

# 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

胡永红<sup>1</sup> 白林燕<sup>1</sup> 王鹤松<sup>2</sup> 米晓楠<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院数字地球重点实验室, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3 地球科学与测绘工程学院, 中国矿业大学, 北京 100083)

**摘要:** 下行短波辐射 (Downward Shortwave Radiation, DSR) 是地表接收太阳辐射的重要组成部分, 是地表能量平衡和地气相互作用的重要驱动因素, 同时DSR的变化影响着天气过程与气候变化。遥感手段获取的DSR产品已成为陆面过程与气候变化研究的重要驱动参数, 对DSR数据的验证与评估能为相关研究提供必要的精度与可靠性信息, 同时反馈于相关数据产品的改进工作。使用干旱/半干旱区协同观测网络为研究评估数据源, 对新一代DSR产品 (Global Land Surface Parameters-Downward Shortwave Radiation, GLASS-DSR) 进行验证评估, 发现在中国北方干旱/半干旱区该数据与观测具有较好的一致性, 整体相对误差小于4%, RMSE小于 $140\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在不同站点评估效果有一定程度差异, 均一下垫面具有较好效果。研究也发现卫星观测辐射的精度受到时空尺度的影响, 卫星获取DSR存在明显的观测特征尺度。

**关键词:** 下行短波辐射, 干旱/半干旱区, 辐射收支

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.05.002

## Validation for Downward Shortwave Radiation of GLASS Product by the Coordinated Enhanced Observation

Hu Yonghong<sup>1</sup>, Bai Linyan<sup>1</sup>, Wang Hesong<sup>2</sup>, Mi Xiaonan<sup>1,3</sup>

(1 Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094 2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 3 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

**Abstract:** As a driving force of the surface energy balance and the land-atmosphere interaction, downward shortwave radiation (DSR) is an important component solar radiation received in the land surface, which has already affected weather processes and climate change. Currently, DSR obtained by means of remote sensing products has become key parameters for land surface processes and climate change research, and validation for DSR datasets will provide necessary or reliability information of DSR datasets by errors evaluation, further improving next-generation DSR datasets. In this study, surface shortwave albedo of each station were derived from field measurements of the Coordinated Enhanced Observation Network to assess the new generation DSR product of Global Land Surface Parameters-Downward Shortwave Radiation, GLASS-DSR and evaluate its reliability. Good agreements were found between the field measurement and satellite results with overall relative errors fewer than 4% and RMSE fewer than  $140\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . It is heterogeneous among different observation sites, and better agreements were homogeneously achieved. The characteristic scale was also found for monitoring downward shortwave radiation variation, which is an important factor in influencing the accuracy of derived DSR.

**Keywords:** downward shortwave radiation, arid/semi-arid area, radiation budget

### 1 引言

太阳辐射是大气运动的重要能量来源, 是地表温

度和地表热通量的直接驱动因素。在大气层顶辐射收支保持着近似平衡, 而在地球系统内辐射传输过程非常复杂, 由卫星观测得到的年均辐射收支表明近50%的太阳辐射能量为地表所吸收, 这部分能量用于加热地表, 并通过感热通量、潜热通量和土壤热通量等与地表和大气进行能量交换, 进而影响地表能量平衡和陆面过程变化, 为近地层大气运动提供动力, 同时地

收稿日期: 2013年3月1日; 修回日期: 2013年4月27日  
第一作者: 胡永红(1979—), Email: yonghonghu@ceode.ac.cn  
资助信息: 中科院战略性先导科技专项(XDA05090203);  
国家重点基础研究发展计划(2009CB723904);  
干旱气象科学研究基金项目(IAM201212)

