

李净, 王丹. 2018. 3 种不同遥感辐射产品的精度比较 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 252–258. Li Jing, Wang Dan. 2018. A comparative study on three types of remote sensing solar radiation products [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 252–258, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17038.

3 种不同遥感辐射产品的精度比较

李净 王丹

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘 要 遥感辐射产品的验证研究主要集中在单一产品在青藏高原地区和实测数据的比较分析上, 缺乏产品之间的相互比较从而无法得知产品的适用性, 因此针对整个中国地区对这些产品的适用性进行系统性的比较研究。选取了数据序列较完整的 GEWEX-SRB (Global Energy and Water Cycle Experiment–Surface Radiation Budget)、CERES-EBAF (Clouds and Earth’s Radiant Energy Systems–Energy Balanced and Filled) 和 GLASS-DSR (Global Land Surface Satellite–Downward Shortwave Radiation) 3 种辐射产品, 以相关系数、平均偏差、均方根误差为评价指标在整个中国区域范围内进行精度评价, 并且对其精度的时空分布特征进行了研究。研究表明, 2000~2007 年 GEWEX-SRB 与 CERES-EBAF 相比两者具有相似的偏差趋势, 低估和高估最严重站点同为峨眉山站和太原站, 总体上 CERES-EBAF 的精度更高。2008~2010 年间 GLASS-DSR 与 CERES-EBAF 进行对比结果表明 CERES-EBAF 精度要高。总体来说, 这 3 种辐射产品的精度都较高, 低估的站点大多地处高海拔地区, 其中 CERES-EBAF 产品时间序列长且精度相对较高, 尤其是在中东部及大部分沿海地区精度较高。

关键词 向下短波辐射 正弦曲线模型 GEWEX-SRB 辐射产品 CERES-EBAF 辐射产品 GLASS-DSR 辐射产品

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0252-07

中图分类号 P422.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17038

A Comparative Study on Three Types of Remote Sensing Solar Radiation Products

LI Jing and WANG Dan

College of Geographical and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070

Abstract The verification of remote sensing radiation products mainly focuses on comparative analyses of single products and measured data in the Qinghai–Tibet Plateau region. The lack of comparison between the products make it hard to determine the applicability of these products. Therefore, a systematic comparative study of the applicability of these products in China is conducted in the present study. GEWEX-SRB (Global Energy and Water Cycle Experiment–Surface Radiation Budget), CERES-EBAF (Clouds and Earth's Radiant Energy Systems–Energy Balanced and Filled), and GLASS-DSR (Global Land Surface Satellite–Downward Shortwave Radiation) radiation products are chosen to verify their accuracy. The correlation coefficient, the mean bias error, and root mean square error are taken as evaluation indexes, and the accuracy of the temporal and spatial distribution of these products in China is discussed. GEWEX-SRB and CERES-EBAF over the period from 2000 to 2007 are compared and analyzed. Results indicate both of them have the same overestimation and underestimation tendencies. The most severe underestimation and overestimation both occur at Mount Emei Station and Taiyuan Station, and the accuracy of CERES-EBAF is higher than

收稿日期 2017-03-10; **网络预出版日期** 2017-11-13

作者简介 李净, 女, 1978 年出生, 副教授, 博士, 主要从事复杂地形下定量遥感的研究。E-mail: li_jinger@nwnu.edu.cn

通讯作者 王丹, E-mail: wang_douou@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41261016, 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目 NWNU-LKQN-14-4

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41261016), Northwest Normal University Youth Teachers' Academic Promotion Program (Grant NWNU-LKQN-14-4)

that of GEWEX-SRB. GLASS-DSR and CERES-EBAF over the period from 2008 to 2010 are also compared and analyzed. It is found that CERES-EBAF has a higher accuracy. Overall, these three radiation products all have a high accuracy. The underestimated sites are mostly located at high altitudes. The CERES-EBAF product covers a long time period with a relatively high accuracy, especially in eastern China and most of the coastal region in China.

