

文章编号: 1007-4619 (2003)06-0465-07

用 GMS-5 气象卫星遥测地面太阳总辐射

魏合理, 徐青山, 张天舒

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 国家 863 计划大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 由 GMS-5 静止气象卫星测量的可见光通道的行星反照率, 根据地球-大气系统的物理模式反演得到了地面的太阳辐射。该模式以平均气候模式和晴天的气溶胶光学厚度计算晴天的大气吸收、分子和气溶胶散射, 其它情况下的散射由行星反照率和晴天的地表反照率推算而得。模式中考虑了水汽和气溶胶的变化对地表太阳辐射的影响。卫星反演的地表太阳辐射与地面观测结果的相关系数高达 95% 以上, 日平均方差约为 10%。

关键词: 太阳辐射; GMS-5; 遥测; 比较; 6S

中图分类号: TP79/P407 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳辐射是地球上一切活动的主要能量来源, 也是地球气候形成的最重要的因子, 对地表辐射平衡、能量交换以及天气气候的形成具有决定性的意义。太阳辐射的变化对农业、气候以及日常生活有重要影响。因此, 太阳辐射的测量很早(19 世纪)就被人们重视。现在一些主要的气象台站已具备测量日射的仪器, 但是测量站为数极为稀少, 远远不能满足估计和预报太阳辐射的需要。业已有一些模式可以计算地面的太阳辐射^[1-3], 但是, 这些计算依赖于气象参数, 特别是象云和气溶胶这些参数很难进行实时测量, 并且用常规的气象参数计算的太阳辐射在空间和时间上都是不连续的。

随着空间技术的发展, 气象卫星以较高的空间和时间分辨率大面积快速地测量地球-大气系统反射的太阳辐射及热辐射, 覆盖可见光到红外甚至微波波段。卫星观测的辐射含有大量的地表和空间背景辐射的信息, 采用一定的物理模式, 从中提取环境辐射特性, 可以极大地弥补地面观测数据的不足。

用卫星数据估算地表辐射场的研究始于 19 世纪 60 年代, 主要分为两种方法: 统计反演法和物理反演法。统计法^[4]预先需要大量的观测数据与卫星

测量的值进行比较, 得到经验关系式, 这对于缺少观测资料的地区似乎不可行; 物理反演法^[5-7]利用辐射传输计算结合卫星资料, 计算得到地表和空间的辐射, 通常分为晴天和阴天以及部分云场的情况来分别考虑, 云的识别一般用阈值法来判别, 而阈值的设置往往带有人为的性质; 晴天中的气溶胶变化也是影响地面太阳辐射重要因子, 这些因素在卫星估计地面辐射中都没有完全解决。

本文在 Dedieu^[5]模式的基础上, 考虑了气溶胶和水汽的变化对晴天地表太阳辐射的影响, 反演得到了地面的太阳辐射, 并与地面用辐射总表直接测量的结果进行了比较, 两者变化趋势相当一致, 相关系数达 95% 以上, 日平均方差约为 10%, 晴天两者的差别在 5% 以内, 阴天绝对差在 $45\text{W}/\text{m}^2$ 以内。

2 由卫星测量反演地表太阳辐射的方法

2.1 晴天到达地表的总辐射

晴天到达地表的太阳辐射 E_{sclr} 可表示为^[1]:

$$\begin{aligned} E_{\text{sclr}} &= E_0 \cos(\theta_s) [\exp(-\tau/\cos\theta_s) + td(\theta_s)] [1 + A_s S_a + (A_s S_a)^2 + \dots] \\ &= \frac{E_0 \cos(\theta_s) T(\theta_s)}{1 - A_s S_a} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 E_0 为大气外界的太阳辐射, 可根据太阳常数

收稿日期: 2002-04-08; 修订日期: 2002-11-01

基金项目: 中国科学院知识创新课题资助, 课题编号: 200002320

作者简介: 魏合理(1965—)男, 副研究员。1992年毕业于中国科学院安徽光学精密机械研究所, 获大气物理专业理学硕士学位。主要从事红外辐射大气传输、卷云辐射传输和大气遥感方面的工作, 发表论文近 30 篇。