表辐射收支是否平衡也与区域蒸散状况及水文过程有着密切关系<sup>[1-4]</sup>。

下行短波辐射 (Downward Shortwave Radiation, DSR) 是太阳辐射的主要组成部分, 目前研究者多采用台站与卫星观测两种手段对其进行量化<sup>[1, 5]</sup>, 其中卫星观测以大尺度连续空间观测优势得到了广泛应用。对地静止卫星已能够提供常规辐射观测业务<sup>[6]</sup>, 进而为流域蒸散和干旱研究服务<sup>[7]</sup>, 模型与高分辨率卫星影像结合, 能进一步提供小流域的辐射收支和蒸散状况<sup>[8-11]</sup>。然而, 由于辐射产品来自多种不同的观测系统, 存在研究目的与应用领域的差异, 这些辐射产品对于下行短波的量化也各有不同<sup>[3]</sup>, 尤其是作为陆面过程模式的重要驱动数据, DSR的时空分辨率在区域与流域尺度的应用仍存在一定问题<sup>[12]</sup>。因此, 对DSR的订正和评估有助于量化辐射产品的合理性与可靠性, 帮助研究者更好地开展相关科研工作。

新一代卫星辐射产品 (GLASS-DSR) 综合了多种卫星平台, 可生产高时空分辨率均一化DSR数据。本研究拟使用干旱区/半干旱区协同观测网络, 对GLASS-DSR产品进行验证与评估, 提供相应辐射产品的精度评估与验证信息, 为GLASS辐射数据产品的下一步改进及其在相关研究领域的应用提供基础信息。

## 2 数据与方法

鉴于数据源获取的限制, 本研究使用北方协同观测站网作为地面验证数据, 以开展GLASS-DSR的评估工作。因此, 本研究DSR的评估结果主要适用于干旱/半干旱区域的精度分析。

### 2.1 GLASS-DSR 产品

GLASS-DSR产品由北京师范大学全球变化研究院数据中心提供, 该数据由国内多家单位协作完成。

本研究使用了GLASS-DSR研究组提供的最终版数据。该数据空间分辨率为5km, 时间分辨率为3h, 其使用多个静止卫星 (GOES、FY、MSG和MTSAT) 和极轨卫星 (MODIS) 影像作为融合数据源。下行辐射数据采用查找表法进行产品反演, 首先利用MODTRAN大气辐射传输模型建立大气顶层辐亮度与地表DSR的关系, 建立不同卫星天顶辐亮度和地表DSR关系的查找表, 进而通过卫星观测数据估算地表DSR, 然后得到不同卫星平台的地表下行辐射进行融合, 即为本研究使用的GLASS地表DSR数据<sup>[13]</sup>。

### 2.2 中国干旱/半干旱区协同观测系统

中国干旱/半干旱区协同观测系统设立的目的是为了获得干旱/半干旱区的关键生态过程与气象参数, 认识该区域陆气相互作用特征, 为提高该区域的模式参数化水平和理解该区域生态环境演变规律服务。该观测系统涵盖了北方部分常规观测站及国家和地方建成的研究型观测站, 观测内容涵盖了近地层气象梯度、地—气能量和物质交换、地表生态和大气成分等内容。从2008年开始, 协同观测已进行了近4年的业务化运作, 每年定期开展系统的仪器维护、标定, 并进行相应的数据整编、处理等工作, 保证了所有观测台站在统一的观测标准下进行, 保证所获数据的可比性。由于部分台站存在缺测现象, 本研究选取使用了观测较为完整的站点 (表1) 数据, 主要使用其气象观测信息作为验证数据源, 协同观测的数据产品经过了数据处理人员的系统订正、去野点和滤波等处理工作, 保证了较好的数据质量。

### 2.3 验证方法

DSR主要受到太阳入射角度和大气状态影响, 而下垫面的影响较小, 通常辐射具有一定尺度的空间代表性。因此, 本研究在验证评估GLASS-DSR时, 直

表1 本研究使用的中国干旱/半干旱区协同观测系统台站信息

台站名称	海拔 (m)	冠层高度 (m)	平均降水量 (mm)	下垫面类型
阿柔	3033	2	396	亚高山草甸
盈科	1519	1	382	农田 (玉米)
临泽	1384	1	376	农田 (玉米)
玛曲	3423	2	599	亚高山草甸
沙坡头	1227	2	261	草原化荒漠
榆中	1965	2	382	典型草原
庆阳	1095	2	414	农田 (小麦)
东苏	970	2	287	荒漠化草原
锦州	22	1	463	农田 (玉米)
密云	350	25	584	落叶阔叶林
馆陶	42	15	536	农田 (小麦)

