

陈亚楠, 吴炜, 戈瑶, 等. 基于多源数据的山东太阳总辐射对比分析[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(3): 50-59.  
CHEN Yanan, WU Wei, GE Yao, et al. Comparative analysis of total solar radiation in Shandong based on multi-source data[J].  
Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 50-59. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240130001. (in Chinese)

## 基于多源数据的山东太阳总辐射对比分析

陈亚楠<sup>1,2</sup>, 吴炜<sup>1,2</sup>, 戈瑶<sup>1,3</sup>, 朱晓清<sup>1,3</sup>, 朱辉<sup>1,4</sup>

(1. 山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象科学研究所, 山东 济南 250031; 3. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 4. 山东省气象数据中心, 山东 济南 250031)

**摘要** 利用 Ångström-Prescott (A-P) 太阳辐射气候学公式和山东 122 个国家级气象观测站的日照时数资料, 估算得到全省站点的日太阳总辐射, 与订正系统偏差后的欧洲中期天气预报中心 ERA5 数据和葵花 8 卫星太阳总辐射产品进行误差对比, 讨论不同数据在山东空间分布上的差异。结果表明: (1) 葵花 8 卫星订正后的太阳总辐射与观测的误差最小, 在不同天气条件下表现稳定; A-P 公式估算的太阳总辐射与观测的误差和 ERA5 数据与观测的误差接近, 云量越多这两种数据的误差越大, A-P 公式估算值在晴天表现较好, ERA5 数据在多云天表现较好。(2) 相比于葵花 8 卫星的太阳总辐射分布, A-P 公式估算值在山东西部偏低, 夏季在全省范围内普遍偏低; 而 ERA5 太阳总辐射往往在低值区偏高、在高值区偏低, 另外在威海数值明显偏高。(3) 对山东太阳总辐射而言, 葵花 8 卫星数据的准确性最高。

**关键词** Ångström-Prescott 公式; 太阳辐射; 空间分布特征; ERA5 数据; 葵花 8 卫星数据

**中图分类号**: P422.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)03-0050-10

**DOI**: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240130001

## Comparative analysis of total solar radiation in Shandong based on multi-source data

CHEN Yanan<sup>1,2</sup>, WU Wei<sup>1,2</sup>, GE Yao<sup>1,3</sup>, ZHU Xiaqing<sup>1,3</sup>, ZHU Hui<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031, China; 2. Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 4. Shandong Meteorological Data Center, Jinan 250031, China)

**Abstract** Based on the Ångström-Prescott (A-P) equation and sunshine duration data of 122 national meteorological observation stations in Shandong, the daily total solar radiation is estimated, and the error and spatial differences in Shandong are discussed by comparing it with ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis v5 (ERA5) data and Himawari-8 satellite radiation product after system deviation correction. The results are as follows. (1) The corrected total solar radiation of Himawari-8 satellite has the smallest error with the observations, and the error is stable under different weather conditions. The error between the total solar radiation estimated by the A-P equation and the observations is close to that between ERA5 and the observations, and the error of the two sets of data

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2022MD040, ZR2023QD164); 山东省气象局创新团队项目 (SDXCT2023-3); 山东省气象局能源气象服务专项 (2023SDBD06)

第一作者简介: 陈亚楠, 女, 博士, 工程师, 主要从事气候与气候变化和太阳能开发利用研究, cyn1866@163.com。

通信作者简介: 吴炜, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事数值预报和海洋气象研究, wuwei\_sd@163.com。

is larger as more cloud covers. The A-P equation estimate performs well on sunny days, while ERA5 data performs well on cloudy days. (2) Compared with the total solar radiation distribution of Himawari-8 satellite, the A-P equation estimate is mainly lower in the west of Shandong, and generally lower in the whole province in summer. The total solar radiation of ERA5 data is usually higher in the low-value area and lower in the high-value area, and it is obviously higher in Weihai. (3) For the total solar radiation in Shandong, the accuracy of Himawari-8 satellite data is the highest.

**Keywords** Ångström-Prescott equation; solar radiation; spatial distribution characteristics; ERA5 data; Himawari-8 satellite data

## 引言

太阳辐射是地球表面获得能量的根本途径,随着传统能源面临枯竭,太阳能、风能等新能源的开发利用成为全球首要任务。研究地表接收到的太阳辐射可以大大提升太阳能的有效合理利用,加快推进“双碳”工作,准确的太阳辐射空间分布有利于光伏电站设计的经济性和可靠性,对开发与利用当地的太阳能资源具有重要意义。

国内对太阳能资源的研究主要集中在太阳辐射的时空变化特征方面<sup>[1-2]</sup>,尽管地面观测到的太阳辐射是所在地总辐射的最优估计,但地面太阳辐射观测站较少,站点观测的辐射资料无法满足太阳辐射空间分布特征的研究需要,因此常用气候学方法估算得到的太阳辐射数据代替<sup>[3]</sup>。根据相关关系,日照、云量、气温等观测资料常被用来估算太阳辐射<sup>[3-5]</sup>,研究表明基于日照计算的辐射值效果更好<sup>[6]</sup>。早在20世纪20年代,Ångström<sup>[7]</sup>首先提出基于日照的太阳辐射气候学计算公式,随后Prescott<sup>[8]</sup>提出以天文辐射代替晴天(可能)太阳总辐射,该太阳辐射气候学估算方法常被称为Ångström-Prescott公式<sup>[9-10]</sup>(以下简称“A-P公式”)。尽管A-P公式是基于月尺度提出的,但其描述的线性关系在日尺度上的适用性值得讨论,一是因为对精细的时间分辨率的需求,二是因为实际获取的太阳辐射观测值的时间范围较短,用日尺度数据可以增加样本量。崔日鲜<sup>[11]</sup>利用A-P公式在日尺度上估算1961—2012年山东太阳总辐射,其误差分析较使用月尺度经验系数的计算结果更好,同时使用估算结果对山东太阳总辐射时空变化特征进行分析,然而该研究仅使用了17个气象站资料,空间分辨率较低。目前山东除泰山站外有122个国家级气象观测站,可以满足更高空间分辨率的需求,但是

