

常用遥感上行长波辐射产品在两极的精度研究

孙道中¹, 吉长东¹, 马传宁²

¹辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000;

²国家测绘地理信息局第二大地测量队(黑龙江第一测绘工程院), 黑龙江 哈尔滨 150000

摘要 针对 GEWEX-SRB(Global Energy and Water Exchanges Project-Surface Radiation Budget)、ISCCP-FD(International Satellite Cloud Climatology Project-Flux Data)和 CERES-SYN(Clouds and the Earth's Radiant Energy System-Synoptic Radiative Fluxes and Clouds)中上行长波辐射数据在极地地区的精度问题展开研究。实验利用极地地区的 BSRN(Baseline Surface Radiation Network)和 CEOP(Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project)两种地面观测数据作为参考数据,并采用降尺度方法对地面数据进行处理,最后对辐射产品进行精度评估。研究结果显示,在极地地区,3种常用上行长波辐射数据总体精度较低,方均根误差(RMSE)和平均绝对偏差(MAE)的绝对值基本在 $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,GEWEX-SRB、ISCCP-FD和 CERES-SYN 上行长波辐射产品的 RMSE 均值分别为 $23.70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (8.69%)、 $25.14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (9.62%)、 $22.98 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (8.80%), MAE 均值分别为 $18.53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (6.96%)、 $20.09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (7.70%)、 $17.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (6.79%)。通过精度分析得出,影响上行长波辐射产品精度的因素包括空间异质性、输入参数误差、云的影响以及辐射产品的空间分辨率较低等。

关键词 大气光学; 极地地区; 上行长波辐射; 精度

中图分类号 P422.6

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070101

Accuracy Research of Commonly Used Remote Sensing Upward Longwave Radiation Products in Polar Regions

Sun Daozhong¹, Ji Changdong¹, Ma Chuanning²

¹College of Surveying Mapping and Geographical Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

²The Second Earth Metering of National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation (Heilongjiang Province First Academy of Engineering of Surveying and Mapping), Harbin, Heilongjiang 150000, China

Abstract Accuracy of the upward longwave radiation data of GEWEX-SRB (Global Energy and Water Exchanges Project-Surface Radiation Budget), ISCCP-FD (International Satellite Cloud Climatology Project-Flux Data) and CERES-SYN (Clouds and the Earth's Radiant Energy System-Synoptic Radiative Fluxes and Clouds) in polar regions is studied. In the experiment, two kinds of ground observation data of BSRN (Baseline Surface Radiation Network) and CEOP (Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project) in polar regions are used as reference data, and the downscaling method is used to deal with them. Finally, accuracy of the radiation products is evaluated. Research results show that the overall accuracies of the three kinds of commonly used upward longwave radiation data are lower in polar regions. Absolute values of the root mean square error (RMSE) and the mean absolute error (MAE) are more than $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. The mean RMSEs of GEWEX-SRB, ISCCP-FD and CERES-SYN are $23.70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (8.69%), $25.14 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (9.62%) and $22.98 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (8.80%), respectively, and the mean MAEs are $18.53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (6.96%), $20.09 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (7.70%), and $17.73 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (6.79%), respectively. Through the

收稿日期: 2018-01-25; 收到修改稿日期: 2018-01-28

基金项目: 黑龙江省对地观测与导航工程技术创新平台(ZY17A02)

作者简介: 孙道中(1990—),男,硕士研究生,主要从事定量遥感、极地地区长短波辐射的估算等方面的研究。

E-mail: sundaozhong_rs@163.com

导师简介: 吉长东(1970—),男,博士,教授,主要从事定量遥感、高精度 GNSS 数据处理、GNSS 精密单点定位方面的研究。E-mail: wn1529@163.com(通信联系人)

analysis of accuracy, the factors that affect the accuracy of the upward longwave radiation products include spatial heterogeneity, input parameter errors, cloud influence and low spatial resolution of radiation products and so on.

Key words atmospheric optics; polar regions; upward longwave radiation; accuracy

OCIS codes 010.5620; 350.0350; 350.5610

1 引言

高纬度极地区域是全球物质能量循环与能量平衡的关键区域,对全球气候变化比较敏感。研究极地区域的上行长波辐射(ULR)可以很好地了解全球物质能量循环以及地气系统的相互作用^[1-4]。另外,极地区域的特殊性,决定了该区域上行长波辐射在认识和研究全球气候变化、地表的辐射平衡、生态环境的稳定性、水文与农业气象等方面有着更重要的实用价值^[5]。

传统的上行长波辐射数据一般基于地面观测站进行观测,数据精度和时间分辨率较高。由于全球范围内的地面观测站的数量有限,导致数据的覆盖范围较小,已经不能满足科学研究的需求。随着卫星遥感技术不断取得进步,高时间与高空间分辨率使其在一定程度上弥补了地面监测的不足,并成为研究地表净辐射的有力技术支撑^[6-7]。自1980年以来,利用遥感数据反演地表辐射通量已经取得很大进展,并生产了大尺度的上行长波辐射产品,如GEWEX-SRB(Global Energy and Water Exchanges Project-Surface Radiation Budget)、ISCCP-FD(International Satellite Cloud Climatology Project-Flux Data)以及CERES-SYN(Clouds and the Earth's Radiant Energy System-Synoptic Radiative Fluxes and Clouds)等。2009年,Gui等^[8]对CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System)辐射产品在青藏高原地区的数据精度进行了评估,得出在青藏高原地区CERES辐射产品中,长波辐射产品的数据精度高于短波辐射产品的数据精度。2010年,Gui等^[9]还对3种辐射产品中的长波辐射数据在中低纬度地区的数据精度进行了评估,得出云对长波辐射数据具有一定的影响。2011年,Yan等^[10]对CERES辐射产品在黄土高原地区的数据精度进行了评估,发现在黄土高原地区,CERES辐射产品中的上行长波辐射产品的数据白天被过度高估而夜间被轻微地低估。这3种产品在非极地中低纬地区的数据精度已得到验证,但对极地地区数据的质量研究相对较少,甚至出现空缺。

