

引用格式: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. [ Zhang X X, Lv N, Yao L, et al. Error analysis of ECMWF surface solar radiation data in China[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20 (2):254-267. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170381

# ECMWF地表太阳辐射数据在我国的误差及成因分析

张星星<sup>1,2</sup>, 吕 宁<sup>1,3\*</sup>, 姚 凌<sup>1,3</sup>, 姜 侯<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049 ;  
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

## Error Analysis of ECMWF Surface Solar Radiation Data in China

ZHANG Xingxing<sup>1,2</sup>, LV Ning<sup>1,3\*</sup>, YAO Ling<sup>1,3</sup>, JIANG Hou<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Comparison of surface radiation data of ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis data and data from station observation (China Meteorological Administration) is conducted at different time scales to check whether reanalysis data can reflect the characteristics of surface solar radiation over China. Based on the cluster analysis method, China is divided into 8 regions in order to study the regional differences of the surface radiation products of the ECMWF reanalysis data in China. Taking into account the influence of atmospheric factors on the earth's surface radiation and the spatial stratified heterogeneity of the atmospheric distribution, the geographical detector is used to find the causes of errors in different sites of reanalysis data. Overall, ECMWF is higher than the ground observation station data and the monthly deviation is  $18.2835\text{W/m}^2$ . ECMWF shows seasonal difference, greater deviation in spring and winter, less deviation in summer and autumn. Large relative deviation of the data mainly distributed in December, January, February and March while minor relative deviation of the data mainly concentrated in July, June, August and September. The dominant atmospheric factors in different regions are different in winter and summer. In summer, from zone 1 to 5 the dominant factors are aerosols and the power of determinant is larger. The dominant factors of the zone 6 are albedo and aerosol. The dominant factors of the zone 7 are cloud cover and aerosol but the power of determinant is small, merely 0.0228 and 0.0202, respectively. Failing significance test indicates that the four factors had no significant effect on the relative deviation in the zone 8. In winter, the dominant factors of zone 4, 6, 8 and zone 1, 3, 5, 7 are aerosol and cloud coverage, respectively.

**Key words:** surface solar radiation; ECMWF reanalysis data; CMA stations; Geo-Detector software; influence factors

收稿日期 2017-08-17;修回日期:2017-10-17.

基金项目 :国家自然科学基金项目(41371016、41771380);中国科学院地理科学与资源研究所优秀青年人才基金项目(2015RC203)。[ **Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.41371016, 41301380; The CAS Youth Innovation Promotion Association, and the Yong Talent Fund of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, No.2015RC203. ]

作者简介 张星星(1992-),男,安徽宿松人,硕士生,主要从事地表太阳辐射反演研究。E-mail: zhangxx.15s@igsrr.ac.cn

\*通讯作者 吕 宁(1981-),男,副研究员,主要从事大气遥感反演及应用研究。E-mail: ning.robin@gmail.com

\*Corresponding author: LV Ning, E-mail: ning.robin@gmail.com

**摘要** 利用2000–2009年中国气象局(CMA)地表太阳辐射台站资料,对欧洲中期天气预报中心(ECMWF)地表太阳下行短波辐射产品进行多时间尺度的计算与分析,检验ECMWF地表辐射产品对于中国地区太阳辐射特征的表现。本文通过聚类分析将中国地区分为8个区域,考虑到ECMWF大气因素对ECMWF地表辐射的影响和大气因子分布的空间异质性,引入地理探测器对ECMWF再分析辐射产品的时空误差进行定量分析,来判明影响ECMWF辐射精度的主要大气因子。结果表明:总体上看,ECMWF地表太阳辐射要高于地面观测数据,月均偏差为 $18.28\text{W/m}^2$ ;ECMWF地表太阳辐射表现出季节性差异,夏秋季节明显好于春冬季节,相对偏差较大的数据集中分布在12、1、2和3月,相对偏差较小的数据集中分布在6、7、8和9月;不同区域在冬季和夏季的主导大气影响因子不同,夏季中国西北(1区)、高原(3区)、西南(4区)和四川盆地(5区)地区主导影响因子都是气溶胶,东南(6区)地区的主导影响因子是地表反照率和气溶胶,中东部地区(7区)的主导影响因子是云覆盖率和气溶胶,但是因子解释较小,分别为0.0228和0.0202,东北地区(8区)4个因子均未通过显著性系数检验,因子对相对偏差的变化影响不显著;冬季中国西北(1区)、高原(3区)、中东(7区)、东北(8区)和四川盆地(5区)地区的主导影响因子都是云覆盖率,西南(5区)和东南(6区)地区的辐射主要受到气溶胶的影响。

**关键词** 地表太阳下行辐射;ECMWF再分析资料;CMA站点;地理探测器;影响因子

## 1 引言

地表太阳下行短波辐射(Downward Shortwave Radiation, DSR)是生态系统的重要能量来源。目前,获取地表太阳下行短波辐射数据主要有2种方式:①直接利用太阳辐射观测台站获取短波辐射数据,但是中国太阳辐射观测台站较少且分布不均匀,获取空间连续的、长时间序列的地表太阳辐射观测数据受到了限制;②利用卫星数据反演得到的地表短波数据,如The Global Energy and Water Cycle Experiment(GEWEX)地表短波数据集,但是由于反演算法的适用性和传感器的精度等问题,数据的一致性较差<sup>[1–2]</sup>,且卫星数据反演的时间覆盖范围是有限的。相对于卫星遥感数据和地面观测站点数据,再分析资料的优点在于建立了一个较长时间序列全球的有效数据产品,再分析采用组合模型(地球物理流体动力学模型,包括辐射传输模型等)对大气进行动态一致的全球分析,并结合观测数据等各种数据源来限制动态模型,从而优化了产品的准确性和完整覆盖<sup>[3]</sup>。再分析作为一种全球通用的数据来源,在大气科学领域应用极为广泛<sup>[4–8]</sup>。但是,再分析资料的数据来源多种多样,数据的同化方案也不尽相同,同化过程中的错误源(如云和气溶胶)会导致再分析辐射产品的系统误差,了解再分析资料存在的不确定性和偏差是合理使用再分析资料的前提<sup>[9]</sup>。

目前已有相关研究利用地面站点地表辐射数据和遥感地表辐射产品对再分析地表辐射数据在站点、区域、全球等不同范围进行了多尺度的验

证。研究结果表明大多数再分析地表辐射数据相对于地面观测站点数据偏大<sup>[10–13]</sup>。Brotzge<sup>[14]</sup>研究发现,美国国家环境预测中心(NCEP)NCEP-NCAR全球再分析数据相对于2个地面站点观测的地表辐射数据高估了17%~27%。Wang等<sup>[10]</sup>利用CMAP/Tibet(Coordinated Enhanced Observing Period(CEOP)-Asia-Australia Monsoon Project)提供的西藏地区9个观测站点数据,对6种再分析地表辐射数据(ERA-40、ERA-Interim、NCEP-NCAR、CFSR、MERRA和GLDAS)的验证发现,再分析日均地表辐射数据比地面观测站点数据略大 $1.56\sim 5.00\text{W/m}^2$ 。Xia等<sup>[11]</sup>以中国气象局气候数据中心(CDC/CMA)46个一级站点地表辐射数据研究发现,NCEP多年平均地表辐射数据大于地面站点数据 $40\sim 100\text{W/m}^2$ ,NCEP地表辐射数据的代际变化趋势远小于地面观测站点资料0.03%~0.14%,并且定性的分析了NCEP高估的原因是由于NCEP模式低估了云的覆盖率,但是,研究没有考虑气溶胶的影响。此外,较少有研究表明再分析地表辐射产品在季节性变化、空间分布等方面是否具有 consistency。Zhang等<sup>[15]</sup>从季节性变化和空间分布、全球尺度等方面对6种再分析地表辐射产品进行了相关研究,研究表明再分析地表辐射与地面观测站点的全球月均偏差为 $11.25\sim 49.80\text{W/m}^2$ ,并且发现在全球尺度上,云量的低估可能导致再分析地表辐射的高估。

目前大部分研究都是对再分析地表辐射产品误差的分析,并未探究其成因。太阳辐射受到云、气溶胶、地表反照率、水汽含量等因素影响,不同地区的地表太阳辐射存在着很大的时空差异。本文

