

引用格式:Li Weiwei,Husi Letu,Chen Hongbin,*et al.*Estimation of Surface Solar Radiation Using MODIS Satellite Data and RSTAR Model[J].Remote Sensing Technology and Application,2017,32(4):643-650.[黎微微,胡斯勒图,陈洪滨,等.利用 MODIS 资料计算不同云天条件下的地表太阳辐射[J].遥感技术与应用,2017,32(4):643-650.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.4.0643

利用 MODIS 资料 计算不同云天条件下的地表太阳辐射

黎微微^{1,3},胡斯勒图²,陈洪滨¹,尚华哲²

- (1.中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室,北京 100029;
2.中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室,北京 100101;
3.中国科学院大学地球科学学院,北京 100049)

摘要:利用 MODIS 气溶胶和云产品卫星数据与大气辐射传输模式 RSTAR,进行了晴空和有云条件下地表太阳辐射计算,并与香河综合辐射站的地基辐射测量值相比较。分析表明,晴空下二者相关性较好,相关系数平方 R^2 值为 0.95,均方根误差 RMSE 为 38.8 W/m²。有云条件下,计算结果较差于晴空条件下, R^2 值为 0.88, RMSE 为 88.2 W/m²。观测显示,香河站云—气溶胶共存现象较多,而 MODIS 仅按单一层的云进行微物理参数反演,导致模式输入参数误差,给地表太阳辐射计算结果引入误差。为了分析云—气溶胶共存状态对计算地表太阳辐射的影响,利用 RSTAR 计算了不同光学厚度的云和气溶胶在特定波段卫星观测的辐亮度值,并对于特定波段卫星接收的辐亮度值,用不同垂直结构的云和气溶胶分别反演其光学和微物理参数,再利用反演的结果分别计算相应的地表太阳辐射。结果表明:相对于单一云层的反演结果,云下气溶胶光学厚度(AOD)为 0.1 时,由反演误差所导致的地表太阳辐射估算误差较小;而随着 AOD 增加影响明显增大,在 AOD 为 1.2 时,相对误差达 17.79%~18.38%。对于污染较重的华北地区而言,分析云覆盖下的气溶胶对地表太阳辐射的影响,有助于提高有云条件下地表太阳辐射的计算精度。

关 键 词:地表太阳辐射;MODIS;RSTAR;云天;气溶胶

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2017)04-0643-08

1 引 言

到达地表的太阳辐射是全球辐射和能量收支中的一个重要分量。准确获取地表太阳辐射分布状况,可为全球气候变化研究及太阳能有效利用提供基础数据。随着遥感技术的发展,卫星遥感观测技术成为获取地表太阳辐射数据源的一种途径,多源卫星观测全球覆盖,为估算大面积任意区域的地表太阳辐射提供了新机遇。

目前国内外学者基于卫星数据进行了大量的估

算晴空地表太阳辐射的研究。研究表明,晴空下太阳短波辐射计算值与地基观测值之间有较好的一致性^[1-3]。然而,有云条件下地表太阳辐射的计算较晴空复杂^[4-5]。通过卫星云检测技术、云和气溶胶微物理参数反演技术,能够获得大范围的云和气溶胶参数,结合大气辐射传输模式,可从反演参数中计算出到达地表的太阳辐射^[6]。实际中,到达地表的太阳辐射是云和气溶胶等因素共同作用的结果。Tak-enaka 等^[7]在有云条件下利用卫星资料计算日本 Chiba 站点的地表太阳辐射时,未考虑气溶胶影响,

收稿日期:2016-12-04;修订日期:2017-02-02
基金项目:国家自然科学基金项目(41305011,41275039,41575034)共同资助。
作者简介:黎微微(1992—),女,广西桂林人,硕士研究生,主要从事大气遥感方面的研究。E-mail:liweiwei@mail.iap.ac.cn。
通讯作者:陈洪滨(1960—),男,江苏丹徒人,研究员,主要从事大气遥感、探测方面的研究。E-mail:chb@mail.iap.ac.cn。

所得结果与地基辐射观测值一致性仍较好。说明对于清洁大气背景而言,有云条件下,气溶胶对地表太阳辐射影响较小,可忽略不计。华北地区受气溶胶污染较为严重^[9],使得地表太阳辐射减少^[10]。权维俊等^[8]结合卫星资料,利用 Li 模式和 Masuda 模式在有云条件下,对北京地区卫星遥感反演的地表太阳辐射有明显偏高趋势。受气溶胶污染较为严重的地区,常呈现云—气溶胶双层结构,气溶胶变化对地表太阳辐射计算影响不容忽视。目前被动式光学传感器,例如 MODIS,在云微物理参数反演以及云检测方面存在不足:一方面 MODIS 对于云和气溶胶同时存在的情况,依然仅按单一云层来反演参数;另一方面 MODIS 云检测存在误差,尤其是在污染背景下容易把雾霾识别为云^[11-12]。这些会在地表太阳辐射的计算引入较大的不确定性,因此分析云覆盖下气溶胶对地表太阳辐射估算的影响,对提高有云条件下地表太阳辐射的计算精度具有重要意义。