本文主要以2007年极地地区的GEWEX-

SRB、ISCCP-FD以及CERES-SYN辐射产品在任意天气条件下3h分辨率的上行长波辐射数据为研究对象,以相应的BSRN(Baseline Surface Radiation Network)和CEOP(Coordinated Energy and Water Cycle Observations Project)地面观测数据为参考进行精度评估,研究这3种常用遥感辐射产品中上行长波辐射数据在极地地区的数据精度,并分析影响数据精度的主要因素。

2 资料与方法

2.1 研究区概况

实验选取南北两极为研究区域。极地区域气候状况不同于其他中低纬区域,即使南北两极也存在较大差异。北极以苔原气候为主,冬季寒冷漫长,夏季温暖短促,年平均气温在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;降水量较少,年降水量为 $100\sim 250\text{ mm}$,并且主要集中在夏季。南极以冰原气候为主,酷寒、烈风、干旱是该地区最主要的气候特点;年平均气温在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,降水极少,年平均降水量在 55 mm 左右。这种复杂的气候条件对大气上行长波辐射具有重要的影响。另外,极地地区纬度较高,大面积区域常年被冰雪覆盖,大大减弱甚至阻止了大气与海洋之间热量、水汽及动量的交换^[11],使得极地区域温度较低。

2.2 辐射产品数据

GEWEX-SRB是国际科学理事会和世界气象组织为了研究气候异常、解决长期预报、以减灾防灾、掌握全球范围内能量与水循环之间的相互作用为目的而设立的世界性研究计划^[12-13]。GEWEX-SRB长波辐射的主算法采用的是Fu-Liou长波模型^[14-15],其空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。ISCCP-FD利用当时不同国家的多颗在轨气象卫星,收集了全球大气层顶辐射信息并进行反演获得了全球区域内的云资料。ISCCP-FD采用的是辐射传输方程GISS GCM(Goddard Institute for Space Studies and Global Circulation Models)辐射模型来计算辐射通量^[16],其空间分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。CERES-SYN数据集是把CERES中辐射通量和云的单卫星格点化资料(FSW)作为绝对参考,进一步结合同步地球静止卫星资料(GGEO)和大气结构数据(ASTR)进行订正,并通过时间插值得到,其对气候研究有十分

重要的价值^[17-18]。CERES-SYN 辐射产品在全天条件下采用 LPLA(the NASA Langley Parameterized Longwave Algorithm)算法^[10]。其空间分布为一个巢状格网,纬度差为 1°,但格网的经度差随纬度的变化而变化,在热带和亚热带中低纬地区,经度差为 1°,而到两极极地地区,经度差会增大到 360°^[19]。

2.3 地面参考数据

BSRN 是全球气候研究计划下的全球能量与水循环实验的一个项目,旨在监测与气候变化相关的地球表面辐射场的重要变化^[20]。BSRN 观测

数据包括全球各站点处的上下行长短波辐射数据以及净辐射量数据等,数据年限主要为 1992 年至今^[21]。全球共 63 个站点,在极地区域内共有 11 个站点,根据数据的可用性,选用其中的 6 个站点。CEOP 最初是水文气象组战略的一部分^[22],主要由 6 个部分组成:区域水文气候项目、区域研究、交叉研究、模型研究、数据管理、联合的全球数据中心。选取 CEOP 观测网在北极的 5 个站点。该实验所用的 11 个站点在极地的分布见图 1,位置信息见表 1。