Keywords Downward shortwave radiation, Sinusoidal model, GEWEX-SRB radiation product, CERES-EBAF radiation product, GLASS-DSR radiation product

1 引言

太阳辐射是地球上能量的主要来源,是驱动大气运动的主要动力,其时空变化对气候的变化、植物生长及人类活动具有重要影响。因此,对太阳辐射的研究具有重要的意义。

我国太阳辐射观测台站数目较少,无法满足区域尺度的气候、水和生态模型需要的太阳辐射数据。由于遥感具有时间和空间上连续的特点,目前已有利用遥感产品进行区域尺度太阳辐射变化的研究(Yang et al., 2008; 蒋兴文和李跃清, 2010; 陈征等, 2016; 潘鑫和刘元波, 2016),并且已经有很多反演的辐射产品。现有的全球辐射产品主要有: CERES (Clouds and Earth's Radiant Energy Systems)、GEWEX-SRB (Global Energy and Water Cycle Experiment-Surface Radiation Budget)、ISCCP-FD (International Satellite Cloud Climatology Project)、GLASS (Global LAnd Surface Satellite)、UMD-SRB (the University of Maryland-Surface Radiation Budget)、FLASHFlux (Fast Longwave and Shortwave Radiative Flux),但这些辐射产品的精度的影响因素有很多,比如遥感器方面的误差、算法本身的误差以及算法中参数估计的误差等(Liang et al., 2010; 于江丰, 2013),因此对辐射产品精细地验证和评价是其有效应用到研究领域的前提。Yang et al. (2006, 2010)对 GEWEX-SRB 短波辐射资料在青藏高原区进行了评估,表明该辐射产品在高原的不同特征地区其产品应用还是很有局限性。Gui et al. (2009, 2010)对 CERES 的 FSW (瞬时辐射通量)在青藏高原地区进行了质量检验,发现误差较大,胡永红等(2013)也对中国北方干旱/半干旱地区,基于 GLASS 下行短波辐射产品进行了验证评估,取得较好的一致性,但其植被下垫面多为草地,评估结果具有一定的局限性。Jin et al. (2013)在复杂地形下对 GLASS-DSR 进行了评估,结果表明 GLASS-DSR 存在高估的现象且具有局限性。

前人对辐射产品的验证研究主要集中在单一产品在某一区域和实测数据比较分析上,缺乏产品之间的相互比较从而无法得知哪个产品更适合某一地区,因此本文针对整个中国地区对这些产品的适用性进行系统性的比较研究。由于 GEWEX-SRB、CERES 和 GLASS 短波辐射产品被大量广泛应用(王蕾迪, 2012; Huang et al., 2013),数据无缺失且数据序列相对完整,所以本文对这 3 种辐射产品在整个中国地区进行有效地对比验证分析,以便为区域尺度的气候、生态和水文等模型提供合适的太阳辐射数据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 地面辐射数据

本文所使用的短波辐射数据集来源于中国气象数据网([http://data.cma.cn/\[2017-01-01\]](http://data.cma.cn/[2017-01-01])),该数据集包含了 2000~2012 年中国 122 个地面辐射站点的实测资料,去除部分数据缺测严重的站点,选取时间序列完整无间断的站点,应用以下质量控制方法进行了质量控制,包括:气候界限值或允许值检查;内部一致性检查;时间连续性检查;时间序列一致性检查。经过质量控制后的辐射数据的实有率均在 99.5%左右,正确率在 99.9%以上,接近 100%。根据逐日曝辐量将地面观测数据转化为月平均值,为便于比较将站点辐射数据单位统一由 MJ m^{-2} 转换成遥感辐射数据的单位 W m^{-2} 。