接采取台站与对应分析区域进行直接对比验证，具体如下：

(1) GLASS卫星影像处理：根据已有站点观测，对GLASS-DSR数据进行准确的空间定位。为了保证所得辐射结果的稳定性，提取台站对应区域 $3 \times 3$ 像元的辐射平均值作为验证值，然后对所有卫星影像进行批处理，生成卫星DSR的时间序列；由于目前协同观测数据只提供了2008和2009年的观测数据，而2008年处于协同运行的初期，可能存在一定的仪器观测不稳定因素，因此选择2009年作为GLASS数据的评估时段。

(2) 观测数据收集整理：收集2008和2009年协同台站气象观测数据，并从CNR四分量辐射计观测得到的辐射参数中选取DSR信息作为验证数据源。协同观测提供的数据信息为30min平均观测数据。

(3) 时序差异处理：对比GLASS-DSR与台站观测时间序列，发现两者在产品给出的时间频率方面存在一定差异，观测提供的是半小时平均数据，而卫星数据提供的是1h瞬时产品。为了将卫星数据产品与观测数据进行较好匹配，将台站数据平均到1h的时间尺度上进行分析，这样一方面使得观测与卫星数据时段理论上更为接近，另外避免了由于部分观测点偏差过大引起的误差。

(4) 时空尺度影响分析：为了探讨影响辐射的时空因素，本研究选择多种不同的空间尺度（像元： $1 \times 1, 2 \times 2, \dots, 10 \times 10$ ）评估不同尺度下辐射的变化特征，并结合下垫面状况说明是否存在较好的空间尺度；另外，对于辐射观测结果受到研究时段影响较大的特征，选择中午太阳高度角最大时刻作为评估时段，减小由于太阳入射角度偏差过大而引起的误差，探讨辐射的时间特征的可能影响。

## 2.4 验证指标选取

以台站观测作为真值评估卫星观测结果的偏差时，使用两种不同的评估指标分析卫星数据的整体精度与离散程度，分别为：

均方根误差（RMSE）：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i^n (DSR_{si} - \overline{DSR_s})^2}$$

其中， $n$ 为卫星观测序列长度， $DSR_{si}$ 为第 $i$ 个卫星观测DSR值， $\overline{DSR_s}$ 为序列均值。

相对误差（RE）：

$$RE = \frac{DSR_s - DSR_f}{DSR_f}$$

其中， $DSR_s$ 为卫星观测DSR值， $DSR_f$ 为台站观测DSR值。

## 3 结果与讨论

为了获得对GLASS辐射数据精度比较完整的认识，本研究采用多种不同的时空分析尺度进行精度评估与验证研究。首先，以所有的待分析卫星与地表观测数据为对象，评估GLASS数据的总体精度；其次，选择不同的台站周边空间尺度和不同的观测时刻，分析短波下行辐射的变化特征，探讨影响产品评估的内因因素。

### 3.1 GLASS-DSR 总体精度验证

图1为2009年GLASS-DSR的验证评估散点图。从图上可以发现，2009年GLASS-DSR产品与台站观测具有很好的相关性，大部分站点 $R^2$ 达到了0.8以上。线性拟合的斜率也普遍达到了0.8左右，该结果表明GLASS数据产品与台站观测值非常接近，但整体评估稍低于台站观测。这可能与卫星提取下行短波方式有关，首先，卫星使用了瞬时观测数据，而台站为连续观测的平均；其次，卫星反演的DSR产品仍包含了一定程度的大气效应影响。

进一步将2009年7—9月的卫星与观测数据进行整合，分别计算GLASS-DSR产品的整体均方根误差和相对偏差，得到GLASS数据在不同观测台站的评估结果（表2）。结果表明，GLASS产品整体精度较好，相对误差基本在10%以内；个别站点（东苏）与新增的庆阳站点超过10%；密云站验证效果最好，相对误差约2%，且RMSE约为 $121 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对于所有站点进行统计发现，产品总体相对偏差约为4%，与目前国际上经过同化的辐射数据集的评估结果较一致<sup>[14]</sup>。