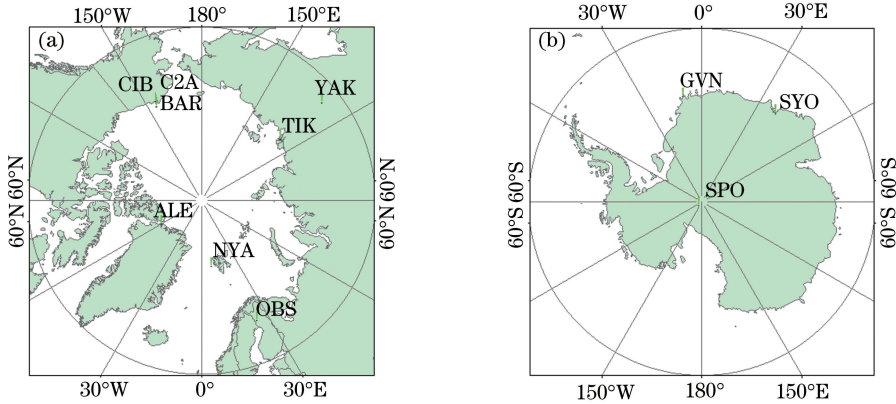


图 1 极地站点分布图。(a)北极;(b)南极

Fig. 1 Polar sites distribution map. (a) North pole; (b) south pole

表 1 极地各参考站点的位置信息

Table 1 Location of reference sites in polar regions

Site	Abbreviation	Latitude / (°)	Longitude / (°)	Elevation / m
Alert	ALE	82.490	-62.420	127
Ny-Alesund	NYA	78.925	11.930	11
Tiksi	TIK	71.617	128.750	38
Barrow	BAR	71.323	-156.607	8
C1 Barrow	C1B	71.323	-156.607	8
C2 Atqasuk	C2A	70.472	-157.407	20
Observatory Site A	OBS	67.367	26.629	1792
Yakutsk	YAK	62.255	129.618	120
Syowa	SYO	-69.005	39.589	18
Georg von Neumayer	GVN	-70.650	-8.250	42
Southpole	SPO	-89.983	-24.799	2800

2.4 验证方法

为研究上行长波辐射产品在极地的数据精度,采用的精度指标有 4 种,分别为相关系数(R^2)、方均根误差(RMSE, R_{MSE_Ab} 和 R_{MSE_Re})、平均偏差误差(MBE, M_{BE_Ab} 和 M_{BE_Re})、平均绝对偏差(MAE, M_{AE_Ab} 和 M_{AE_Re}),其中下角标“_Ab”和“_Re”分别

表示误差和偏差的绝对值和相对值。令 $u = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$ 为地面观测数据的平均值, e_i 为辐射产品值, n 为样本数, m_i 为地面观测值, 4 种精度指标的表达式分别为

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n e_i m_i - \sum_{i=1}^n e_i \sum_{i=1}^n m_i \right)^2}{\left[n \sum_{i=1}^n e_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n e_i \right)^2 \right] \times \left[n \sum_{i=1}^n m_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n m_i \right)^2 \right]}, \quad (1)$$

$$R_{\text{MSE_Ab}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2 / n}, \quad R_{\text{MSE_Re}} = \frac{R_{\text{MSE_Ab}}}{u} \times 100\%, \quad (2)$$

$$M_{\text{BE_Ab}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (e_i - m_i) / n}, \quad M_{\text{BE_Re}} = \frac{M_{\text{BE_Ab}}}{u} \times 100\%, \quad (3)$$

$$M_{\text{AE_Ab}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n |e_i - m_i| / n}, \quad M_{\text{AE_Re}} = \frac{M_{\text{AE_Ab}}}{u} \times 100\%. \quad (4)$$

研究表明,在同一个辐射产品观测格网中,随着地面站点数的增加,RMSE将会减小。先对每个地面站点处上行长波辐射产品数据进行精度评估,然后再根据同一观测格网中的地面站点均值数据进行评估。

BSRN与CEOP地面观测数据时间分辨率分别为1 min和1 h,而研究对象数据的时间分辨率均为3 h,因此,为了解决研究数据和参考数据的时间不匹配问题,需要对两种参考数据的时间分辨率进行降尺度处理,即对每3 h观测数据进行求平均值作为最终的参考数据,然后将最终的地面参考数据与对应的辐射产品数据进行对比,得出数据的各种精度指标值。

3 结果与分析

3.1 精度评估结果

对3种辐射产品上行长波辐射数据进行处理,之后再与地面参考数据进行对比验证,最后得出表2中的各项精度指标值。

对GEWEX-SRB、ISCCP-FD和CERES-SYN辐射产品上行长波辐射数据与地面参考数据进行对比可得出,在极地区域,3种常用上行长波辐射产品的精度较低,多数站点处的RMSE和MAE的绝对值大于 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从表2中各精度指标可知,在极地地区,上行长波辐射产品数据中CERES-

表2 各站点处的各项指标值

Table 2 Index values at each site

Product type	Site	R^2	RMSE		MAE		MBE	
			$R_{\text{MSE_Ab}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$R_{\text{MSE_Re}} / \%$	$M_{\text{AE_Ab}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_{\text{AE_Re}} / \%$	$M_{\text{BE_Ab}} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$M_{\text{BE_Re}} / \%$
GEWEX-SRB	ALE	0.89	20.41	8.24	16.39	6.61	-3.97	-1.60
	NYA	0.85	38.52	13.17	32.19	11.01	24.49	8.38
	TIK	0.94	20.77	7.40	16.61	5.91	-11.60	-4.13
	BAR	0.88	20.17	7.29	15.86	5.73	-0.99	-0.36
	C1B	0.89	19.73	7.07	15.27	5.47	-3.32	-1.19
	C2A	0.92	20.96	7.43	16.29	5.77	-6.30	-2.23
	OBS	0.87	24.83	7.68	19.86	6.14	-15.49	-4.79
	YAK	0.94	23.88	8.13	18.93	6.45	-10.23	-3.49
	SYO	0.80	29.97	11.32	26.51	10.01	-25.78	-9.73
	GVN	0.71	21.34	8.72	15.99	6.53	0.28	0.12
SPO	0.88	13.18	9.12	9.94	6.88	-1.41	-0.97	
Mean	0.87	23.70	8.69	18.53	6.96	-4.94	-1.82	
ISCCP-FD	ALE	0.85	24.47	9.88	20.45	8.25	-3.59	-1.45
	NYA	0.35	36.32	12.42	28.59	9.78	12.42	4.25
	TIK	0.88	24.19	8.61	19.64	6.99	2.43	0.86
	BAR	0.89	21.95	7.93	17.01	6.15	6.56	2.37
	C1B	0.90	20.53	7.36	15.84	5.67	4.22	1.51
	C2A	0.88	28.82	10.21	22.39	7.93	1.28	0.45
	OBS	0.79	24.05	7.43	18.74	5.79	-1.29	-0.40
	YAK	0.91	26.55	9.04	21.24	7.23	2.36	0.80
	SYO	0.62	26.14	9.87	21.90	8.27	-15.45	-5.83
	GVN	0.64	24.72	10.10	20.25	8.27	2.47	1.01
SPO	0.82	18.79	13.01	14.96	10.36	8.66	5.99	
Mean	0.78	25.14	9.62	20.09	7.70	1.82	0.87	

