

两种反演地表净太阳辐射的 参数化模式在北京地区的比较^{* 1}

权维俊¹ 陈洪滨² 郭文利¹ 夏祥鳌² 张小玲³

QUAN Weijun¹ CHEN Hongbin² GUO Wenli¹ XIA Xiang'ao² ZHANG Xiaoling³

1. 北京市气象局气候中心, 北京, 100089

2. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测开放实验室, 北京, 100029

3. 北京市气象局大气成分观测与分析中心, 北京, 100089

1. *Beijing Municipal Climate Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China*

2. *Laboratory for middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China*

3. *Atmospheric Compositions Watch and Analysis Center, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China*

2007-12-24 收稿, 2008-08-06 改回.

Quan Weijun, Chen Hongbin, Guo Wenli, Xia Xiang'ao, Zhang Xiaoling. 2009. Net surface solar radiation over Beijing area derived by two parameterization models: A comparison. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4): 623–630

Abstract The Net Surface Solar Radiation (NSSR) plays a very important role in the studies of the radiation balance of earth's surface, the energy exchange of earth-atmosphere system, weather forecast, climate changes, solar energy utilization, etc. Satellite remote sensing technology can be used to quickly derive the distribution of NSSR over large areas, especially, over those areas where have no meteorological observations, e. g. , polar and ocean areas. In this paper, based on the CERES/SSF satellite data, two parameterized models named Li model and Masuda model are used to calculate the NSSR over Shangdianzi, Beijing during January, April, July, and October in 2005, and a series of analyses are performed to compare the NSSR derived from parameterized models with observations. At the same time, two fitted models based on Li model and Masuda model are proposed in order to better derive the NSSR over Beijing area. The results show that the Mean Bias Error (MBE) of Li model and Masuda model are 62.2 W/m² and 50.8 W/m² under clear skies, while 82.1 W/m² and 71.8 W/m² under cloudy skies. Generally, the value of Li model is larger than that of Masuda model. The Mean Absolute Deviation (MAD) between the two results are 11.5 W/m² and 10.2 W/m² under clear and cloudy skies, respectively. The systematic errors of the two models can be decreased evidently after the models are linear fitted. The MBE of monthly mean NSSR between observation and derived from models is 19.6 W/m² for fitted Li model and 26.0 W/m² for fitted Masuda model.

Key words CERES/SSF, net surface solar radiation, parameterized model

摘 要 地表净太阳辐射(NSSR)在地表辐射平衡、地-气能量交换、天气预报、气候变化和太阳能利用等研究方面具有重要的作用。利用卫星遥感技术能在广大的空间区域内快速地获取地表净太阳辐射的分布情况,特别是在无人观测的极地和海洋区域。本文基于 CERES/SSF 卫星数据,分别采用两种地表净太阳辐射(NSSR)的卫星反演参数化模式——Li 模式与 Masuda 模式计算了北京市上甸子地区 2005 年 1、4、7 和 10 月的 NSSR,并将反演结果与上甸子大气本底站的实测结果进行了对比分析,并对两种模式进行了修正以更好地反演北京地区的地表净太阳辐射。结果显示: Li 模式和 Masuda 模式反演结果与实测结果间的平均绝对误差在晴空条件下分别为 62.2 和 50.8 W/m²,在云天条件下分别为 82.1 和 71.8 W/m²; Li 模式相对于 Masuda 模式具有偏大的趋势,在晴天和云天条件下两者的平均绝对偏差分别为 11.5 和 10.2 W/m²;对 Li 模式和 Masuda 模式进行线性拟合回归后能有效减小反演过程中的系统性偏差,修改后的 Li 模式和 Masuda 模式在所有天空状况下反演的月

* 资助课题:北京市自然科学基金项目(8052010)。

作者简介:权维俊,主要从事卫星遥感和大气辐射方向的研究。E-mail:quanquan78430@163.com

平均 NSSR 值与观测值间的平均绝对误差分别为 -1.8 和 -3.4 W/m^2 , 均方根误差分别为 19.6 和 26.0 W/m^2 。

关键词 CERES/SSF, 地表净太阳辐射, 参数化模式

中图法分类号 P422.1

1 引言

地表净太阳辐射(Net Surface Solar Radiation, NSSR)也称地表吸收太阳辐射,是指到达地表的太阳总辐射减去被地表反射部分后所得到的辐射差额,太阳总辐射是太阳直接辐射和散射辐射的总和。在地表辐射交换中,它是辐射能量的收入部分,对地表辐射平衡、地-气能量交换,以及各地天气气候的形成都具有决定性的意义(翁笃鸣,1997)。地表净太阳辐射也会对地表温度、植物蒸腾、水循环以及生态系统等产生深远的影响。同时,地表净太阳辐射也是一种重要的气候资源和能源,在农业生产和太阳能的开发利用等方面都有着重要的作用。

