

文章编号: 1000-0534(2008)06-1410-06

# 基于 MODTRAN 模式与卫星资料的 晴空净太阳辐射模拟

刘勇洪<sup>1</sup>, 权维俊<sup>1</sup>, 夏祥鳌<sup>2</sup>, 郭文利<sup>1</sup>

(1. 北京市气象局 北京市气候中心, 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)

**摘要:** 探讨了中分辨率大气辐射传输模式 MODTRAN4.0 与卫星资料同化在模拟净太阳辐射中的应用, 并利用 CERES 卫星资料作为 MODTRAN 模式输入参数, 对 2005 年北京上甸子进行了晴空下的地表净太阳辐射模拟与比较。结果表明: 利用 MODTRAN4.0 模式和 CERES 卫星资料可以较为精确地模拟晴空天气下的净太阳辐射, 平均绝对误差为  $25.74 \text{ W/m}^2$ , 平均相对误差为  $4.98\%$ 。此外, 对净太阳辐射的影响因子的研究表明: 太阳天顶角、反照率、水汽含量、大气光学厚度与臭氧浓度等因子与净太阳辐射均呈负相关关系, 且太阳天顶角与反照率影响较大, 其余因子影响较小。

**关键词:** MODTRAN; CERES; 晴空; 净太阳辐射

**中图分类号:** P422.1 **文献标识码:** A

## 1 引言

地表净太阳辐射是驱动地表光合作用、蒸散发的能量, 是气候和水文模式所必需的物理参数。目前, 我国的地面辐射测站有 70 多个, 其中大多数测站的观测项目少, 还存在着辐射资料精度较差、时空分布不均, 远不能满足各领域应用的需要。对此近 10 年来, 充分利用卫星资料来估算太阳辐射是获取空间连续分布的重要途径。陈渭民等<sup>[1]</sup>利用探空资料所计算的太阳辐射值, 建立了 TOVS 卫星测值与大气中各高度层的太阳直接辐射和散射辐射的计算模式。傅炳珊等<sup>[2]</sup>利用 TOVS 观测资料计算了晴空和云天情况下的直接辐射和散射辐射, 与用探空大气资料计算的模式值作了比对, 发现晴空下两者基本一致。傅炳珊等<sup>[3]</sup>则充分利用了气象台站大气廓线的观测数据, 用 MODTRAN 3 计算了晴空下太阳直接辐射和散射辐射, 并与地面观测做了比较, 但由于缺乏气溶胶及水汽含量等观测数据以及地面验证数据不准确等, 计算结果仍存在较大误差。权威俊<sup>[4]</sup>则基于 CERES 卫星资料, 用三种模式来反演地表净太阳辐射并相互作了比较, 提出

利用不同模式在不同天气下反演地表净太阳辐射的可行性, 但由于缺乏准确的验证资料, 没能进行反演精度评估。余予等<sup>[5]</sup>利用太阳光度计观测等获取的大气实况资料, 应用 3 个辐射传输模式(含 MODTRAN 模式)模拟计算直接和散射辐射, 模拟与观测的平均偏差仅为  $3\% \sim 5\%$ , 表明只要有准确的一些重要大气参数(如气溶胶、水汽、臭氧等地面)观测资料, 利用 MODTRAN 模式就能较为准确地模拟太阳辐射。但实际上现有的观测台站很难获取这些大气观测资料, 而通过卫星观测手段来获取相关大气资料已成为近 10 年来的一条重要途径, 卫星资料在不同模式中的同化已成为提高模拟精度的重要研究方向<sup>[6-7]</sup>。本文在探讨 MODTRAN4.0 辐射传输模式特性的基础上, 利用主要来自于 CERES 卫星上的资料作为模式输入参数, 模拟及计算北京上甸子晴空下的地表净太阳辐射, 并与实际观测进行比较, 目的是探讨卫星资料在 MODTRAN 模式计算太阳辐射中的同化应用。在模式模拟精度确保的情况下, 模拟结果可以弥补我国晴空条件下辐射站稀少及太阳辐射资料时空分布的不足。

收稿日期: 2008-02-13; 改回日期: 2008-05-21

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8052010)资助

作者简介: 刘勇洪(1974—), 男, 四川广安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事卫星遥感应用与农业气象等的研究