### 3.2 空间尺度差异对卫星 DSR 观测的影响

通常认为空间尺度对于DSR的影响较小，但是小区域的地形变化可能导致一定辐射反演误差，辐射观测是否在空间尺度上存在一个最优阈值，以及空间观测是否对最终的辐射观测结果产生影响，仍是分析辐射产品精度时一个必须考虑的问题。本研究为了对这个问题进行剖析，选择了相对偏差较小的两个站点（密云站和阿柔站）进行分析，并考虑到两种不同下垫面之间的对比。这里设计的空间尺度变化为5~70km，也即是从 $1 \times 1$ 像元到 $14 \times 14$ 像元（图2）。可以看出，台站周边地形具有明显的起伏变化。

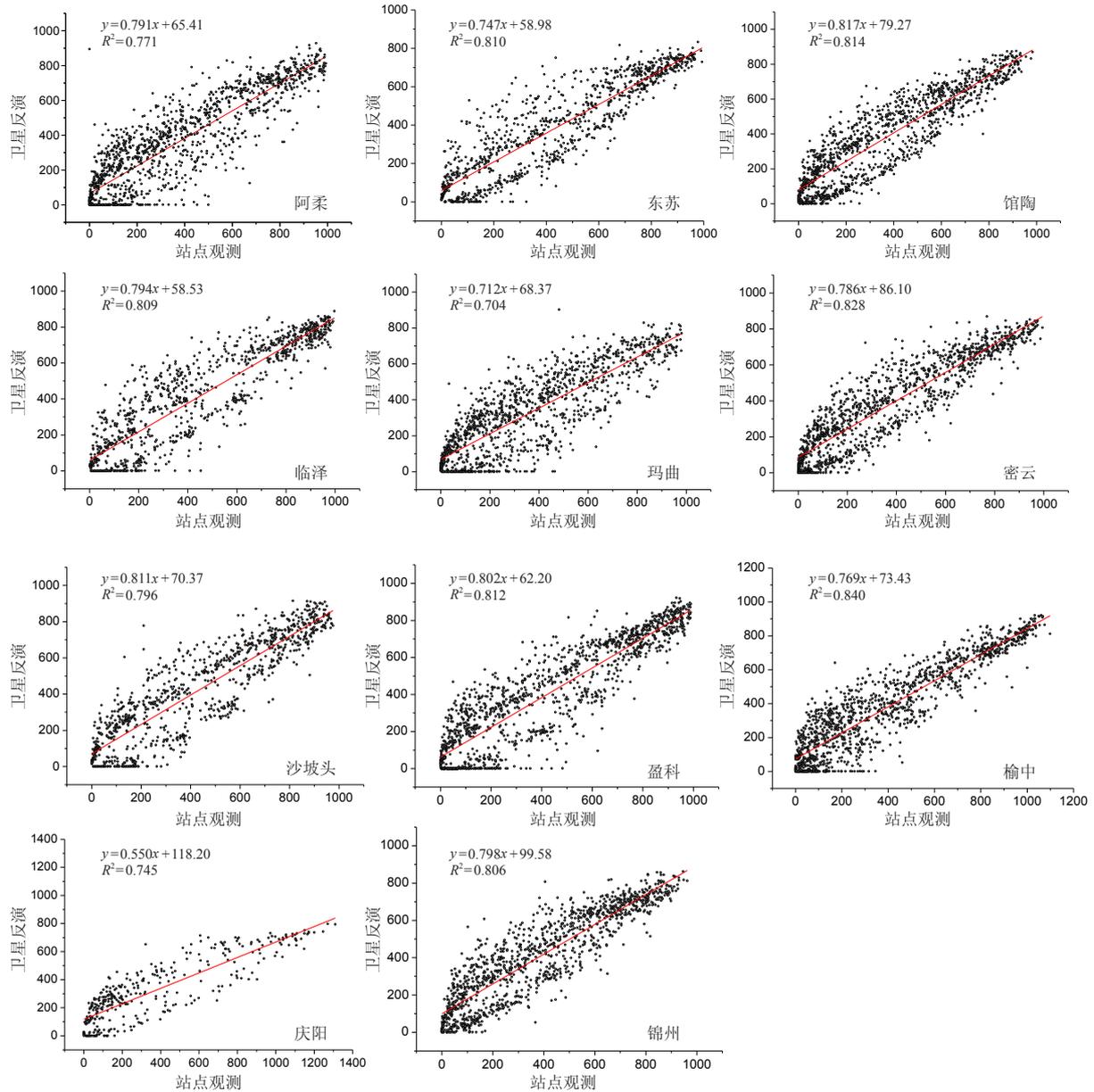


图1 DSR在协同观测台站的验证散点图 (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )

表2 2009年GLASS-DSR产品验证结果

台站	RMSE ( $W \cdot m^{-2}$ )	RE (%)
阿柔	142.41	-2.7
盈科	139.33	-4.8
东苏	141.72	-11.9
密云	121.06	1.8
沙坡头	136.57	-2.4
榆中	130.12	-4.3
锦州	117.01	5.5
临泽	122.78	-6.8
玛曲	146.04	-9.6
馆陶	134.86	3.2
庆阳	197.85	-12
整体评估结果	139.07	-4

图3为利用GLASS-DSR得到的2009年第199日 (Julian日) 上午11:30密云站和阿柔站的DSR空间尺度效应的分析结果。可以看出, 随着空间尺度的增加, DSR降低, 空间尺度在20~25km之间时DSR的变化趋于稳定, 降低幅度约达到 $15 W \cdot m^{-2}$ 。对空间尺度变换过程中的偏差分析结果 (图3b) 也可以看到, 标准偏差随着空间尺度的增加而增加, 当空间尺度超过20km时, 由空间尺度变化导致的偏差趋于稳定。由上分析可见, DSR变化存在较为明显的空间依赖性, 具有观测特征尺度, 在20km以内其变化可能会受到