根据ECMWF再分析地表太阳辐射变化的区域分布特征,把中国地区分为8个区域。在此基础上,引入地理探测器对ECMWF再分析辐射产品的时空误差进行分析,并对不同区域的太阳辐射主导大气因子影响进行定量研究。

## 2 数据源

本文使用2000–2009年的ECMWF再分析资料,其中包括地表太阳下行辐射、水汽含量、总云覆盖率、气溶胶光学厚度、地表反照率数据集,数据下载自ECMWF网站。中国地区的地表辐射地面观测站点数据由CMA提供。气溶胶光学厚度、云覆盖率、水汽含量和地表反照率验证数据集均来自于CERES(云和地球辐射能量系统)。再分析资料、CMA站点和CERES数据源的详细信息见表1。

表1 数据产品详细信息

Tab. 1 Details of the data products

数据源	数据时期	时间分辨率	空间分辨率	引用
ERA-Interim	1979年–至今	3 h	0.75°×0.75°	文献[16]
CMA	1957年–至今	天	N/A(站点)	<a href="http://cdc.nmic.cn/home.do">http://cdc.nmic.cn/home.do</a>
CERES	2000年–至今	月	1°×1°	文献[17]

### 2.1 ECMWF

欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather, ECMWF)是国际性天气预报研究和业务机构。其提供的ERA-Interim再分析数据集的水平空间分辨率是0.75°(约80 km),垂正方向从地表面到0.1 hPa高空分为60级,时间分辨率为3 h。辐射计算基于快速辐射传输模型(RRTM)<sup>[18]</sup>。

### 2.2 CMA

中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)是中国国家级的气象行政管理部门。其提供了中国地区(港澳台除外)的122个地面站点数据集,每个数据集包括逐日的太阳总辐射,太阳直接辐射和太阳散射辐射3个物理量。辐射站点分布见图1。

### 2.3 CERES\_EBAF产品

CERES资料来自TRMM, Terra和Aqua 3颗卫星搭载的云、气溶胶和地球辐射能量系统的探测器,它提供了云和气溶胶等大气参数的合理反演<sup>[19]</sup>,

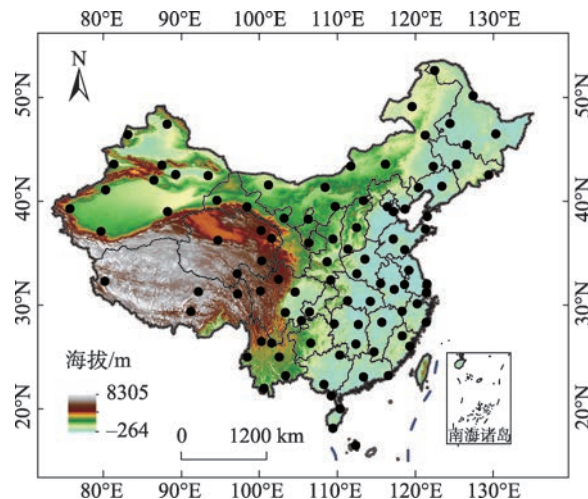


图1 CMA地表辐射站点分布图

Fig. 1 The distribution of radiation stations managed by CMA

得出与地面到大气顶辐射通量相一致的地表和各大气参数的计算。研究证明CERES-EBAF较之其他格网地表辐射产品具有更高的精度。Zhang等<sup>[15]</sup>研究发现相对于再分析数据,CERES-EBAF地表辐射数据和地面观测站点地表辐射数据更加吻合,并且提供了更精确的云和气溶胶等大气产品信息。本文使用了CERES云、气溶胶等大气产品月均数据集,空间分辨率为1°。

## 3 研究方法

### 3.1 地面观测站点数据质量控制

国内的许多学者对CMA地面观测站点辐射资料进行质量检验发现,辐射资料的质量存在一定的问题,影响数据质量的主要因素有:辐射仪器的精度和标定、仪器操作过程中的人为因素以及台站变迁等<sup>[20]</sup>。在使用辐射资料作为验证数据之前,应该先进行质量检验。原站点数据已经对逐日的地表辐射数据进行了简单的物理质量控制,即总辐射的大小要高于散射辐射和直接辐射之和。在原站点数据的质量控制基础上,根据辐射数据本身的物理意义和辐射数据的统计特征给其设定一个阈值,只有通过物理阈值质量控制测试的地面观测站点数据,才能进行下一步实验。

本文参照Shi等<sup>[21]</sup>的研究,首先设置上限为每天地球大气顶接收到的辐射日总量 $G_0/(MJ/m^2)$ ,其计算公式为<sup>[22]</sup>:

$$G_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} I_0 k (\cos \phi \cos \delta \sin w_s + \frac{\pi w_s}{180} \sin \phi \sin \delta) \quad (1)$$



式中:  $I_0$  表示太阳常数, 大小为  $1367 \text{ W/m}^2$ ;  $\delta$  表示太阳赤纬角;  $\phi$  表示站点纬度位置;  $w_s$  表示日落时角;  $k$  表示地球轨道偏心率校正因子。

每天的地球轨道偏心率校正因子  $k$  由式(2)计算得到<sup>[23]</sup>。

$$k = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \quad (2)$$

式中:  $d_n$  表示一年中的第几天。

每天的太阳赤纬角  $\delta$  和日落时角  $w_s$  由式(3)、(4)计算得到<sup>[24-25]</sup>。

$$\delta = 23.45 \sin\left(360\frac{284 + d_n}{365}\right) \quad (3)$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (4)$$

从物理学的角度来看, 很难给太阳总辐射设置一个严格的下限。因为由于散射辐射的存在, 太阳总辐射肯定大于零。本文参照 Geiger 等<sup>[26]</sup>的研究, 设置下限为每天地球大气顶接收到的辐射日总量的3%。由表2物理阈值测试的结果可以看出, 夏季的错误发生率明显更低。2000-2009年每天地表辐射观测数据平均错误百分率为1.98%。下文所有的验证分析只使用通过物理阈值质量控制测试的地面观测站点数据。

### 3.2 再分析数据的区域划分

为了考察再分析资料在中国的区域性差异, 许多学者采用了不同的分区方法<sup>[27-28]</sup>, 如以中国的气候区划分区, 以晴空指数为主要依据的辐射分区等。为了考察再分析辐射数据的区域性差异, 选用再分析辐射数据来进行辐射分区较为合理, 本文使用 MATLAB 分层聚类的方法, 利用2000-2009年的ECMWF再分析月均地表太阳辐射网格数据, 首先根据 dendrogram 函数<sup>[29]</sup>画出分类族谱图(图2)来确定可能的聚类数目。然后, 根据 silhouette 函数画出分类轮廓图(图3)来评价聚类信息, 轮廓图是数据集中每个数据点的一个距离值, 这个值是每个样本

与同一类别中其它样本的不相似度以及与其他类别中样本的不相似度的一个关系值, 其值越大越好。通过分类族谱图和轮廓图的调整, 选择最佳聚类分析结果是7类。最后, 根据 MATLAB 的 K-means 聚类分析方法进行聚类分析来确定不同区划。

聚类分析结果如下, 5区和8区为一类, 1、2、3、4、6和7区分别为一类, 但是考虑到空间分布连续性, 把5区和8区分为2个区, 确定最终将中国地区分为8类, 分别是: 西北地区(1区)、高原地区(3区)、西南地区(4区)、四川盆地地区(5区)、东南地区(6区)、中东部地区(7区)和东北地区(8区), 如图4所示。其中, 2区仅有3个站点, 站点较少且分布在2区边缘地区, 不能均匀覆盖整个区域, 不具有区域代表性, 故本文不予讨论。

### 3.3 地理探测器

地理探测器刚开始是用于探寻地理空间分区因素对疾病风险影响机理的一种方法<sup>[30]</sup>, 能有效的识别多因子与地理现象的作用关系, 被逐渐应用到地理科学和人文科学的研究中<sup>[31]</sup>。地理探测器的因子探测器可以检验单变量的空间分异性, 而气溶胶、云层覆盖率、地表反照率、水汽含量等大气因子属于典型的类别变量, 并对再分析地表辐射计算有重要影响, 故适合采用地理探测器方法来更好地揭示区域大气因子对再分析地表辐射误差的影响。

