沙漠与绿洲气象
Desert and Oasis Meteorology
第18卷 第1期
2024年2月

杨帆,罗敬,张东海,等.FY-4A辐射产品在贵州山区的检验与订正[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(1):134-140.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2024.01.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

FY-4A辐射产品在贵州山区的检验与订正

杨 帆[1],罗 敬[1],张东海[2],何东坡[1],曾莉萍[3],吴古会[1*]
(1.贵州省气象台,贵州 贵阳 550002;2.贵州省气候中心,贵州 贵阳 550002;
3.贵州省气象服务中心,贵州 贵阳 550002)

摘 要:利用2018年3月12日—2019年2月28日贵州山区(从江、三穗、桐梓、贵阳、紫云、兴仁、威宁7站)地面太阳辐照度观测资料对FY-4A反演辐照度进行检验与订正分析。结果表明:(1)卫星反演辐照度取值范围比地面观测小,整体上反演辐照度偏高,晴空条件下反演精度远高于云条件下,正午偏差最小,下午偏差最大。(2)卫星反演辐照度与地面观测辐照度具有较为一致的日变化和季节变化,两者呈显著正相关,相关系数与海拔高度呈负相关。(3)平均偏差往往随着地面观测的增大而减小,当地面观测辐照度> 800 W·m^{-2}时,反演辐照度往往偏小。(4)对地面观测辐照度进行阈值化后,用多元线性回归方法对反演辐照度订正,订正后的产品在贵州具有较好的适用性。

关键词:地面入射太阳辐照度;贵州山区;检验;FY-4A;多元线性回归
中图分类号:P422.1;TP79 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2024)01-0134-07

地表入射太阳短波辐射是人类活动和植物光合作用、蒸腾作用的直接驱动因子[1],是天气和气候形成及变化的基础[2],同时还是重要的清洁能源之一[3]。贵州省是高耸于四川盆地和广西丘陵之间的强烈岩溶化高原山区,全省总面积为176 128 km^2,其中山地和丘陵占97%,受地形坡度、坡向、地形遮蔽等影响,加上气候差异较大,区域内太阳短波辐射空间差异很大[4-5]。2011—2018年,贵州省有贵阳、威宁、紫云等11个国家级地面气象观测站进行太阳辐射观测,可较为精确地反映观测点及附近太阳能资源状况,但2019年以后除了贵阳站,不再对其他站点辐射仪器进行检定,资料不进行质控,并且2021年4月起,仅保留了贵阳辐射观测站,这显然不能满足贵州山区太阳辐射相关领域的需求。

天文、地理以及气象是影响地表入射太阳辐射时空分布差异大的三大因子[6],其中水汽含量、总云量以及能见度等是可能的气象影响因子[7-8],长期以来,研究者根据这些因素推算太阳辐照度[9-10]。近年来,有学者借助卫星遥感资料反演太阳辐射[11-12],但受限于遥感技术发展,反演产品时空分辨率以及精度有限。FY-4A气象卫星于2016年12月11日成功发射,是世界上最先进的静止气象卫星之一[13-14]。2018年3月12日,国家卫星气象中心开始提供地表入射太阳辐射产品,其空间分辨率为4 km,最高时间分辨率可达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)[15],这为获取高时空分辨率的太阳辐射资料提供了可能。当然,受仪器灵敏度和响应特征变化以及算法本身等影响,反演辐射产品仍然存在偏差,在实际应用前需要检验与订正。目前我国在此方面的研究主要包括:梁进秋等[15]利用山西高原3个国家级气象站的地面辐射观测数据对FY-4A反

收稿日期:2022-07-12;**修回日期**:2022-09-13
基金项目:2021年度泛珠三角科技创新开放基金项目(FZSJ202107);2022年度贵州省山地气候与资源重点实验室基金项目(QHLQLJ[2022]-03)
作者简介:杨帆(1986—),女,工程师,主要从事短期天气预报与相关研究工作。E-mail:yangfan_gzsqxt@126.com
通信作者:吴古会(1985—),女,高级工程师,主要从事短期天气预报与相关研究工作。E-mail:19106289@qq.com

演辐射产品进行检验,表明两者相关性很高,反演辐照度数值总体偏高,冬季的月辐照度曝辐量偏低而夏季偏高;王传辉等[16]用安徽地面观测数据对 FY-4A 太阳辐射产品进行检验,得出反演辐照度整体偏高 200 $W\cdot m^{-2}$,该关系受天气状况的影响;陈蔺鸿等[17]对 FY-4A 太阳辐射产品在黑河流域的精度进行分析,表明晴空条件下比全天空条件精度高,在不同的月份均存在一致高估现象。