2.1.2 卫星数据产品

GEWEX-SRB 是由 NASA WCRP/GEWEX (世界气候研究计划/全球能量与水循环试验)发布的地表辐射收支 (SRB) 数据产品集 ([https://eosweb.larc.nasa.gov/project/srb/\[2016-06-10\]](https://eosweb.larc.nasa.gov/project/srb/[2016-06-10])),本文选取了该产品的短波辐射数据集 3.1 版本,时间分辨率为月值,空间分辨率为 1° ,数据时间跨度为 2000 年 1 月至 2007 年 12 月。本文选取的 CERES-EBAF (Energy Balanced and Filled) (<https://eosweb.larc>

nasa.gov/project/ceres/ceres_table[2016-06-10]) 短波辐射数据集时间分辨率为月值, 空间分辨率为 1° , 数据的时间长度为 2000 年 3 月至 2012 年 12 月。GLASS-DSR (Downward Shortwave Radiation) 是北京师范大学全球变化研究院数据中心提供([http://glass-product.bnu.edu.cn/\[2016-06-20\]](http://glass-product.bnu.edu.cn/[2016-06-20])), 该产品目前生产了 2008~2010 年的数据, 时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 5 km (梁顺林等, 2014)。

2.2 研究方法

2.2.1 瞬时辐射值估算日总值

GLASS 短波辐射数据时间分辨率为 3 h, 为了便于比较本文采用正弦曲线插值法将 GLASS 产品的瞬时值合成每日的总辐射值 (Wang et al., 2010; 陈征, 2014)。每日的太阳辐射值从日出到日落的变化趋势近似于正弦曲线, 任一像元 t 时刻的辐射值 $I(t)$ 如下:

$$I(t) = I(T_0) \frac{\sin \frac{(t - T_r)\pi}{T_s - T_r}}{\sin \frac{(T_0 - T_r)\pi}{T_s - T_r}}, \quad (1)$$

式中, $I(T_0)$ 为某一像元已知时刻 T_0 的瞬时辐射值, T_r 为日出时间, T_s 为日落时间, T_r 和 T_s 由日期和地理位置纬度决定的。

若有两个已知时刻 T_1 和 T_2 的瞬时值, 则从 T_r 到 T_1 任意时刻 t 处的瞬时值可表示为 $I(T_1)$, 从 T_2 到 T_s 任意时刻 t 处的瞬时值可表示为 $I(T_2)$, 从 T_1 到 T_2 任意时刻 t 处的瞬时值如下:

$$I(t) = \frac{T_2 - t}{T_2 - T_1} I_{T_1}(t) + \frac{t - T_1}{T_2 - T_1} I_{T_2}(t). \quad (2)$$

每日的总辐射值为昼长时间内将任意时刻 t 处的瞬时值进行积分的结果, 结合公式 (1) 和公式 (2) 若有多个 $T_1, T_2, \dots, T_N$ 时刻的辐射值是已知的, 那每日的总辐射值如下:

$$D = \int_{T_r}^{T_1} I_{T_1}(t) dt + \dots + \sum_{i=1}^{N-1} \int_{T_i}^{T_{i+1}} \left[\frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} I_{T_i}(t) + \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T_i} I_{T_{i+1}}(t) \right] dt + \dots + \int_{T_N}^{T_s} I_{T_N}(t) dt. \quad (3)$$

每日太阳辐射估算的原理如图 1 所示, 其中阴影部分面积是 $I(t)$ 在整个昼长时间内的积分值, 也就是每日昼间单位面积总辐射积累量。最后, 由插值所得到的日总值计算得到日均值, 由日均值合成

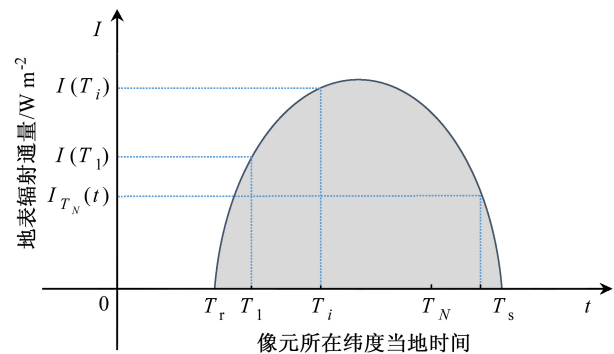


图 1 每日总辐射估算原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of daily total radiation estimation

所需的月均值。

2.2.2 评价指标

本文采用相关系数 (r_{xy})、平均偏差 (d) 和均方根误差 (σ) 这 3 种精度评价指标进行对比分析:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4)$$