目前,利用卫星资料计算地表太阳辐射时,考虑云下气溶胶对地表太阳辐射影响的研究较少,鉴于此,本文利用 MODIS 气溶胶和云产品数据,结合大气辐射传输模式 RSTAR(以下简称 RSTAR)模拟,并综合考虑了晴空和有云条件下对地表太阳辐射重要影响因子的变化,进行了地表太阳辐射的计算。并将模拟结果与香河综合观测站的地基辐射观测值相比较,分析评估二者之间的一致性。最后结合 RSTAR 对卫星接收到的辐亮度值,反演不同云和气溶胶光学厚度组合垂直结构,计算不同垂直结构下的地表太阳辐射,分析云覆盖下气溶胶对地表太阳辐射的影响,为今后提高有云条件下地表太阳辐射的计算精度提供基础。

2 数据与方法

2.1 数据选取

中分辨率成像光谱仪(MODIS)搭载在 Terra 和 Aqua 两颗极轨卫星上,共 36 个通道,光谱覆盖范围为 $0.405\sim 14.385\ \mu\text{m}$,不同波段数据空间分辨率为 250、500 m 和 1 km。本文使用的卫星资料是美国航天局(NASA)戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center,GSFC)提供的 Terra 和 Aqua 的 MODIS 二级气溶胶和云产品,数据时间覆盖 2015 年全年,MOD/MYD03 产品用于提取地理定位资料,MOD/MYD04 产品用于读取气溶胶光学厚度,MOD/MYD06 产品用于获取云光学厚度和云粒子有效半径等信息。

本文利用的地表辐射观测数据取自大气物理研究所香河综合观测实验站($39^{\circ}47'\text{N}$, $116^{\circ}57'\text{E}$,海拔高度 95 km),该站在中国科学院野外台站网络项目支持下运行。文中所用的辐射数据为太阳辐射表(NIP,波段范围为 $0.295\sim 3.000\ \mu\text{m}$)同期观测的 1 min 平均值。为匹配地基辐射观测数据和卫星数据的时间尺度,并减少云的时空变化对卫星观测和地基辐射观测数据的影响,选取对应当天卫星过境前后一段时间的地基观测辐射值做平均。研究中,随机选取了晴空条件下,2015 年各月份地基辐射观测数据(共 12 组)的最临近时间点,5 min 平均值、10 min 平均值、30 min 平均值和 60 min 平均值,与模拟值做相关性分析。结果表明:在地基观测数据做 60 min 平均时,相关性最好, R^2 值为 0.976。因此,在本文中,对于地基辐射观测数据做 60 min 的平均处理。

2.2 研究方法

本文研究使用 2015 年 MODIS 资料,将资料分为晴空和有云两大类。选取卫星与香河站空间匹配点的云和气溶胶微物理参数以及相关信息作为大气辐射传输模式 RSTAR 的输入参数,分别计算到达地表的太阳辐射。并用香河站点观测的辐射数据验证计算结果,检验二者的一致性。最后用 RSTAR 模式模拟云—气溶胶双层结构情况下计算地表太阳辐射,定量分析云下气溶胶对利用 MODIS 资料计算地表太阳辐射的影响。

本文采用的 RSTAR 是一套适用于平面平行大气的辐射传输数值模型^[13-14],有 6 种大气模式可供选择,假设的平面平行大气从海平面到 120 km 可分 50 层,预设由 9 种基本成分(Water, Ice, Dust-like, Water-soluble, Sea Salt, Soot, Volcanic-ash, 75% H_2SO_4 , Yellow sand)组成的 11 类气溶胶模型(Water, Ice, Dust-like, Soot, Volcanic-ash, 75% H_2SO_4 , Rural, Sea Spray, Urban, Tropo, Yellow sand)。云模型有水云和由球形、椭圆形、六棱柱形等不同形状冰晶粒子组成的冰云可供选择。本文主要运用 RSTAR 计算地表太阳辐射和模拟大气顶的辐亮度。

在模式计算过程中,选取波段数目对计算精度和计算效率影响较大,为平衡二者,在地基仪器观测波段范围 $0.295\sim 3.000\ \mu\text{m}$ 选取 30 个代表波段进行地表太阳辐射计算。为评价波段选取对计算精度的影响,又选取 262 个波段计算各个波长的地表太阳辐射进行对比,结果如图 1 所示。由图 1 可见,

所选取的 30 个代表波段基本保留地表太阳辐射波谱特征,可代表地表太阳辐射波谱分布状况。经过计算,简化波段的积分值为密集点时的 99.0% 以上,因此由所选取的 30 个代表波段积分得到的地表太阳辐射可以达到计算精度要求。