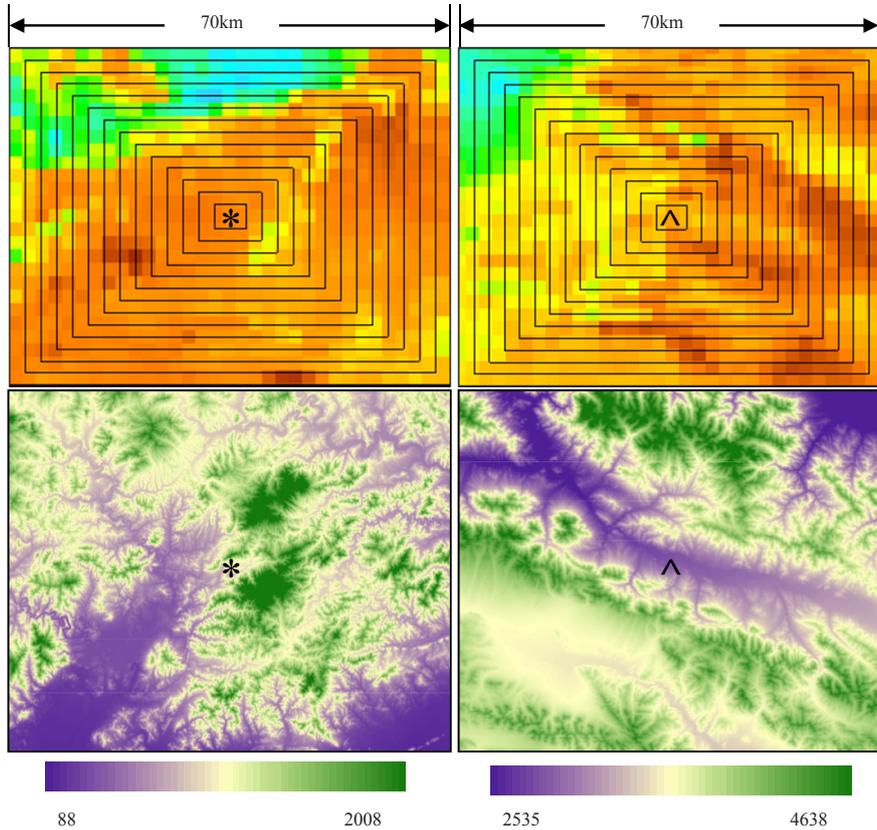


图2 密云站（左侧）与阿柔站（右侧）周边不同空间尺度的下行短波辐射（上方，暖色调代表DSR增加）与DEM（下方，单位：m）变化对比  
DSR初始网格大小为5km×5km，然后以5km为单位递加至70km×70km  
（图中，\*代表密云站所在位置，^代表阿柔站所在位置）

小尺度某些因素的影响，如地形变化或大气消减等（图2），而在20~25km之间开始趋于稳定，区域平均观测值这个时候可能主要受太阳入射角度等因素影响。随着空间尺度的进一步扩大（25~70km），区域DSR仍保持稳定，这进一步说明DSR更倾向于是一种宏观的地表特征参量，主要与太阳地球之间的距离变化、太阳入射角度以及观测点的纬度等因素有关<sup>[9]</sup>。在近正午时刻，空间尺度效应影响程度较小，约为观

测值的2%。但是从部分辐射数据集偏差评估的范围（<5%）来看，空间尺度应是精度评估与验证中需考虑的影响因素之一。

### 3.3 DSR的时间变化差异影响

DSR变化的主要影响因素是太阳入射角度，即与辐射观测的不同时刻有关。为了进一步认识GLASS-DSR在不同时间段可能受到的影响，分别提取密云站和阿柔站2009年7—9月不同UTC时间点（00:30和