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (6)$$

其中, x_i 代表第 i 个地面站点对应的辐射产品的像元取值, y_i 代表第 i 个站点实测值, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别表示两要素的平均值, n 为样本个数。 r_{xy} 为 x 和 y 两要素之间的相关系数, 揭示要素之间相互关系的密切程度; 平均偏差和均方根误差越小, 表示辐射值越接近实测值, 精度越好。

3 结果分析

本文以 ARCGIS 10.2 和 Matlab R2014a 为计算平台, 由于 GLASS-DSR 为 3 h 的产品, 而 GEWEX-SRB 与 CERES-EBAF 为月产品, 所以本文利用正弦曲线插值法将 GLASS-DSR 的瞬时值合成日总值, 然后根据日均值合成得到月均值后, 再与其他辐射数据进行对比分析。选取相关系数、平均偏差和均方根误差 3 种指标进行评价, 结果如表 1 所示, 总体来说, 这 3 种数据集与地面实测数据具有很强的相关性, 2000~2010 年 CERES-EBAF 数据完整而且精度较好。

表 1 卫星辐射值与地面观测值对比分析结果
Table 1 Comparison of satellite radiation values and ground observations

	2000~2007 年			2008~2010 年		
	相关系数	平均偏差/ W m^{-2}	均方根误差/ W m^{-2}	相关系数	平均偏差/ W m^{-2}	均方根误差/ W m^{-2}
GEWEX-SRB	0.94	6.31	19.78	—	—	—
CERES-EBAF	0.95	6.17	17.07	0.95	6.49	16.15
GLASS-DSR	—	—	—	0.95	6.09	20.16

3.1 GEWEX-SRB 和 CERES-EBAF 比较

图 2 为 GEWEX-SRB 和 CERES-EBAF 2000~2007 年辐射值与地面实测值的相关系数、平均偏差和均方根误差的空间分布,这两种产品与全国大部分站点实测值相比精度都较高,除了在西南地区峨

眉山、景洪和蒙自这 3 个站点外,与其他站点的相关系数都大于 0.8。从平均偏差的空间分布来看, CERES-EBAF 与大部分站点的平均偏差更接近于 0, 精度更高; 而 GEWEX-SRB 与站点实测值的平均偏差绝对值相对偏大, 尤其是在华中地区精度较差, 高估明显, 但是在河西走廊等西北地区其偏差较小, 精度较 CERES-EBAF 要好。从两者与地面站点实测值对比的均方根误差空间分布图可知, CERES-EBAF 的均方根误差比 GEWEX-SRB 的均方根误差数值普遍偏小, 尤其是在中东部大部分地区, 其具有更高的精度。总体来讲, CERES-EBAF 的精度比 GEWEX-SRB 更好, 尤其在华东、东北地区以及沿海地区精度更高。此外, 两者在那曲、拉