为了分析中国地区不同区域地表太阳辐射误差变化的主导大气影响因子, 本文利用地理探测器对 ECMWF 的气溶胶、云层覆盖率、地表反照率、水汽含量4个因子进行分析, 计算4个因子在不同区域对地表太阳辐射误差的影响。以各区域站点地表辐射相对偏差作为空间分层变量  $Y$ , 根据地理探测器模型 Power of Determinant ( $PD$ ) 值衡量 ECMWF 大气因子对 ECMWF 地表太阳辐射相对偏差影响程度。设中国为研究区  $D$ , 首先采用 K-means 聚类分析用大气因子  $X$  将中国划分为  $k$  个子区域,

表2 GSR数据2000-2009年未通过物理阈值测试每月天数分布

Tab. 2 Monthly distribution of number of days for daily data failing the physical threshold test

	月份												总数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
超过上限	75	60	216	307	477	330	276	171	123	138	100	55	2328
低于下限	695	516	397	305	323	298	201	259	364	436	510	539	4843
通过测试	29 920	27 569	30 077	29 088	29 890	29 072	30 213	30 260	29 213	30 116	29 090	30 096	354 604
错误百分率/%	2.5090	2.2896	1.9974	2.0606	2.6067	2.1145	1.5543	1.4011	1.6397	1.8703	2.0539	1.9355	1.9800

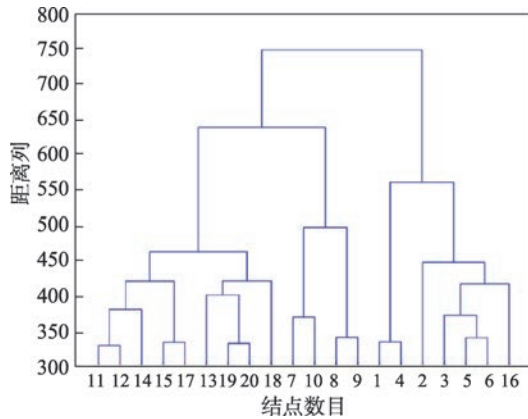


图2 分类族谱图

Fig. 2 Classification tree diagram

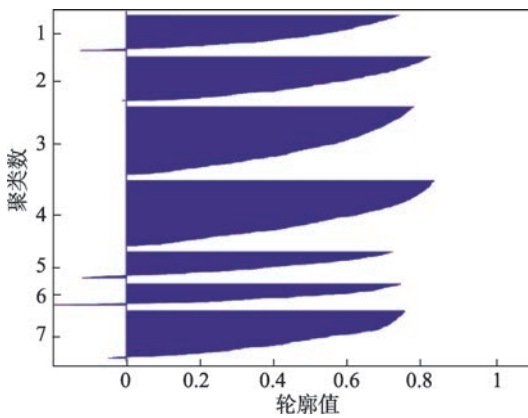


图3 轮廓图

Fig. 3 Silhouette diagram

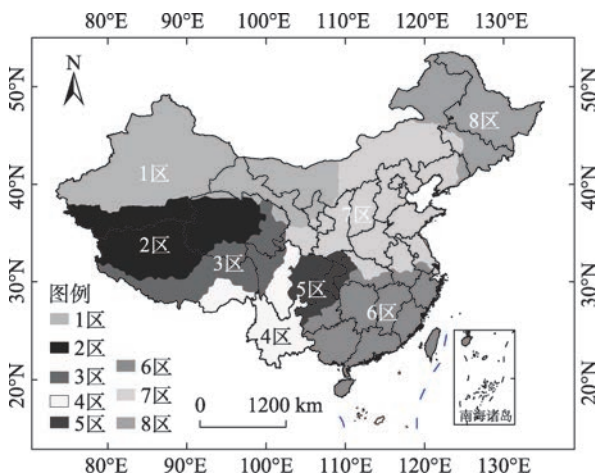


图4 中国8个分区

Fig. 4 Eight regions of China

各个子区域的地表辐射站点个数和站点地表太阳辐射相对偏差的方差分别记为  $N_{d1}, N_{d2}, \dots, N_{dk}$  和  $\sigma_{d1}^2, \sigma_{d2}^2, \dots, \sigma_{dk}^2$ 。PD值计算方法如式(5)所示。

$$PD = 1 - \frac{\sum_{i=1}^K (N_{di} \times \sigma_{di}^2)}{N_D \times \sigma_D^2} \quad (5)$$

式中:  $i=1, 2, 3, k$ ;  $N_{di}$  为第  $i$  个子区域的站点个数;  $N_D$  代表在整个中国区域  $D$  内所有地面辐射站点个数,  $N_D = \sum_{i=1}^K (N_{di})$ 。  $\sigma_D^2$  代表整个区域站点地表太阳辐射相对偏差的离散方差。本文根据大气因子划分的子区域, 当大气因子  $X$  对站点相对偏差具有决定力时, 每个子区域内的大气因子差距较小, 子区域之间的差距较大, 每个子区域的站点离散方差  $\sigma_{di}^2$  会很小, 而子区域之间的方差很大。当  $\sigma_{di}^2$  趋向于 0 时, 是相对偏差变化完全由该大气因子决定的理想状态, 此时,  $PD=1$ 。如果地表太阳辐射相对偏差大小与该大气因子无关, 那么每个子区域站点离散方差  $\sigma_{di}^2$  和站点个数  $N_{di}$  加权之和越接近  $\text{Var } D$ ,  $N_D \times \sigma_D^2 = \text{Var } D$ , 从而  $PD=0$ ; 因此,  $PD$  值的取值范围为  $[0, 1]$ , 其值越大, 说明相应大气因子对地表太阳辐射相对偏差变化的相关性越大。

## 4 再分析数据误差分析

利用 ECMWF 再分析资料的逐 3 h 数据集计算得到逐日数据, 经过处理得到月均、年平均、多年平均等数据。本文通过对 2000–2009 年 ECMWF 再分析地表辐射数据与 CMA 地面站点数据进行比较, 对不同时间尺度再分析数据误差进行分析。

### (1) 时段变化

逐 3 h 再分析资料分 UTC0, UTC3, UTC6, UTC9, UTC12, UTC15, UTC18h 和 UTC21h, 对应北京时间分别要加 8 h。由图 5 可知, 如果将一天 24 h 分为 8 个时段, 分别比较各个时段平均地表太阳辐射与地面观测站点数据, 我国辐射观测不为零的情况可能出现在 UTC0-3、UTC3-6、UTC6-9、UTC9-12 和 UTC21-24 共 5 个时间段内, 其中, UTC12-15、UTC15-18 和 UTC18-21 共 3 个时间段的辐射偏弱甚至为零。再分析地表辐射与地面站点辐射数据不同时段比较发现, UTC3-6 时为一日中辐射较强时刻, 且相关性较高, 其他时段数据相关性相对较弱。再分析资料能否很好地反应小时间尺度上的变化, 也是考察再分析资料适用性的一个标准, 以往对再分析资料误差的分析, 都是从天、月、年等时间尺度上来考虑, 本文从一天 8 个时段来分析再分析地表辐射的误差, 对再分析误差分析研究具有一定参考价值。