Product type	Site	R^2	RMSE		MAE		MBE	
			$R_{MSE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$R_{MSE_Re}/\%$	$M_{AE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{AE_Re}/\%$	$M_{BE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{BE_Re}/\%$
CERES-SYN	ALE	0.90	20.30	8.19	16.16	6.52	-8.47	-3.42
	NYA	0.68	47.40	16.21	38.97	13.33	30.15	10.31
	TIK	0.87	29.72	10.59	21.59	7.69	-11.81	-4.21
	BAR	0.82	24.75	8.94	19.44	7.03	0.68	0.24
	C1B	0.83	24.05	8.61	18.65	6.68	-1.74	-0.62
	C2A	0.91	21.88	7.75	16.30	5.78	-1.99	-0.70
	OBS	0.93	14.35	4.44	10.82	3.34	-4.94	-1.53
	YAK	0.96	17.37	5.92	13.55	4.62	-0.02	-0.01
	SYO	0.84	13.75	5.19	10.72	4.05	-2.61	-0.99
	GVN	0.76	21.85	8.93	16.10	6.58	6.35	2.60
	SPO	0.83	17.39	12.03	12.69	8.78	-3.68	-2.54
	Mean	0.84	22.98	8.80	17.73	6.79	0.17	-0.08

SYN 产品的质量总体上要优于 GEWEX-SRB 和 ISCCP-FD 产品,其上行长波辐射数据与地面参考数据之间表现出良好的相关性,具体信息可见图 2。GEWEX-SRB 产品在多数站点处低估了上行长波辐射通量,其相关系数为 0.71~0.94, RMSE 为 13.18~38.52 $W \cdot m^{-2}$ (7.07%~13.17%), MAE 为 9.94~32.19 $W \cdot m^{-2}$ (5.47%~11.01%), MBE 为 -25.78~24.49 $W \cdot m^{-2}$ (-9.73%~8.38%)。ISCCP-FD 产品在多数站点处出现高估现象,其相

关系数为 0.35~0.91, RMSE 为 18.79~36.32 $W \cdot m^{-2}$ (7.36%~13.01%), MAE 为 14.96~28.59 $W \cdot m^{-2}$ (5.67%~10.36%), MBE 为 -15.45~12.42 $W \cdot m^{-2}$ (-5.83%~5.99%)。CERES-SYN 产品在多数站点处低估了上行长波辐射通量,相关系数为 0.68~0.96, RMSE 为 14.35~47.40 $W \cdot m^{-2}$ (4.44%~16.21%), MAE 为 10.72~38.97 $W \cdot m^{-2}$ (3.34%~13.33%), MBE 为 -11.81~30.15 $W \cdot m^{-2}$ (-4.21%~10.31%)。

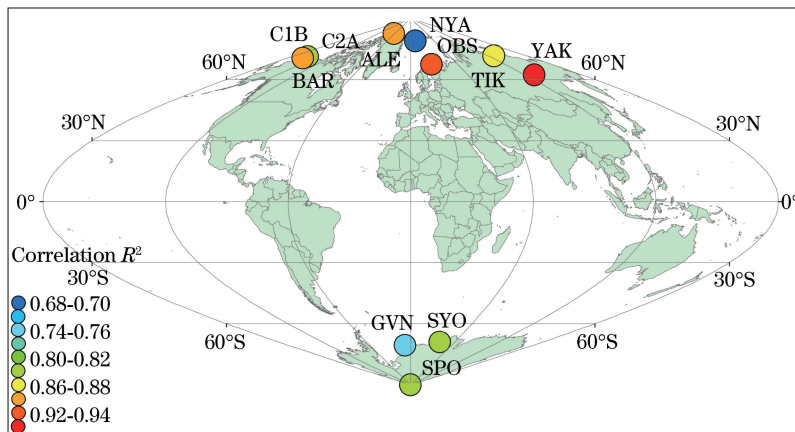


图 2 CERES-SYN 上行辐射产品与地面数据的相关性分布

Fig. 2 Correlation distribution between CERES-SYN upward radiation product and ground data

为能更直观地理解上行长波辐射产品在极地地区的精度,对各地面站点处上行长波辐射产品数据与 BSRN、CEOP 地面观测数据进行绘图处理,得出各个地面站点处上行长波辐射数据散点图,如图 3 所示。由于篇幅有限,此处只列出部分站点处的散点图。