很多学者在太阳辐射的气候学计算方法方面做了大量的工作,已能较好地解决气象站网密集地区的太阳辐射的计算问题。但对站点稀少的广大高原、荒漠和海洋地区,这种气候学计算方法的局限性很大,从而限制了人们对这些地区辐射气候状况的了解。因此,如何利用高空间分辨率的卫星资料来估算这些地区的地表辐射状况就十分必要。从 20 世纪 60 年代起,国际上就有研究者开始利用卫星资料反演地表辐射场的研究,后来中国也有一些学者开展了这方面的研究。目前,地表净太阳辐射的卫星遥感反演方法主要有两类:一类是分项反演地表入射太阳总辐射和地表反射率,然后求得地表净太阳辐射。例如,利用 TIROS-N 卫星可见光云图计算 1979 年夏季青藏高原地表总辐射(周允华等,1989);利用 1982 年 8 月—1983 年 7 月的 Nimbus-7 行星反射率的月平均资料用物理模式方法估算了青藏高原及其临近地区的月平均总辐射(钟强等,1989);应用一定时段的 NOAA/AVHRR 资料推算了青藏高原地区的地表反射率(钟强等,1985;1988);利用卫星辐射资料研究了青藏高原晴天行星反照率与地面反照率之间的关系(祝昌汉等,1993)等。这类方法涉及到太阳总辐射和地表反照率两步反演过程,因此不可避免地带来较大的误差(高歌等,1998)。另一类方法是根据大气顶(Top of Atmosphere, TOA)处的太阳辐射来直接反演地表净太阳辐射。Ramanathan(1986)在分析大气环流模式(General Circulation Models, GCMs)结果时发

现:TOA 处的净太阳辐射与地表净太阳辐射之间存在一个简单的线性关系。Cess 等(1989)根据更准确的辐射传输模式发现:在给定的大气和地表条件下,TOA 和地表处的净太阳辐射间的线性关系会随着太阳天顶角的变化而变化。Cess 等(1993)根据卫星和地面的匹配观测数据给出了一个经验转换算法,在晴天条件下该算法效果较好,但当应用于其他条件时就会产生很大的误差,其主要原因是由于该算法依赖于地表反照率、云量和光学厚度数据(Li, et al, 1993a),而这些参数主要来源于卫星观测,难以获取且精度不够高。为了克服这种局限,Li 等(1993b)根据辐射传输模式计算结果提出了一种新的更通用的参数化模式,该模式只需要太阳天顶角和大气可降水量两个输入参数。后来 Li 等(1993b)将 ERBE(Earth Radiation Budget Satellite)卫星资料输入到该参数化模式中,并根据气象塔上的辐射表观测数据对该模式反演结果进行了对比分析,结果显示在不考虑云和地表属性的情况下,两者的一致性很好。尽管 Li 等提出的反演地表净太阳辐射的参数化模式取得了很大的成功,但是该模式没有考虑除大气可降水量外的其他因子的影响,例如臭氧浓度、气溶胶类型和光学厚度等。针对这些问题, Masuda 等(1995)对该参数化模式进行了改进,引入了气压订正项、臭氧总量订正项、云订正项和气溶胶订正项。同时,对 Li 模式的基本部分的参数也做了相应的修改。

2 模式概述

Li 等(1993a)和 Masuda 等(1995)分别对两种参数化模式进行了详细的描述,为了叙述的完整性,这里给出了这两种参数化模式的简要描述。

2.1 Li 参数化模式

地表净太阳辐射参数化模式

$$S_{\text{surf}}^{\text{net}} = E_0 d^{-2} \mu \left\{ 1 - \frac{C}{\mu} - \frac{D}{\sqrt{\mu}} + \frac{1 - \exp(-\mu)}{\mu} (0.0699 - 0.0683\sqrt{R}) - [1 + A + B \ln \mu - 0.0273 + 0.0216\sqrt{R}] \alpha_{\text{TOA}} \right\} \quad (1)$$

其中, $E_0 = 1365 \text{ W/m}^2$, 是太阳常数; d 是天文单位的日-地距离; R 是以 cm 为单位的大气可降水量; $\mu = \cos\theta_0$, θ_0 是太阳天顶角; $\alpha_{\text{TOA}} = F_{\text{TOA}} / (E_0 d^{-2} \mu)$ 是 TOA 处的反射率, F_{TOA} 是卫星观测到的 TOA 处反射的短波通量, 单位为 W/m^2 ; $A = 0.0815$, $B = 0.0139$, $C = -0.01124$, $D = 0.1487$ 。

式(1)中的太阳常数 E_0 是在 $0.25\text{--}25 \mu\text{m}$ 的光谱范围内的值, 根据世界辐射中心的太阳光谱辐照度数据(Iqbal, 1983)计算, 在此光谱范围内的太阳辐射能占整个太阳光谱太阳能的 99.82%。在本文中考虑到要用上甸子的太阳辐射表观测数据来验证 Li 模式反演结果, 因此取与太阳辐射表光谱范围($0.285\text{--}2.8 \mu\text{m}$)对应的太阳常数 $E_0 = 1325.86 \text{ W/m}^2$, 在此波段内的太阳辐射占总太阳能的 97%, 由于在此光谱范围之外的太阳辐射通量受到的吸收很小, 因此 Li 模式给出的关系仍然成立(Li, 1993)。

2.2 Masuda 参数化模式

参数化模式如下:

$$S_{\text{surf}}^{\text{net}} = E_0 d^{-2} \mu \{ \alpha - \beta + \Delta S_{O_3}(\mu, O_3, r) + \Delta S_c(\mu, c_1, r_e, \omega_e) + \Delta S_a(\mu, \tau_a, r) \} \quad (2)$$

