ao J, et al, 2018. Comparison of precipitable water retrieved by FY-2 satellite and GPS observations[J]. Meteor Mon, 44(8): 1082-1093(in Chinese).
- 瞿建华,张焱,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[J].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[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 911-922(in Chinese).
- 申彦波,2010.近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述[J].气象,36(9):111-115. Shen Y B, 2010. Review of applications of satellite remote sensing data to solar energy resources assessment in China in recent 20 years[J]. Meteor Mon, 36(9): 111-115(in Chinese).
- 申彦波,2017.我国太阳能资源评估方法研究进展[J].气象科技进展,7(1):77-84. Shen Y B, 2017. Development of the solar energy resource assessment methods in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 7(1): 77-84(in Chinese).
- 申彦波,常蕊,杜江,等,2015.吐鲁番地区可利用太阳能资源分析[J].高原气象,34(2):470-477. Shen Y B, Chang R, Du J, et al, 2015. Analysis of the available solar energy resources in Turpan[J]. Plateau Meteor, 34(2): 470-477(in Chinese).
- 申彦波,张顺谦,郭鹏,等,2014.四川省太阳能资源气候学计算[J].应用气象学报,25(4):493-498. Shen Y B, Zhang S Q, Guo P, et al, 2014. Blimatology calculation of solar energy resource in Sichuan Province[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4): 493-498(in Chinese).
- 石广玉,2007.大气辐射学[M].北京:科学出版社:12-14. Shi G Y, 2007. Atmospheric Radiation[M]. Beijing: Science Press: 12-14(in Chinese).
- 唐世浩,邱红,马刚,2016.风云气象卫星主要技术进展[J].遥感学报,20(5):842-849. Tang S H, Qiu H, Ma G, 2016. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite[J]. J Remote Sens, 20(5): 842-849(in Chinese).
- 王炳忠,莫月琴,杨云,等,2018.现代太阳辐射和地球辐射测量及标准[M].北京:气象出版社. Wang B Z, Mo Y Q, Yang Y, et al, 2018. Modern Measurement and Standard of Solar Radiation and Earth Radiation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王炳忠,申彦波,2012.自然环境条件对太阳能资源计算影响的再思考[J].应用气象学报,23(4):505-512. Wang B Z, Shen Y B, 2012. Reconsideration about effects of natural environmental conditions on the calculation of solar energy resources in China[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4): 505-512(in Chinese).
- 王炳忠,张富国,李立贤,1980.我国的太阳能资源及其计算[J].太阳能学报,1(1):1-9. Wang B Z, Zhang F G, Li L X, 1980. Solar energy resources in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sin, 1(1): 1-9(in Chinese).
- 吴北婴,李卫,陈洪滨,等,1999.大气辐射传输实用算法[M].北京:气象出版社. Wu B Y, Li W, Chen H B, et al, 1999. Practical Algorithm for Atmospheric Radiation Transmission[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴琼,窦芳丽,郭杨,等,2020. FY-3C 微波成像仪海上大气可降水产品质量检验[J].气象,46(1):73-79. Wu Q, Dou F L, Guo Y, et al, 2020. Validation of FY-3C MWRI total precipitable water products[J]. Meteor Mon, 46(1): 73-79(in Chinese).
- 尹延通,刘高飞,关吉平,等,2017.基于探空和 SSMI/S 资料的 AMSR-2 海上大气可降水产品检验与评估[J].海洋科学,41(4):65-74. Yin Y T, Liu G F, Guan J P, et al, 2017. Validation and evaluation of AMSR-2-derived total precipitable water over sea surface using radiosonde and SSMI/S data[J]. Mar Sci, 41(4): 65-74(in Chinese).
- 张志清,陆风,方翔,等,2017. FY-4 卫星应用和发展[J].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[J]. Aerosp Shanghai, 34(4): 8-19(in Chinese).
- 中国气象局,2017.地面气象观测规范辐射:GB/T 35231—2017[S].北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2017. Specifications for surface meteorological observation-radiation: GB/T 35231—2017[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- 中国气象局,2019.太阳能资源评估方法:GB/T 37526—2019[S].北京:中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2019. Assessment method for solar energy resource: GB/T 37526—2019[S]. Beijing: China Standard Press(in Chinese).
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al, 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(8): 1637-1658.