对北极地区内的上行长波辐射数据进行整体评估,即对各辐射产品所有数据进行整合,然后再次验证,最后得出各项精度指标值,如表 3 和图 4 所示。可以看出 3 种上行长波辐射产品的 RSME 与 MAE 的绝对值仍大于 15 $W \cdot m^{-2}$ 。

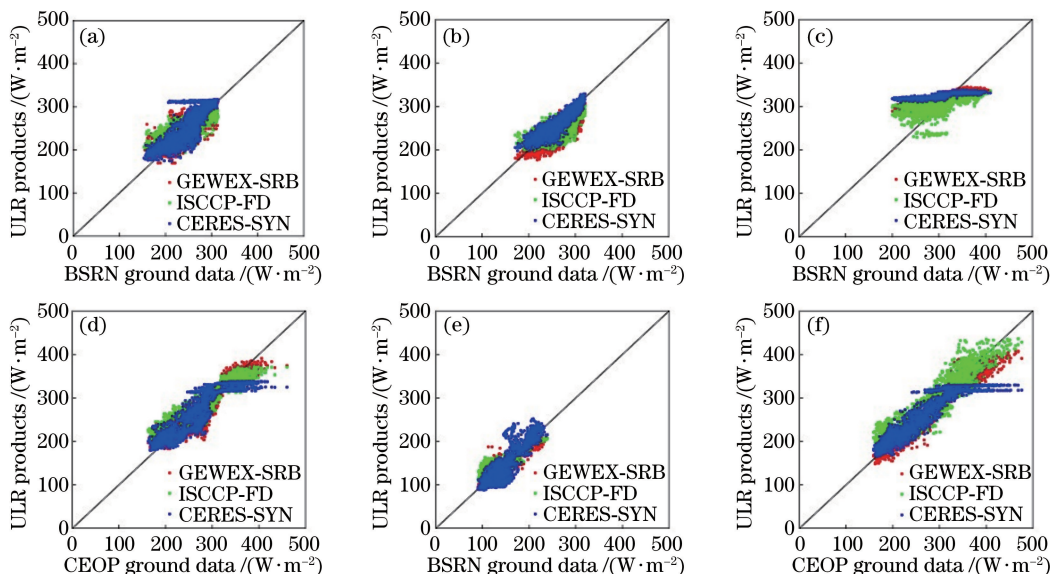


图3 各地面观测站处验证结果的散点图。(a) GVN 站点;(b) SYO 站点;(c) NYA 站点;(d) CIB 站点;(e) SPO 站点;(f) TIK 站点

Fig. 3 Scatterplots of verification results at each ground observation site.

(a) GVN site; (b) SYO site; (c) NYA site; (d) CIB site; (e) SPO site; (f) TIK site

表3 各上行长波辐射产品在北极地区的整体精度

Table 3 Overall accuracy of ULR products in the Arctic

Product type	R^2	RMSE		MAE		MBE	
		$R_{MSE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$R_{MSE_Re}/\%$	$M_{AE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{AE_Re}/\%$	$M_{BE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{BE_Re}/\%$
ULR_GEWEX-SRB	0.87	24.40	8.57	18.94	6.65	-3.40	-1.19
ULR_ISCCP-FD	0.85	26.28	9.23	20.49	7.20	3.09	1.09
ULR_CERES-SYN	0.84	26.80	9.41	19.47	6.84	0.28	0.10

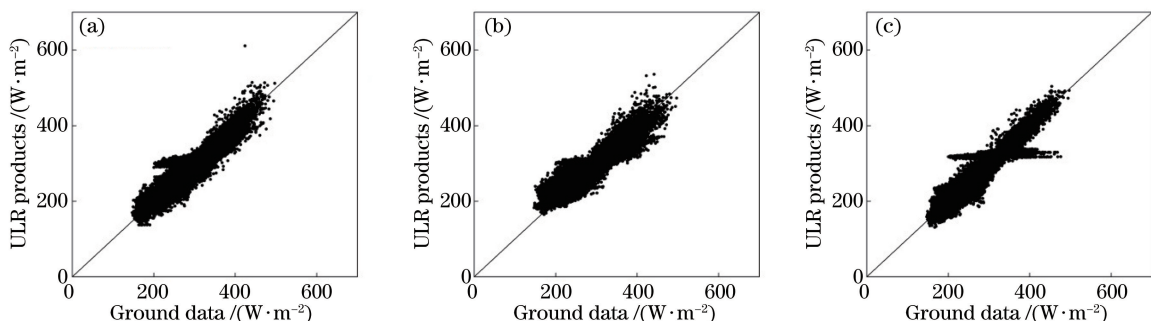


图4 北极各上行长波辐射产品的整体散点图。(a) GEWEX-SRB;(b) ISCCP-FD;(c) CERES-SYN

Fig. 4 Overall scatterplots of ULR products in the Arctic. (a) GEWEX-SRB; (b) ISCCP-FD; (c) CERES-SYN

如果以各站点为横坐标,以各种指标值为纵坐标进行绘图分析(图5),可发现 GEWEX-SRB、ISCCP-FD 和 CERES-SYN 上行长波辐射产品在各站点处的各种精度指标虽然不同,但各指标值随着站点编号的改变有着基本相同的变化趋势。由于各指标情况相似,此处只列出 R^2 、RMSE 和 MBE 的图像。