式(2)中

$$\alpha = 1 - a_1 \mu^{-1} - a_2 \mu^{-x} - (1 - e^{-\mu})(a_3 + a_4 \omega_e^y) \mu^{-1} \quad (3)$$

$$\beta = (1 + a_5 + a_6 \ln \mu + a_7 \omega_e^z) \quad (4)$$

其中 $\omega_e = \omega(p_s/p_0)^{0.838} \quad (5)$

ω_e 为经过地面气压校正后的大气可降水量, ω 为实际大气可降水量, p_s 为地面气压, $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$ 为标准大气压。 $a_1 = -0.00442$, $a_2 = 0.19172$, $a_3 = -0.32120$, $a_4 = 0.25055$, $a_5 = 0.05321$, $a_6 = 0.02978$, $a_7 = 0.03317$, $x = 0.31354$, $y = 0.16656$, $z = 0.40926$ 。

式(2)中的臭氧修正项为

$$\Delta S_{O_3}(\mu, O_3, r) = -b_1 \mu^{b_2} (1 - b_1 O_{3r} / \mu + 1.66 \mu r) \times (O_3 - O_{3r}) \quad (6)$$

其中, $b_1 = 0.0289$, $b_2 = -0.7937$, $O_{3r} = 332 \text{ DU}$ ^① 为参考臭氧总量。

式(2)中的云修正项为

$$\Delta S_c(\mu, c_1, r_e, \omega_e) = c_1 + c_2 \mu + c_3 r_e + (c_4 + c_5 \omega_e + c_6 \mu) c_1 \quad (7)$$

r_e 为等效云滴半径, c_1 为云顶高度, $c_1 = 0.02833$, c_2

$= -0.04705$, $c_3 = -0.00245$, $c_4 = 0.00884$, $c_5 = 0.00263$, $c_6 = -0.00518$ 。

式(2)中的气溶胶的修订项为

$$\Delta S_a(\mu, \tau_a, r) = d_1 + d_2 \mu + (d_3 + d_4) \tau_a \quad (8)$$

τ_a 为气溶胶光学厚度, $d_1 = 0.00521$, $d_2 = -0.00246$, $d_3 = -0.09058$, $d_4 = -0.28465$ 。

3 资料说明

本文使用的卫星资料是由美国 NASA Langley 研究中心大气科学数据中心提供的 CERES/SSF (<http://eosweb.larc.nasa.gov/PRODOCS/ceres/level2-ssf-table.html>) 数据, 该数据是由 TERRA 或 AQUA 卫星上的 CERES 探测器观测并经过云检测和地面处理后的产品。SSF 的主要数据类型有 CERES 瞬时视场(Fields of View, FOV)的几何位置和观测角度、辐射率和辐射通量、晴天区域统计、有云区域统计、MODIS 大气可降水量和气溶胶光学厚度等。每个 SSF 文件是由 1 h 的 CERES FOV 记录组成。本文选用的资料为 2005 年 1、4、7 和 10 月的共 119 个 SSF 文件。

地面辐射数据为北京上甸子大气本底站同期观测的采集频率为 1 次/(1 min) 的地面向下太阳总辐射和地面向上反射辐射数据。在本文中, 首先对太阳直接辐射、散射辐射、地面向下太阳总辐射和地面反射辐射数据进行了“零点漂移”订正处理和辐射表灵敏度订正处理, 然后采用了 BSRN(Baseline Surface Radiation Network)推荐的辐射观测数据质量检验方法对该辐射数据集进行了质量检验(权维俊等, 2009), 以确保用质量可靠的上甸子地面向下太阳总辐射和地面反射太阳辐射数据来检验模式模拟结果。

4 反演结果与分析

4.1 参数化模式反演结果与实测结果的对比分析

对比由 Li 参数化模式和 Masuda 参数化模式反演的地表净太阳辐射结果与上甸子大气本底站的实测结果(图 1)可以看出, Li 模式和 Masuda 模式反演结果与实测结果间的平均绝对误差在晴天状况下分别为 62.2 和 50.8 W/m^2 , 在云天状况下分别为 82.1 和 71.8 W/m^2 。由此可见, 无论是 Li 模式还是 Masuda 模式, 其反演结果与实测结果相比都存