($1376.0\text{W}/\text{m}^2$)和日地距离的变化计算出, θ_s 为太阳天顶角, 可根据时间和当地经、纬度计算; τ 为大气光学厚度, T 为大气总透过率(直射和漫射透过率 id 之和), 包括分子吸收、气溶胶和分子散射引起的衰减。 A_s 为地表反照率, S_a 为大气半球反照率。我们采用 6S 大气模式^[1]来计算晴天的这些大气参数, 采用当地平均大气模式和标准气溶胶模式, 地表反照率按下面方法求取。

2.2 云和地表耦合的反射率和透过率

考虑大气中的云散射贡献时, 假定云(厚的气溶胶也当作云来看待)的反照率为 A_c , 且假定云散射和地表反射是各向同性的, 根据能量守恒, 则云的透过率为 $1 - A_c$ (不考虑云的吸收), 透过的部分经地表折反后的部分为 $(1 - A_c)^2 A_s$, 第二次折反后的部分为 $(1 - A_c)^2 A_s^2 A_c$, 依次类推, 则卫星接收的总反照率为:

$$\begin{aligned} A &= A_c + (1 - A_c)^2 A_s + (1 - A_c)^2 A_s^2 A_c + \dots \\ &= A_c + \frac{(1 - A_c)^2 A_s}{1 - A_c A_s} \end{aligned} \quad (2)$$

同样, 透过云到达地表的总和为:

$$\begin{aligned} T_s &= 1 - A_c + (1 - A_c) A_s A_c + (1 - A_c) (A_s A_c)^2 + \dots \\ &= \frac{1 - A_c}{1 - A_c A_s} \end{aligned} \quad (3)$$

2.3 到达地面的总辐射

假定晴天和有云时大气分子的透过率相同, 这种假定有一定的根据, 因为大气吸收太阳光的主要分子是水汽和臭氧, 臭氧含量主要分布在云以上的高度, 而水汽在多数吸收带上已饱和(如 $2.7\mu\text{m}$, $1.8\mu\text{m}$, $1.4\mu\text{m}$ 带)云中增加的水汽含量并不太多地增加太阳辐射的吸收。这样, 地面接收的总辐射可表示为晴天到达地表的辐射和有云时透过率的乘积:

$$E_s = E_{\text{sclr}} T_s = E_{\text{sclr}} \frac{1 - A_c}{1 - A_c A_s} \quad (4)$$

由式(2)和(4)可以推得下面的表达式:

$$E_s = \frac{E_0 \cos(\theta_s) T(\theta_s) (1 - A_c)}{1 - A_s S_a} \frac{1 - A_c}{1 - A_c A_s} \quad (5)$$

由此可以看出, 云的变化引起地表太阳辐射的变化可以由卫星测量的行星反照率推算出, 只要地表反照率已知即可。当地面反照率 A_s 接近 1 时, 上式变得不确定, 因此, 对雪等类的高反照率地表, 上式是不适用的。

2.4 气溶胶和水汽含量变化的修正

Dedieu 的模式中没有考虑水汽变化的影响, 忽略了晴天气溶胶含量变化对行星反照率和地面太阳辐射的影响, 在他们的模式中气溶胶和水汽含量只用标准大气模式代替。灵敏度分析表明^[6], 在晴天除了天顶角外, 气溶胶的光学厚度则成为影响地表辐射最重要的因子, 水汽含量对地表辐射也有影响, 因此, (5)式很难准确表征晴天或有很薄的云的天气条件下的地表太阳辐射。

(5) 式中, 卫星测量的总反照率 A 对气溶胶的灵敏度取决于地表反照率 A_s , 若 A_s 较大, 卫星测量对气溶胶不敏感。但气溶胶含量对地表太阳辐射却是很敏感。用静止卫星的可见光单通道数据遥测地面太阳辐射, 如何消除气溶胶的影响还是一个没有解决的课题。本文采用下面的经验方法, 设晴天气溶胶含量相对于标准模式的变化引起的地表太阳辐射的修正系数为:

$$C_{\text{aero}} = 1 - \alpha(A_c - A_{c_{\text{std}}}) \quad (6)$$

A_c 为晴天气溶胶或薄云的反射率, 由(2)式根据卫星测量的 A 值和地表反射率 A_s 求得, $A_{c_{\text{std}}}$ 为标准模式中气溶胶的反射率。系数 α 显然与地表反照率和气溶胶光学厚度有关, 按下面方法求得: 取气溶胶光学厚度相差很大的两个晴天, 比较地面实际测量的太阳辐射和通过(5)式用卫星数据反演的地表总辐射, 可以得到该地表反照率 A_s 情况下不同气溶胶反射率 A_{c_1} 、 A_{c_2} 的修正系数 α_1 、 α_2 , 晴天其它气溶胶反射率 A_c 的修正系数由线性内插获得:

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{A_{c_2} - A_{c_1}} (A_c - A_{c_1}) \quad (7)$$

一般来说, α 随气溶胶的光学厚度增加而减小, 对于厚云, 当 $A_c > 0.2$ 时, 令 $\alpha = 0$ 。至于修正系数 α 随地表反照率的变化我们将在以后的研究中给出。

Lacis 和 Hansen^[8]根据 Yamamoto 1962 年的计算结果拟合出一个大家常用的用来计算水汽吸收太阳辐射的经验公式:

$$\text{Abs}(W) = \frac{2.9W}{5.925W + (1 + 141.5W)^{0.635}} \quad (8)$$

W 为整层大气的可降水含量, 以厘米计。许多研究表明^[9], 平均来说, W 可以用很容易获得的地面的露点温度 T_d 来表示^[9]:

$$W = 10^{0.0337 T_d - 0.151} \quad (9)$$

这样由地表露点温度来表征的水汽变化对地面太阳

辐射的修正系数可以表示为:

$$C_{H_2O} = \frac{1 - Abs(W)}{1 - Abs(W_s)} \quad (10)$$

其中 W_s 为标准大气模式中的可降水含量。

考虑水汽和气溶胶含量变化修正因子后(5)式变为:

$$E_s = \frac{E_0 \cos(\theta_s) T(\theta_s)}{1 - A_s S_a} \frac{1 - A}{1 - A_s} \times [1 - \alpha(A_c - A_{c_{sd}})] \times C_{H_2O}(W) \quad (11)$$

利用该式就可以很方便地由卫星测量的总反照率 A 和地面露点温度 T_d 获得实时的地表太阳辐射。

2.5 总反照率 A 和地表反照率 A_s 的获得

实际大气中除了云外,还有气溶胶和大气分子的散射,卫星接收到的表现反照率除了地表和云系统的总反照率 A 外,还要受大气分子和气溶胶的散射和吸收的影响,根据 6S 模式^[1],卫星接收到的表现反照率为:

$$\rho^* = \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Phi) + \frac{AT(\theta_s)T(\theta_v)}{1 - AS_a} \quad (12)$$

其中, $\rho_a(\theta_s, \theta_v, \Phi)$ 为晴空大气反照率, S_a 为晴空大气半球反照率(包括气溶胶和分子), θ_s, θ_v 太阳天顶角和卫星观测天顶角, Φ 为太阳方位角和观测方位角之间的相对方位角。由此可得到

$$A = \frac{\rho^* - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Phi)}{T(\theta_s)T(\theta_v) + S_a[\rho^* - \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Phi)]} \quad (13)$$

从式中可以看出,由卫星测量的表现行星反照率 ρ^* 可以得到地表和云的总反照率 A 。在一定长的时间内,总可以选取晴朗无云的时候,这时由测量的行星表现反照率通过(13)式得到的 A 值达到最小,即认为是地表反照率 A_s 。在求 A_s 时,我们用太阳辐射计实际测量了气溶胶光学厚度^[10]。

我们在实际反演地面反照率时,预先用 6S 大气模式按一定的步长计算出各天顶角($0^\circ - 84^\circ$)、不同的地表反照率(0—0.8)、不同的气溶胶光学厚度(0.0—1.0)下晴天的行星反照率库;选取某一晴天,用太阳辐射计现场测量气溶胶的光学厚度^[10],由晴天卫星测量的表现行星反照率、气溶胶光学厚度以及根据当地经纬度和卫星观测时间计算得到的天顶角,通过查找预先计算的反照率库而得地面反照率 A_s 。

图 1 为 2001-02-14 12:25 反演得到的合肥巢湖地区地表反照率,(横、纵坐标为像元数,每个像元之间的距离约为 1.25km,“+”为测量点 117.162°E, 31.905°N)。该天晴朗无云,太阳辐射计观测的

0.55 μ m 波长的气溶胶光学厚度为 0.34,得到观测点的平均反照率为 0.144。图下方反射率低的区域是中国五大淡水湖之一的巢湖,从经过大气校正的地表反照率图上可以清楚地看到湖内的反照率的层次结构。