本文以 2018 年 3 月 12 日—2019 年 2 月 28 日贵州山区(从江、三穗、桐梓、贵阳、紫云、兴仁、威宁 7 站)地面太阳辐照度观测资料为基准,检验在不同的天空状况下 FY-4A 反演辐照度在贵州山区的精度,定量分析结果可为了解其质量提供参考依据。结合其他影响因子对反演产品进行订正,旨在对该产品在贵州的应用和改进提供参考,进而解决贵州目前仅贵阳市一个地面辐射观测站而无法满足需求的难题,这对贵州省生态环境评价、太阳能资源开发、气候变化研究等领域具有现实意义。

1 资料与方法

1.1 资料

1.1.1 FY-4A 反演产品

FY-4A 产品数据来源于国家卫星气象中心,其中 FY-4A 地表太阳入射辐射辐照度(Surface Solar irradiance,简称 *SSI*)反演产品(以下称为反演辐照度),是利用扫描成像辐射计中通道 1 至通道 6 的短波辐射观测,获取大气和地表的瞬时状态参数,同时由地表高程数据获取地表海拔高度信息,结合太阳角度和观测角度,根据事先建立的模型获取。模型产品采用 CGMS LRIT/HRIT 全球规范定义的静止轨道标称(NOM)投影,算法基于多层平面平行介质的离散坐标化辐射传输方法而建立,考虑了云、水汽以及气溶胶等大气参数的影响。

为了对比不同天空状态下反演辐照度的精度差异,引进了 FY-4A 云检测产品(Cloud Binary Mask,简称 CLM),主要是利用多通道扫描成像辐射计中的 5 个通道,基于云和晴空的光谱、时间和空间信号特征,对每个卫星扫描像素进行云检测,进一步判断该像素是晴空还是云,对晴空、可能晴空、可能云、云分别用 3、2、1、0 表示,其时空分辨率同地表太阳入射辐射辐照度[15,17]。

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> 70°时,受地球曲率的影响,平面平行模式已经不适用,因此在算法中,直接设置为无辐照度、云检测等产品输出,故 SSI、CLM 产品的有效观测时次主要为 08—17 时,随着时间和地点而略有不同。

1.1.2 地面气象站观测数据

2019 年以后,贵州省仅贵阳市一个国家级气象站仍进行辐射仪器检定,卫星气象中心提供的反演辐照度从 2018 年 3 月 12 日开始,为此选取的资料时段为 2018 年 3 月 12 日—2019 年 2 月 28 日,贵州省仅从江、三穗、桐梓、贵阳、紫云、兴仁、威宁进行太阳辐照度观测(图 1),这 7 个站点相对分散,海拔及地形差异大,可以相对全面地代表整个贵州山区辐照度的情况。

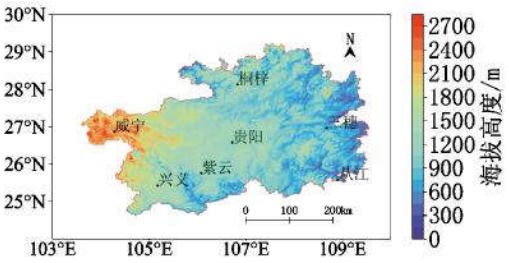

图 1 2018 年贵州省具备太阳总辐照度观测的 7 个国家级站点分布

由于卫星反演算法中太阳天顶角阈值设置、卫星姿态的调整,数据传输等因素,选取卫星和地面辐射观测同时大于零的时刻进行检验和订正,过程中利用 CLM 资料对不同天空状况进行分类,挑选出晴空(CLM 为 3)和云(CLM 为 0)的样本时次来进行对比分析,最终获取得的各个站点资料见表 1。

为了对卫星反演辐照度进行订正,使用的地面观测数据还包括地面相对湿度、水平能见度。

表 1 7 个国家级站点基本信息及数据情况

站名	经度/°E	纬度/°N	海拔高度/m	全天空样本时次	晴空样本时次	云样本时次
从江	108.90	25.58	235	2 733	222	1 933
三穗	108.67	26.97	611	3 110	242	2 409
桐梓	106.83	28.13	973	3 158	256	2 393
贵阳	106.72	26.58	1 074	3 170	265	2 422
紫云	106.08	25.76	1 196	2 681	284	1 890
兴仁	105.18	25.43	1 379	3 154	508	2 051
威宁	104.28	26.87	2 236	3 173	954	1 890