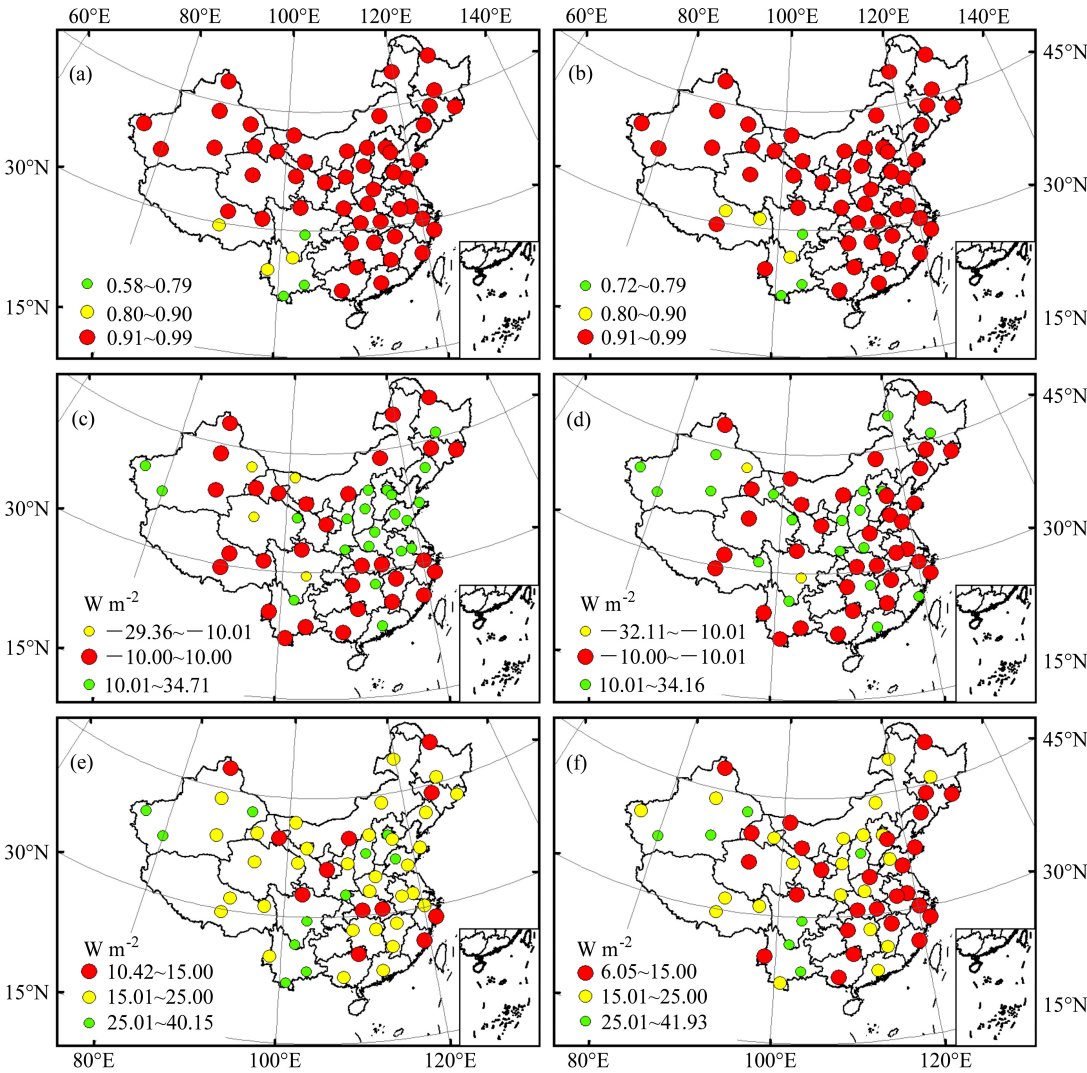


图 2 2000~2007 年 GEWEX-SRB (左列) 和 CERES-EBAF (右列) 卫星辐射值与地面观测值对比分析结果空间分布: (a、b) 相关系数; (c、d) 平均偏差; (e、f) 均方根误差
Fig. 2 Spatial distribution of comparative results of s GEWEX-SRB (Global Energy and Water Cycle Experiment–Surface Radiation Budget; left column) and CERES-EBAF (Clouds and Earth's Radiant Energy Systems–Energy Balanced and Filled; right column) with ground observations of radiation during 2000 to 2007: (a, b) Correlation coefficient; (c, d) MBE (Mean Bias Error); (e, f) RMSE (Root Mean Square Error)

萨、峨眉山、红原、蒙自这些地处高海拔地区的站点表现出一致的低估, 其中峨眉山站点低估最严重, 这可能是受高原地区云强迫等因素的影响, 并发现两者在太原站严重高估。

3.2 GLASS-DSR 和 CERES-EBAF 比较

GLASS-DSR 和 CERES-EBAF 2008~2010 年辐射值与地面实测值的相关系数空间分布如图 3 所示, GLASS-DSR 和 CERES-EBAF 除了西南地区峨眉山、攀枝花和景洪这 3 个站点外, 与全国大部分站点观测值的相关系数都大于 0.8。从两者与地面实测值对比的平均偏差和均方根误差的空间分布可以看出, GLASS-DSR 的平均偏差绝对值数值整体偏大, 而 CERES-EBAF 的平均偏差整体要接近