① DU: 0°C , 1013.25 hPa 气压下, 垂直气柱臭氧总量将占 10^{-5} m 厚度。

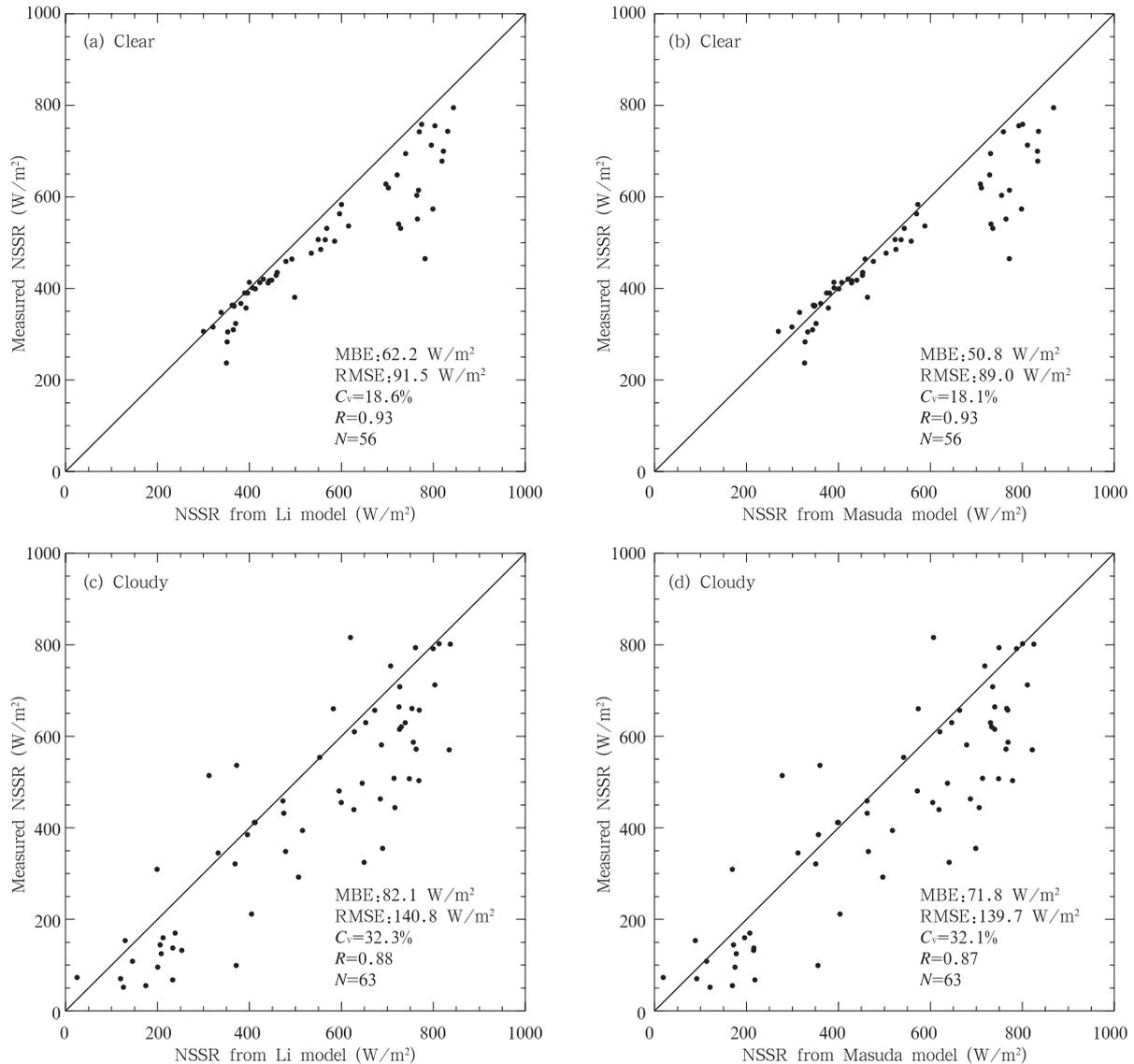


图1 参数化模式反演的NSSR与上甸子站观测结果

(a. 晴天Li模式, b. 晴天Masuda模式, c. 云天Li模式, d. 云天Masuda模式; MBE是平均绝对误差, RMSE是均方根误差, C_v 是变差系数, R 是相关系数, N 是样本数)

Fig. 1 NSSR data derived from parameterized models and measured at Shangdianzi background station, respectively

(a. Li model for clear skies, b. Masuda model for clear skies, c. Li model for cloudy skies, and d. Masuda model for cloudy skies. MBE is mean bias error. RMSE is root mean square error. C_v is coefficient of variation. R is correlation coefficient. N is sample numbers)

在一个比较明显的系统性偏大趋势。主要的原因或许是北京地区的气溶胶的真实含量比其他资料(例如MODIS气溶胶光学厚度资料)中给出的要大(毛节泰, 2002, 2005; Xia, 2006), 因此, 当将MODIS的气溶胶光学厚度资料作为输入参数输入到Masuda模式时会使该模式对北京地区气溶胶影响的考虑偏小, 而气溶胶的主要影响是衰减到达地表的太阳辐射, 这造成了Masuda参数化模式反演结果在北京

地区存在普遍偏大的现象。虽然, 在Li参数化模式中不需要输入气溶胶光学厚度数据, 但是在Li模式的建立过程中对气溶胶影响的考虑在北京地区也是偏小的, 这种影响体现在了Li模式的系数中, 因此该模式反演结果在北京地区同样存在系统偏大的趋势。

与地面实测结果相比, 两种参数化模式的反演结果都比较分散, 均方根误差在晴天条件下分别为

91.5和89.0W/m²,在云天条件下更是达到了140.8和139.7W/m²。其主要原因是尽管上甸子大气本底站的观测记录是每分钟1次,但仍然与卫星的即时观测间存在一定的时间匹配误差;另一个原因是卫星观测的瞬时视场与地面台站观测存在一定的差别,同时它们之间在空间位置上也存在一定的匹配误差。这种由时空匹配偏差引起的观测值与反演值之间的误差是客观存在的,特别是当天空中出现破碎的积云时,会使卫星和地面观测目标出现匹配性

的误差(Li, et al, 1993a)。

4.2 Li模式和Masuda模式反演结果的对比分析

从晴天和云天状况下Li模式与Masuda模式反演结果之间的散点分布(图2)可以看出,两种参数化模式反演结果的一致性非常好,其相关系数超过0.998;由于是对相同的卫星观测值利用不同模式反演的结果间的比较,因此不存在像卫星观测与地面观测间时空匹配引起的误差问题,两者间的均方根偏差也小很多,分别为18.7和17.1W/m²。