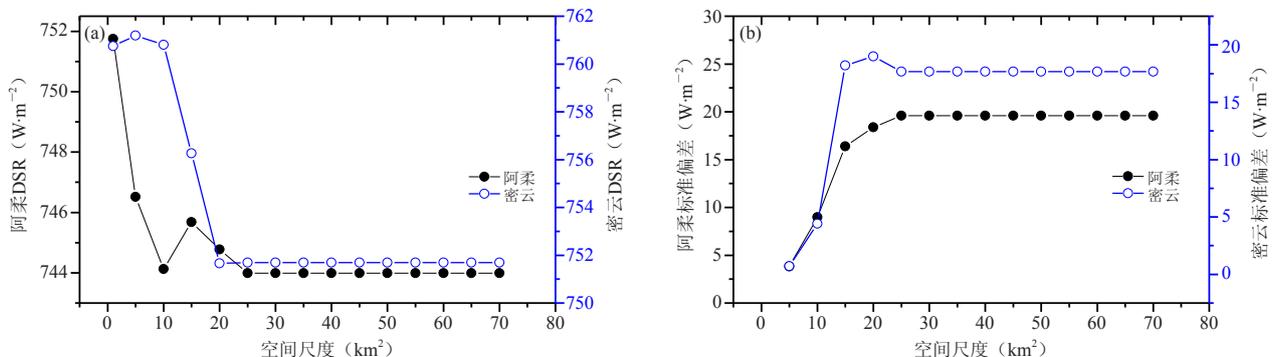


图3 空间尺度变化与DSR之间的关系：（a）DSR随空间尺度增加的变化，（b）对应空间尺度变化过程的标准偏差

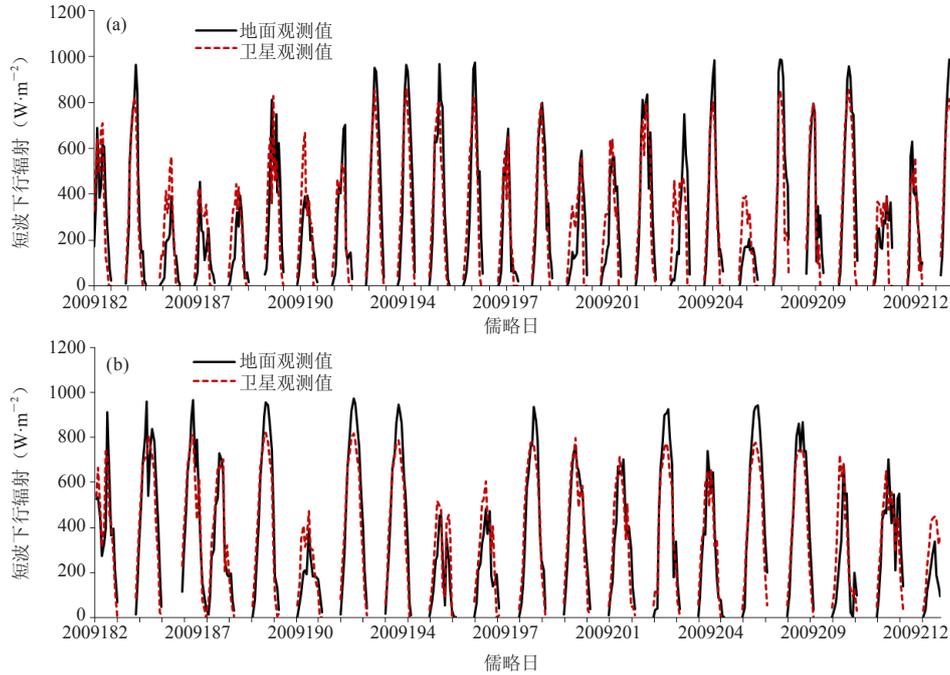


图4 2009年7-9月间密云站 (a) 与阿柔站 (b) DSR地表观测与卫星观测序列的对比

04:30) 数据进行了对比分析。图4为密云站和阿柔站卫星观测序列与台站观测序列的对比,可以看出卫星观测序列与台站观测序列具有较好的同步性,两者均能体现辐射的日变化特征。台站观测在高值区(约在正午时刻)与卫星观测具有较好的一致性,极少数观测点的差