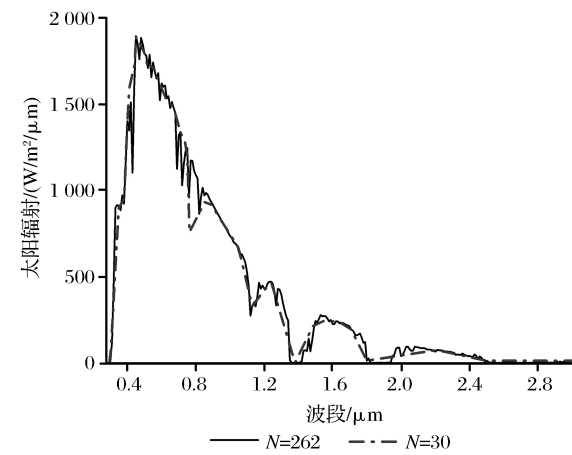


图 1 选取代表波段与密集波段地表太阳辐射对比
Fig.1 Comparison of surface solar irradiation calculated with representative band and dense band

3 结果与分析

根据 2015 年的 MODIS 资料,选取卫星与香河站空间匹配点的云和气溶胶微物理参数以及相关信息作为模式的输入参数。具体计算时将数据分为晴空(除污染严重的霾天)和有云两大类;对于晴空的判断依据是,在 MODIS 的气溶胶反演算法中,当云

检测结果为“晴空”,或者“可能晴空”时才进行气溶胶光学厚度的反演^[15-16]。针对 2015 年的数据选取了晴空时段 69 个,有云时段 65 个。

3.1 地表太阳辐射模拟分析

对于晴空条件下,根据香河所处位置和周边环境,将气溶胶类型设定为乡村类型,其中气溶胶主要组分由可溶性水分和灰尘两大类组成。模式中气溶胶的垂直分布是给出每种气溶胶粒子对应于每一次层(共 50 层,对应高度为 0~120 km)的含量,其垂直分布规律为:对流层气溶胶和煤烟气溶胶均匀分布在 3 km 以内的边界层内;海盐粒子在 4 km 高度内指数下降;沙尘气溶胶根据历史观测资料一般位于 4~8 km 的自由对流层内。考虑到季节变化对地表太阳辐射的影响,对于春秋采用美国标准大气模式,夏季采用中纬度夏季模式,冬季采用中纬度冬季模式进行模拟。当选定大气模式后,模式有设定的大气廓线,采用模式默认值。

空间上,根据香河站点的经纬度,将获取的 69 个晴空时段卫星几何位置信息,气溶胶光学厚度(AOD)信息等,输入 RSTAR 计算地表太阳辐射。为消除破碎云场对结果影响,对地基辐射观测数据作如下处理:选取对应卫星过境的精准时刻的地基辐射观测数据作 60 min 平均。最后,将 RSTAR 模拟的地表太阳辐射与之作对比分析。对模式输入所有的参数和模拟结果按 AOD 不同大小范围进行统计,结果如表 1 所示。

表 1 模式输入参数和模拟结果统计
Table 1 Statistical value of input parameters of model and modeled result

	太阳天顶角/°	AOD	模拟结果/(W/m ²)	地基观测结果/(W/m ²)	个数
0.00<AOD<0.15	16.82~61.36	0.055~0.148	371.48~1 016.07	415.03~981.01	26
0.15<AOD<0.30	17.71~56.62	0.152~0.297	415.57~1 011.45	431.14~977.07	20
0.30<AOD<0.50	17.90~57.75	0.304~0.459	491.65~981.52	515.98~974.49	23
总体	16.82~61.36	0.055~0.459	358.59~988.88	415.03~981.01	69

晴空条件下 RSTAR 模拟的地表太阳辐射值与地基观测辐射值对比情况,如图 2 所示;表 2 为模拟结果与地基观测辐射值的比较统计量。由图 2 和表 2 统计结果可见,除 3 个个例偏离比较明显外,模拟结果与地基观测辐射值具有较好的相关性, R^2 值为 0.95, RMSE 为 38.8 W/m²;从线性拟合来看,斜率(1.07)接近 1,截距为 42.5 W/m²,二者之间有较好的一致性。模拟值和地基观测辐射值二者平均绝对误差为 29.5 W/m²,平均相对误差为 4.22%。计算

值与观测值的相关性随着 AOD 增加而减小,这与预计一致。

图 3 为 3 个偏离个例在卫星过境 1 h 内,地面辐射值变化以及参考晴空情况的比较(以卫星过境时刻为 0 值),可见 3 个个例卫星过境时间(北京时间)分别为 2015 年 4 月 23 日 13:45、2015 年 8 月 26 日 13:15、2015 年 10 月 27 日 11:45,而以这 3 个时刻为中心,地面观测到的 1 h 内辐射值变化剧烈,有明显大幅度波动或是持续低值后突然出现高

值,表明有小块云的影响。作为对比,2015 年 9 月 13 日卫星过境时刻为完全晴空,地面辐射值变化较小。由于卫星云检测误差,无法识别破碎云块,导致按晴空进行计算,模拟值偏高。