3.2 结果分析

1) 空间异质性的影响

GEWEX-SRB、ISCCP-FD 和 CERES-SYN 辐射产品每个格网内的地形、地物,以及上空的气象状况等空间格局差别较大。因此,这种在空间格局上呈现出的异质性对上行长波辐射存在一定影响。在本实验 11 个站点中,C1B 与 C2A 站点位于 ISCCP-FD 产品的同一格网内,但其精度并不相同。因此,可利用 C1B 与 C2A 站点分析空间异质性对上行长波辐射的影响,即根据位于同一格网内的 C1B 与 C2A 站点的地面均值再次评估,具体信息如表 4 所示。

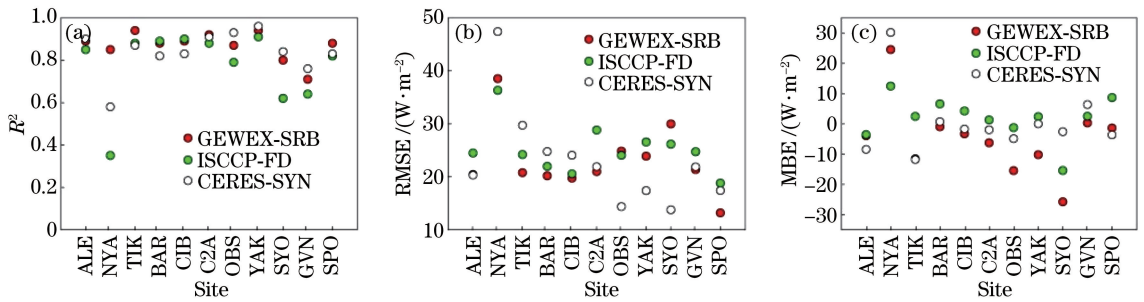


图 5 3 种辐射产品在不同站点处的各种指标。(a) R^2 ; (b) RMSE; (c) MBE

Fig. 5 Various indexes of three kinds of radiation products at different sites. (a) R^2 ; (b) RMSE; (c) MBE

表 4 空间异质性的对 ISCCP-FD 上行长波辐射通量的影响

Table 4 Influence of spatial heterogeneity on ISCCP-FD ULR flux

Site	R^2	RMSE		MAE		MBE	
		$R_{MSE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$R_{MSE_Re}/\%$	$M_{AE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{AE_Re}/\%$	$M_{BE_Ab}/(W \cdot m^{-2})$	$M_{BE_Re}/\%$
C1B	0.90	20.53	7.36	15.84	5.67	4.22	1.51
C2A	0.88	28.82	10.21	22.39	7.93	1.28	0.45
Mean	0.90	23.40	8.34	22.40	6.49	2.72	0.97

2) 季节性分析

对极地地区各站点处短波辐射产品做季节性分析,对其每月数据进行精度评估,可得出:在极地地区多数站点处,3 种上行长波辐射产品精度有一定的季节性。在每年 4 月份至 9 月份,上行长波辐射产品精度相对稳定,而且基本高于其他月份的精度。具体信息如图 6 所示。另外,在 SYO 站点处,只有 CERES-

SYN 产品中的 3, 7, 9 月份出现高估现象,其他月份(包括另外两种辐射产品全年)均为低估现象。因此可得出,在极地地区 3 种常用上行长波辐射产品的误差来源主要是系统误差,并非随机误差;另外从各辐射产品在地面站点处基本统一的高低估现象中也可以得出此结论。由于各站点处的季节分析图基本相似,图 6 只列出 3 个站点处的季节分析图。

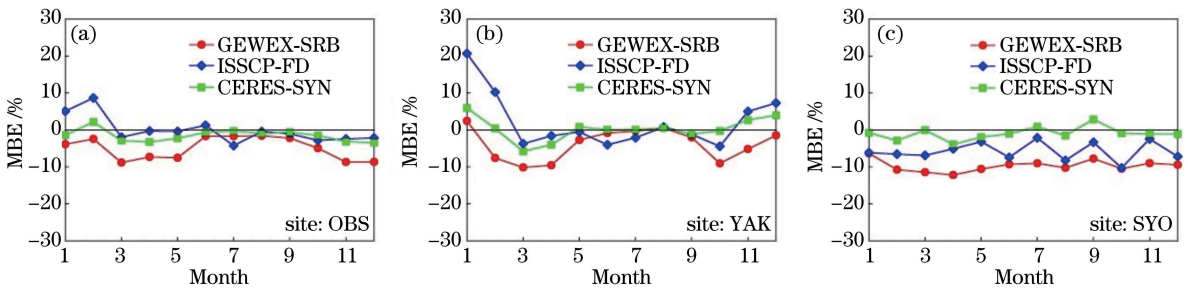


图 6 各辐射产品在地面站点处各月份的 MBE。(a) OBS 站点;(b) YAK 站点;(c) SYO 站点

Fig. 6 MBE of each month for various radiation products at the ground sites. (a) OBS site; (b) YAK site; (c) SYO site