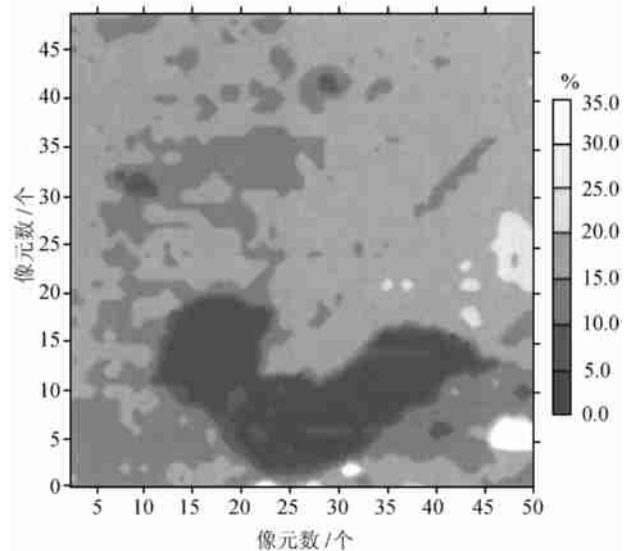


图 1 反演得到的合肥巢湖地区地表反照率(2001-02-14, 12:25)

(横、纵坐标为像元数,每个像元 1.25km,“+”为测量点,灰度等级从 0%(暗)—35%(亮))

Fig-1 The retrieved surface albedo in the district of Hefei and Chaohu lake

3 用 GMS-5 气象卫星遥测地面太阳总辐射

3.1 GMS-5 卫星数据和地面辐射总表测量数据

GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite) 是 1995 年由日本发射的静止气象卫星,星下点中心位置为(140°E, 0°)在 GMS-5 上搭载了可见光和红外自旋扫描辐射计 VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer)对地球扫描成像。GMS-5 星载 VISSR 有 IR1(红外 1),IR2(红外 2),V(可见光),W(水汽)4 个探测通道,可见光波段范围为 0.4—1.10 μ m,覆盖了超过 60%的太阳辐射能,可见光通道的星下点分辨率是 1.25km。完成一次对地扫描的时间只需 25min,每小时至少可以得到一幅卫星云图,GMS 的高时间分辨率特别适合于估计地面辐射,观测是连续不断地进行。我们选取了 2000 年 4 月—2001 年 6 月超过一年的可见光通道数据,反演得到了合肥地区地表的短波太阳辐射,为了检验卫星反演的结果,我们利用了中日合作项目日方有关的仪器(主要包

括辐射总表、太阳直射总表)。

GMS 可见光波段接收到的信号由原始图像中的定位表和定标表经过定位和定标后,可得到观测点的表现反照率 ρ^* ,考虑到定位精度的影响,我们实际使用了 3×3 像元的平均值。

为了同卫星测量的结果相比较,在地面用辐射总表和直射总表(响应波段 $0.3-3\mu\text{m}$)实际测量了天空向下的漫射辐射和太阳直射辐射,得到了地面的总辐射。观测点位于合肥西郊 (117.162°E , 31.905°N)连续自动地每半分钟记录一组数据。

3.2 反演步骤

卫星测量的是 $0.4-1.1\mu\text{m}$ 波段的反射太阳辐射,到达地表的太阳总辐射覆盖 $0.3-3\mu\text{m}$ 波段,我们假定卫星测量的地表和大气的反射率与 $0.3-3\mu\text{m}$ 的反射率相同,(5)式中与波长有关的观测测量假定适用于 $0.3-3\mu\text{m}$ 波段,则测量结果就能代表到达地表的总辐射,并且可以与地表直接测量结果相比较,这种假定有一定的根据, $0.1-1.1\mu\text{m}$ 波段包括了 60% 以上的太阳总辐射,余下部分的变化趋势与前一部分基本一致。

首先用上述方法得到地表反照率 A_s 和气溶胶修正系数 α ,预先按当地平均气象条件下的“标准大气模式”计算晴朗天气条件下的大气半球反照率 S_a 、大气透过率随天顶角 θ_s 的变化 $T(\theta_s)$;然后,根据监测点的经纬度从 GMS-5 卫星云图中的可见光通道中利用定位表找到该像元的坐标,并读取该像元灰度值,利用定标表转换成表现反照率,通过式(13)得到总反照率 A ,由 A 和 A_s 通过(2)式得到 A_c ,由(7)式计算气溶胶的修正系数,由地表露点温度得到可降水含量,通过(8)式得到水汽修正系数。最后通过(11)式得到地表的太阳辐射。