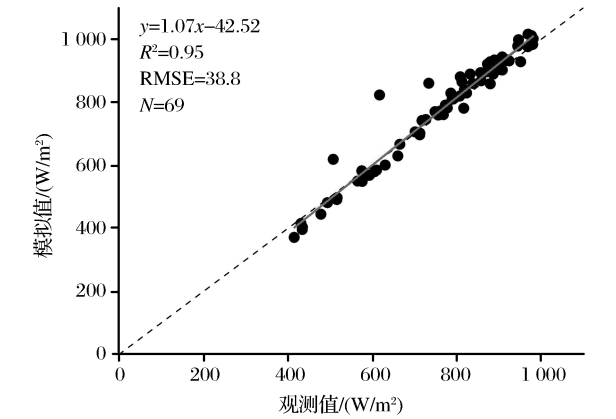


图 2 晴空条件下模拟与观测的比较

Fig.2 Comparison of simulated and observed surface solar radiation in clear skies

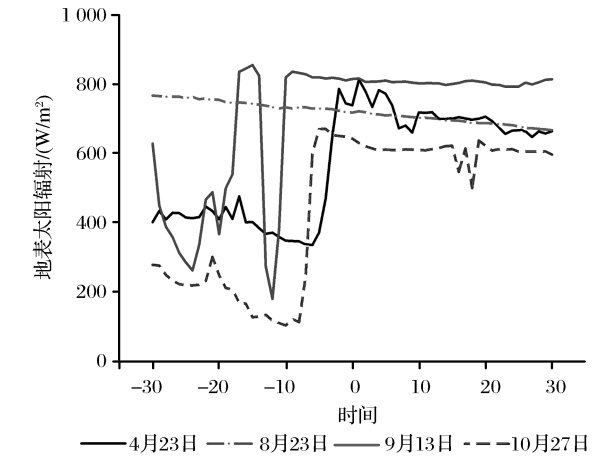


图 3 3 个破碎云与完全晴空时的地表太阳辐射测量值

Fig.3 Comparison of surface solar radiation in 3 broken cloudy days and 1 clear day

表 2 晴空条件下 RSTAR 模拟值与地基观测值对比

	R^2	相对误差/%	RMSE/(W/m ²)	个数
0.00<AOD<0.15	0.97	4.39	32.3	26
0.15<AOD<0.30	0.95	4.57	39.2	20
0.30<AOD<0.50	0.90	3.71	43.0	23
总体	0.95	4.22	38.8	69

对于有云情况,在 MODIS 和地基观测匹配时段,共有 65 组数据,依据 MOD/MYD06 产品的云相态数据集将云分为水云和冰云两大类。对不同相

态的云在模式中分别选取不同的类型;水云在模式中云滴设定为球形,而冰云设置为六棱柱形冰云。将卫星几何信息和云光学厚度和云有效粒子半径等信息输入 RSTAR 中,计算得到地表太阳辐射。将模拟结果与地基观测辐射值的对比,结果如图 4 所示。

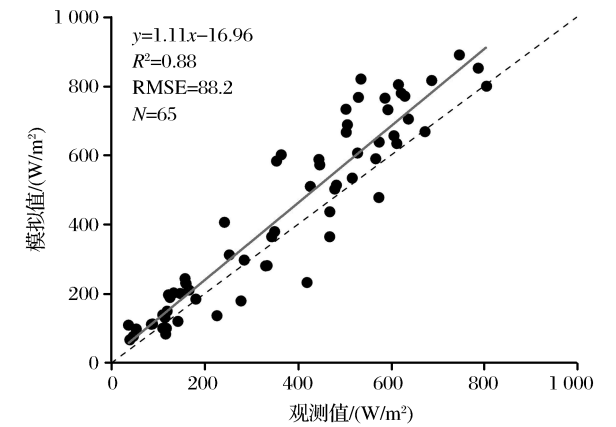


图 4 有云条件下模拟与观测的比较

Fig.4 Comparison of simulation and observation in cloudy skies

表 3 有云条件下 RSTAR 模拟值与地基观测值对比

Table 3 Comparison of simulated and observed surface solar radiation in cloudy skies

	R^2	相对误差/%	个数
COT>10	0.75	34.08	24
COT<10	0.75	24.18	41
总体	0.88	30.28	65

从图 4 中可见模拟值与地基辐射观测值二者相关性较好, R^2 值为 0.88, RMSE 为 88.2 W/m²。从线性拟合情况来看,斜率(1.11)接近 1,截距为 17.0 W/m²。总体平均绝对误差为 83.4 W/m²,相对误差为 30.28%。

晴空和有云条件下,由卫星资料计算的地表太阳辐射与地基观测值相比均存在一定误差。主要原因有:①时空匹配误差。MODIS 的空间分辨率是 1 km,像元结果反映的是像元区域范围内的平均水平。②MODIS 数据产品误差。在有细小云块和多种云层混合在像元中出现时,云检测算法误差较大^[11,12]。尽管为补偿云的时空可变性对卫星观测和地表实测数据的影响,对地基观测辐射数据做了 1 h 平均处理,但是细小云过境对地表太阳辐射的影响仍存在,不能完全剔除。③卫星与地基观测方式不一致。卫星是自上而下观测,而地基是自下而上观测。两者观测方式不一致,会导致结果出现偏