注:从江缺 2019 年 1 月 3 日 10 时以后的太阳辐照度观测数据。

1.2 方法

为了将地面观测辐照度与卫星反演辐照度进行

对比分析，对卫星反演辐照度网格产品进行相应地面气象观测站的邻近点插值，主要讨论的要素包括：平均偏差 M_{BE}、均方根偏差 R_{MSE}、平均绝对偏差百分率 M_{APE}、相关系数 r 以及偏高百分比 P_{PD}。各表达式如下：

$$M_{BE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i), \tag{1}$$

$$R_{MSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-O_i)^2}\ , \tag{2}$$

$$M_{APE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{|S_i-O_i|}{O_i}}{n}\times 100\%, \tag{3}$$

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2(S_i-\overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i-\overline{O})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i-\overline{S})^2}}, \tag{4}$$

$$P_{PD}=\frac{N}{n}\times 100\%\ . \tag{5}$$

式中：O_i 表示地面观测的辐照度，S_i 为 FY-4A 辐照度，$\overline{O}$、$\overline{S}$ 分别表示他们的平均值，n 为总样本个数，N 为 $(S_i-O_i)>0$ 样本个数。其中 M_{BE} 反映卫星产品相对于地面观测数据的偏离程度；R_{MSE} 反映产品值与观测值之间的离散程度；M_{APE} 反映平均绝对偏差百分比；相关系数 r 反映两者之间的一致性；P_{PD} 反映了卫星反演辐照度偏大样本数占观测样本的比值。

在对卫星反演辐照度进行订正时，主要使用多元线性回归方法[18]，在方程建立过程中，用 F 检验来检验线性模型中所有自变量和因变量之间的关系是否显著，用 t 检验对单个变量进行检验[19]。

2 FY-4A 反演辐照度与观测辐照度对比

2.1 不同天空状况下反演辐照度精度总体分析

在各站所有有效样本中，FY-4A 反演辐照度取值范围为 151~1 175 W·m^{-2}，地面观测辐照度为 1~1 638 W·m^{-2}，前者数值范围要小很多。

表 2 给出了不同天空状况下贵州山区 7 个地面气象站逐时辐照度样本平均值以及相应卫星反演辐照度的检验统计值。全天空条件下，地面观测辐照度平均值为 257 W·m^{-2}（三穗）~486 W·m^{-2}（威宁），M_{BE} 为 11 W·m^{-2}（威宁）~303 W·m^{-2}（三穗），7 站平均 M_{BE} 为 210 W·m^{-2}；各站平均 R_{MSE} 为 304 W·m^{-2}；M_{APE} 为 150%（紫云）~378%（三穗），平均为 253%；P_{PD} 最小为威宁（67%），平均为 83%。总体而言，卫星反演辐照度偏高，绝对偏差百分率达 150%以上，离散度也高。但 r 在 0.66（威宁）~0.76（三穗、桐梓），均通过 0.01 的显著性检验。

晴空条件下，地面观测辐照度平均值为 494 W·m^{-2}（三穗）~710 W·m^{-2}（威宁），各站点 M_{BE} 减小为 -40 W·m^{-2}（威宁）~175 W·m^{-2}（三穗），7 站平均为 70 W·m^{-2}；各站平均 R_{MSE} 减小为 194 W·m^{-2}；M_{APE} 减小，除三穗外，均<50%；平均 P_{PD} 减少到 64%；r 除威宁外，均增大为 0.73（紫云）~0.83（三穗），平均为 0.76。云条件下，地面观测辐照度平均值为 205W·m^{-2}（三穗）~384 W·m^{-2}（从江），各站点 M_{BE} 增大为 151 W·m^{-2}（从江）~316 W·m^{-2}（三穗），R_{MSE} 增大为 298 W·m^{-2}（从江）~344 W·m^{-2}（三穗）；M_{APE} 增

表 2 2018 年 3 月 12 日—2019 年 2 月 28 日地面观测辐照度总样本平均值 A_{VE}、FY-4A 卫星反演辐照度平均偏差 M_{BE}、均方根偏差 R_{MSE}、平均绝对偏差百分率 M_{APE}、相关系数 r 和偏高百分比 P_{PD}