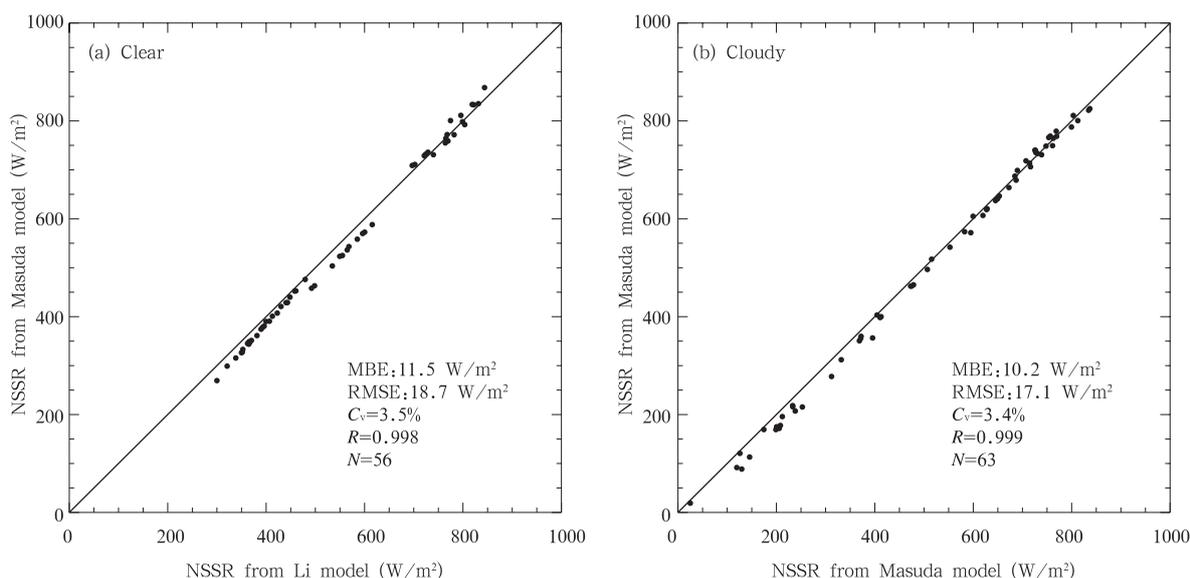


图2 Li模式与Masuda模式反演的NSSR结果

(a. 晴天条件下, b. 云天条件下; MAD是平均绝对偏差, RMSD是均方根偏差, Cv是变差系数, R是相关系数, N是样本数)

Fig. 2 NSSR data derived from the Li model and Masuda model, respectively

(a. For clear skies, b. for cloudy skies. MAD is mean absolute deviation. RMSD is root mean square deviation. Cv is coefficient of variation. R is correlation coefficient. N is sample numbers)

由图3可见,在晴天条件下,78.7%的Li模式反演结果大于Masuda模式结果,偏大的范围主要集中在5—30W/m²,所占比例为66.1%;在云天条件下,74.6%的Li模式结果大于Masuda模式结果,偏大的范围主要集中在5—20W/m²,所占比例为52.3%。结合前面的分析,可以看出Masuda模式由于考虑了臭氧、气溶胶和云的影响,其反演结果相对Li模式的结果更接近实际情况一些。具体地讲,在晴天条件下Masuda模式主要考虑了臭氧和气溶胶对太阳辐射的衰减影响,在云天条件下则综合考虑了臭氧、气溶胶和云的共同衰减影响,由于云的类

型和云量都存在很大的不确定性,因此相对于云天,在晴天条件下的Masuda模式要比Li模式反演效果更好一些。但总体上讲,两者间的差别并不是十分明显,其变差系数Cv均在3.5%以下。

比较图2和图3可以看出,Li模式相对Masuda模式具有偏大的趋势,在晴天和云天条件下的平均绝对偏差分别为11.5和10.2W/m²。

因此,在实际业务运行中考虑使用Li模式或许是一个可行的方案,因为该模式仅需要一个大气可降水量参数且精度与Masuda模式差别不大,而后者需要以臭氧含量、气溶胶光学厚度和云量数据作为输入参数,这些数据一般难以获取且精度有限。