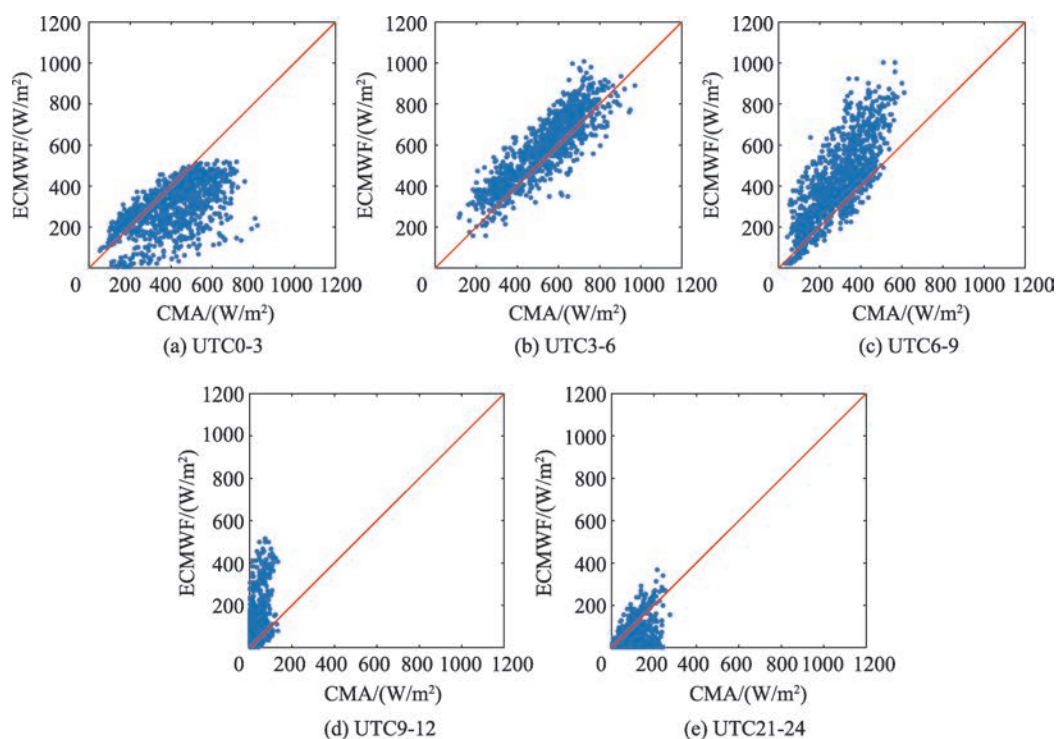


图5 2000–2009年ECMWF-CMA分时段月均地表辐射散点图

Fig. 5 Scatter plots of ECMWF-CMA average monthly surface radiation at different periods from 2000 to 2009

## (2) 季节性变化

图6为2000–2009年ECMWF再分析数据和96个CMA地面观测站点数据的月均地表辐射散点图。从图6可看到,相关系数 $R$ 为0.91,均方根误差为 $32.36 \text{ W/m}^2$ ,平均偏差为 $18.28 \text{ W/m}^2$ ,且大多数点都在1:1线上方。实验表明ECMWF再分析地表辐射数据略高于地面观测站点数据,与前人研究结论一致。

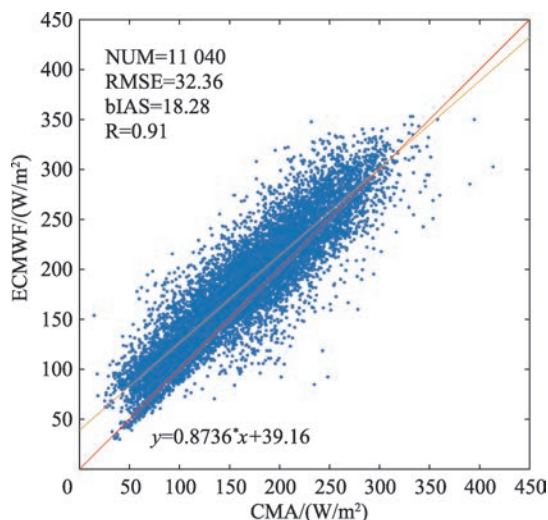


图6 2000–2009年CMA-ECMWF月均地表辐射散点图  
Fig. 6 Scatter plots of CMA-ECMWF average monthly surface radiation from 2000 to 2009

不同季节再分析资料与观测资料之间的差异也不相同,图7展示了2000–2009年的ECMWF再分析数据和CMA地面观测站点数据分季节地表辐射散点图。由图7可见,春夏秋冬4个季节的相关系数分别为0.83、0.76、0.80、0.84。均方根误差分别为 $38.21$ 、 $27.05$ 、 $22.08$ 和 $23.02 \text{ W/m}^2$ ;平均偏差分别为 $30.70$ 、 $6.66$ 、 $12.08$ 和 $23.02 \text{ W/m}^2$ 。结果表明,不同季节ECMWF再分析资料与观测资料之间的差异不同,春冬季节的再分析数据明显高于地面观测站点数据,ECMWF再分析地表辐射数据春冬季节偏差大于夏秋季节。

## (3) 年际变化

图8为2000–2009年ECMWF再分析资料和CMA站点资料地表太阳辐射时间序列变化图。图8(a)中,ECMWF再分析资料的地表太阳辐射都要高于CMA站点资料。从图8(a)、(b)可看出,月均地表太阳辐射每年都在7月左右达到峰值,1月左右达到谷值。相对偏差的计算方法如式(6)所示。

$$RB = \frac{ECMWF - CMA}{CMA} \quad (6)$$

式中: $RB$ 表示相对偏差,其值为正时表示再分析数据高于地面观测数据,为负时表示再分析数据低于地面观测数据。由图8(d)所有站点月均相对偏差



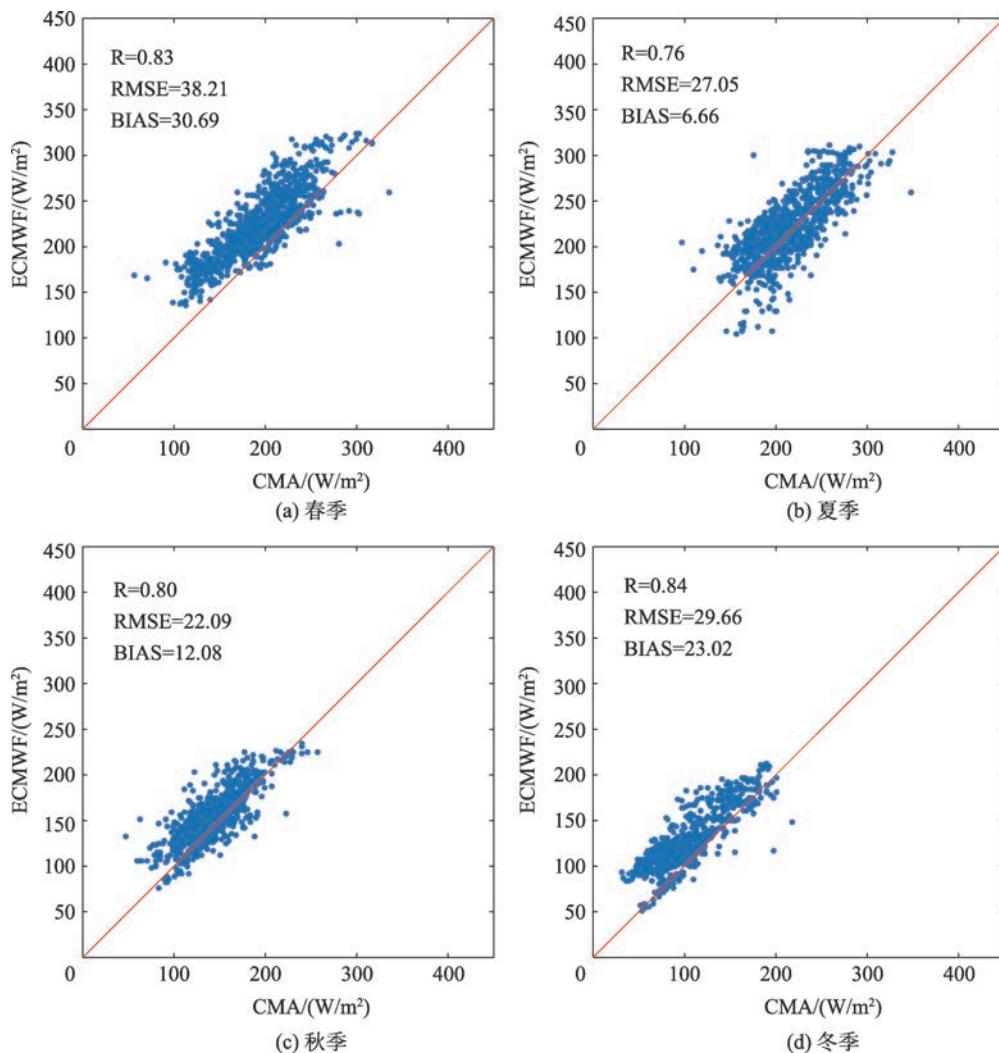


图7 2000–2009年CMA-ECMWF分季节地表辐射散点图

Fig. 7 Seasonal scatter plots of CMA-ECMWF average monthly surface radiation from 2000 to 2009