不同区域太阳辐射透过性、日照百分率等对整个区域太阳辐射的影响不同,不同气象站经验系数的选择还有待进一步讨论。此外,基于A-P公式计算太阳辐射空间分布是否合理也需要与其他数据进行对比分析。

常用于研究太阳辐射空间分布特征的数据有卫星遥感产品和欧洲中期天气预报中心ERA5数据<sup>[12]</sup>。卫星遥感反演的太阳辐射产品可以提供大范围连续的空间分布信息,但其存在由传感器精度和反演算法适用性等问题产生的系统偏差,使用时常需要加以订正<sup>[13-14]</sup>。尽管卫星反演的太阳辐射具有较高的精度,但卫星遥感反演发展较晚,缺少长时间的太阳辐射数据。ERA5数据融合了地面观测等各种数据源,具有较长的时间范围<sup>[15]</sup>。由于同化多种数据使得云量和气溶胶误差增加,太阳辐射再分析数据有较大的系统偏差。张星星等<sup>[16]</sup>分析了欧洲中期天气预报中心的地表向下太阳辐射数据在中国范围内的误差及原因,发现其在12月—次年3月相对偏差较大,6—9月相对偏差较小,在中东部地区影响误差的主要因子是云覆盖率。综上,卫星数据精准性较高但其时间序列较短,ERA5数据时间序列较长但其准确性偏差较大,因此拟利用ERA5数据和葵花8卫星的地表向下太阳辐射产品与A-P公式计算的太阳总辐射作对比,分析比较3种数据刻画山东太阳总辐射空间分布特征的差异,借此讨论A-P公式在日尺度上的适用性。

山东位于我国东部沿海、黄河下游,有3个国家级辐射观测站(以下简称“辐射站”)<sup>[17]</sup>,分别是位于北部沿海的福山站(37.48°N, 121.23°E)、位于鲁中西部的济南站(36.60°N, 117.00°E)和位于鲁东南的莒县站(35.57°N, 118.84°E),主要观测太阳总辐射和净辐射。回顾前人研究发现,A-P公式常被用于估算辐射观测站的太阳辐射长时间序列,缺少对

其在日尺度上适用性的讨论,同时不同数据源的逐日太阳总辐射在山东的对比研究较少。本文基于A-P公式将山东122个国家级气象观测站的日照时数转化为太阳总辐射,与ERA5数据和葵花8卫星产品进行误差对比分析,讨论不同数据刻画山东太阳辐射空间分布的差异,以期对3种太阳辐射数据有更好的认识,为改进太阳辐射预报效果、优化光伏发电选址等提供理论支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

#### 1.1.1 太阳总辐射

从气象大数据云平台获取山东3个辐射站的逐小时总辐射曝辐量作为太阳辐射观测数据,对数据进行质量控制,对数据的完整性、极值、一致性进行检查。气象大数据云平台在线辐射小时数据从2015年8月开始,由于2016年4—6月缺少观测,选取2017年3月—2022年2月共5 a的数据作为确定A-P公式经验系数的时间范围。由于辐射站记录太阳总辐射的时间为当地时间,需将其转换为世界时,计算逐日观测的太阳总辐射。

对比的多源数据包括ERA5数据提供的地表向下太阳辐射日累计数据,其空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,网站(<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>)可提供1940年1月以来的数据。另外,葵花8地球静止卫星L3级产品的地表向下太阳辐射也被用来比较空间分布特征,其空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ,时间分辨率为1 d,数据使用ftp传输(<ftp://ftp.ptree.jaxa.jp/pub/himawari/L3/PAR/021/>),可下载时间自2015年7月开始。使用三次样条插值方法将ERA5数据和卫星的格点数据插值到站点,方便与观测和站点估算数据作比较。

#### 1.1.2 日照时数

基于A-P公式估算太阳总辐射时需要用到日照观测数据,从气象大数据云平台获取山东122个国家级气象观测站(除泰山站)每天记录的日照时数作为日照观测数据,时间范围为2017年3月—2022年2月,数据完整率超过90%。

#### 1.1.3 总云量

考虑在不同天气条件下对A-P公式估算的太

阳总辐射进行检验,从气象大数据云平台获取福山、济南、莒县等3站的总云量日数据,时间范围为2017年3月—2022年2月,经检查该时间范围内总云量数据完整率超过90%,除2017年3月和2020年5月数据缺测外,其他月份数据较为完整。

## 1.2 方法

### 1.2.1 A-P公式太阳辐射计算方法

A-P公式的表达式为:

$$Q = Q_0(a + bs_1) \quad (1)$$

式中: $Q$ 是实际太阳总辐射; $Q_0$ 是天文辐射,指到达大气上界、未经大气衰减的太阳辐射,其大小由太阳对地球的天文位置和各地纬度决定,计算方法详见文献[11]。日照百分率 $s_1$ 为日照时数(实际日照时间)与可照时数(可能日照时间,即全天无云时应有的日照时数)之比,它表达了天气条件(主要是云、雨、雾、尘、沙等)对日照时间的削减作用<sup>[18]</sup>。经验系数 $a$ 和 $b$ 可由最小二乘法拟合得到。

### 1.2.2 检验指标计算方法

采用平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、皮尔逊相关系数( $R$ )分别描述检验数据较观测数据的不确定性、准确性和相关性。具体计算公式如下:

$$V_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (2)$$

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{D(x)} \sqrt{D(y)}} \quad (4)$$

式中: $x$ 为估计值; $y$ 为观测值; $n$ 为样本数; $i$ 为样本序号, $i=1, 2, \dots, n$ ;cov为协方差函数; $D$ 为方差函数。成对数据的误差绝对值使用 $Z$ 检验进行显著性分析,二者相关系数使用 $t$ 检验进行显著性分析<sup>[19]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 基于A-P公式估算逐日太阳总辐射