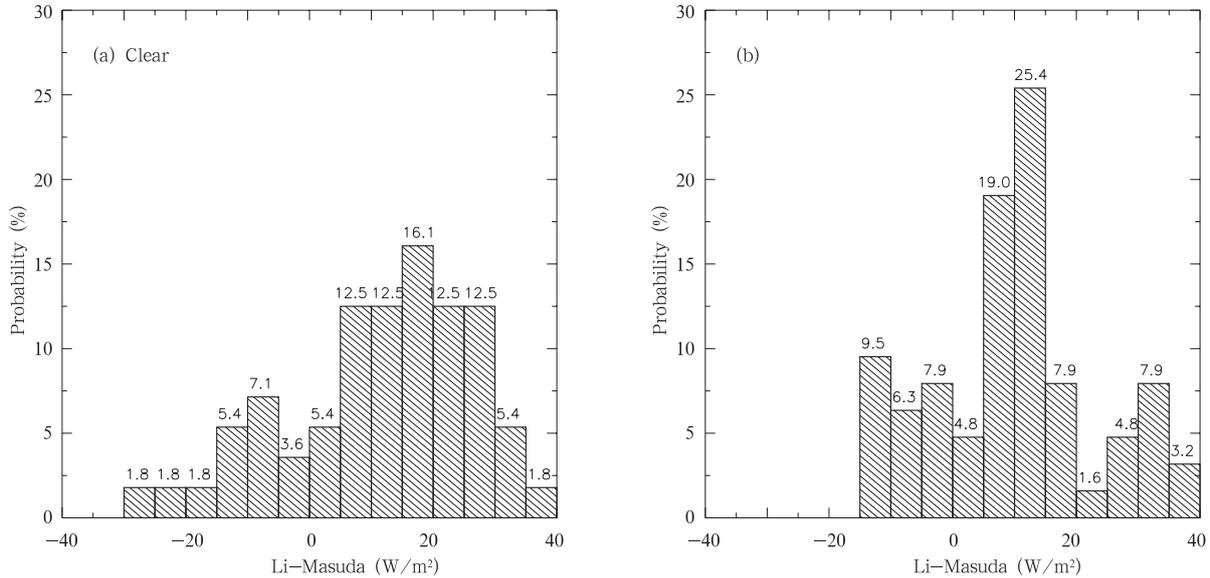


图3 参数化模式反演结果差值的概率分布

(a. 晴天条件, b. 所有天空条件)

Fig. 3 Probability distribution of the difference between two parameterized models

(a. for clear skies, b. for all skies)

4.3 参数化模式反演结果的线性回归分析

从以上分析可以看出,不论是 Li 模式还是 Masuda 模式,其反演结果都存在比较明显的系统性偏差现象。但是,两种参数化模式反演结果与地面实测结果间的线性相关性较好,在晴天条件下相关系数 R 的值为 0.93,云天条件下也在 0.87 以上。因此为了使这两种参数化模式更能合理地模拟北京地区的地表净太阳辐射,我们根据最小二乘法原理分别对两种参数化模式进行了一元线性拟合回归,回归方程形式为 $y=a+bx$,回归系数 a 和 b 列于表 1。

对回归方程进行的 t 检验表明,这两个一元线性回归方程都通过了置信度为 0.95 的 t 检验,表明回归效果显著。同时,回归方程的判定系数 R^2 也

表 1 参数化模式的回归系数

Table 1 The regression coefficients of parameterized models

	a (W/m^2)	b
Li 模式	18.44	0.83
Masuda 模式	48.22	0.79

较高,分别为 0.79 和 0.78,说明回归方程的拟合程度也较好。图 4 给出了经过拟合回归处理后的两种参数化模式反演结果与实测结果间的散点图。

从图 4 可以看出,经过拟合回归后的两种参数化模式反演结果与实测结果间的平均绝对误差非常

小,这说明经过一元线性回归处理后的参数化模式在反演北京地区的地表净太阳辐射时不存在明显的系统性偏差。拟合回归后的 Li 模式和 Masuda 模式反演结果的均方根误差分别为 88.9 和 90.3 W/m^2 ,相对于拟合前也有了一定的减小,但仍然较大。拟合回归分析能较好解决参数化模式反演结果系统性偏大的问题,但却很难从本质上解决反演结果比较发散的问题。

4.4 拟合回归后的参数化模式反演的月平均地表净太阳辐射的比较

由于卫星观测与台站观测的时空匹配偏差、模式输入参数的精度问题以及云的不确定性等,使得参数化模式的反演结果总存在一些随机性误差,但是通过平均运算能在一定程度上减小这种随机性误差(Li, et al, 1993a)。

经过拟合回归后的 Li 模式和 Masuda 模式反演结果的月平均 NSSR 值与地面实测值间的散点分布(图 5)表明。经过拟合回归后的 Li 模式和 Masuda 模式反演结果的 MBE 分别为 -1.8 和 -3.4 W/m^2 ,这说明经过拟合回归后这两种参数化模式反演的月平均 NSSR 结果与地面实测结果间不存在明显的系统性偏差。两者的 RMSE 分别为 19.6 和 26.0 W/m^2 ,这与 Whitlock 等(1995)的研究