于 0。此外, CERES-EBAF 的均方根误差也要整体偏小于 GLASS-DSR, 尤其在东部沿海地区其均方根误差整体偏小。总体上讲, CERES-EBAF 的精度要更高, 尤其是在中东部大部分地区及沿海地区精度更好, 而 GLASS-DSR 在东南部地区高估明显, 但在西北部分地区, 精度要更好。GLASS-DSR 和 CERES-EBAF 同样在高海拔地区的那曲、拉萨、峨眉山站点存在低估, 其中在峨眉山站点低估最严重。由于 CERES-EBAF 产品的时间序列较长且数据完整, 本文单独对 CERES-EBAF 从 2000~2012 年与地面实测数据进行了验证, 发现其相关系数和平均偏差精度提高, 说明在长时间段内研究其变化时, 对比的结果更加稳定, 相关性更高。

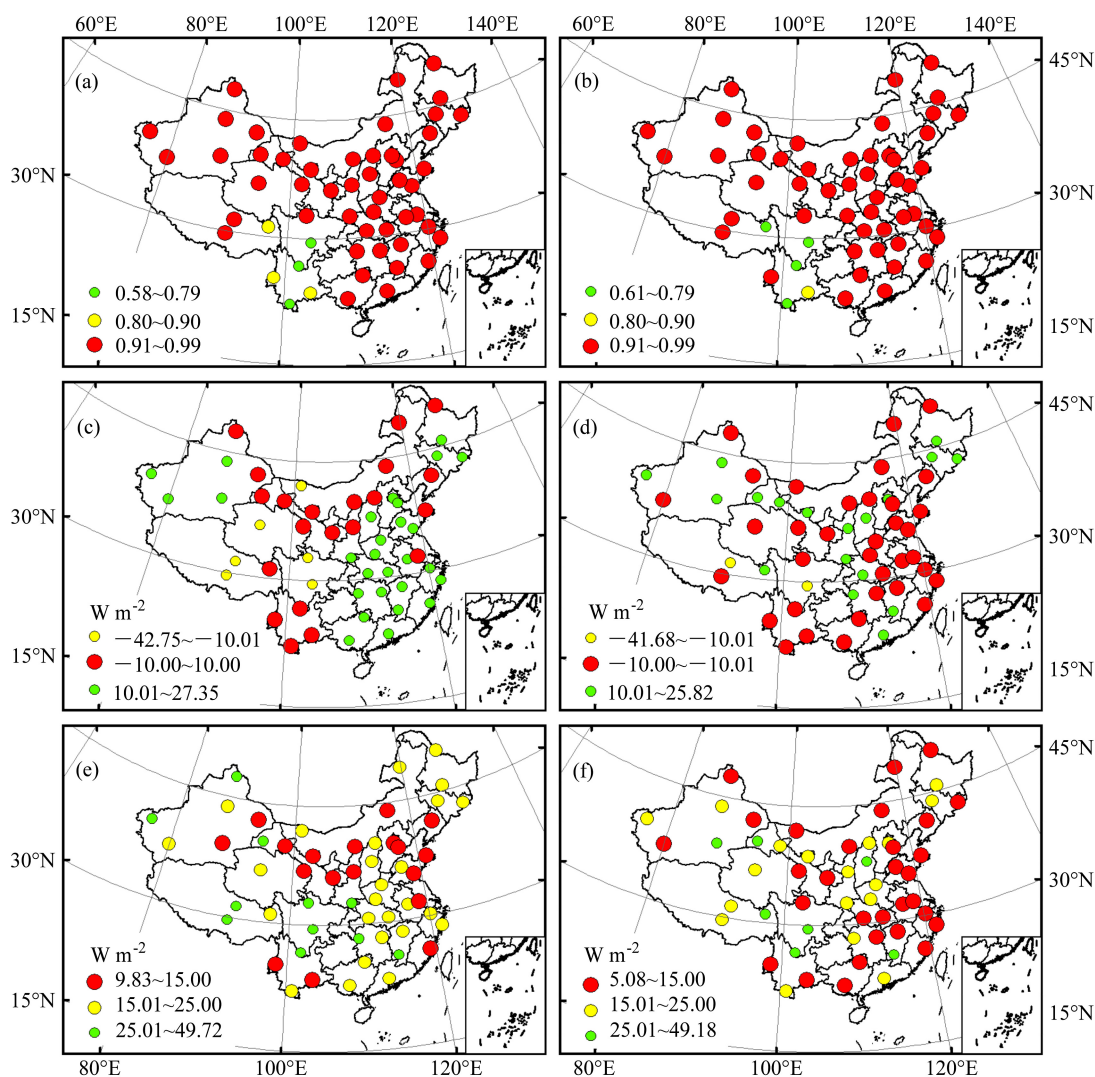


图 3 2008~2010 年 GLASS-DSR (左列) 和 CERES-EBAF (右列) 卫星辐射值与地面观测值对比分析结果空间分布: (a、b) 相关系数; (c、d) 平均偏差; (e、f) 均方根误差

Fig. 3 Spatial distribution of comparative results of GLASS-DSR (Global LAnd Surface Satellite-Downward Shortwave Radiation; left column) and CERES-EBAF (right column) with ground observations of radiation during 2008 to 2010: (a, b) Correlation coefficient; (c, d) MBE; (e, f) RMSE

总的来说, GEWEX-SRB、CERES-EBAF 和 GLASS-DSR 3 种产品低估的站点大多是在海拔比较高的高原地区, 比如那曲、拉萨、峨眉山, 这与 Yang et al. (2006)、Gui et al. (2010) 等的研究结果一致, 其中在峨眉山站和太原站存在最严重的低估和高估。

4 结论

本文对 GEWEX-SRB、CERES-EBAF 和 GLASS-DSR 3 种卫星辐射产品在整个中国地区进行精度验证, 结果表明:

(1) 本文对 GLASS-DSR 数据采用正弦曲线插值算法, 使用瞬时辐射值合成日总辐射值, 其估算的结果与地面辐射值进行对比, 精度较好, 说明该方法合理。

(2) 2000~2007 年 CERES-EBAF 的均方根误差总体上比 GEWEX-SRB 的均方根误差数值普遍偏小, 尤其是在中东部大部分地区。两者在地处高海拔地区的峨眉山站点低估最严重, 高估最严重的站点是太原站。总体来讲 CERES-EBAF 的精度比 GEWEX-SRB 更高, 尤其在华东、东北地区以及沿海地区精度更高, 且 CERES-EBAF 时间序列较长且数据完整。