Ångström<sup>[7]</sup>从月尺度上发现到达地面的太阳总辐射和晴天(可能)太阳总辐射之比与日照百分率有很好的线性关系,进而提出计算月太阳总辐射的气候学方法。初期研究发现,在日尺度上地面观测的太阳总辐射和天文辐射之比与日照百分率有较好的线性关系(图略),另外崔日鲜<sup>[11]</sup>的工作也用到

日数据拟合 A-P 经验公式估算太阳总辐射,因此认为可以利用 A-P 公式估算日太阳总辐射。

对 2017 年 3 月—2022 年 2 月不同月份的日数据进行最小二乘法拟合,得到山东 3 个辐射站 A-P 公式的经验系数  $a$ 、 $b$  (表 1),回归方程通过 0.01 显著性水平检验。同一月份下,济南站的经验系数  $a$  值较小,说明济南站的太阳辐射透过性较差,与大气污染偏重有关;济南站的  $b$  值较大,表明济南地区太阳总辐射对日照时数变化更为敏感。

表 1 2017 年 3 月—2022 年 2 月不同月份 3 个辐射站的 A-P 公式经验系数

Table 1 Empirical coefficients of A-P equation of three radiation stations in different months from March 2017 to February 2022

月份	福山站经验系数		济南站经验系数		莒县站经验系数	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
3	0.220	0.485	0.217	0.495	0.232	0.484
4	0.166	0.568	0.148	0.598	0.178	0.558
5	0.204	0.548	0.200	0.558	0.232	0.505
6	0.201	0.522	0.201	0.516	0.222	0.463
7	0.226	0.455	0.227	0.444	0.218	0.445
8	0.185	0.501	0.179	0.539	0.220	0.512
9	0.208	0.520	0.189	0.562	0.210	0.533
10	0.241	0.475	0.203	0.549	0.257	0.460
11	0.211	0.496	0.203	0.532	0.244	0.467
12	0.231	0.455	0.184	0.520	0.233	0.478
1	0.255	0.412	0.196	0.494	0.242	0.481
2	0.225	0.474	0.163	0.584	0.230	0.503

与崔日鲜<sup>[11]</sup>利用 20 世纪 90 年代前后数据建立的 3 个站点全年统一 A-P 经验公式所估算的日太阳总辐射误差相比,文中根据不同站点和不同月份建立的 A-P 经验公式估算的日太阳总辐射更为准确(表 2)。此外,利用本研究的逐月 A-P 公式估算 2017 年 3 月—2018 年 2 月的月太阳总辐射与观测的 RMSE 约为  $18.44 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,而王仁政等<sup>[10]</sup>利用 1992—2015 年月数据建立逐月 A-P 公式后估算 2016 年月太阳总辐射与观测的 RMSE 约为  $19.73 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,对比表明本研究利用不同月份日数据拟合的 A-P 经验公式也能较好地估算山东地区太阳总辐射。需要注意的是,基于日数据建立的 A-P 公式受日照百分率影响更大(经验系数  $b$  值较大),但日数据可以增加样本数量,使回归方程显著性提升。

由公式(1)可知,经验系数由日照百分率和太阳总辐射与天文辐射比值的决定,因此日照百分率变化关系好的站点的经验系数可能更为接近,以此为判断依据,分别计算山东不同站点与 3 个辐射站之间

日照百分率的皮尔逊相关系数,取相关性高的辐射站的 A-P 经验公式作为该站点的经验公式。最大相关站点有较明显的区域特征(图略),半岛地区除了青岛南部均与福山站相关性较好,鲁西北、鲁中和鲁南地区的西部与济南站相关性较好,青岛南部、鲁中和鲁南地区的东部则与莒县站相关性较好,区域特征随月份发生变化。由此建立山东 122 个国家级气象观测站的 A-P 经验公式,将日照时数代入公式,估算得到各站点的日太阳总辐射。

表 2 不同 A-P 经验公式估算的太阳总辐射与观测值的误差分析

Table 2 Error analysis between total solar radiation estimated by different A-P empirical equations and observations

时间尺度	A-P 经验公式来源	MAE/ ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	RMSE/ ( $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$R$
日数据	本研究	1.55	2.35	0.940 7
	崔日鲜 <sup>[11]</sup>	1.88	2.47	0.933 1
月数据	本研究	—	18.44	—
	王仁政等 <sup>[10]</sup>	—	19.73	—

注:“—”表示没有计算结果。

## 2.2 ERA5 数据和葵花 8 卫星数据偏差订正

前人大量研究<sup>[12-16]</sup>指出再分析和卫星反演的太阳总辐射有较大的系统偏差,因此在使用 ERA5 数据和葵花 8 卫星的地表向下太阳辐射日值产品时,需先对两种数据进行系统偏差订正。文中利用山东 3 个辐射站 2017 年 3 月—2022 年 2 月的逐日太阳总辐射计算并订正 ERA5 数据和葵花 8 卫星太阳总辐射日数据的系统偏差。

由 ERA5 数据与观测太阳总辐射的散点图(图 1a—c)可以看到散点偏向横坐标,即 ERA5 太阳总辐射较观测值偏高。二者偏差的逐日变化在 3 个站点基本一致(图 1d),7 月底—8 月初偏差最小,2—3 月偏差较大。偏差最大值和最小值的区间显示在夏季(6—8 月)ERA5 数据与观测结果的差异振幅较大,11 月—次年 1 月较小,这表明 ERA5 太阳总辐射在夏季更不稳定。将 3 个站点的平均偏差滑动平均后(图 1d 中黑线)作为系统偏差订正 ERA5 日太阳辐射,订正后 ERA5 太阳总辐射数据误差更小(图 1e—g),其中日平均 MAE 减小  $0.18\sim 0.39 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,日平均 RMSE 减小  $0.30\sim 0.42 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,莒县站误差减小最明显。从散点图(图 1)上看,在观测太阳总辐射的最大值和最小值附近散点偏向纵坐标,说明 ERA5 太阳总辐射对极端值刻画能力不足。