3) 输入参数的影响

上行长波辐射通量主要由地表与近地表大气在吸收太阳辐射之后发出的辐射能量构成,在辐射传输过程中会受到多种大气分子和大气粒子的吸收作用,通过影响大气透过率进而导致辐射传输的衰减^[23-25]。研究表明,上行长波辐射通量的反演精度受多种反演参数的综合影响,如近地表大气温度和水汽含量等^[4]。在近地面大气温度和水汽含量之间存在一定的函数关系,大气水汽(C_w ,单位为 cm)可使用近地面气温(T_a ,单位为 K)和相对湿度 r_h 推算得到^[9]:

$$C_w = 0.0042 r_h T_a^{-1} \exp(26.23 - 5416 T_a^{-1}) \quad (5)$$

从表 5 中可知,在选取的 6 个地面站点处,辐射产品的近地面大气温度与地面站点输入数据平均相差 5.87 K,大气相对湿度平均相差 26.06%,可降水量平均相差 0.22 cm。

从图 7 中更能清楚地看出辐射产品水汽数据与地面站点参数的差异。因此,输入的各气象参数误差也是造成上行长波辐射精度较低的一个重要原因。图 7 中 _IS 表示 ISCCP-FD 产品站点, _CE 表示 CERES-SYN 产品站点。

表 5 辐射产品输入数据与地面输入数据的偏差

Table 5 Deviation between input data of radiant products and ground input data

Parameter type	Site	ISCCP-FD		CERES-SYN	
		MAE	MBE	MAE	MBE
T_a/K	NYA	3.60	2.23	—	—
	C2A	7.05	5.40	—	—
	OBS	5.04	3.16	—	—
	C1B	6.60	6.04	—	—
	YAK	6.31	5.07	—	—
	TIK	6.62	5.35	—	—
$r_h/\%$	NYA	11.98	-4.16	30.16	-28.20
	C2A	24.01	7.14	37.34	-36.33
	OBS	22.24	11.86	33.03	-30.76
	C1B	23.11	3.37	40.67	-40.50
	YAK	25.91	10.44	19.59	-8.98
	TIK	20.07	-5.74	24.63	-22.02
C_w/cm	NYA	0.15	0.09	0.13	0.07
	C2A	0.22	0.14	0.19	0.11
	OBS	0.34	0.30	0.24	0.21
	C1B	0.23	0.19	0.19	0.13
	YAK	0.32	0.29	0.21	0.19
	TIK	0.22	0.19	0.18	0.16

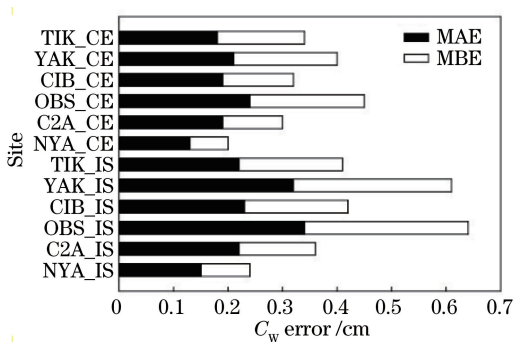


图 7 辐射产品水汽与地面站点参数的差异

Fig. 7 Differences between water vapor of radiation products and ground site parameters

4) 其他因素的影响

GEWEX-SRB、ISCCP-FD 和 CERES-SYN 辐射产品空间分辨率分别为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 和 $1^\circ \times 1^\circ$ 。3 种辐射产品的每个观测格网均对应较大的地面范围,每个格网内的上行长波辐射值均为整个格网内混合像元的平均值,以整个格网平均值作为最终观测值,与真实值相比,误差也会增大。另外,极地地区冰雪的覆盖率较大,导致云和冰雪的区分困难较大,而冰雪反照率大于云的反照率,使得由卫星遥感数据进行反演的各种必要参数存在着较大的误差。

4 结 论

通过对极地区域 GEWEX-SRB、ISCCP-FD 和

CERES-SYN 上行长波辐射产品数据与 BSRN 和 CEOP 地面参考数据进行对比研究,可得出结论:1) CERES-SYN 的上行长波辐射质量相对优于 GEWEX-SRB 和 ISCCP-FD 两种辐射产品,该产品数据与地面参考数据的相关性较好,且 CERES-SYN 辐射产品中的上行长波辐射在各个站点处较稳定。2) 在 3 种辐射产品中,GEWEX-SRB 和 CERES-SYN 产品在多数站点处低估了上行长波辐射,而 ISCCP-FD 产品在多数站点处高估了上行长波辐射。3) 3 种上行长波辐射产品在极区域内的精度较低,多数站点处的 RMSE 和 MAE 的绝对值均大于 $15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,而影响数据精度的因素可包括:空间异质性、输入参数误差、云的影响以及辐射产品空间分辨率较低等。4) 在极地地区,GEWEX-SRB、ISCCP-FD 和 CERES-SYN 上行辐射产品数据在不同站点处的各指标值虽然不同,但各种指标值随着站点编号的改变有着基本相同的变化趋势,表明 3 种上行长波辐射产品数据的误差来源相同。

致谢 感谢 GEWEX 实验的地表能量收支平衡项目研究组、云和地球辐射能量系统科学研究所、国际卫星云气候计划、基准地面辐射观测网络和国际协同加强观测计划观测网提供数据。