(3) 2008~2010 年 CERES-EBAF 的精度要更高, 尤其是在中东部大部分地区精度更好, 但在西北部分地区, GLASS-DSR 精度要好。GLASS-DSR 和 CERES-EBAF 同样在高海拔地区的那曲、拉萨、峨眉山站点存在一致地低估。

(4) 本文所选取的 3 种卫星产品的辐射值普遍存在高估的现象。从 2000~2010 年, 3 种数据进行比较, CERES-EBAF 表现出更高的精度, 尤其是在东南沿海地区精度最好。此外, GLASS-DSR 与 GEWEX-SRB 和 CERES-EBAF 相比, 空间分辨率较高, 在西北地区精度相对较高, 可以应用到小尺度或复杂地形领域, 但时间序列较短。

参考文献 (References)

陈征. 2014. 中国陆表辐射收支遥感参数化及其年内时空分异特征 [D]. 首都师范大学硕士学位论文. Chen Zheng. 2014. Remote sensing parameterization of China land surface radiation budget and its spatial and temporal variability [D]. M. S. thesis (in Chinese), Capital Normal University.

陈征, 胡德勇, 蒋卫国, 等. 2016. 基于 GLASS 数据估算中国陆表净辐

射及其空间分布分析 [J]. 地理研究, 35 (1): 25–36. Chen Zheng, Hu Deyong, Jiang Weiguo, et al. 2016. Land surface radiation budget parameterization and spatial analysis over China using GLASS data [J]. Geographical Research (in Chinese), 35 (1): 25–36, doi: 10.11821/dlyj201601003.

Gui S, Liang S L, Li L. 2009. Validation of surface radiation data provided by the CERES over the Tibetan Plateau [C]// 17th International Conference on Geoinformatics. Fairfax, VA: IEEE, 1–6, doi: 10.1109/GEOINFORMATICS.2009.5292880.