E-mail: lyh7414@163.com

## 2 观测资料与预处理

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 数据, 该数据是由 TERRA 或 AQUA 卫星上的 CERES 探测器观测的, 是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、晴空区域统计、有云区域统计、宽波段反照率、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 记录组成的。本文选用的资料时段为 2005 年 1, 4, 7 和 10 月。

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 min 一次的地面向上、向下太阳总辐射数据, 为保证该观测数据的精确性和可靠性, 权维俊等<sup>[8]</sup> 对该数据集进行了订正处理与质量控制, 挑选出严格符合质量检验的观测数据记录, 为验证模式计算结果提供质量可靠的验证数据。

## 3 MODTRAN 模式计算过程

MODTRAN (Moderate Resolution Transmission, 中分辨率大气透过率计算程序) 模式是近 30 年发展起来的一种国际公认的大气辐射传输模式与算法<sup>[9-12]</sup>, 起源于 LOWTRAN (Low Resolution Transmission, 低分辨率大气辐射传输模式)。它不但把光谱分辨率从 LOWTRAN 的  $20 \text{ cm}^{-1}$  提高到  $2 \text{ cm}^{-1}$ , 而且还包括了多次散射辐射传输精确算法——离散纵坐标法 (DISORT, Discrete Ordinate Method), 在处理散射辐射上相比 LOWTRAN 的二流近似算法有更高的精度和灵活性, 该模式中还充分考虑了二氧化碳、水汽、臭氧等微量和痕量气体与气溶胶的吸收和散射, 模式自身提供了多种模式大气、模式气溶胶痕量气体参数。因此, 该模式具有计算方案设计灵活、计算精度高和输出结果丰富等优点, 但也因此而使该模式非常复杂, 输入参数繁琐众多, 参数设置和选择就显得非常重要。但是由于许多重要参数在常规观测台站难以获取, 通过对实时观测卫星资料的同化应用就成为 MODTRAN 模式高精度模拟的一条重要途径。

### 3.1 大气模式

MODTRAN4.0 提供了 8 种模式大气以供选择: 水平大气输入参数、热带大气、中纬度夏和冬季大气、极地夏和冬季大气、美国标准大气以及用

户定义的大气廓线观测数据模式等。计算时需要考虑的主要大气成分有: 水汽、臭氧、甲烷、氮化物、二氧化碳的剖面资料、计算模式等。由于实时观测的大气廓线数据难以获取, 在这里根据季节采用 MODTRAN4.0 自带的大气模式: 即 1 月和 10 月选用中纬度冬季大气模式, 4 月和 7 月选用中纬度夏季大气模式。

### 3.2 地表反照率

地表反照率对地表向上辐射有直接影响, 并且主要受太阳高度角和下垫面状况影响。在早晚太阳高度角较小时, 变化较明显, 当太阳高度角上升到一定程度以后, 反照率变化不明显<sup>[13]</sup>。MODTRAN4.0 提供了新雪、森林、农田、沙漠、海洋、云盖、干草地、湿草地、枫叶地、烧过草地等 10 种地物类型的默认反照率值。由于没有地表反照率直接观测值, 在这里可从 CERES/SSF 数据中“宽波段反照率”产品获取, 该产品实际上根据 MODIS 土地覆盖分类产品 MOD12Q 得到的地物类型, 然后根据“地物类型—反照率”查找表(网址: [http://tanalol.larc.nasa.gov:8080/surf\\_htmls/SARB\\_surf.html](http://tanalol.larc.nasa.gov:8080/surf_htmls/SARB_surf.html))来确定反照率。由于上甸子观测场下垫面类型固定, 地表反照率变化较小, 卫星观测产品“宽波段反照率”均为 0.16。而且该产品获取时间大致在 10:00~14:10 之间, 太阳高度角较高, 可不考虑其对反照率的影响, 因此在本文 MODTRAN4.0 模式中均取固定值 0.16。