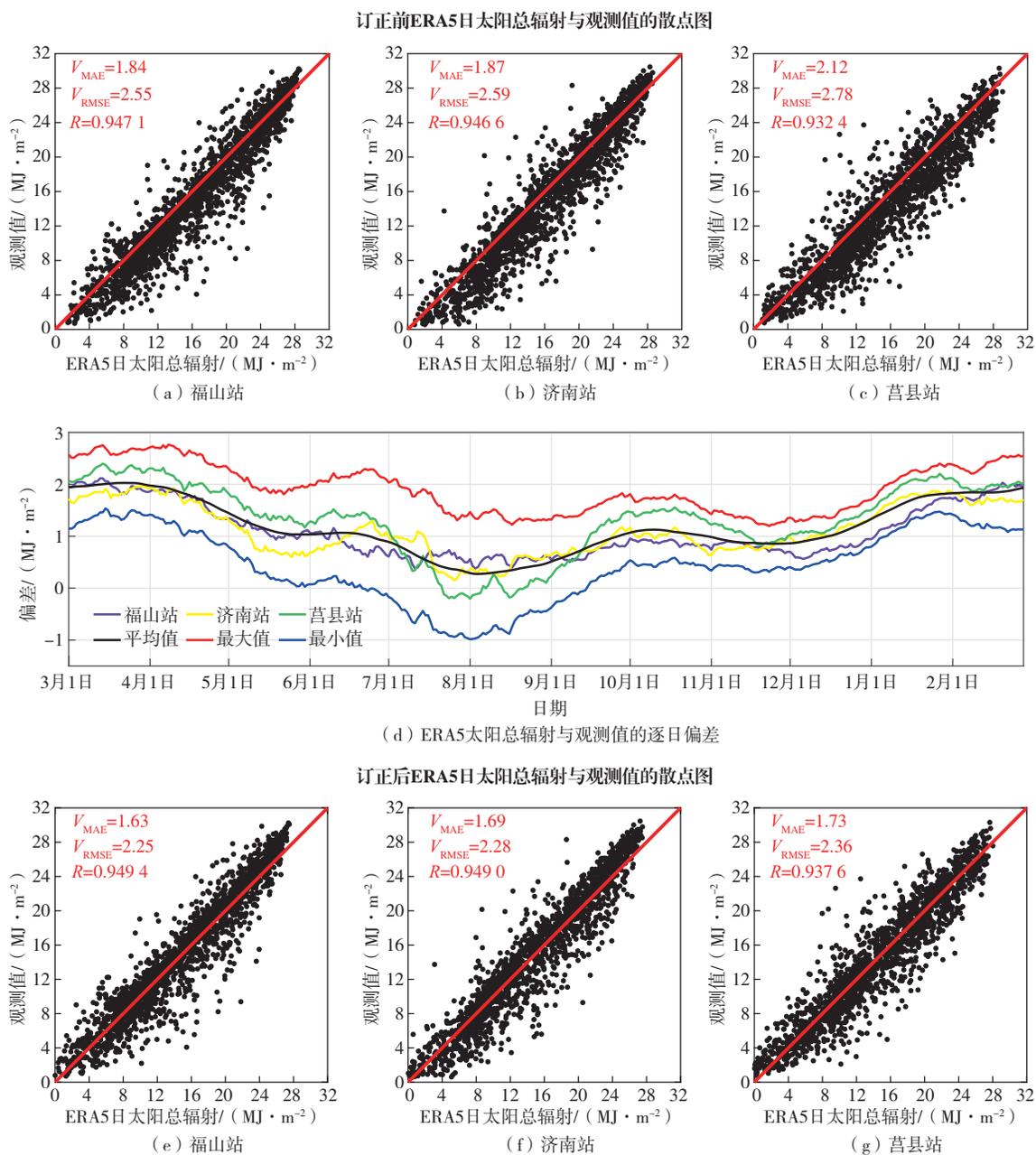


图1 订正前和订正后 ERA5 日太阳总辐射与观测值的散点图以及 ERA5 与观测值的逐日偏差

Fig.1 Scatter plot of ERA5 daily total solar radiation before/after correction and observations, and deviation of daily solar radiation between ERA5 data and observations

同样地,对葵花8卫星太阳总辐射数据进行系统偏差订正。订正前葵花8产品较观测整体偏高(图2a—c),与未订正的ERA5数据相比,尽管卫星反演数据的RMSE小,但其MAE大,说明葵花8卫星太阳总辐射产品高估特征更明显。葵花8卫星太阳总辐射产品与观测值的偏差在春季大、秋季小(图2d),这种变化与季节性气溶胶光学厚度引起的反演偏差有关。偏差最大和最小值的区间在夏季和冬季较宽,说明卫星数据在夏季和冬季与观测差异变化较大。将

3个站点的平均偏差滑动平均后(图2d中黑线)作为逐日系统偏差订正葵花8数据,订正后的葵花8卫星太阳总辐射产品与观测值误差更小(图2e—g)。相比于ERA5数据,系统偏差订正对葵花8卫星数据精度提升更大(日平均MAE减小 $1.33\sim 1.35\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ,日平均RMSE减小 $1.23\sim 1.45\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ),因此在使用葵花8卫星太阳总辐射产品时应该注意对数据的系统偏差订正。文中后续研究内容及结论中的ERA5和卫星数据精确度均是订正系统偏差后的结果。