Gui S, Liang S L, Wang K C, et al. 2010. Assessment of three satellite-estimated land surface downwelling shortwave irradiance data sets [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 7 (4): 776–780, doi: 10.1109/LGRS.2010.2048196.

胡永红, 白林燕, 王鹤松, 等. 2013. 基于干旱/半干旱区协同观测网络的 GLASS 下行短波辐射产品精度验证及影响因素评估 [J]. 气象科技进展, 3 (5): 12–18. Hu Yonghong, Bai Linyan, Wang Hesong, et al. 2013. Validation for downward shortwave radiation of GLASS product by the coordinated enhanced observation [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 3 (5): 12–18.

Huang G H, Wang W Z, Zhang X T, et al. 2013. Preliminary validation of GLASS-DSSR products using surface measurements collected in arid and semi-arid regions of China [J]. International Journal of Digital Earth, 6 (Sup.1): 50–68, doi: 10.1080/17538947.2013.825655.

蒋兴文, 李跃清. 2010. 青藏高原地表辐射的气候特征 [J]. 资源科学, 32 (10): 1932–1942. Jang Xinwen, Li Yueqing. 2010. Climatological characteristics of surface radiation over the Tibetan Plateau [J]. Resources Science (in Chinese), 32 (10): 1932–1942.

Jin H A, Li A N, Bian J H, et al. 2013. Validation of global land surface satellite (GLASS) downward shortwave radiation product in the rugged surface [J]. Journal of Mountain Science, 10 (5): 812–823, doi: 10.1007/s11629-013-2543-6.

Liang S L, Wang K C, Zhang X T, et al. 2010. Review on estimation of land surface radiation and energy budgets from ground measurement, remote sensing and model simulations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 3 (3): 225–240, doi: 10.1109/JSTARS.2010.2048556.

梁顺林, 张晓通, 肖志强, 等. 2014. 全球陆表特征参量 (GLASS) 产品 [M]. 北京: 高等教育出版社, 203pp. Liang Shunlin, Zhang Xiaotong, Xiao Zhiqiang, et al. 2014. Global Land Surface Satellite (GLASS) Products (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 203pp.

潘鑫, 刘元波. 2016. 1983~2012 年长江流域地表净辐射变化特征 [J]. 长江流域资源与环境, 25 (3): 486–496. Pan Xin, Liu Yuanbo. 2016. Spatio-temporal variation of surface net radiation over the Yangtze River basin during 1983–2012 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 25 (3): 486–496.

Wang D D, Liang S L, Liu R G, et al. 2010. Estimation of daily-integrated PAR from sparse satellite observations: comparison of temporal scaling methods [J]. Int. J. Remote Sens., 31 (6): 1661–1677, doi: 10.1080/01431160903475407.

王蕾迪. 2012. 青藏高原地区短波辐射的地面观测与卫星遥感产品的分析研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文. Wang Leidi. 2012. Study on ground observation and satellite remote sensing product of shortwave

- radiation in Qinghai-Tibet Plateau [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- Yang K, Koike T, Stackhouse P, et al. 2006a. An assessment of satellite surface radiation products for highlands with Tibet instrumental data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (22): L22403, doi: 10.1029/2006GL027640.
- Yang K, Pinker R T, Ma Y M, et al. 2008. Evaluation of satellite estimates of downward shortwave radiation over the Tibetan Plateau [J]. *J. Geophys. Res.*, 113: D17204, doi: 10.1029/2007JD009736.
- Yang K, Jie H, Tang W J, et al. 2010. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (1): 38–46, doi: 10.1016/j.agrformet.2009.08.004.
- 于江丰. 2013. 下行短波辐射和光合有效辐射遥感产品质量控制与质量评价方法研究 [D]. 电子科技大学硕士学位论文, 1–2. Yu Jiangfeng. 2013. Study on quality control and quality evaluation of downstream shortwave radiation and photosynthetically active radiation remote sensing products [D]. M. S. thesis (in Chinese), University of Electronic Science and Technology of China, 1–2.