### 3.3 计算散射方法及半高全宽度(FWHM)设置

MODTRAN4.0 提供了普通的 Isaac 二流近似法和精确算法——DISORT (离散坐标法)<sup>[9]</sup>, 由于净太阳辐射模拟涉及散射辐射, 在这里采用 DISORT4 流法来模拟散射辐射, 更为精确的 8 流和 16 流算法在本文中的计算结果与 4 流计算结果相差微弱, 为减少计算时间, 采用 4 流计算方式。另外, 在这里不考虑太阳多次散射视场内的方位角影响。设置三角扫描函数的 FWHM (Full Width at Half Maximum) 为  $5 \text{ cm}^{-1}$ , 用于大气顶太阳辐照度的平滑。

### 3.4 水汽、二氧化碳和臭氧参数

水汽、二氧化碳和臭氧是大气辐射中最为重要的几种吸收气体, 其含量分布直接影响着到达地面的辐射值。MODTRAN4.0 根据选择的大气模式提供了相应的水汽、二氧化碳和臭氧的默认设置, 但默认值与实际相差甚大, 而常规气象台站没有水汽、二氧化碳和臭氧的直接观测值, 现有的卫星资

料则可以在很大程度上弥补此不足。水汽可从实时的 CERES/SSF 数据集上的“MODIS 大气可降水量”产品中获取,该参数是地表到大气顶(TOA)的水汽含量。单位为  $\text{gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由于二氧化碳浓度呈逐年升高趋势,在这里没有采用默认的  $330 \times 10^{-6}$  值,统一规定二氧化碳浓度参数值为  $370 \times 10^{-6}$ 。上甸子没有总的垂直臭氧柱含量观测,因此在这里选用从美国探测臭氧的一颗卫星 Aura 上的传感器——OMI (Ozone Monitoring Instrument) 上获取(网址: [http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone\\_overhead\\_v8.html](http://jwocky.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead_v8.html))。根据输入的地理位置(经度、纬度)和具体日期,就可查询上甸子具体日期的臭氧含量,查询值的单位是 Dobson, 转换成 MODTRAN 模式所需单位( $\text{gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ )需乘以转换系数 0.001。

### 3.5 气溶胶模式与地面气象视距

当大气中的气溶胶含量达到一定的程度时,它对辐射传输的影响很大。MODTRAN 模式考虑到这一点,在输入气溶胶参数时将气溶胶分为对流层和平流层气溶胶,同时考虑季节变化的影响,对不同模式运用不同模型进行修正。如果选择中纬度冬季、极地冬季模式大气,就用秋冬季模型进行修正;选择热带、中纬度夏季、极地夏季和美国标准模式大气以及用户输入气溶胶参数,则采用春夏模型修正,同时考虑风速对气溶胶的影响。另外,还考虑降雨量及海拔高度的影响。对流层有 9 种模式气溶胶可选取,平流层有 8 种模式气溶胶可供选择。当然用户还可以自定义自己的气溶胶参数模式。由于上甸子没有直接观测的气溶胶参数(如散射系数、吸收系数、不对称因子等),且地处山区农村,因此在这选用 MODTRAN 定义的“乡村消光系数,缺省气象视距=23 km”气溶胶模式,并根据季节的不同,选用秋冬季模型或春夏季模型进行修正。

在没有可观测得到气溶胶参数情况下,地面气象视距是描述气溶胶浓度水平特性的最重要参数,在 MODTRAN 中主要用来计算消光系数。尽管水平气象视距,可以从气象台站获得的能见度估算<sup>[14]</sup>(约 1.0 倍~1.6 倍水平能见度),但是由于能见度观测的人为主观性,观测误差很大,因此以能见度或者由能见度推算而来的水平气象视距与实际存在较大误差,在这里引用何立明等<sup>[14]</sup>在 MODTRAN 模拟中提出的气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式:

$$V = 1/(a \cdot \tau_{500}) - b/a, \quad (1)$$

其中  $\tau_{500}$  是 550 nm 处的气溶胶光学厚度,  $V$  是水平气象视距,  $a$  和  $b$  是转换系数,在不同季节(春夏、秋冬)和不同气溶胶类型(乡村、城市)取值有所不同,具体取值见文献[11]。