站名	全天空						晴空						云					
	A_{VE}/(W·m^{-2})	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%	A_{VE}/(W·m^{-2})	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%	A_{VE}/(W·m^{-2})	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%
从江	470	113	282	173	0.74	69	708	-28	188	43	0.81	39	384	151	298	217	0.66	78
三穗	257	303	337	378	0.76	97	494	175	208	53	0.83	95	205	316	344	445	0.72	97
桐梓	285	259	312	346	0.76	89	600	86	158	35	0.81	67	223	282	324	405	0.70	93
贵阳	322	241	305	268	0.73	87	595	92	189	44	0.75	66	264	264	318	304	0.67	90
紫云	380	204	291	150	0.69	84	622	76	190	40	0.73	63	316	230	304	172	0.62	89
兴仁	355	238	310	267	0.69	87	559	126	194	48	0.74	77	276	272	337	340	0.60	90
威宁	486	110	290	188	0.66	67	710	-40	230	49	0.66	41	374	183	313	228	0.57	80
平均	365	210	304	253	0.72	83	612	70	194	45	0.76	64	292	243	320	302	0.65	88

大,除紫云外,均>200%;平均 P_{PD} 达 88%;r 减小至 0.57(威宁)~0.72(三穗),所有的相关系数均通过 0.01 的显著性检验。综上,晴空条件下,卫星反演辐照度与地面观测辐照度更接近,相关性更高。

结合表 1 可知,不同站点之间反演辐照度的精度差异主要与海拔高度有关,随着海拔高度的升高,r 呈降低趋势。在云和全天空条件下,r 与海拔高度呈负相关,通过显著性水平为 0.05 的 t 检验,晴空条件下通过显著性水平为 0.01 的 t 检验。此外,各种天空状况下,三穗站地面观测辐照度平均值最小,卫星反演辐照度具有最大的 M_{BE}、R_{MSE}、M_{APE};威宁、从江平均地面辐照度观测平均值大,但是 M_{BE} 较小。经计算 3 种天空状况下,M_{BE} 与 A_{VE} 相关系数均<–0.97,说明平均偏差往往随着观测辐照度值的增大而减小,其他参数并不具备一般规律。

2.2 各测站各月各时次辐照度检验

自东向西(海拔自低到高,并且全年逐时平均辐照度从小到大),以三穗、贵阳、威宁为代表对各月各时次平均反演辐照度进行检验,各月各站点地面观测总辐照最大值出现在 11—13 时,三穗与贵阳站夏季辐射最强,春季次之,冬季最小;威宁则是春季辐射最强,秋季最弱,夏季和冬季相当。卫星反演辐照度和地面观测辐照度的日变化和月(季节)变化均比较一致(经计算,各站各月 10—15 时两者相关系数均能通过 0.05 的显著性检验,大部分能通过 0.01 的显著性检验)。从误差分布来看,三穗、贵阳站在各月各时次,均具有正的平均偏差,而威宁多个月份的多个时次具有负的平均偏差,其中冬春季10—12 时负偏差比较明显。各站点各月均是16—17 时偏差远远大于其他时次,M_{APE} 可超过500%,正午前后则具有较小的 M_{APE}。从误差逐月变化来看,实况辐照度大的月份,误差相对较小,反之亦然。

2.3 反演精度随地面观测值的变化分析

在实际地面观测辐照度较大时,卫星反演辐照度偏差较小。为进一步验证此结论,对各个站点所有样本地面辐照度观测值进行阈值划分后,计算卫星反演辐照度的精度,各站平均结果见表 3。当地面观测辐照度< 400 W·m^{-2} 时,几乎所有的反演辐照度比地面观测高,其中当辐照度< 200 W·m^{-2},各站平均 M_{BE} 为 347 W·m^{-2},而 M_{APE} 高达 518%。当辐照度为 400~600 W·m^{-2} 时,各站平均 P_{PD} 仍然高达 80%,平均 M_{APE} 减小为 36%。当辐照度为 600~1 000 W·m^{-2} 时,反演精度最高,平均 M_{APE}<20%。当辐照度>800 W·m^{-2} 时,卫星反演辐照度表现为偏低为主,各站平均 M_{BE} 为负值,尤其是辐照度>1 000 W·m^{-2} 时,平均 M_{BE}≤–230 W·m^{-2},各站平均 P_{PD} 仅为 4%。