频率分布图可见,相对偏差较小( $-5\% \sim 10\%$ )在6–10月分布频率较高,相对偏差较大( $15\% \sim 35\%$ )在12–4月分布频率较高。这种季节性的差异可能是由于水汽、气溶胶、地表反照率、云覆盖率等大气因素的季节性差异引起的。

## 5 时空误差成因分析

考虑到再分析资料与观测资料之间相对偏差的季节性变化,不同季节起主导影响的大气因子不一样,本文把2000–2009年按照冬季(12、1、2和3月)和夏季(6、7、8和9月)两部分来进行区域大气影响因子分析。图9(a)、(b)分别表示夏季和冬季ECMWF再分析地表太阳辐射平均相对偏差分布图。从图9可看到,夏季正相对偏差较大站点主要

分布在中国东南地区(6区)、中东部地区(7区)和四川盆地地区(5区),负相对偏差较大站点主要分布高原地区(3区)、西南地区(4区)和东北地区(8区);冬季站点相对偏差基本上都为正,在冬季ECMWF地表辐射数据表现出明显的高估,相对偏差较大站点主要分布在中国东南地区(6区)、中东部地区(7区)和四川盆地地区(5区)。

为了分析中国地区不同分区影响ECMWF再分析地表太阳辐射相对偏差变化的主导大气影响因子,把地表太阳辐射相对偏差作为空间分层变量Y,利用地理探测器对ECMWF的气溶胶、云层覆盖率、地表反照率、水汽含量4个因子进行分析,分别计算得到夏季和冬季4个因子在不同区域的因子解释力大小,因子解释力越大,表示因子对相对偏差变化的影响越显著,如表3所示。

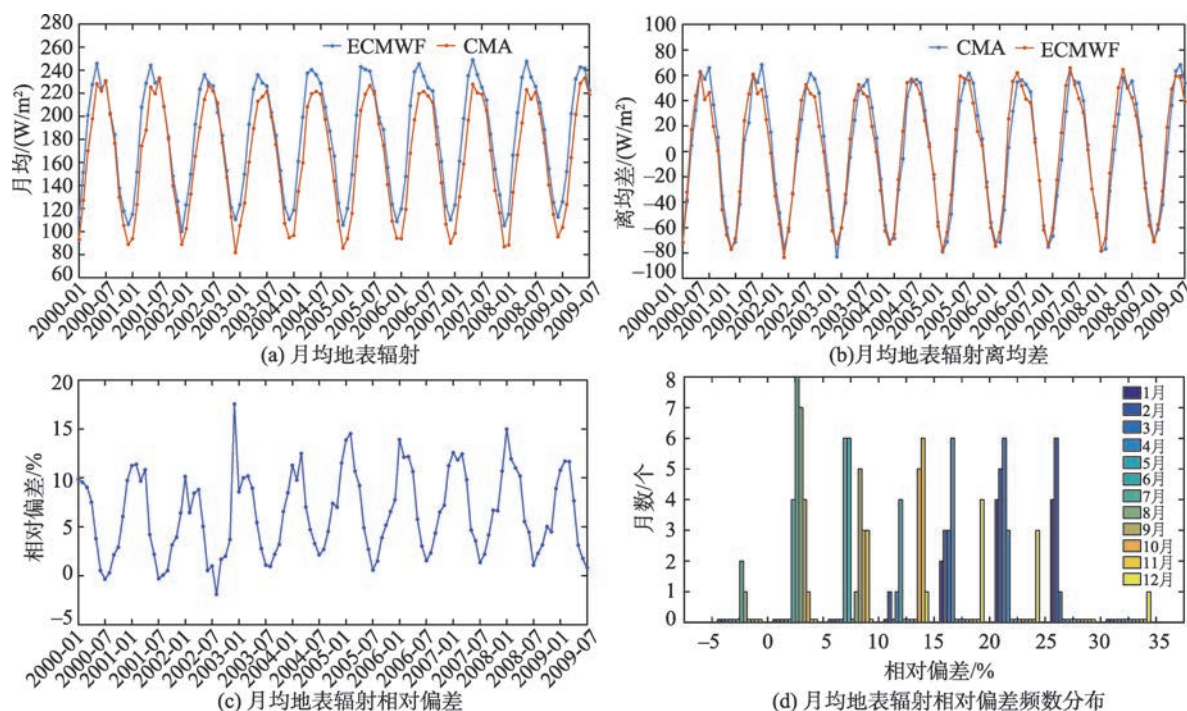


图8 2000–2009年CMA-ECMWF地表太阳辐射时间序列图

Fig. 8 Time series of monthly mean (a), anomalies (b) and relative bias to monthly mean (c) and relative bias frequency distribution (d) for CMA-ECMWF average monthly surface radiation from 2000 to 2009.

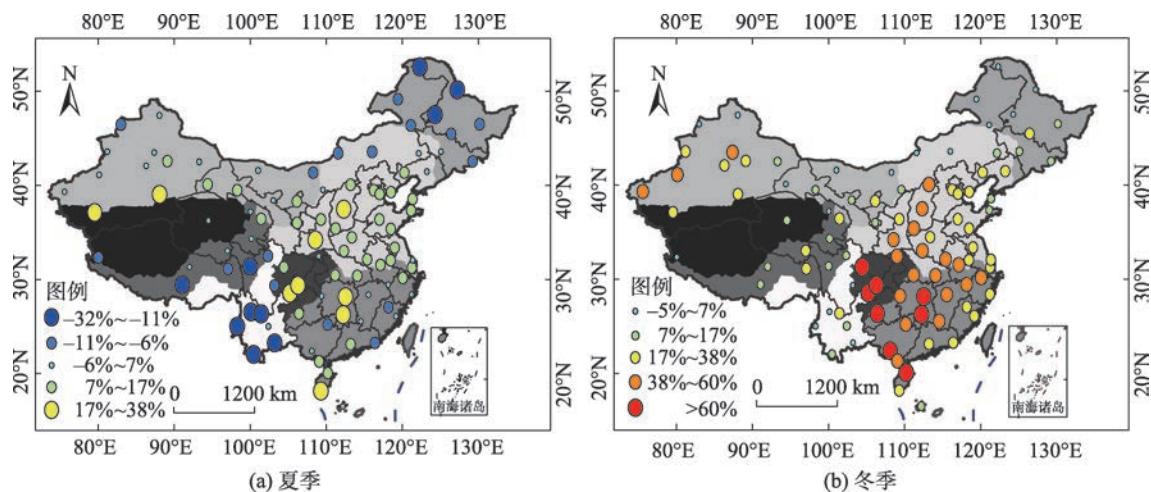


图9 2000–2009年ECMWF-CMA地表太阳辐射平均相对偏差分布图

Fig. 9 Distribution of average relative deviation of ECMWF-CMA surface solar radiation from 2000 to 2009

从中国各个区域因子解释力分布图(图10)来看,夏季中国西北地区(1区)、高原地区(3区)、西南地区(4区)和四川盆地地区(5区)的主导影响因子都是气溶胶,且因子解释力较大;东南(6区)地区的主导影响因子是地表反照率和气溶胶;中东部地区(7区)的主导影响因子是云覆盖率和气溶胶,但是因子解释较小,分别为0.0228和0.0202;东北地区

(8区)4个因子均未通过显著性系数检验,说明在该区4个因子对相对偏差变化的影响不显著。冬季中国西南地区(4区)、东南地区(6区)的主导影响因子是气溶胶;西北地区(1区)、高原地区(3区)、中东部地区(7区)、东北地区(8区)和四川盆地地区(5区)的主导影响因子是云覆盖率。而在冬季地表反照率都未通过显著性系数检验,说明在冬季地表反照