参 考 文 献

- [1] Nussbaumer E A, Pinker R T. Estimating surface long-wave radiative fluxes at global scale [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2012, 138(665): 1083-1093.
- [2] Trigo I F, Barroso C, Viterbo P, *et al.* Estimation of downward long-wave radiation at the surface combining remotely sensed data and NWP data [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D24): D24118.
- [3] Kratz D P, Gupta S K, Wilber A C, *et al.* Validation of the CERES edition 2B surface-only flux algorithms [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2010, 49(1): 164-180.
- [4] Wang J. Method for the remote sensing retrieval of surface longwave radiation [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2014.
王娇. 地表长波辐射遥感反演方法研究 [D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [5] Chen S W, Xu N, Dai T, *et al.* Sensitivity of intercalibration uncertainty on spectral sampling of space-based radiance standard [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1): 0128004.
陈申玮, 徐娜, 戴铁, 等. 空间辐射基准传递不确定性的光谱敏感性分析 [J]. 光学学报, 2018, 38(1): 0128004.
- [6] Zhang X Y, Wang J. Estimation of land surface temperature using geostationary meteorological satellite data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(1): 12-17.
张霄羽, 王娇. 基于静止气象卫星数据的地表温度遥感估算 [J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 12-17.
- [7] Zhang X Y, Wang J. Estimation of surface soil moisture from onboard FY-2D satellite multi-temporal data [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 882-887.
张霄羽, 王娇. 风云二号静止气象卫星数据估算土壤表面水分方法研究 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 882-887.
- [8] Gui S, Liang S L, Li L. Validation of surface radiation data provided by the CERES over the Tibetan Plateau [C]. International Conference on Geoinformatics, 2009: 10940576.
- [9] Gui S, Liang S L, Li L. Evaluation of satellite-estimated surface longwave radiation using ground-based observations [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(D18): D18214.
- [10] Yan H R, Huang J P, Minnis P, *et al.* Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(6): 1489-1500.
- [11] Wang X C, Liu J P, Yu Y Q, *et al.* Polar climate simulation in FGOALS_g1.1 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(6): 961-972.
王秀成, 刘骥平, 俞永强, 等. FGOALS_g1.1 极地气候模拟 [J]. 气象学报, 2009, 67(6): 961-972.
- [12] Cox S J, Stackhouse P W, Gupta S K, *et al.* NASA/GEWEX shortwave surface radiation budget: integrated data product with reprocessed radiance, cloud, and meteorology inputs, and new surface albedo treatment [C]. International Radiation Symposium Radiation Processes in the Atmosphere & Ocean, 2017, 1810(1): 194-211.
- [13] Randall D, Krueger S, Bretherton C. Confronting models with data: the GEWEX cloud systems study [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2003, 84(4): 455-469.
- [14] Fu Q, Liou K N, Cribb M C, *et al.* Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1997, 54(24): 2799-2812.
- [15] Gupta K S. A parameterization for longwave surface radiation from sun-synchronous satellite data: recent improvements [J]. Journal of Applied Meteorology, 1992, 31(12): 203-222.
- [16] Zhang R. The study of the estimation of downward radiation based on MODIS data [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
张茹. 基于 MODIS 数据的下行辐射遥感反演研究 [D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [17] Zhang D L, Huang J P, Liu Y Z, *et al.* Analysis on temporal and spatial variations for cloud radiative forcing over Qinghai-Xizang Plateau using CERES (SYN) data [J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(5): 1192-1202.
张丁玲, 黄建平, 刘玉芝, 等. 利用 CERES(SYN) 资料分析青藏高原云辐射强迫的时空变化 [J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1192-1202.
- [18] Kato S, Loeb N G, Rutan D A, *et al.* Clouds and the Earth's radiant energy system (CERES) data products for climate research [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2016, 93(6): 597-612.
- [19] Gui S. Satellite remote sensing of surface net radiation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.

- 桂胜. 地表净辐射的卫星遥感研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [20] Zhang T P, Stackhouse P W, Jr Gupta S K, *et al.* The validation of the GEWEX SRB surface longwave flux data products using BSRN measurements [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 150: 134-147.
- [21] Driemel A, König-Langlo G, Sieger R, *et al.* The world radiation monitoring center of the baseline surface radiation network: status 2017 [C]. *EGU General Assembly Conference*, 2017, 19: 2910.
- [22] Mcdonald K R, Enloe Y, Di L P, *et al.* Data integration support to the coordinated enhanced observing period project (CEOP) [M]. // Di L P, Ramapriyan H K. *Standard-based data and information systems for Earth observation*. Heidelberg: Springer, 2009: 27-36.
- [23] Yang J Q, Luo J J, Xu J, *et al.* Calculation of infrared radiation atmospheric transmittance based on CART[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030101.
- 杨建清, 罗积军, 徐军, 等. 基于 CART 的红外辐射大气透过率的计算[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030101.
- [24] Zhang F, Qi L L, Ji W, *et al.* Influence of atmosphere in different areas on middle-far infrared radiation transmission[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0401002.
- 张芳, 齐琳琳, 吉微, 等. 不同地域大气对中远红外辐射传输的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0401002.
- [25] Huang S, Jing X, Tan F F, *et al.* Measurement and calibration methods for total atmospheric continuous transmittance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0710001.
- 黄晟, 靖旭, 谭逢富, 等. 整层大气连续透过率的测量与标定方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0710001.