$\tau_{500}$  可以从 CERES/SSF 数据集上“550 nm 气溶胶光学厚度”产品中获取,该产品实际上是从 MODIS 仪器中 MOD04\_L2 气溶胶产品(TERRA 上午星)或 MYD04\_L2 气溶胶产品(AQUA 下午星)中获得,因为 CERES 探测器与 MODIS 探测器同在一颗卫星上,观测数据具有良好的同步性。从该产品中根据地理位置获取上甸子站的  $\tau_{500}$  值后,然后根据(1)式就可得到 MODTRAN 模式中所需的水平气象视距。

### 3.6 几何信息与光谱信息

在进行辐射传输模式计算时,要考虑辐射流方向上的单次或多次散射,因此几何路径的选取也是很重要的。根据不同要求,可选择水平路径、两高度间的倾斜路径和射线倾斜路径以及路径长度和路径倾斜度等。同时要求用户给出所求位置的地理经纬度、海拔高度等。对太阳天顶角、方位角、地球半径和所求波谱段范围的选取也要考虑,散射过程还有单次散射和多次散射可供选择。由于 MODTRAN 模式在短波波谱上分辨率较高,而短波区有几十万条吸收谱线,因此计算结果随波数起伏较大,需要进行平滑以作分析。

在这里,大气路径选择“向空间垂直或倾斜”,执行模式为“计算包括太阳或月亮的单次散射的辐射率”,并选用“有多次散射”的散射方式进行模拟计算。采用相对太阳方位角和天顶角来定义几何光学路径,其中天顶角可由观测时的具体时间和经纬度求得,相对太阳方位角定义为零(由于不考虑太阳多次散射视场内的方位角影响,因此该值的变化对结果没有影响),路径方位角和不对称因子均采用默认设置。由于模拟的是太阳净太阳辐射,因此波谱范围主要选择太阳辐射波段  $0.29 \sim 4.0 \mu\text{m}$ (波数段为  $3333 \sim 34483 \text{ cm}^{-1}$ ),采用  $5 \text{ cm}^{-1}$  的步长,采用默认的三角函数进行平滑滤波,滤波半高全宽度采用  $5 \text{ cm}^{-1}$ 。

## 4 结果与分析

本文根据前面选择的地面辐射验证数据和 TERRA、AQUA 卫星过境时的 CERES 卫星资料,选取了 2005 年 4 个月份(1, 4, 7 和 10 月)的 35 个

表 1 MODTRAN 输入参数及模拟结果统计

Table 1 Statistical values of input parameters of MODTRAN and modeled result

月份	太阳天顶角 / $^{\circ}$	550 nm 光学厚度	水汽含量 / $\text{gm} \cdot \text{cm}^{-2}$	臭氧浓度 / $\text{gm} \cdot \text{cm}^{-2}$	模拟结果 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	绝对误差 / $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	相对误差 / $\%$
1	60.66~67.35	0.01~0.45	0.14~0.36	0.351~0.429	287.86~418.27	4.84~34.95	1.3~9.3
4	26.78~41.05	0.03~0.82	0.12~1.62	0.343~0.405	547.77~793.73	2.50~91.55	0.3~14.6
7	28.53~30.57	0.04~0.10	2.25~2.35	0.307~0.338	287.86~793.73	9.24~15.59	1.2~2.2
10	46.99~56.91	0.02~0.48	0.47~1.21	0.271~0.316	386.58~558.64	5.96~45.23	1.6~9.0
总体	26.78~67.35	0.01~0.82	0.12~2.35	0.271~0.429	287.86~793.73	2.50~91.55	0.3~14.6
			平均			25.74	4.98

晴空时段, 对于晴空的判断是依据 CERES/SSF 数据集的“晴空区域统计”产品(该产品来源于 MOD04 产品中的云量观测: cloud fraction land, 晴空条件下该值为零)。

#### 4.1 净太阳辐射模拟分析

对 35 个晴空时段下 MODTRAN4.0 净太阳辐射模拟的一些输入参数及结果按照 1, 4, 7 和 10 月 4 个月份样本及总体样本分别进行了统计(表 1)。其中绝对误差在这里定义为模拟值与验证值的误差的绝对值, 相对误差定义为模拟值与验证值的误差百分比的绝对值。