表3 中国各个区域因子解释力  
Tab. 3 Power of the determinant of China's regions

分区	夏季(6,7,8和9月)				冬季(12,1,2和3月)			
	气溶胶	云覆盖率	水汽含量	地表反照率	气溶胶	云覆盖率	水汽含量	地表反照率
1	0.3405	0.0516(N)	0.0460	0.0302(N)	0.0196(N)	0.2085	0.0124(N)	0.0184(N)
2	0.4953	0.2546	0.2210	0.0497(N)	0.4457	0.0587(N)	0.4952	0.1080(N)
3	0.3405	0.0202(N)	0.0432(N)	0.1789	0.0843(N)	0.2396	0.0899	0.0477(N)
4	0.3753	0.2221	0.2507	0.5970(N)	0.4899	0.1088	0.1173	0.0266(N)
5	0.3258	0.0426(N)	0.1047	0.1941	0.1128	0.1174	0.0933	0.0504(N)
6	0.2278	0.0550(N)	0.0920	0.2556	0.2074	0.0284(N)	0.0091(N)	0.0211(N)
7	0.0202	0.0228	0.0125	0.0173	0.0626	0.1225	0.0961	0.0072(N)
8	0.0502(N)	0.0522(N)	0.0355(N)	0.0965(N)	0.1113	0.2828	0.0058(N)	0.0304(N)

注:编号1-8代表不同分区,N表示未通过显著性系数检验

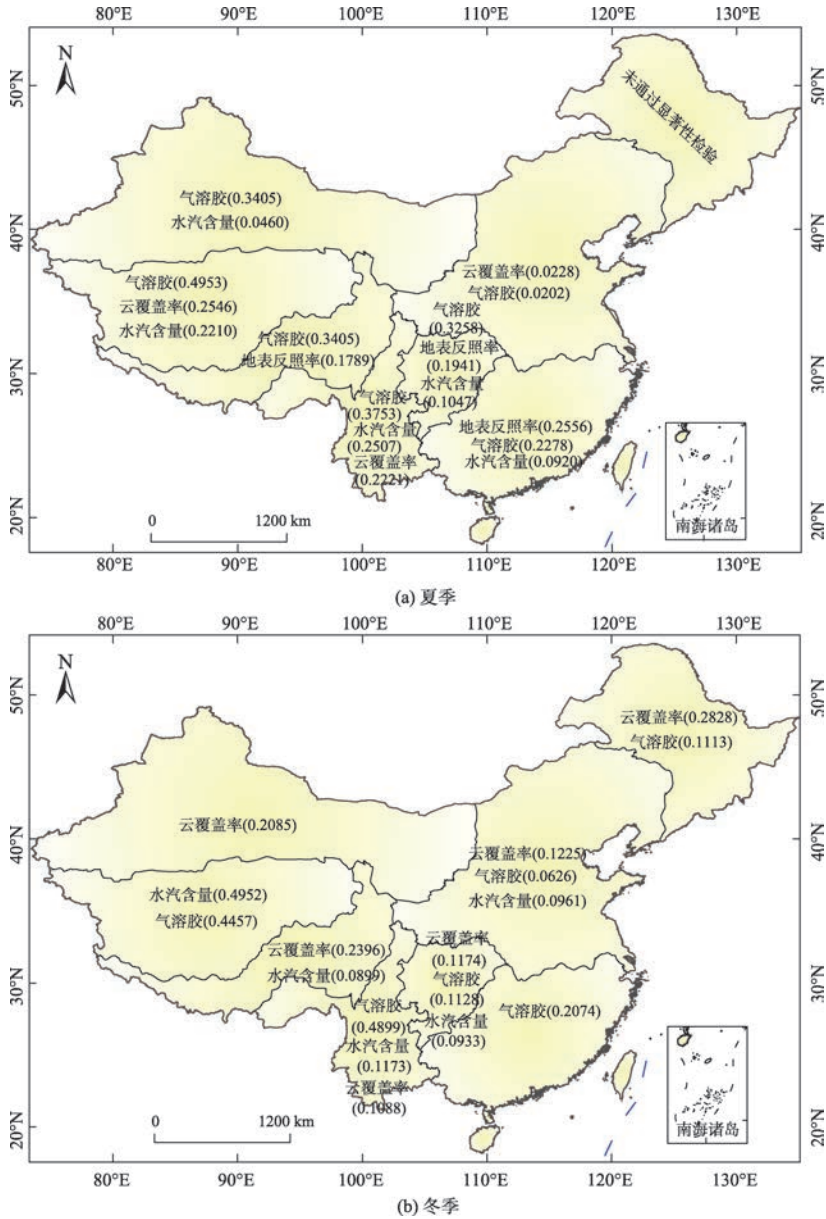


图10 中国各个区域因子解释力  
Fig. 10 Power of the determinant of China's regions

率对相对偏差变化的影响不显著。综合夏季和冬季可以发现,气溶胶和云覆盖率对ECMWF地表太阳辐射相对偏差变化影响更加显著,是2个重要的主导影响因子。

以上得到了各个区域的主导大气影响因子和因子解释力的大小,由于CERES大气参数产品具有相对较高的精度,采用2000–2009年CERES的云覆盖率、气溶胶、水汽含量和地表反照率产品和ERA-interim的大气产品相比较进行验证分析,得到夏季和冬季平均ERA-interim与CERES大气产品区域分布对比图(图11、12),结合中国各个区域因子解释力图(图10),判断各区域ECMWF大气参数的变化是否和主导大气影响因子相符合。

夏季,从地表太阳辐射平均相对偏差(图9(a))、区域因子解释力(图10(a))和大气产品区域分布对比图(图11)来看:中国西北(1区)、高原(3区)、西南(4区)、东南(6区)、中东部(7区)和四川盆地地区(5区)都受到气溶胶的影响,气溶胶是西北、高原、西南和四川盆地地区的主导影响因子。其中西北地区ECMWF气溶胶北边被高估南边被低估,站点地表太阳辐射相对偏差也表现出北低南高的现象,西北地区地表辐射的变化主要受到气溶胶的影响;高原地区ECMWF气溶胶被高估,地表太阳辐射相对偏差为负的站点占主要部分,高原地区的辐射低估主要由于气溶胶的高估;西南地区虽然气溶胶是主导影响因子,但是云覆盖率和水汽含量的因子解释力之和大于气溶胶因子解释力,综合影响力更强,ECMWF云覆盖率和水汽含量均被高估,所以西南地区辐射表现出被低估的现象;四川盆地地区ECMWF气溶胶被严重低估,地表太阳辐射相对偏差为正的站点占主要部分,四川盆地辐射高估主要由于气溶胶的低估;东南部地区的辐射变化最主要受到地表反照率的影响;中东部地区主导影响因子是云覆盖率和气溶胶,中国中东部ECMWF云覆盖率西北边略被高估,气溶胶在东南边明显被低估,站点地表太阳辐射相对偏差也表现出西北低东南高的现象,中东部地区辐射变化受到云覆盖率和气溶胶共同影响。

冬季,从地表太阳辐射平均相对偏差(图9(b))、区域因子解释力(图10(b))和大气产品区域分布对比图(图12)来看:中国西北(1区)、高原(3区)、西南(4区)、中东部(7区)、东北(8区)和四川盆地地区(5区)都受到云覆盖率的影响,云覆盖率是西北、高

原、中东部、东北和四川盆地地区的主导影响因子。其中西北、高原和东北地区ECMWF云覆盖率明显被高估,地表太阳辐射相对偏差为负的站点在这些区域占主要部分,西北、高原和东北地区的辐射低估主要由于ECMWF云覆盖率的高估;西南和东南地区主导影响因子是气溶胶,这2个区域ECMWF气溶胶被高估,地表太阳辐射相对偏差较小的站点占主要部分,西南和东南地区的辐射主要受到气溶胶的影响;四川盆地地区主导影响因子是云覆盖率和气溶胶,ECMWF气溶胶和云覆盖率在四川盆地地区明显被低估,水汽含量被高估,气溶胶和云覆盖率解释力之和(0.2302)要远大于水汽含量(0.0933),且四川盆地地区相对偏差为正的站点占主要部分,因此在四川盆地地区冬季由于ECMWF气溶胶和云覆盖率的低估从而导致了地表太阳辐射的高估;中东部地区主导影响因子是云覆盖率,ECMWF云覆盖率在北边明显被高估,且站点相对偏差在中东部地区也表现出北低南高的现象,中东部地区辐射变化主要受到云覆盖率的影响。