差。此外,模式中的一些大气与地表输入没有准确的探测数据,与实际情况也存在差别。

3.2 云覆盖下气溶胶对地表太阳辐射影响分析

有云条件下,尽管模拟值与地基观测值二者具有较好的相关性,但是相比于晴空来说,模式模拟值存在明显高估的趋势。利用 RSTAR 由卫星资料计算日本 Chiba 地区的地表太阳辐射,得到计算值与地基辐射观测值有较好的相关性^[7]。与日本 Chiba 地区相比,香河站点位于北京周边,受气溶胶污染较为严重。范学花等^[17]对 2001 至 2013 年对北京地区的 MODIS 气溶胶产品分析得出北京污染严重,气溶胶光学厚度较大(550 nm 波段处的年平均值可达 0.7 以上)。MODIS 卫星资料的反演中,目前无法同时反演云和气溶胶的光学和微物理参数,不能获取云覆盖下气溶胶的光学和微物理信息,具体计算时仅能按单一层的云参数计算地表太阳辐射。因此,模拟值偏高的趋势可能是没有考虑云下气溶胶对地表太阳辐射的影响

对于有云的情况,云的光学厚度和云有效粒子半径等云微物理参数的精确反演是地表太阳辐射模拟准确的前提。气溶胶一般存在于云下层,受地面扬尘和人类活动影响,近地层的浓度最大^[18-19]。图 5 模拟了有云条件下,气溶胶在不同太阳天顶角情况下对地表太阳辐射的影响;图 6 显示的是相对于无气溶胶的相对误差。选择无云以及云光学厚度为 8、16 和 32,云有效粒子半径为 16 μm 作为代表,模拟条件设定为上层为水云,下层为乡村型气溶胶。纵坐标表示到达地表的太阳辐射。相比于没有气溶胶的情况,云和气溶胶同时存在时,气溶胶会使得到达地表的太阳辐射减少。由图 5 可见,在云光学厚度较小、太阳天顶角较小的时候,云下存在气溶胶情况与单层云情况二者差值较大。这是由于在天顶角小的时候(接近天顶方向),到达地表的太阳辐射本身基数较大,因此云下气溶胶的影响大。由图 6 可见,相对误差对云和气溶胶的光学厚度敏感,尤其是薄云时,高气溶胶使得地表太阳辐射减少 15% 以上。

对于卫星观测到的同一像元的辐亮度值,包含气溶胶和云共同的信息。图 7 通过 RSTAR 模拟在太阳高度角一定时($TH_0=60^\circ$, $TH_1=150^\circ$, $FAI=0^\circ$),选取云光学厚度为 8、16 和 32,有效粒子半径为 16 μm 作为代表,卫星接收到的辐亮度值,利用查找表法,对应卫星观测到的同一辐亮度值,可能出现云

和气溶胶光学厚度组合的情况,计算每种组合情况下地表太阳辐射的具体数值,如表 5 所示。模拟结果表明,在卫星观测到的同一辐亮度值下,云和气溶胶光学厚度有多种不同的组合情况,而不同气溶胶光学厚度对地表太阳辐射影响差别很大。与无气溶胶,只考虑单一层云光学厚度的情况相比,在云覆盖下存在较薄气溶胶时,气溶胶光学厚度为 0.1,影响较小,相对误差约为 1.29%~1.56%,而随着气溶胶光学厚度增加,影响增大,在气溶胶光学厚度为 1.2,相对误差为 17.79%~18.38%。随着云层增厚,云光学厚度较大,到达地面的太阳辐射较小,气溶胶的影响减弱,二者差别也相应减少。

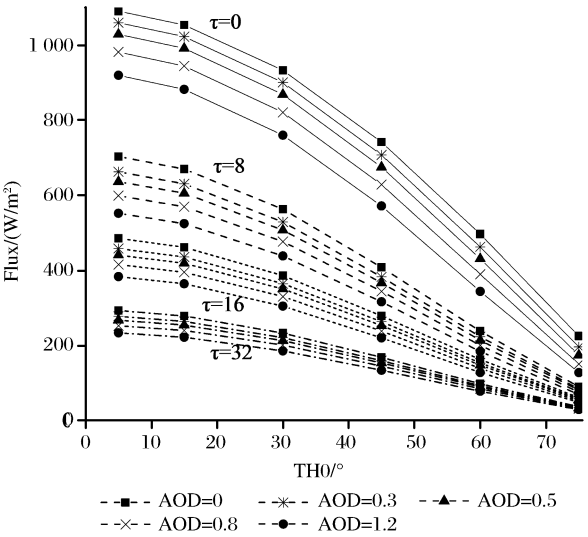


图 5 有云条件下 AOD 对地表太阳辐射的影响
Fig.5 Influence of AOD on surface solar radiation in cloudy skies