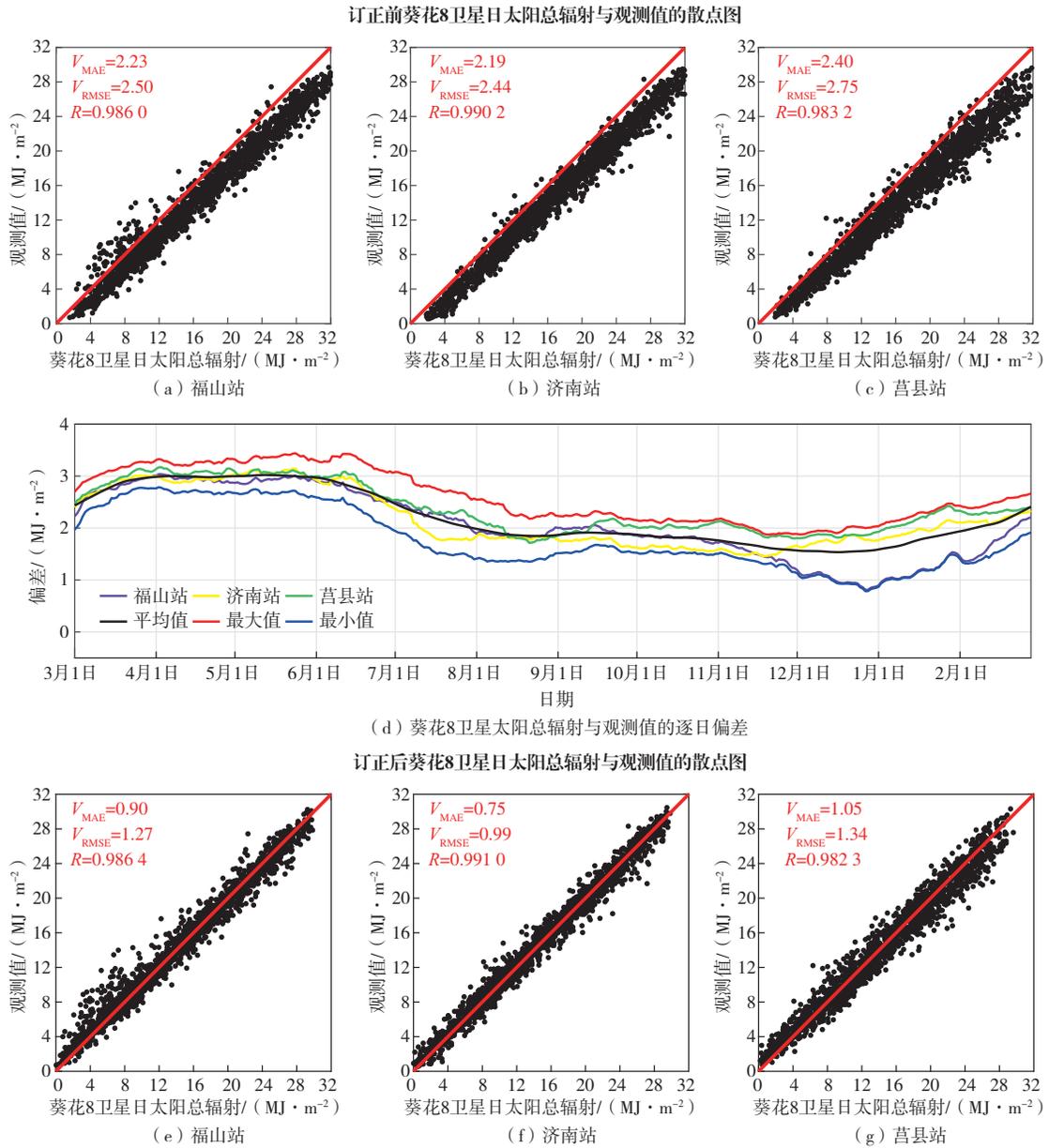


图2 同图1,但为葵花8卫星数据

Fig.2 The same as Fig.1, but for Himawari-8 satellite data

### 2.3 不同数据源日太阳总辐射的误差检验分析

前文先基于 A-P 公式估算得到山东 122 个国家级气象观测站的日太阳总辐射,然后分别订正 ERA5 和葵花 8 卫星数据的系统偏差获得更准确的日太阳总辐射数据,接下来对得到的 3 种日太阳总辐射数据进行误差检验分析(表 3),结果均已通过 0.01 显著性水平检验。A-P 公式估算的太阳总辐射在福山站的误差较小,其次是济南站,莒县站误差较大,这与记录的无日照日数有关,统计发现研究期间莒县站无日照的日数(244 d)较其他两站(福山站和济南站分别为 151 d 和 185 d)偏多。申彦波<sup>[6]</sup>指出由于日照计时的

辐射强度阈值约为  $120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,日照时数不能完全反映到达地面的太阳总辐射,当云量偏多时,日照时数与太阳总辐射关系较弱,因此在日尺度上利用 A-P 公式估算太阳总辐射具有局限性。

为检验 3 种数据在不同天气条件下的误差,以逐日云量(100 为全云)为指标,对晴天(云量不高于 10)、多云(云量为 40~60)、阴天(云量不低于 90)这 3 种典型天气<sup>[20]</sup>进行检验。A-P 公式估算的太阳总辐射误差与 ERA5 数据相近,A-P 公式估算的太阳总辐射 MAE 稍小,但 ERA5 数据的 RMSE 较小且相关系数更高,说明 ERA5 数据能较好地刻画太

阳总辐射的平均变化,但对极端值刻画不足。葵花8卫星数据在3个辐射站的误差更小、相关系数更高,说明葵花8卫星产品比A-P公式估算的太阳总辐射和ERA5数据更接近于观测值,由此认为经过系统偏差订正后的葵花8卫星地表向下太阳辐射产品能更好地表征观测太阳总辐射。对比不同天气条件下的误差结果,A-P公式估算和ERA5的太阳总

辐射与观测值的误差(相关系数)都表现出随云量增多而变大(减小)的情况,表明云量对这两种太阳总辐射日数据的影响较大,在晴天A-P公式估算的太阳总辐射误差明显小于ERA5数据,而在多云天ERA5太阳总辐射误差较小;葵花8卫星太阳总辐射产品在晴天时与观测值误差最小,在多云和阴天时误差变化不大,在不同天气条件下表现更稳定。