## 6 结论

本文分析研究ECMWF再分析资料地表太阳下行辐射产品在中国的误差及成因,主要结论如下:

(1)多时间尺度的数据误差评估。ECMWF要高于地面观测数据,月均偏差为 $18.28 \text{ W/m}^2$ ;再分析地表辐射与地面站点辐射数据不同时段比较发现,UTC3–6时ECMWF相关性较高,其他时段数据相关性相对较弱。ECMWF表现出季节性差异,夏秋季节明显好于春冬季节,相对偏差较大的数据集分布在12、1、2和3月,相对偏差较小的数据集分布在6、7、8和9月。

(2)基于地理探测器的再分析辐射产品时空误差分析。为了考察再分析数据的区域性差异,本文通过聚类分析对中国地区进行辐射分区,考虑到ECMWF大气因素对ECMWF地表辐射的影响和大气因子分布的空间异质性,引入地理探测器对ECMWF再分析辐射产品的时空误差进行定量分析,来判明影响ECMWF辐射精度的主要大气因子。

(3)不同区域的主要大气影响因子分析。不同区域在冬季和夏季的主导大气影响因子不同,夏季中国西北(1区)、高原(3区)、西南(4区)和四川盆地(5区)地区主导影响因子都是气溶胶,且因子解



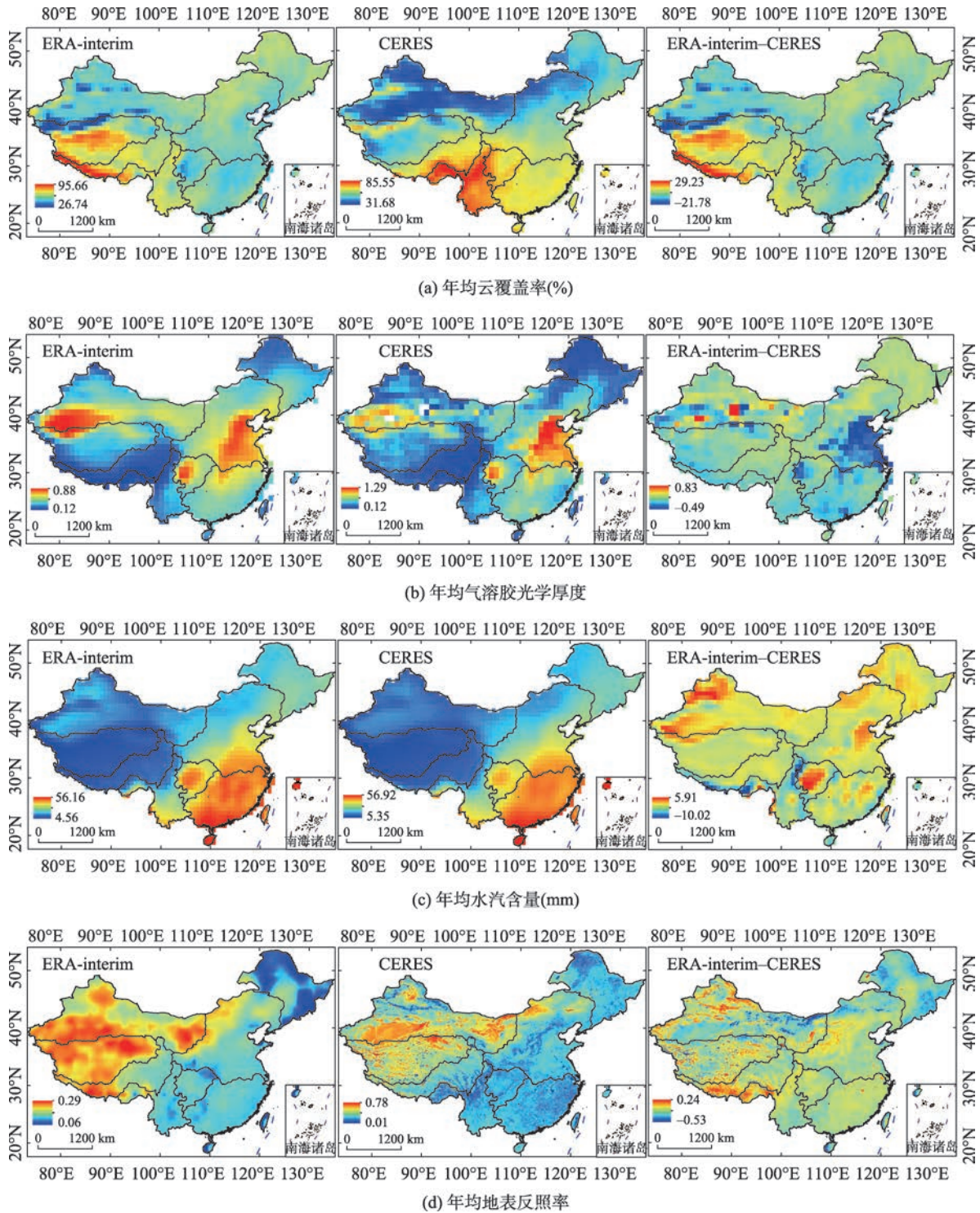


图 11 2000–2009 夏季平均 ERA-interim 与 CERES 大气产品区域分布对比图

Fig. 11 Comparisons of ERA-interim and CERES average atmosphere product in summer on regional scale from 2000 to 2009

释力较大,东南(6区)地区的主导影响因子是地表反照率和气溶胶,中东部地区(7区)的主导影响因子是云覆盖率和气溶胶,东北地区(8区)4个因子对相对偏差的变化影响不显著;冬季中国西北(1区)、高原(3区)、中东(7区)、东北(8区)和四川盆地(5

区)地区的主导影响因子都是云覆盖率,西南(5区)和东南(6区)地区的辐射主要受到气溶胶的影响,在冬季地表反照率在各区都未通过显著性系数检验。综合夏季和冬季,中国地区 ECMWF 地表太阳辐射在夏季主要受气溶胶的影响,冬季主要受云覆