考虑到总体样本较少, 分散到 4 个月的样本更为稀少, 在这里不对这 4 个月的统计结果进行比较分析, 只对总体样本统计结果进行分析。

从表 1 可知, 所选 4 个月 35 个模拟时段太阳天顶角范围为  $26.78^{\circ} \sim 67.35^{\circ}$ , 大气光学厚度范围为  $0.01 \sim 0.82$ , 水汽含量从  $0.12 \sim 2.35 \text{ gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 臭氧浓度为  $0.271 \sim 0.429 \text{ gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 几乎涵盖了各种晴空大气模式, MODTRAN4.0 的模拟结果为  $287.86 \sim 793.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 绝对误差在  $2.50 \sim 91.55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  之间, 相对误差为  $0.3\% \sim 14.6\%$ , 平均绝对误差为  $25.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均相对误差为  $4.98\%$ 。分析存在误差的原因: (1) 时空匹配误差, 尽管上甸子观测是每分钟记录一次, 但仍然与卫星瞬时视场(FOV)的观测时间存在一定的时间匹配误差; 另一个原因是 FOV 与地面辐射台站之间存在一定的空间位置匹配误差, 这种由时空匹配误差引起的观测值与计算值之间的误差是客观存在的; (2) 卫星数据产品误差: 卫星上观测反演得到的水汽含量浓度、气溶胶光学厚度及反照率都与实际存在一定误差。如毛节泰等<sup>[15]</sup>的研究表明, 北京地区的 MODIS 光学厚度产品可能被低估。刘圣伟等<sup>[16]</sup>的研究表明, 北京地区的 MODIS 的

“大气可降水量”高估了实际水汽含量; 而反照率是根据地物类型和查找表确定的, 没有考虑下垫面状况随季节变化及太阳高度角影响, 因此也存在着误差; (3) 晴空时段的判断误差: CERES/SSF 数据集的“晴空区域统计”产品来源于  $1 \text{ km}$  分辨率的 MOD04 产品, 在如此大的空间范围内当天空中出现破碎的积云时(小至 MODIS 不能监测到), 辐射误差会明显增大, 因此很可能出现  $10\%$  以上的误差个例, 而在文献[5]中对晴空的判断来源于 TSI 的精确实时观测(Total Sky Image, 型号: 440, 每  $1 \text{ min}$  获取一幅全天空图像); (4) MODTRAN4.0 模式本身的计算误差, MODTRAN 是适用于低空大气红外辐射传输的算法<sup>[8]</sup>, 由于没有考虑非局地热力平衡, 不适用于  $60 \text{ km}$  以上高空大气, 而且模式中的许多参数也采用默认值并非实际情况, 其算法也有一定模拟误差。

图 1 给出了 MODTRAN 所模拟的净太阳辐射值和观测值的拟合情况。由图可以看出, MODT-

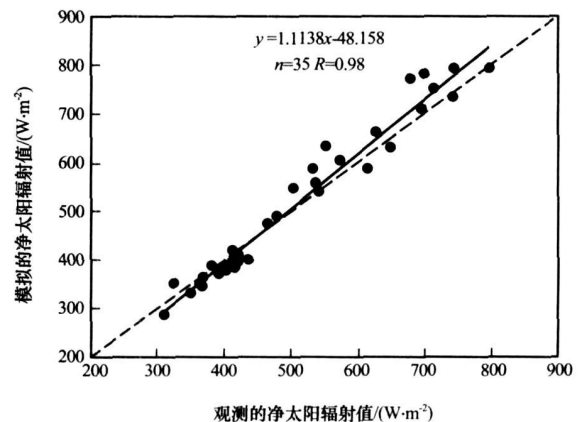


图 1 净太阳辐射模拟值(MODTRAN)与观测值拟合  
Fig. 1 Fitting of modeled net solar radiation (MODTRAN) and measured values

RAN 模式的拟合直线斜率为 1.1138, 相关系数达到 0.98, 均接近 1.0, MODTRAN 模式的拟合效果较好。这表明, 在缺少地面观测的大气参数时, 可以利用同步卫星观测获的数据进行模式同化, MODTRAN 对净太阳辐射的模拟仍能达到较好的效果。