表3 2017年3月—2022年2月不同天气条件下不同数据源日太阳总辐射与观测值的对比

Table 3 Comparative analysis between daily total solar radiation from different data sources and observations at three radiation stations under different cloud conditions from March 2017 to February 2022

天气背景	数据源	MAE/(MJ·m <sup>-2</sup> )			RMSE/(MJ·m <sup>-2</sup> )			R		
		福山站	济南站	莒县站	福山站	济南站	莒县站	福山站	济南站	莒县站
所有天	A-P公式估算	1.51	1.55	1.59	2.31	2.36	2.39	0.945 6	0.943 4	0.933 1
	ERA5再分析	1.63	1.69	1.73	2.25	2.28	2.36	0.949 4	0.949 0	0.937 6
	葵花8卫星产品	0.90	0.75	1.05	1.27	0.99	1.34	0.986 4	0.991 0	0.982 3
晴天	A-P公式估算	0.87	0.84	0.80	1.25	1.11	1.20	0.982 1	0.985 0	0.979 2
	ERA5再分析	1.15	1.33	1.19	1.48	1.63	1.60	0.979 9	0.978 2	0.962 8
	葵花8卫星产品	0.72	0.59	0.99	1.04	0.75	1.22	0.988 2	0.992 9	0.981 1
多云	A-P公式估算	1.62	1.59	1.65	2.35	2.44	2.49	0.938 7	0.922 7	0.908 1
	ERA5再分析	1.59	1.59	1.84	2.19	2.19	2.43	0.946 8	0.938 3	0.910 5
	葵花8卫星产品	1.04	0.74	1.10	1.46	0.96	1.41	0.979 9	0.988 3	0.975 7
阴天	A-P公式估算	1.95	2.14	2.27	2.62	2.85	2.93	0.909 9	0.895 8	0.810 9
	ERA5再分析	2.20	2.02	2.12	2.92	2.66	2.90	0.893 8	0.921 1	0.876 9
	葵花8卫星产品	0.97	0.83	0.98	1.37	1.06	1.27	0.979 9	0.988 2	0.971 4

## 2.4 日太阳总辐射的空间分布

由5a(2017年3月—2022年2月)平均气候态看,春季(图3a—c),山东太阳总辐射呈“北高南低”的分布特征,日太阳总辐射为16~19 MJ·m<sup>-2</sup>。3种数据的太阳总辐射高值区都出现在滨州、东营等地,菏泽、枣庄等地太阳总辐射偏低。相较于葵花8卫星产品,A-P公式估算的太阳总辐射在聊城等地明显偏低(图4a),ERA5数据的太阳总辐射在聊城、菏泽、济宁、威海等地偏高(图4b)。

夏季(图3d—f),山东太阳总辐射较春季稍有增幅,日太阳总辐射为16~20 MJ·m<sup>-2</sup>。太阳总辐射高值区在鲁西北,低值区出现在临沂、日照等地,整体呈“西北高东南低”的分布特征。相较于葵花8卫星产品,A-P公式估算的太阳总辐射在全省一些站点明显偏低(图4c),这可能与山东夏季阴雨天偏多有关,ERA5数据的太阳总辐射依旧在威海和沿海局地偏高(图4d)。

秋季(图3g—i),山东太阳总辐射呈“东高西低”的分布特征,5a平均日太阳总辐射为11~13 MJ·m<sup>-2</sup>。太阳总辐射高值区出现在半岛地区,低值区位于菏泽等地。A-P公式估算的太阳总辐射与葵花8卫星产品差异较小(图4e),但ERA5数据的

太阳总辐射比葵花8卫星产品在菏泽、聊城、德州、东营和威海等地偏高,在日照、青岛等地偏低(图4f)。

冬季(图3j—l),山东太阳总辐射分布呈现“南高北低”的主要特征,日太阳总辐射为8~10 MJ·m<sup>-2</sup>。太阳总辐射高值区主要位于鲁中地区南部和临沂、日照等地,低值区位于威海和烟台北部。对比之下,A-P公式估算的太阳总辐射在德州、聊城、菏泽等地偏低(图4g),ERA5数据的太阳总辐射在上述太阳总辐射高值区偏低、低值区偏高(图4h)。