表 3 地面观测辐照度在不同取值范围内,卫星反演辐照度平均偏差 M_{BE}、平均绝对偏差百分率 M_{APE}、偏高百分比 P_{PD}

取值范围/(W·m^{-2})	(0,200]	(200, 400]	(400, 600]	(600, 800]	(800, 1 000]	>1 000
M_{BE}/(W·m^{-2})	347	281	138	27	–57	–230
M_{APE}/%	518	103	36	18	15	21
P_{PD}/%	100	99	80	56	39	4

3 反演辐照度的订正

云量、空气中的水汽以及水平能见度等是影响辐照度的重要因素,由于现在不进行云量观测,用 CLM 资料对天空状况分类后,拟选择相对湿度、能见度以及卫星反演太阳辐照度作为自变量,地面观测太阳辐照度作为因变量,用多元线性回归方法对卫星反演辐照度进行订正。同时考虑到各站点在回归建模时,如果由于相对湿度和能见度显著负相关(相关系数为–0.65(威宁)~–0.48(兴仁))引起的多重共线性问题,而导致其中一个变量在回归方程中没有通过 t 检验时,则删除该变量。最终三穗、兴仁选择相对湿度、能见度以及卫星反演辐照度作为回归因子,桐梓选择能见度以及卫星反演辐照度,其余站点则选择相对湿度以及卫星反演辐照度作为回归因子。重新选择并建模后,各站点所建立的多元线性回归方程均能通过 F 检验,其中的自变量均通过 t 检验。

订正过程中随机不固定选取 75%样本作为训练集,25%样本作为验证集。在验证集中,检验订正后的反演辐照度,结果见表 4。对比表 2,多元线性回归方法能够取得一定的订正效果,全天空条件下各站 M_{BE} 减小为–4~11 W·m^{-2},P_{PD} 减小为接近50%,M_{APE} 减小,但是仍高达 49%~76%。晴空条件下虽然平均偏差增大,但是 M_{APE} 进一步减小为 20%~31%,相关系数 r 增大到 0.84~0.9。云条件下订正后,M_{APE} 仍比较大,除威宁外,均超过 80%。各天空条件下,R_{MSE} 均比较大,说明多元线性回归订正后,卫星反演辐照度离散度仍比较高。

地面观测辐照度越小时,反演辐照度偏差越大。为消除系统偏差,对各站点根据观测辐照度进行阈值划分后,再进行多元线性回归订正,订正过程中仍随机选取 75%样本作为训练集,25%样本作为验证集,用验证集进行检验,各站平均结果见表5。对比表

表4 卫星反演辐照度经多元线性回归订正后，平均偏差 M_{BE}、均方根偏差 R_{MSE}、平均绝对偏差百分率 M_{APE}、相关系数 r、偏高百分比 P_{PD}

站名	全天空					晴空					云				
	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%	M_{BE}/(W·m^{-2})	R_{MSE}/(W·m^{-2})	M_{APE}/%	r	P_{PD}/%
从江	4	194	69	0.84	56	−4	171	30	0.86	39	−10	211	81	0.80	57
三穗	2	119	71	0.84	56	−12	97	20	0.85	46	9	117	82	0.77	60
桐梓	−2	137	74	0.86	52	14	123	28	0.85	42	1	137	90	0.80	62
贵阳	−11	159	70	0.83	53	−32	152	27	0.82	34	−7	156	85	0.75	58
紫云	−11	186	49	0.76	54	16	119	24	0.90	56	11	170	55	0.70	63
兴仁	−10	155	68	0.83	53	13	120	28	0.84	47	18	150	98	0.75	59
威宁	−4	209	76	0.80	53	−15	182	31	0.80	42	9	117	82	0.77	60
平均	−5	166	68	0.82	54	−3	138	27	0.85	44	4	151	82	0.76	60

3可知，订正后的反演辐照度精度明显提高，各阈值区间内 M_{BE} 均减小为个位数；地面观测辐照度< 200 W·m^{-2} 时，订正过后的平均 M_{APE} 仍较高为66%，但在地面观测辐照度> 200 W·m^{-2} 的各区间，平均 M_{APE} 仅为5%~16%。将各分档验证集中所有订正后的卫星反演辐照度作为一个序列，与相应的地面观测辐照度检验，各站平均 M_{BE} 仅为2 W·m^{-2}，M_{APE} 为22%，经计算，各站 r 均>0.98，R_{MSE} 减小为47~65 W·m^{-2}。