该方法中由于已在模式中考虑了晴天的气溶胶光学厚度和水汽含量的变化的影响,卫星测量的气溶胶反射率的敏感性随地表反射率的变化已由(9)式得到订正,使该模式能更好地由卫星测量的总反照率表征地表的太阳辐射。

3.3 与地面观测结果的比较

3.3.1 每时段卫星测量的结果与地面测量的比较

图 2 给出了 2001 年 1-6 月半年的合肥地区地面太阳辐射,横坐标是地面辐射表直接测量的数据(取地面测量 5min 的平均值),纵坐标是用 GMS-5 卫

星可见光通道反演的结果,用线性最小二乘拟合得到卫星反演的结果 E_{sat} 和直接用辐射总表测量值 E_{obs} 之间的关系:

$$E_{\text{sat}} = 14.2 + 1.038 E_{\text{obs}} \quad (15)$$

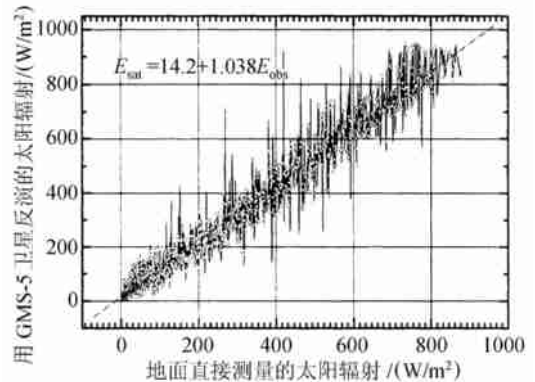


图 2 卫星反演和直接测量的瞬时地面太阳辐射
Fig. 2 Comparison between measured retrieved surface solar radiation

两者相关系数高达 0.960,总均方根误差 $63.6\text{W}/\text{m}^2$,相当于平均值的 19.5%。与 Dedieu 的结果(均方根差 $109\text{W}/\text{m}^2$,相当于平均值的 19.5%)相当,但是,他们的结果只局限在 4-7 月的中午 11:00-13:00 之间,而我们取了半年中日出后和日落前的所有卫星测量时刻,并且我们遥测和地面测量的相关系数比他们(0.92)要高很多。

图 3 给出了卫星反演和直接测量的瞬时地面太阳辐射以 $50\text{W}/\text{m}^2$ 为间隔的相对和绝对偏差(均方根 RMS),晴天均方根差 $<10\%$ (在 $800\text{W}/\text{m}^2$ 时为 $50\text{W}/\text{m}^2$, $<7\%$);阴天均方根差约为 20%-30%(在

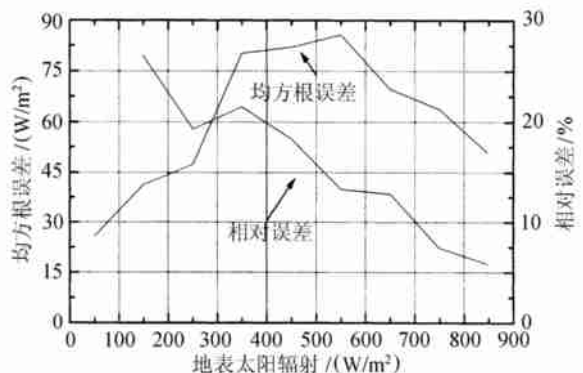


图 3 卫星反演和直接测量的瞬时地面太阳辐射的相对和绝对偏差(均方根值)

Fig. 3 Relative and absolute residual error the (root mean square value) between retrieved and measured surface solar radiation

100—200W/m² 时为 30—45W/m²);多云天气均方根差为 20%左右(在 300—600W/m² 时为 60—85W/m²)。从比较的结果来看,本文反演的地面辐射的精度与已有的结果相比有所提高,如 Tarpley 的结果:晴天 10%,多云天 30%,阴天 50%。