## 3 结论与讨论

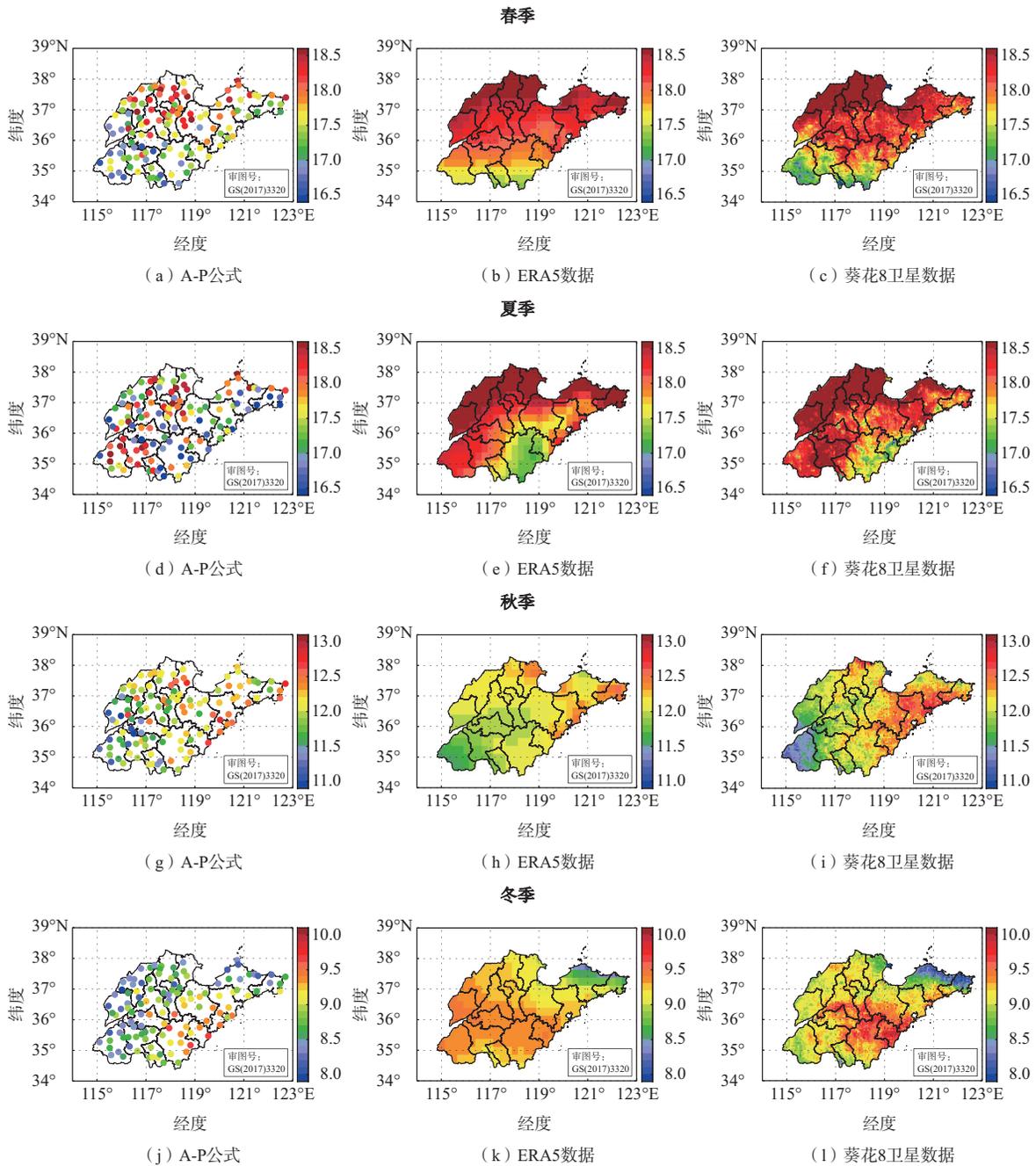
利用山东3个辐射站2017年3月—2022年2月的太阳总辐射日数据,按不同月份计算A-P公式的经验系数,根据不同站之间日照百分率的皮尔逊相关系数,选择相关系数最大的辐射站A-P经验公式,估算得到山东122个站点的日太阳总辐射数据集。对ERA5数据和葵花8卫星的日太阳总辐射数据进行系统偏差订正,得到准确性更高的2种数据集。

对比3种日太阳总辐射与观测值的误差发现,葵花8卫星的太阳总辐射准确性最高,与观测值的误差在晴天时最小,在多云和阴天时变化不大,表现较为稳

定;A-P公式估算的误差检验结果与ERA5数据相近,A-P公式估算的太阳总辐射MAE稍小,但ERA5数据的RMSE较小且相关系数更高,说明ERA5太阳总辐射能较好地刻画平均变化,对观测中辐射极端值刻画不足;云量对A-P估算和ERA5数据的太阳总辐射影响较大,云量越多,二者与观测的误差越大,在晴天A-P估算值误差明显较小,而在多云天ERA5误差较小。

3种太阳总辐射数据在山东四季的空间分布显示,

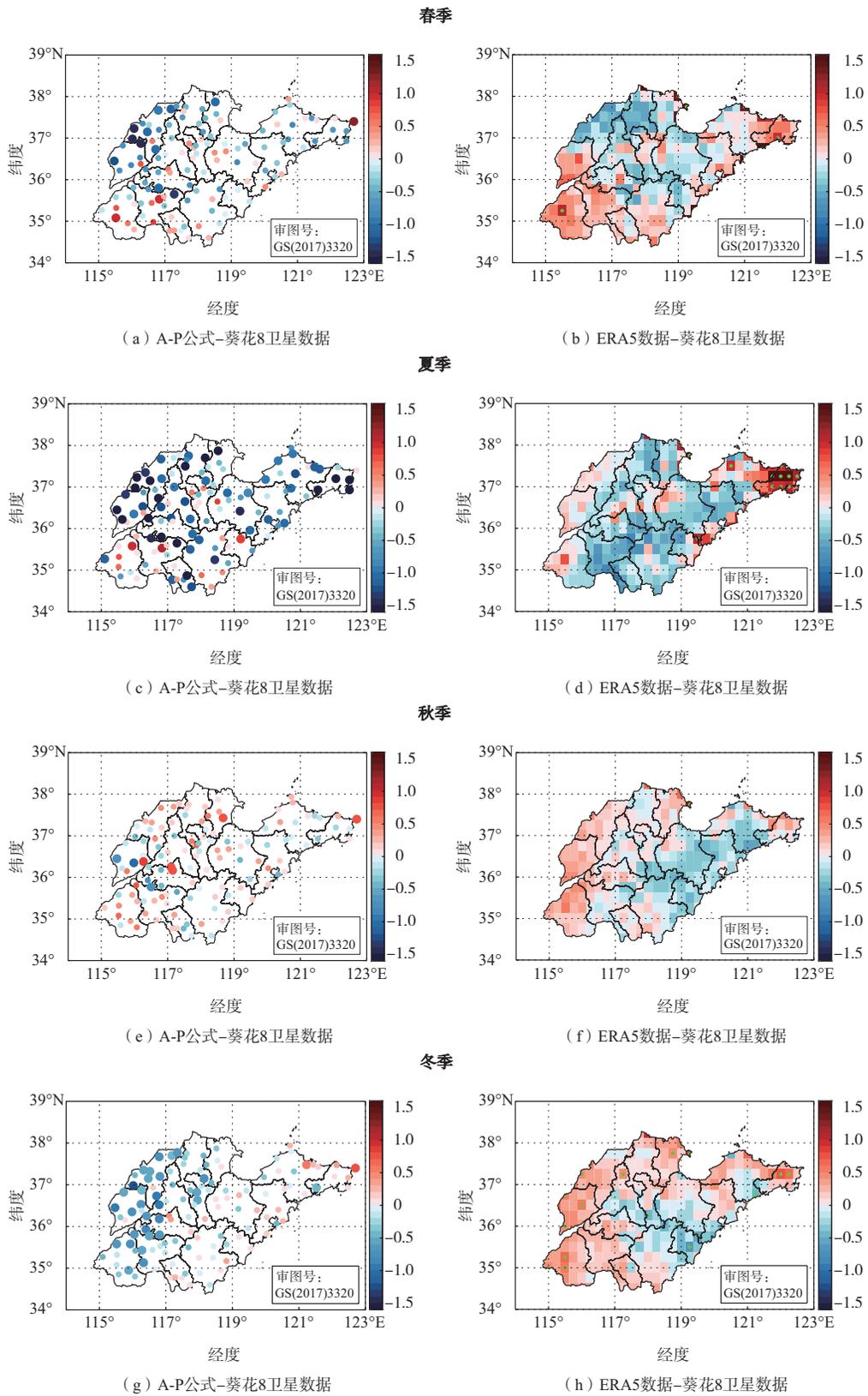
春季和夏季太阳总辐射较高、冬季较低,不同季节太阳总辐射的高值区和低值区不同。相比于准确性更高的葵花8卫星产品,A-P公式估算的太阳总辐射在鲁西北和菏泽等地偏低,夏季在山东部分站点都偏低,这可能与阴雨天偏多有关,秋季差别不明显;而ERA5数据的太阳总辐射往往在低值区偏高、在高值区偏低,这也体现了ERA5太阳总辐射产品的平滑特征,另外ERA5数据的太阳总辐射在威海数值明显偏高。