异表明可能存在天气因素的影响,如台站观测受到云遮盖,而卫星观测区域较大,使得这种影响变小。

为了进一步认识辐射变化的不同时刻影响,分别提取00:30和04:30(UTC时间)的数据进行累计经验分布函数(Empirical CDF)分析(图5),以认识不

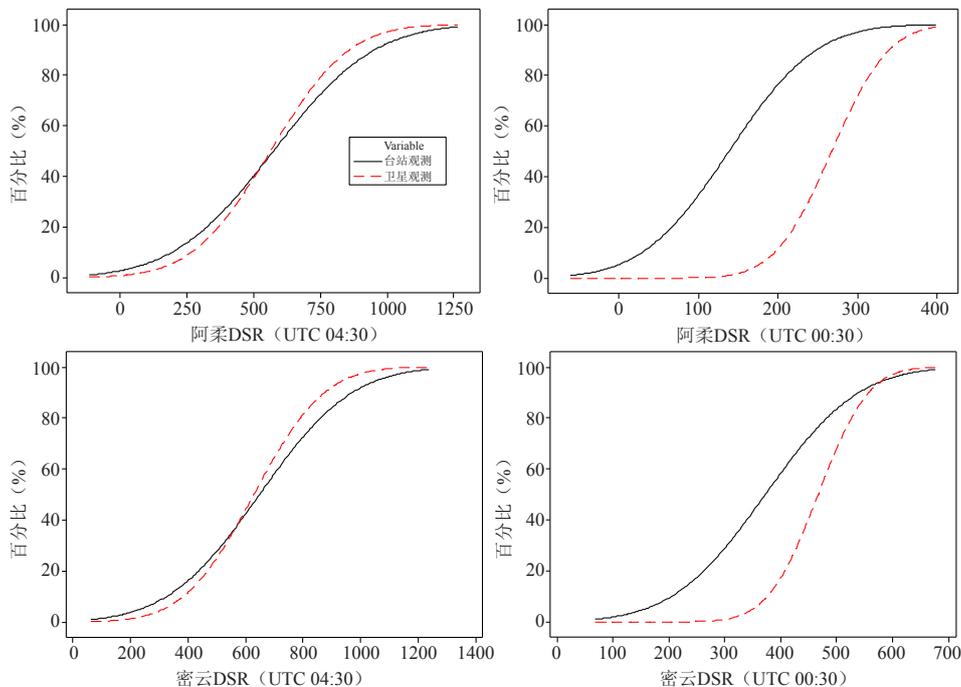


图5 密云站与阿柔站在不同时段DSR变化的累计经验分布函数(CDF)分析

同时刻、不同观测手段间的差异。阿柔站与密云站的分析结果表明,在04:30时刻,即当地时正午接近太阳直射的时候,卫星观测得到的DSR与台站观测具有非常一致的分布,也即说明正午时刻卫星观测受到其他因素的影响最小,是评估相对理想状态下卫星反演DSR的较好时段;而在00:30时刻,即刚刚日出不久,太阳高度角较低,此时卫星反演得到的DSR分布与台站有较大差异,卫星观测结果整体低于台站观测,这与此时太阳入射辐射在大气中经过的路径最长,受到的影响因素最多有关。

## 5 结论

本研究利用中国干旱/半干旱区协同观测网络提供的台站观测数据,对2009年7—9月GLASS-DSR数据在中国北方地区进行了精度验证以及相应辐射观测影响因素评估。结果表明,GLASS-DSR数据具有较好的精度,多个台站的评估统计结果表明其整体偏差小于4%,超过了部分国际综合同化辐射资料的评估精度。同时也必须注意到,卫星反演DSR应注意时空尺度的影响,通常随着空间尺度的变大,卫星观测得到的DSR变化逐步趋于稳定,大尺度的DSR与日地距离及太阳入射角度等宏观参数有关,而局地DSR观测可能存在较优观测尺度;从产品精度验证的角度而言,太阳近似直射的正午时刻为辐射验证较为理想的时段。

本研究使用的协同观测台站大部分位于中国干旱/半干旱区,植被下垫面多为草地等,未能利用更广泛的观测数据,如中国南方地区或人类影响较多的下垫面区域,因此评估结果具有一定程度的局限性,有待下一步工作改进。

### 参考文献

- [1] Bisht G, Venturini V, Islam S, et al. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 52-67.
- [2] Niemela S, Raisanen P, Savijarvi H. Comparison of surface radiative flux parameterizations - Part II. Shortwave radiation. *Atmospheric Research*, 2001, 58: 141-154.
- [3] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90: 311-323.
- [4] Yang K, Pinker R T, Ma Y, et al. Evaluation of satellite estimates of downward shortwave radiation over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, 113, D17204, doi:10.1029/2007JD009736.