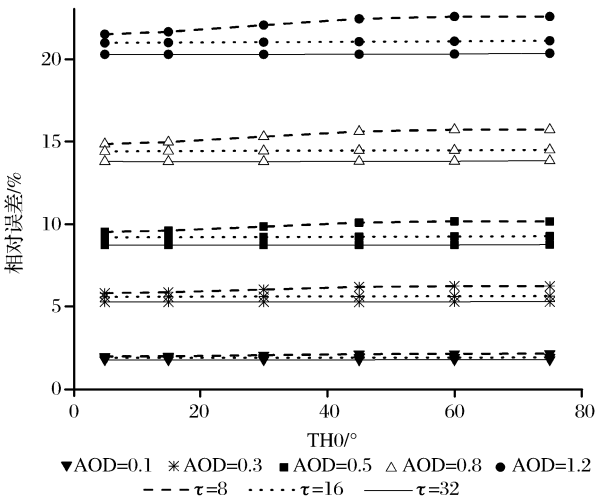


图 6 有云条件下 AOD 对地表太阳辐射的影响
Fig.6 Influence of AOD on surface solar radiation in cloudy skies

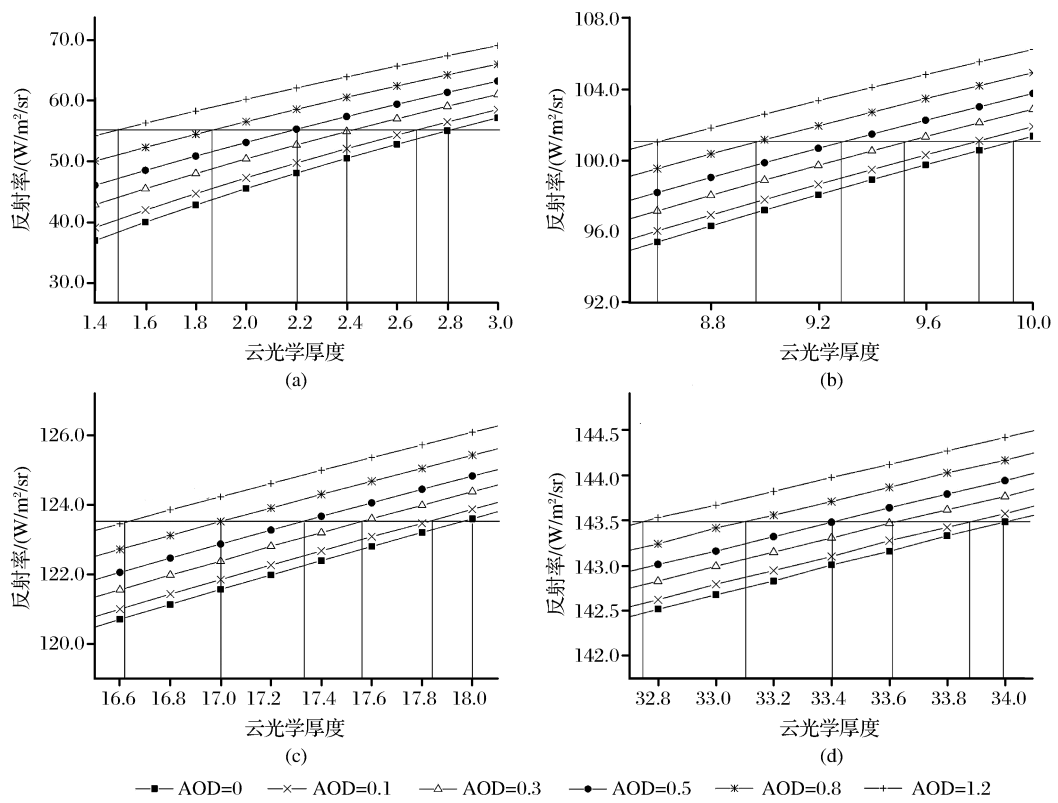


图 7 不同云和气溶胶组合时模拟计算的卫星辐亮度

Fig.7 Satellite radiance simulated with different combination of clouds and aerosol optical thickness

表 4 不同云和气溶胶光学厚度组合下地表太阳辐射

Table 4 Surface solar radiation simulated with different combination of clouds and aerosol opticaldepth