划分阈值后再进行多元回归订正，订正后的卫星反演辐照度精度高，尤其是当地面观测辐照度> 200 W·m^{-2} 时，订正后的反演辐照度已能够较好地代表实际的地面太阳辐射情况，具有较好的适用性。

表5 卫星反演辐照度经多元线性回归订正后的平均偏差 M_{BE}、平均绝对偏差百分率 M_{APE}、偏高百分比 P_{PD}

地面观测辐照度/(W·m^{-2})	(0,200]	(200,400]	(400,600]	(600,800]	(800,1 000]	>1 000	分档多元回归
M_{BE}/(W·m^{-2})	1	3	3	6	2	5	2
M_{APE}/%	66	16	10	7	5	5	22
P_{PD}/%	54	55	53	57	59	59	55

4 讨论与结论

4.1 讨论

以地面观测数据作为基准，FY-4A卫星反演辐照度精度不高，分析偏差出现的原因，主要有两个方面：

(1)观测方式的不同，卫星自上而下对地进行全圆盘扫描，每个完整的扫描过程需要15 min，因而对于某一个具体的点而言，整点时刻的辐照度其实是15 min的平均值，这和地面观测时间上并不完全对应；另外反演辐照度空间分辨率是4 km，每个数值反映的是16 km^2 内的平均状况，而地面观测只能代表观测点的状况，因此观测空间上也并没有完全对应。

(2)云是影响地面太阳辐照度的重要因子，卫星地表入射太阳辐射产品虽然考虑了云的影响，但受云检测算法精度不高的影响，入射太阳辐射产品在有云天气时常出现较大偏差[20]，贵州山区素有“地无三尺平，天无三日晴”的说法，地形复杂、天气多变，反演辐照度产品受云影响的频次多，误差大。

4.2 结论

利用2018年3月12日—2019年2月28日(2018年春季—冬季)贵州山区(从江、三穗、桐梓、贵阳、紫云、兴仁、威宁7站)地面太阳辐照度观测资料对FY-4A反演辐照度进行检验与订正分析，得出以下结论：

(1)全天空条件下，卫星反演辐照度取值范围整体比地面观测辐照度小，平均而言各站点反演辐照度较地面观测偏高210 W·m^{-2}，均方根偏差达304 W·m^{-2}，但两者呈显著正相关，相关系数与海拔高度呈显著负相关；晴空条件下精度远高于云条件，但各站平均 R_{MSE} 仍高达194 W·m^{-2}。因此，未经订正的反演辐照度产品误差大，无法直接替代地面观测来使用。

(2)卫星反演辐照度能较好地体现太阳辐照度的日变化和季节变化，正午前后偏差最小，下午偏差最大。平均偏差往往随着地面观测的增大而减小，当地面观测辐照度< 400 W·m^{-2} 时，卫星反演辐照度普遍偏大一倍以上；当地面观测辐照度> 600 W·m^{-2} 时，两者比较接近，其中当地面观测

辐照度> 800 $W \cdot m^{-2}$ 时,卫星反演辐照度往往偏小。

(3)采用多元线性回归进行卫星反演辐照度订正,能够取得一定的订正效果,而对地面观测辐照度进行阈值划分后,再进行多元线性回归订正,效果更佳,各站点订正后的卫星反演辐照度与地面观测辐照度相关系数可达 0.98,平均 M_{BE} 仅为 2 $W \cdot m^{-2}$,M_{APE} 为 22%。除了地面辐照度比较小时,订正后的反演辐照度偏差仍较大外,分档多元线性回归订正后的卫星反演辐照度与地面观测值非常接近,已经能够较好地代表贵州实际辐射状况,具有较好的适用性。

(4)本文的检验与订正模型,针对有辐射观测的地面站点,对于没有辐射观测的地方,没有实况对比,不涉及检验与订正。后期如果卫星反演辐照度要应用于整个贵州,可以用历史资料(云观测、日照时数、相对湿度、能见度以及有限站点的太阳辐照度)先从气候上对贵州进行辐射区域的划分,不同的区域采用合适的订正模型,以卫星反演辐照度、相对湿度、能见度作为输入因子,可以计算出更接近实况的太阳辐照度。

参考文献:

[1] ROBERTO R, RENZO R. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin[J]. Journal of Hydrology, 1995, 166(3): 461-478.

[2] 肖子牛,钟琦,尹志强,等.太阳活动年代际变化对现代气候影响的研究进展[J].地球科学进展,2013,28(12):1335-1348.