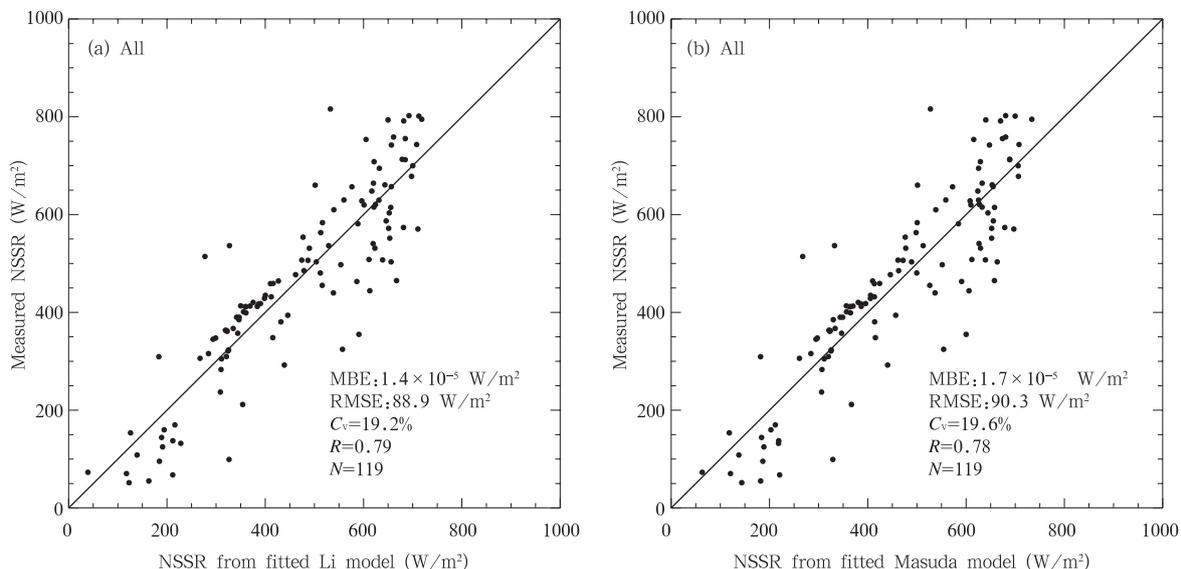


图4 拟合回归后的参数化模式反演的NSSR结果与上甸子站实测结果
(a. 全空回归Li模式, b. 全空回归Masuda模式; MBE是平均绝对误差, RMSE是均方根误差, C_v 是变差系数, R^2 是判定系数, N 是样本数)

Fig. 4 NSSR data derived from fitted parameterized models and measured at Shangdianzi background station, respectively
(a. fitted Li model for all skies, b. fitted Masuda model for all skies. MBE is mean bias error. RMSE is root mean square error. C_v is coefficient of variation. R^2 is decision coefficient. N is sample numbers)

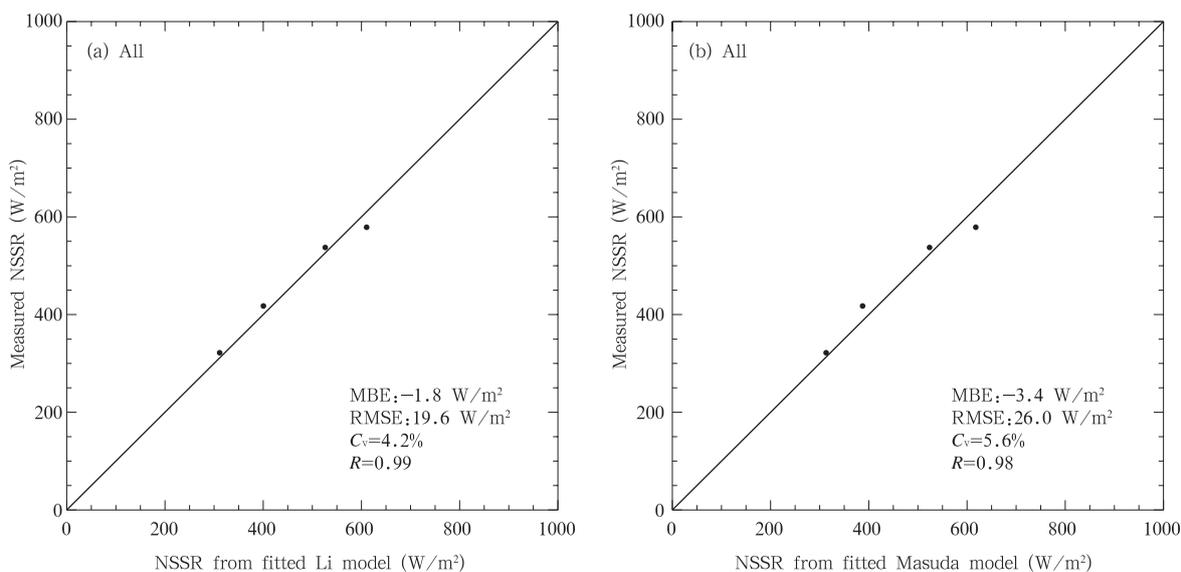


图5 拟合回归后的参数化模式反演的月平均NSSR结果与上甸子站实测结果
(a. 全空回归Li模式, b. 全空回归Masuda模式; MBE是平均绝对误差, RMSE是均方根误差, C_v 是变差系数, R 是相关系数)

Fig. 5 Monthly mean NSSR data derived from fitted parameterized models and measured at Shangdianzi background stations, respectively
(a. fitted Li model for all skies, b. fitted Masuda model for all skies. MBE is mean bias error. RMSE is root mean square error. C_v is coefficient of variation. R is correlation coefficient)

结果一致。该研究表明,由卫星估算的地面太阳辐射通量月平均值与地面实测值之间的RMSE

的范围为 $11.7\text{—}31.5\text{ W/m}^2$,这说明经过拟合回归后的两种参数化模式反演的北京地区月平均净太阳

辐射的精度能够满足气候模式研究的需要。如果地面太阳辐射观测台站的数量足够多,那么拟合回归后的参数化模式反演结果的 RMSE 还会减小(Xia, et al, 2006)。

5 结果与讨论

通过对 Li 模式和 Masuda 模式反演的地表净太阳辐射结果与上甸子地面辐射站实测结果的对比分析,得出如下结论:

(1) 在北京地区,无论是 Li 模式还是 Masuda 模式,其反演的地表净太阳辐射结果相对于地面实测结果存在明显的系统性偏大趋势。

(2) Masuda 模式由于考虑了臭氧、气溶胶和云的影响,其反演结果相对 Li 模式的结果更接近实际情况一些,特别是在晴天条件下效果会更好一些,但总体上讲,两者间的差别并不是十分明显。由于 Li 模式输入参数较少且精度与 Masuda 模式差别不大,建议在业务中使用 Li 模式。

(3) 本文给出的线性拟合回归方程,可以使 Masuda 模式和 Li 模式反演的北京地区地表净太阳辐射结果不存在明显的系统性偏差,且精度较高。

致谢:本文中使用的 SSF 数据由美国 NASA Langley 研究中心大气科学数据中心提供,地面辐射观测数据由北京上甸子大气成分本底国家野外站提供,在此表示感谢!