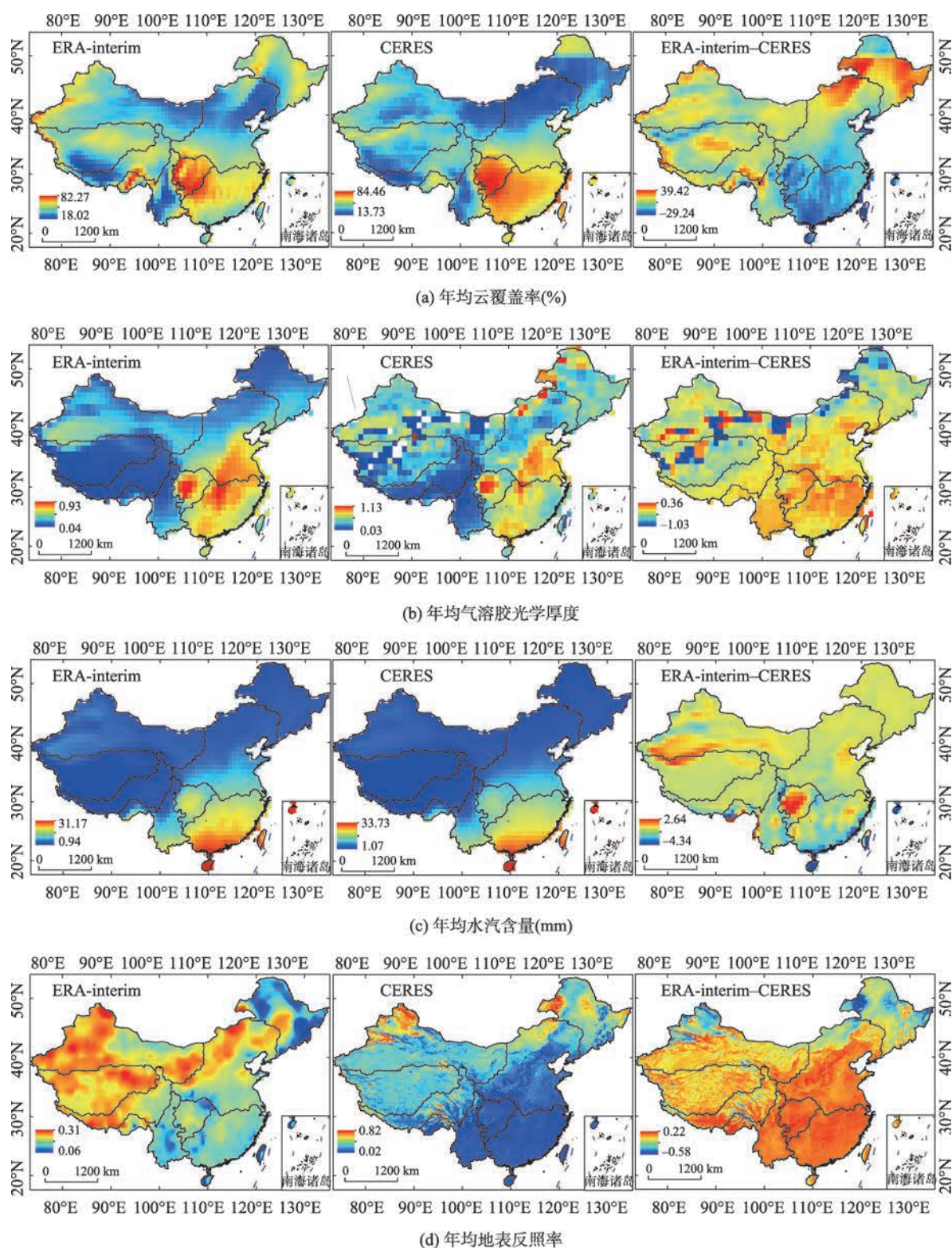


图12 2000-2009年冬季平均ERA-interim与CERES大气产品区域分布对比图

Fig. 12 Comparisons of ERA-interim and CERES average atmosphere product in winter on regional scale from 2000 to 2009

盖率的影响。

本文可以进一步提高和完善:① 缺乏质量较高的  
的大气参数数据与ECMWF再分析大气参数数据

进行对比验证,使验证结果更具有说服力;② 目前  
使用的CMA地面站点数仅为96个,为了使站点能  
均匀覆盖整个研究区域,加强因子解释力的说服

性,下一步的研究将新增716个由青藏高原多圈层模拟与数据同化中心提供的地表辐射数据。

致谢:感谢中国气象研究中心提供的中国地面观测站点数据,感谢欧洲中期天气预报中心提供的ERA-Interim资料。感谢国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)提供数据支撑。

#### 参考文献(References):

- [1] Pinker R T, Tarpley J D, Laszlo I, et al. Surface radiation budgets in support of the GEWEX Continental-Scale International Project (GCIIP) and the GEWEX Americas Prediction Project (GAPP), including the North American Land Data Assimilation System (NLDAS) project[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003,108 (D22):GCP5-1.
- [2] Huang G, Li X, Ma M, et al. High resolution surface radiation products for studies of regional energy, hydrologic and ecological processes over Heihe river basin, north-west China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230:67-78.
- [3] Betts A K, Zhao M, Dirmeyer P A, et al. Comparison of ERA40 and NCEP/DOE near-surface data sets with other ISLSCP-II data sets[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006,111(D22).
- [4] Wang K, Dickinson R E. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalysis[J]. *Reviews of Geophysics*, 2013,51(2):150-185.
- [5] Brotzge J A. A two-Year comparison of the surface water and energy budgets between two OASIS sites and NCEP NCAR reanalysis data[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004,5(2):311.
- [6] Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al. Evaluation of the Reanalysis Products from GSFC, NCEP, and ECMWF Using Flux Tower Observations[J]. *Journal of Climate*, 2010,25(25):1916-1944.
- [7] Lohmann S, Schillings C, Mayer B, et al. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data[J]. *Solar Energy*, 2006,80(11):1390-1401.
- [8] 谢爱红, ALLISON I, 效存德, 等. 不同再分析气温在东南极中山站-Dome A断面的适用性评价[J]. *中国科学:地球科学*, 2014(1):156-68. [Xie A H, Allison I, Xiao C D, et al. Assessment of air temperatures from different meteorological reanalyses for the East Antarctic region between Zhoushan and Dome A[J]. *Science China: Earth Science*, 2014(1):156-168.]
- [9] 邓小花, 翟盘茂, 袁春红. 国外几套再分析资料的对比与分析[J]. *气象科技*, 2010,38(1):1-8. [Deng X H, Zhai P M, Yuan C H. Comparative analysis of NCEP/NCAR, ECMWF and JMA reanalysis data[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2010,38(1):1-8.]
- [10] Wang A, Zeng X. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012,117(D5): 214-221.
- [11] Xia X A, Wang P C, Chen H B, et al. Analysis of downwelling surface solar radiation in China from National Centers for Environmental Prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006,111(D9):2105-2117.
- [12] You Q, Sanchez-lorenzo A, WILD M, et al. Decadal variation of surface solar radiation in the Tibetan Plateau from observations, reanalysis and model simulations[J]. *Climate Dynamics*, 2013,40(7-8):2073-2086.
- [13] Yang R, Ek M, Meng J. Surface water and energy budgets for the mississippi river basin in three NCEP reanalyses [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015,16(2):857-873.
- [14] Brotzge J A. A two-year comparison of the surface water and energy budgets between two OASIS sites and NCEP NCAR Reanalysis Data[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2004,5(2):311.
- [15] Zhang X, Liang S, Wang G, et al. Evaluation of the reanalysis surface incident shortwave radiation products from NCEP, ECMWF, GSFC, and JMA using satellite and surface observations[J]. *Remote Sensing*, 2016,8(3):225.
- [16] Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. ERAInterim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards[J]. *ECMWF Newsl. ECMWF Read. UK*, 2007,110:25-35.
- [17] Kato S, Loeb N G, Rose F G, et al. Surface irradiances consistent with CERES- Derived Top- of- Atmosphere shortwave and longwave irradiances[J]. *Journal of Climate*, 2013,26(9):2719-2740.
- [18] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997,102(14):16663-16682.
- [19] Wielicki B A, Barkstrom B R, Baum B A, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES):Algorithm overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998,36(4):1127-1141.
- [20] Younes S, Claywell R, Muneer T. Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches[J]. *Energy* 2005,30(9):1533e49.

- [21] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007,47(4):1006-1016.
- [22] Elminir H K, Azzam Y A, Younes F I. Prediction of hourly and daily diffuse fraction using neural network, as compared to linear regression models[J]. *Journal of Energy*, 2007,32(8):1513-1523.
- [23] Yorukoglu M, Celik A N. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006,47(15-16):2441-2450.
- [24] Moradi I. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours[J]. *Energy*, 2009,34(1):1-6.
- [25] Tang W, Yang K, He J, et al. Quality control and estimation of global solar radiation in China[J]. *Solar Energy*, 2010,84(3):466-475.
- [26] Geiger M, Diabate L, Menard L, et al. A web service for controlling the quality of measurements of global radiation[J]. *Solar Energy*, 2002,73(6):475-480.
- [27] 刘大龙,刘加平,杨柳.以晴空指数为主要依据的太阳辐射分区[J].*建筑科学*,2007,23(6):9-11. [ Liu D L, Liu J P, Yang L. Solar radiation distribution based on clearness index[J]. *Building Science*, 2007,23(6):9-11. ]
- [28] 赵天保,艾丽坤,冯锦明. NCEP再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较[J].*气候与环境研究*,2004,9(2):278-294. [ Zhao T B, Ai L K, Feng J M. An intercomparison between NCEP reanalysis data and observed data over China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2004,9(2):278-294. ]
- [29] Kaufman L, Rousseeuw P J. Divisive Analysis (Program DIANA)[M]// *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. 2008:253-279.
- [30] Wang J F, Li X H, Chrisakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-27.
- [31] 刘彦随,杨忍.中国县域城镇化的空间特征与形成机理 [J].*地理学报*,2012,67(8):1011-1020. [ Liu Y S, Yang R. The spatial characteristics and formation mechanism of the county urbanization in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(8):1011-1020. ]