遥测结果的偏差是因为上述两者测量在时间、空间和光谱范围上都存在区别,卫星测量是窄视场内瞬时测量,空间范围内地面 3.75km×3.75km(3×3 像元)的平均值,并且定位误差有可能超过一个像元,地面测量是宽视场(半球方向)、地面一点 5min 的平均值。卫星的可见光通道的光谱范围为 0.4—1.1μm,而地面辐射表的波长为 0.3—3.0μm。绝对

偏差最大出现在 300—600W/m² 之间,属薄云或卫星视场中部分有云(破碎云场)的情况。

为了直接比较两者的测量结果,图 4 分别展示了不同天气条件下的测量值,其中卫星遥感只取了天顶角<80°的结果,假定了天顶角>90°时(日出前和日落后)地面总辐射为 0。从中可以看出:卫星测量和地面测量两者变化趋势一致,符合得相当好。除了云层较薄的 2 月 13 日(第 44 天)、4 月 19 日(第 109 天)和 4 月 21 日(第 111 天)外,两者的绝对差别较小。从中可以粗略地看出:晴天两者差别可以达到 5%以内,阴天的均方根差不大于 50 W/m²,差别最大出现在薄云和部分有云的天气。

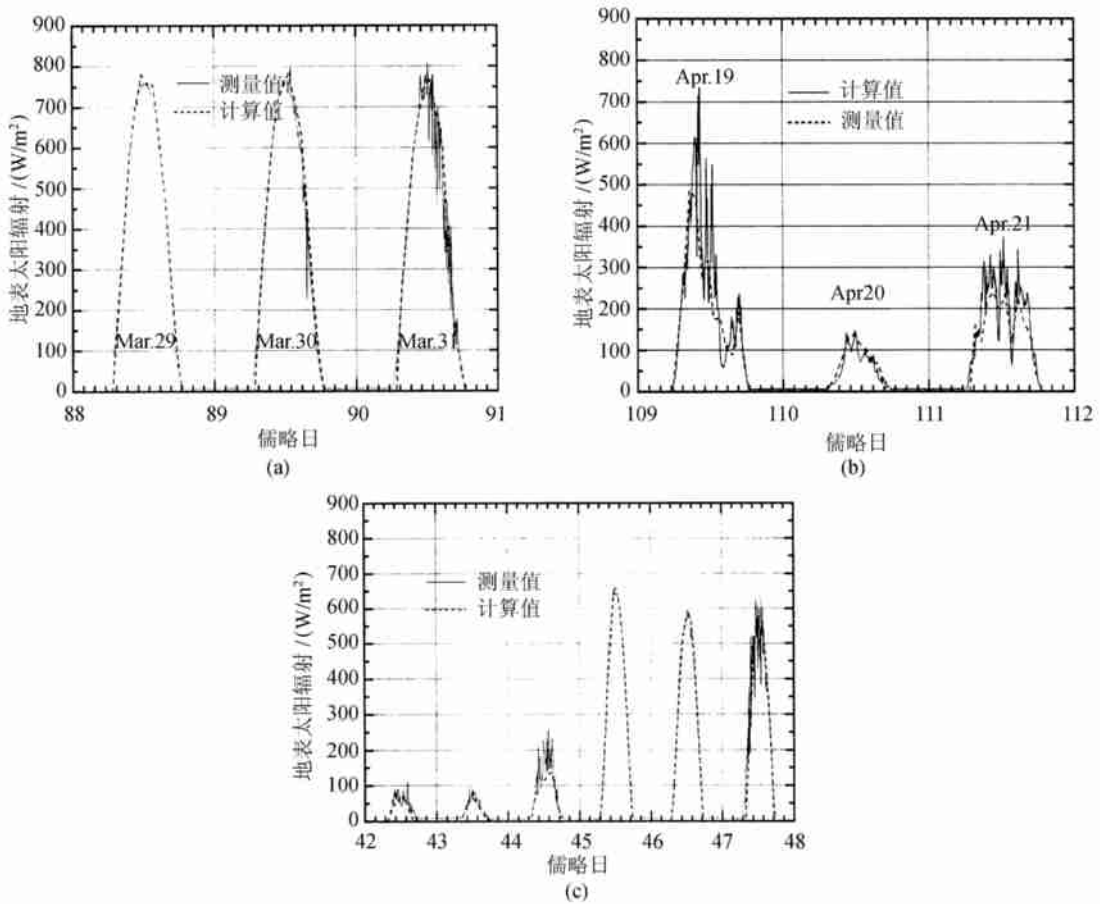


图 4 卫星反演和直接测量的瞬时地面太阳辐射随时间的变化
(a)晴天;(b)多云;(c)阴天和晴天

Fig.4 Comparisons between the measured and retrieved variation of surface solar radiation