- [5] Becker R, Behrens K. Quality assessment of heterogeneous surface radiation network data. *Adv Sci Res*, 2012, 8: 93-97.
- [6] Paech S J, Mecikalski J R, Sumner D M, et al. A Calibrated, High-Resolution GOES Satellite Solar Insolation Product for a Climatology of Florida Evapotranspiration1. *Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45: 1328-1342.
- [7] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2007, 112, D11112, doi:10.1029/2006JD007507.
- [8] Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, et al. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales. *Journal of Hydrometeorology*, 2004, 5: 343-363.
- [9] Bastiaanssen W, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 1998, 213: 198-212.
- [10] Chen L, Yan G, Wang T, et al. Estimation of surface shortwave radiation components under all sky conditions: Modeling and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 457-469.
- [11] Norman J M, Anderson M C, Kustas W P, et al. Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. *Water Resources Research*, 2003, 39, 1221, doi:10.1029/2002WR001775.
- [12] 潘小多, 李新, 钞振华. 区域尺度近地表气候要素驱动数据研制的研究综述. *地球科学进展*, 2010, 25: 1314-1324.
- [13] 张晓通, 周公器, 吴浩然, 等. GLASS下行短波辐射产品使用手册\_V1.1. 北京师范大学全球变化数据处理与分析中心, 2012. <http://glass-product.bnu.edu.cn/wendangziliao/suanfawendang/61.html>
- [14] Troy T J, Fwood E. Comparison and evaluation of gridded radiation products across northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, 2009, 4, 045008.