辐亮度值 /(W/m ² ·sr)	AOD	COT	地表太阳辐射 /(W/m ²)	差值 /(W/m ²)	相对误差 /%	辐亮度值 /(W/m ² ·sr)	AOD	COT	地表太阳辐射 /(W/m ²)	差值 /(W/m ²)	相对误差 /%
55.00	0	2.80	352.23			101.00	0	9.72	216.97		
	0.10	2.68	346.25	−5.98	−1.70		0.10	9.80	211.64	−5.33	−2.46
	0.30	2.40	336.31	−15.92	−4.52		0.30	9.52	205.99	−10.98	−5.06
	0.50	2.20	324.35	−27.88	−7.91		0.50	9.30	199.86	−17.11	−7.89
	0.80	1.86	308.86	−43.37	−12.31		0.80	8.98	191.14	−25.83	−11.90
	1.20	1.50	287.49	−64.74	−18.38		1.20	8.60	178.96	−38.01	−17.52
123.60	0	18.00	151.07			143.50	0	34.00	93.91		
	0.10	17.85	149.06	−2.01	−1.33		0.10	33.88	92.53	−1.38	−1.47
	0.30	17.55	145.08	−5.99	−3.96		0.30	33.60	89.84	−4.07	−4.33
	0.50	17.34	140.66	−10.41	−6.89		0.50	33.40	86.99	−6.92	−7.37
	0.80	17.00	134.29	−16.78	−11.11		0.80	33.11	82.75	−11.16	−11.88
	1.20	16.62	125.74	−25.33	−16.76		1.20	32.74	77.20	−16.71	−17.79

4 结 语

本研究利用 MODIS 卫星数据结果 RSTAR 模型模拟地表太阳辐射,将模拟结果与香河站地面辐射观测数据进行对比分析。此外,本文还借助 RSTAR 分析了有云条件下,气溶胶对地表太阳辐

射的影响。得出如下结论:

(1) 运用 MODIS 卫星气溶胶和云产品, RSTAR 模式计算的地表太阳辐射与香河站的观测结果进行相关性分析,发现在晴空条件下效果较好,相关系数平方 R^2 值为 0.95。有云情况下,计算结果较差于晴空,但 R^2 值可达 0.88。

(2)计算值与地基辐射观测值的误差分析表明,除模式自身误差外,卫星产品误差、卫星与地基观测方式不一致、时空匹配不一致是计算结果误差的重要来源;像元内破碎云对地面太阳辐射的影响也是误差的来源之一。

(3)卫星接收到的同一辐亮度值,用不同组合的云和气溶胶可反演出不同的光学和微物理参数,从而给地表太阳辐射估算带来不确定性。气溶胶粒子对太阳辐射有散射和吸收的作用,会削弱到达地表的太阳辐射。气溶胶还可以充当凝结核,从而改变云的光学性质、云量以及云的演化过程。分析表明,相对于单层云的反演结果,云下的气溶胶光学厚度为0.1时,由反演误差所导致的地表太阳辐射估算误差比较小,相对误差为1.29%~1.56%,而随着AOD增加,影响明显增大,在云下AOD为1.2时,相对误差为17.79%~18.38%。所以,对受气溶胶污染严重的华北地区,提高有云条件下地表太阳辐射的计算精度需要考虑其影响。

本文中对一些参数的设置,如地表反射率采用0.1的固定值,大气廓线参数等采用的是模式默认值,与实际情况存在差别。充分运用多种气象和卫星资料,获取模式输入需要参数,对进一步提高模拟结果精度,减小模拟结果的误差有重要作用。

此外,为进一步提高时间分辨率,可利用静止气象卫星资料更多时次的观测估算大范围的地表太阳辐射分布与变化,为太阳能的利用和气候变化研究和提供基础数据。

致谢:本文中使用的MODIS产品数据由美国航天局(NASA)戈达德空间飞行中心提供,地基太阳辐射观测数据由中国科学院大气物理研究所香河综合观测实验站提供,在此表示感谢!

参考文献(References):