#### 4.2 净太阳辐射的影响因子分析

MODTRAN 模式模拟净太阳辐射包含了几个重要输入因子: 太阳天顶角、反照率、水汽含量、大气光学厚度(与水平气象视距对应)与臭氧浓度。为此, 选择了 4 月 13 日的晴空时段(太阳天顶角 = 41.15, 反照率 = 0.16, 水汽含量 = 0.44, 光学厚度 = 0.14, 臭氧浓度 = 0.379, 模拟误差为 5.17%) 来作为标准输入参数, 在固定其它输入参数时, 分别只修改太阳天顶角、反照率、水汽含量与大气光学厚度中的一个参数, 其中修改步长分别为太阳天顶角  $2^\circ$ 、反照率 0.01、水汽含量  $0.04 \text{ gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、光学厚度 0.01, 臭氧浓度  $0.02 \text{ gm} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 每个参数按上下各 5 个步长来进行模拟计算, 以反映该参数的变动对模拟结果的影响。为了分析上述参数对净太阳辐射的影响程度, 对前面模拟时的输入参数进行标准化, 即标准化后的值 = 参数值 / 标准值, 并以标准化后的值为横坐标, 对应模拟的净太阳辐射为纵坐标, 进行线性拟合, 根据斜率绝对值的大小可以反映出不同参数的影响程度。

各参数不同步长取值下模拟的结果如图 2 所示。从图 2 可看出, 随着太阳天顶角、反照率、水汽含量、光学厚度与臭氧浓度的增加, 净太阳辐射均呈减少趋势, 净太阳辐射与这 5 种因子均呈负相关关系。从拟合的直线斜率绝对值来看, 太阳天顶角最大, 其次为反照率、水汽含量、光学厚度与臭氧浓度, 按每个因子值增加 10%, 太阳天顶角、反照率、水汽含量、光学厚度与臭氧浓度各自减少的净太阳辐射分别为 48.5, 11.3, 2.3, 1.7 和 1.1  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这些分析表明, 在晴空天气条件下, 太阳天顶角对净太阳辐射影响最大, 这与文献[17]的研究结果一致; 其次为反照率, 对净太阳辐射影响也较大, 而水汽含量、光学厚度及臭氧浓度对净太阳辐射的影响较小。在实际应用时, 太阳天顶角可以通过太阳所在位置的精确计算得到, 其误差影响可忽略不计, 而大范围空间分布区域上的反照率、水汽含量、光学厚度及臭氧浓度需要通过卫星观测数据计算或反演得到, 因此卫星数据产品计算或反演的精度在很大程度上决定着模式模拟的精度。

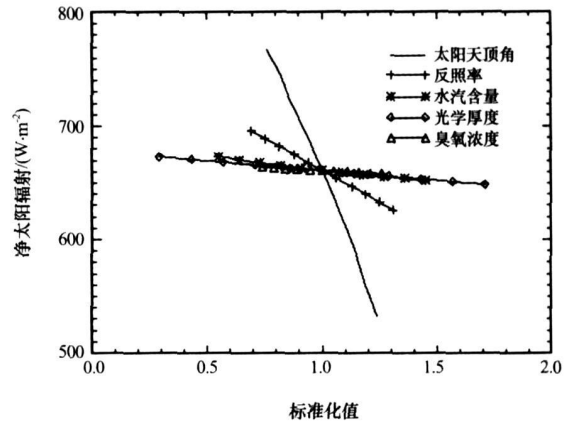


图 2 不同参数变化的净太阳辐射变化

Fig. 2 Change of net solar radiation for various parameters

## 5 结论与讨论

通过 CERES 卫星资料在 MODTRAN4.0 模式中的同化来模拟净太阳辐射并将结果与上甸子地面辐射观测数据进行对比分析, 得出如下结论:

(1) 应用 MODTRAN 模式, 充分利用卫星资料获取的较少的实时观测数据, 可以较为精确地模拟晴空天气下的净太阳辐射, 平均绝对误差为  $25.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均相对误差为 4.98%, 这为利用卫星资料来获取广大无辐射资料地区晴空天气下的辐射状况提供了捷径。