References

- Cess R D, Vulis I L. 1989. Inferring surface solar absorption from broadband satellite measurements. *J Climat*, 2: 974-985
- Cess R D, Nemesure S, Dutton E G. 1993. The impact of clouds on the shortwave radiation budget of the surface-atmosphere system: Interfacing measurements and model. *J Climat*, 6: 308-316
- Gao G, Weng D M. 1998. Retrieval of Qinghai-Xizang SASWAR with ERBE and ISCCP data. *J Nanjing Inst Meteor (in Chinese)*, 21(1): 8-9
- Iqbal M. 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Canada: Academic Press, 46-47
- Li Z Q, Leighton H G, Masuda, et al. 1993a. Estimation of SW flux absorbed at the surface from TOA reflected flux. *J Climat*, 6(2): 317-330
- Li Z Q, Leighton H G, Cess, et al. 1993b. Surface net solar radiation estimated from satellite measurements comparisons with tower observations. *J Climat*, 6(9): 1764-1772
- Masuda, Leighton H G, Li Z Q. 1995. A new parameterization for the determination of solar flux absorbed at the surface from satellite measurements. *J Climat*, 8: 1615-1628
- Mao J T, Li C C, Zhang J H, et al. 2002. The comparison of remote sensing aerosol optical depth from MODIS data and ground sun-photometer observation. *Quart J Appl Meteor (in Chinese)*, 13(1): 127-135
- Mao J T, Li C C. 2005. Observation study of aerosol radiative properties over China. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(5): 622-635
- Quan W J, Chen H B, Gao Y H, et al. 2009. The quality evaluation of solar radiation data measured in Shangdianzi background station. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 28(1): 136-142
- Ramanathan V. 1986. Scientific use of surface radiation budget for climate studies//Report of the Workshop on Surface Radiation Budget for Climate Applications. NASA RP-1169: 58-86
- Weng D M. 1997. *Radiation Climate in China (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 100pp
- Whitlock C H. 1995. First global WCRP shortwave surface radiation budget dataset. *Bull Ame Meteor Soc*, 76: 905-922
- Xia X A, Wang P C, Chen H B, et al. 2006. Analysis of downwelling surface solar radiation in china from National Centers for Environmental Prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observations. *J Geograph Res*, 111: D09103
- Zhong Q, Wu S J. 1985. A method for determining surface albedo over the Tibetan Plateau from AVHRR data. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 4(3): 193-203
- Zhong Q. 1988. Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau region. *Adv in Atmos Sci*, 5: 57-85
- Zhong Q, Sui J. 1989. Estimation of global radiation over the Qinghai-Xizang Plateau from Nimbus-7 planetary albedo data. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 42(2): 165-172
- Zhou Y H. 1989. Using satellite image to calculate the radiation equilibrium field over the Tibetan Plateau during summer in 1979 //Tibetan Plateau Meteorological Experiment Corpus II (in Chinese). Beijing: Science Press, 46-52
- Zhu C H, Zhu F K, Liu Y J. 1993. On the relationship between clear-sky planetary and surface albedo over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 51(1): 57-65

附中文参考文献

- 高歌,翁笃鸣. 1998. 利用 ERBE 和 ISCCP 资料反演青藏高原地表短波吸收辐射场. *南京气象学院学报*, 21(1): 8-9
- 毛节泰,李成才,张军华等. 2002. MODIS 卫星遥感北京地区气溶胶光学厚度与地面光度计遥感对比. *应用气象学报*, 13(1): 127-135
- 毛节泰,李成才. 2005. 气溶胶辐射特性的观测研究. *气象学报*, 63(5): 622-635
- 权维俊,陈洪滨,高燕虎等. 2009. 上甸子大气本底站太阳辐射观测数据的质量评价. *高原气象*, 28(1): 136-142
- 翁笃鸣. 1997. *中国辐射气候*. 北京:气象出版社, 100pp
- 钟强,吴士杰. 1985. 利用 AVHRR 资料推算青藏高原地区地表反射率的方法. *高原气象*, 4(3): 193-203
- 钟强,睦金娥. 1989. 利用 Nimbus-7 行星反照率观测资料估算青藏高原地区的总辐射. *气象学报*, 42(2): 165-172
- 周允华. 1989. 利用卫星云图对 1979 年夏季青藏高原侯辐射平衡场的计算//青藏高原气象科学实验文集(二). 北京:科学出版社, 46-52
- 祝昌汉,朱福康,刘玉洁. 1993. 青藏高原晴天行星反照率与地面反照率关系的研究. *气象学报*, 51(1): 57-65