- [1] Halthore R N, Schwartz S E, Michalsky J J, *et al.* Comparison of Model Estimated Measured Direct-Normal Solar Irradiance [J]. *Journal of Geophysical Research All Series*, 1997, 102: 29991-30002.
- [2] Chen Weiming, Bian Duo, Yu Fan. Measurement of Direct Solar Radiation and Scattering Radiation in Clear Sky by Satellite Data [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(4): 457-469. [陈渭民, 边多, 郁凡. 由卫星资料估算晴空大气太阳直接辐射和散射辐射 [J]. *气象学报*, 2000, 58(4): 457-469.]
- [3] Yu Yu, Xia Xiang'ao, Chen Hongbin, *et al.* Comparison of Solar Shortwave Radiation Observation and Pattern in Clear Sky [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2007, 28(3): 233-240. [余予, 夏祥鳌, 陈洪滨, 等. 晴空大气太阳短波辐射观测与模式比较 [J]. *太阳能学报*, 2007, 28(3): 233-240.]
- [4] Chen Hongbin. Abnormal Absorption of Solar Radiation by Clouds and Clouds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 1997, 21(6): 750-757. [陈洪滨. 关于云和云天大气对太阳辐射的吸收异常 [J]. *大气科学*, 1997, 21(6): 750-757.]
- [5] Hu Liqin, Liu Changsheng. Effects of Clouds and Aerosols on Atmospheric Absorption of Solar Radiation [J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(3): 264-270. [胡丽琴, 刘长盛. 云层与气溶胶对大气吸收太阳辐射的影响 [J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 264-270.]
- [6] Wei Heli, Xu Qingshan, Zhang Tianshu. GMS-5 Meteorological Satellite for Remote Sensing of Total Solar Radiation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 465-471. [魏合理, 徐青山, 张天舒. 用 GMS-5 气象卫星遥测地面太阳总辐射 [J]. *遥感学报*, 2003, 7(6): 465-471.]
- [7] Takenaka H, Nakajima T Y, Higurashi A, *et al.* Estimation of Solar Radiation Using a Neural Network based on Radiative Transfer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 (D8).
- [8] Quan Weijun, Chen Hongbin, Guo Liwen, *et al.* Comparison of Two Parameterized Models of Net Solar Radiation Inversion in Beijing [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, (4): 623-630. [权维俊, 陈洪滨, 郭利文, 等. 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 [J]. *气象学报*, 2009, (4): 623-630.]
- [9] Zhang Wenxing, Lü Daren, Wang Pucai. Observation and analysis of atmospheric aerosol optics in Beijing area [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 22(6): 495-500. [章文星, 吕达仁, 王普才. 北京地区大气气溶胶光学后的观测和分析 [J]. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 495-500.]
- [10] Lin C G, Yang K, Huang J P, *et al.* Impacts of Wind Stilling on Solar Radiation Variability in China [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5. doi:10.1038/srep 15135.
- [11] Hutchison K D, Hauss B, Iisager B D, *et al.* Differentiating between Clouds and Heavy Aerosols in Sun-glint Regions [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(6): 1085-1094.
- [12] Shang H Z, Chen L F, Tao J H, *et al.* Synergetic Use of MODIS Cloud Parameters for Distinguishing High Aerosol Loadings from Clouds Over the North China Plain [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(12): 4879-4886.
- [13] Nakajima T, Tanaka M. Matrix Formulations for the Transfer of Solar Radiation in a Plane-parallel Scattering Atmosphere [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1986, 35(1): 13-21.
- [14] Nakajima T, Tanaka M. Algorithms for Radiative Intensity Calculations in Moderately Thick Atmospheres Using a Truncation Approximation [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1988, 40(1): 51-69.
- [15] Frey R A, Ackerman S A, Liu Y, *et al.* Cloud Detection with MODIS. Part I: Improvements in the MODIS Cloud Mask for Collection 5 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Tech-*

nology,2008,25(7):1057-1072.

[16] Ackerman S,Holz R,Frey R,*et al.*Cloud Detection with MODIS.Part II:Validation[J].Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,2008,25(7):1073-1086.

[17] Fan X H,Xia X G,Chen H B.Comparison of Column-Integrated Aerosol Optical and Physical Properties in an Urban and Suburban Site on the North China Plain[J].Advances in Atmospheric Sciences,2015,32(4):477-486

[18] Shi Guangyu,Xu Li,Guo Jiandong.High-altitude Balloon Detection of Vertical Distribution of Atmospheric Ozone and Aerosol[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,1996,20(4):401-407.[石广玉,许黎,郭建东.大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测[J].大气科学,1996,20(4):401-407.]

[19] Sun Qiang,Fan Xuehua,Xia Xiang,ao.Observation and Analysis of Vertical Distribution of Aerosol in North China[J].Meteorology and Environmental Sciences,2016,39(1):26-33.[孙强,范学花,夏祥鳌.华北地区气溶胶垂直分布特征的观测与分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):26-33.]

Estimation of Surface Solar Radiation Using MODIS
Satellite Data and RSTAR Model

Li Weiwei^{1,3},Husi Letu²,Chen Hongbin¹,Shang Huazhe²

(1.Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation,Institute of Atmospheric Physics,Chinese Academy of Sciences,Beijing 100029,China;

2.State Key Laboratory of Remote Sensing Science,Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences,Beijing 100101,China;

3.University of Academy of Sciences,Beijing 100049,China)

Abstract: The MODIS aerosol product and cloud product data are combined with the atmospheric radiation transmission model RSTAR to calculate the surface solar radiation under sunny and cloudy conditions.The results are compared with the ground observed values of Xianghe integrated radiation station.It shows that the simulated value and observed value have good correlation.The R^2 and RMSE are 0.95 and 38.8 W/m² in the clear skies,while 0.88 and 88.2 W/m² in the cloudy skies.The results show that more cloud-aerosol mixed states is in Xianghe station,while MODIS can only invert single microphysical parameter of cloud layer,which leads to error of model input parameter,bringing error to the calculation result of surface solar radiation.In order to quantitatively analyze the effect,the RSTAR radiation model was used to calculate the radiance values,and invert f different cloud and aerosol optical thickness,calculating surface solar radiation.The results show that the error of estimation of surface solar radiation is 1.29%~1.56% when the aerosol optical thickness (AOD)is 0.1,compared with the single layer.With the increase of AOD,the effect of AOD increased obviously.The relative error was 17.79%~18.38% when AOD was 1.2.For the heavily polluted areas of North China,it is important to analyze the influence of aerosol on the surface solar radiation under cloud cover,which is very important to improve the calculation accuracy of surface solar radiation under cloud conditions.

Key words: Surface solar radiation;MODIS;RSTAR;Cloud sky;Aerosol