(2) 误差分析表明, 除了 MODTRAN 模式自身有一定误差, 其余误差则主要是由卫星资料的观测或反演误差带来的, 并且在 MODTRAN 模式中的采用默认值的许多重要参数如大气廓线也可以利用卫星资料获取得到。表明一方面要充分利用各种卫星资料提供的大气、地表参数进行同化来提高模式精度, 另一方面提高卫星资料的精度(包括时间分辨率、空间分辨率和相关参数)也是提高模式精度的重要途径。如现有的卫星资料(例如 MODIS)可以获取更为准确的双向反射分布函数(BRDF)反照率产品, 而且空间分辨率(1 km)也较 CERES 卫星(10 km)有明显提高。

(3) 在晴空下, 太阳天顶角、反照率、水汽含量、大气光学厚度、臭氧浓度与净太阳辐射均呈负相关关系, 且太阳天顶角对净太阳辐射影响最大, 反照率影响也较大, 水汽含量、光学厚度与臭氧浓度对净太阳辐射的影响较小。

在本文中只讨论了这几个较为重要的因子, 但影响净太阳辐射的因子很多, 如温度、气压、风速、

云参数等等, 如何准确地利用这些参数来模拟计算太阳辐射需要进一步研究。

致谢: 本文中使用的 SSF 数据由美国 NASA Langely 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。

## 参考文献

- [1] 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
- [2] 傅炳珊, 陈渭民, 张凤英. 利用 TOVS 资料计算我国东南地区的太阳直接辐射和散射辐射[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 807-815
- [3] 傅炳珊, 陈渭民, 马丽. 利用 MODTRAN 3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(1): 51-58
- [4] 权维俊. 中国大陆地区地表净太阳辐射的卫星遥感研究[D]. 南京信息工程大学硕士论文, 2003
- [5] 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): 234-240
- [6] 黄彦彬, 雷恒池, 郭学良, 等. 卫星导风资料对 REM 中尺度数值模拟的改进研究[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 574-582
- [7] 胡文东, 沈桐立, 丁建军, 等. 卫星资料的非线性反演同化与一次强降水预报试验[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 249-258
- [8] 权维俊, 陈洪滨, 高燕虎, 等. 上甸子大气本底站太阳辐射观测数据的质量评价[J]. 高原气象(待发表)
- [9] 吴北婴等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 52-65
- [10] 董言治, 周晓东. 大气红外辐射模型与实用算法的研究进展[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 412-416
- [11] 毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中透过率计算[J]. 测绘与空间地理信息, 2004, 27(4): 1-3
- [12] 文军, 王介民. 绿洲边缘内外大气中水汽影响辐射传输分析[J]. 干旱区地理, 1998, 21(2): 21-28
- [13] 李英, 胡泽勇. 藏北高原地表反照率的初步研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1034-1041
- [14] 何立明, 王华, 阎广建, 等. 气溶胶光学厚度与水平气象视距相互转换的经验公式及其应用[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 372-378
- [15] 毛节泰, 李成才, 张军华, 等. 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[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 127-135
- [16] 刘圣伟, 张朝林, 郭小方, 等. MODIS 水汽反演用于 InSAR 大气校正的理论研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 367-372
- [17] 王开存, 周秀骥, 刘晶森. 复杂地形对计算地表太阳短波辐射的影响[J]. 大气科学, 2004, 28(4): 625-633

## Net Surface Solar Radiation in the Clear Sky Based on MODTRAN Model and Satellite Data

LIU Yong-hong<sup>1</sup>, QUAN Wei-jun<sup>1</sup>, XIA Xiang-ao<sup>2</sup>, GUO Wen-li<sup>1</sup>

(1. Beijing Climate Center, Beijing Meteorology Bureau, Beijing 100089, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The combination application of Moderate Resolution Transmission MODTRAN model and satellite data in computing net surface solar radiation is discussed. CERES satellite data are used as input parameters of MODTRAN for simulating net surface solar radiation in the clear sky at Shangdianzi background station in 2005. The results show that the combination of MODTRAN model and CERES satellite data can accurately simulate net surface solar radiation in the clear sky. The average absolute error is  $25.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and average relative error is 4.98%. Solar zenith angle, albedo,  $\text{H}_2\text{O}$ , atmosphere optical thickness and  $\text{O}_3$  are negative relation with net surface solar radiation. Solar zenith angle and albedo have large effect on net surface solar radiation and the others have less effect.

**Key words:** MODTRAN; CERES; Clear sky; Net surface solar radiation