[3] 王峥,任毅.我国太阳能资源的利用现状与产业发展[J].资源与产业,2010,12(2):89-92.

[4] 袁淑杰,缪启龙,谷晓平,等.贵州高原起伏地形下太阳直接辐射的精细分布[J].自然资源学报,2009,24(8):1432-1439.

[5] 谷晓平,袁淑杰,史岚,等.贵州高原复杂地形下太阳总辐射精细空间分布[J].山地学报,2010,28(1):96-102.

[6] 申彦波,赵宗慈,石广玉.地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J].地球科学进展,2008,23(9):915-924.

[7] 李小军,辛晓洲,彭志晴.2003—2012 年中国地表太阳辐射时空变化及其影响因子[J].太阳能学报,2017,38(11):3057-3066.

[8] 郭子嘉,刘鑫,陈勇航,等.基于 RegCM4.6 的中国地区云对地表太阳辐射的影响研究[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):107-113.

[9] 达选芳,李照荣,王小勇,等.有云条件下太阳辐射短临预报订正技术研究[J].干旱气象,2021,39(6):1006-1016.

[10] 申彦波,张顺谦,郭鹏,等.四川省太阳能资源气候学计算[J].应用气象学报,2014,25(4):493-498.

[11] 申彦波.我国太阳能资源评估方法研究进展[J].气象科技进展,2017,7(1):77-84.

[12] 马润,胡斯勒图,尚华哲,等.基于葵花-8 卫星大气产品的地表下行短波辐射计算[J].遥感学报,2019,23(5):924-934.

[13] 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.

[14] 王淦泉,沈霞.风云四号辐射成像仪及其数据在卫星气象中的应用[J].自然杂志,2018,40(1):1-11.

[15] 梁进秋,申彦波,胡丽琴,等.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,2020,46(12):1575-1585.

[16] 王传辉,申彦波,翟振芳,等.FY-4A 星地面太阳辐射产品检验与订正——以安徽省为例[J].太阳能学报,2021,42(9):159-169.

[17] 陈蔺鸿,张彦丽,宋雨钰.FY-4A 太阳短波辐射产品在黑河流域的精度分析[J].生态学杂志,2021,40(1):292-300.

[18] 黄思,唐晓,徐文帅,等.利用多模式集合和多元线性回归改进北京 PM_{10} 预报[J].环境科学学报,2015,35(1):56-64.

[19] 翟维.基于多元线性回归的环境监测数据分析与研究[J].微型电脑应用,2022,38(3):186-188,192.

[20] 斯勒图,施建成,李明,等.基于卫星数据的地表下行短波辐射估算:方法、进展及问题[J].中国科学:地球科学,2020,50(7):887-902.

沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第 18 卷 第 1 期
2024 年 2 月

Verification and Correction of FY-4A Solar Radiation Products in Guizhou Mountainous Areas

YANG Fan[1], LUO Jing[1], ZHANG Donghai[2], HE Dongpo[1], ZENG Liping[3], WU Guhui[1]
(1.Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China;
2.Guizhou Climate Center, Guiyang 550002, China;
3.Meteorological Service Centre of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

Abstract Based on the ground solar irradiance observation data of national meteorological stations (Congjiang, Sansui, Tongzi, Guiyang, Ziyun, Xingren and Weining stations) in the Guizhou mountainous areas from March 12, 2018 to February 28, 2019, this study tried to verify and correct the accuracy of FY-4A surface solar irradiance (SSI) products. The results show that: (1) The range of FY-4A SSI value is smaller than that of the ground observations. On average, the FY-4A SSI of each station is higher than that of ground observations, and the accuracy under clear sky conditions is much higher than that under cloudy conditions. The deviation is the smallest at noon and the largest in the afternoon. (2) The FY-4A SSI and the ground observed SSI have relatively consistent diurnal and seasonal variations. There is a significant positive correlation between the two, and the correlation coefficient is negatively correlated with altitude. (3) The average deviation tends to decrease with the increase of ground observation. When the ground observed SSI is greater than 800 $W \cdot m^{-2}$, the FY-4A SSI tends to be lower than that of ground observation. (4) After thresholding the ground observed SSI, the FY-4A SSI is corrected using multiple linear regression. The corrected product has good applicability in Guizhou.

Key words ground solar irradiance; Guizhou mountainous areas; verification; FY-4A; multiple linear regression