色阶一日太阳总辐射,单位为MJ·m<sup>-2</sup>。

图3 2017年3月—2022年2月不同季节平均日太阳总辐射气候态分布

Fig.3 Climatological distribution of daily total solar radiation from A-P equation, ERA5 data and Himawari-8 satellite in 4 seasons from March 2017 to February 2022



色阶—日太阳总辐射差, 单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ; a、c、e、g中大圆点和b、d、f、h中绿色圆点—差值已通过0.05显著性水平检验。

图4 2017年3月—2022年2月不同季节日太阳总辐射气候态分布之差  
 Fig.4 Difference of climatological distribution of daily total solar radiation from in 4 seasons from March 2017 to February 2022

A-P公式估算的太阳总辐射准确性与ERA5数据相近,二者同受云量影响较大,空间分布在东西方向上有明显的差异。一方面,ERA5的总云量数据较观测云量在西部偏少、东部偏多(图略),因此未来仍需关注对欧洲中期天气预报中心云量产品的订正,改进太阳辐射预报效果;另一方面,在云量偏多的情况下,A-P公式估算结果偏小,因此不建议使用A-P公式对多云和阴天时的日太阳总辐射进行估算。

### 参考文献:

- [1] 查良松.我国地面太阳辐射量的时空变化研究[J].地理科学,1996,16(3):232-237.
- [2] 李晓文,李维亮,周秀骥.中国近30年太阳辐射状况研究[J].应用气象学报,1998,9(1):24-31.
- [3] 和清华,谢云.我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J].自然资源学报,2010,25(2):308-319.
- [4] 曹雯,申双和.我国太阳日总辐射计算方法的研究[J].南京气象学院学报,2008,31(4):587-591.
- [5] 曹敏,朱晓晨.中国地表太阳总辐射空间化模拟及其时空特征分析[J].气象研究与应用,2021,42(2):24-28.
- [6] 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.
- [7] ÅNGSTRÖM A. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1924,50(210):121-126.
- [8] PRESCOTT J A. Evaporation from water surfaces in relation to solar radiation[J]. Trans R Soc S Aust,1940,64(1):114-118.
- [9] PAULESCU M, STEFU N, CALINOIU D, et al. Ångström-Preseott equation: physical basis, empirical models and sensitivity analysis[J]. Renew Sust Energ Rev,2016,62:495-506.
- [10] 王仁政,单正堃,王建新,等.基于Angstrom-Preseott模型和空间插值的山东省月太阳辐射再估算[J].山东科学,2020,33(3):93-99.
- [11] 崔日鲜.山东省太阳总辐射的时空变化特征分析[J].自然资源学报,2014,29(10):1780-1791.
- [12] SLATER A G. Surface solar radiation in North America: a comparison of observations, reanalyses, satellite, and derived products[J]. J Hydrometeorol, 2016, 17(1):401-420.
- [13] ZHANG X T, LIANG S L, WILD M, et al. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products[J]. Remote Sens Environ,2015,165:186-202.
- [14] LETU H S, NAKAJIMA T Y, WANG T X, et al. A new benchmark for surface radiation products over the East Asia-Pacific region retrieved from the Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite[J]. Bull Amer Meteor Soc,2022,103(3):E873-E888.
- [15] ZHANG X T, LIANG S L, WANG G X, et al. Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations[J]. Remote Sens,2016,8(3):225.
- [16] 张星星,吕宁,姚凌,等.ECMWF地表太阳辐射数据在我国的误差及成因分析[J].地球信息科学学报,2018,20(2):254-267.
- [17] 董旭光,陈艳春,孟祥新.WRF-Solar模式对山东太阳总辐射的模拟效果检验[J].海洋气象学报,2021,41(4):36-51.
- [18] 陈传振,张秀娟,李莉,等.南极乔治王岛地区太阳光照气候特征及影响分析[J].海洋气象学报,2021,41(4):95-101.
- [19] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999.
- [20] 程兴宏,刘瑞霞,申彦波,等.基于卫星资料同化和LAPS-WRF模式系统的云天太阳辐射数值模拟改进方法[J].大气科学,2014,38(3):577-589.