3.3.2 与地面日累积辐照的比较

地面太阳辐射最常用的量是日累积辐照 I_{daily} (单位为:J/m²),表示每天地面接收的短波总辐射能量,是地面辐照的时间积分,对卫星测量的结果采用梯形积分公式可写为:

$$I_{\text{daily}} = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{E_s(t_k) + E_s(t_{k-1})}{2} (t_k - t_{k-1})$$

t_k 为卫星观测的时间,其时间间隔为 1 小时, n 为每天卫星观测的次数; t_0, t_{n+1} 分别为日出和日落的时间,并假定: $E_s(t_0) = E_s(t_{n+1}) = 0$ 。

图 5 给出了 2001 年 1—6 月半年由卫星遥测和地面辐射表直接测量的合肥地区地面日累计太阳辐

照,日平均的点聚图见图 5(b)可见两者相当一致,相关系数高达 0.987,标准差 $1.26 \times 10^6 \text{J/m}^2$,相当于

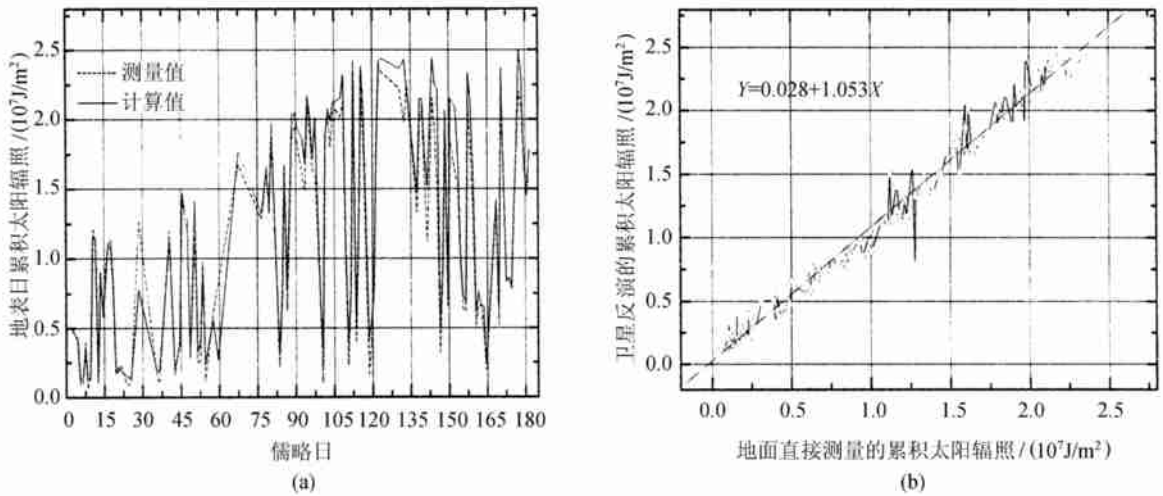


图 5 卫星估计的和地面辐射表测量的日累计辐照(2001 年 1—6 月)

(a)直接比较;(b)点聚图

Fig.5 The Cumulative surface insolation estimated by GMS-5 and measured by the pyranometer

平均值的 10.2%。

注意到图 5 中的 1 月 28 日,地面测量的日积分辐照为 $1.28 \times 10^7 \text{J/m}^2$,而卫星遥测的值仅为 $0.77 \times 10^7 \text{J/m}^2$,相差较大,经查,2001 年 1 月 28—29 日这两天合肥地区地面积雪达 5cm 厚,雪在可见光波段有很高的反照率,卫星把它当作云处理,测量的表观反照率偏大。单独用 GMS 静止卫星的可见光通道无法区别云和雪,所以该模式不适合于象雪类的高地面反照率的测量。

3.4 卫星反演合肥地区地面太阳辐照的结果

根据 2000 年 4 月—11 月和 2001 年 1—6 月的 GMS-5 卫星数据遥感得到了合肥地区月累计太阳辐照如图 6(其中,2000 年 12 月因卫星数据太少而舍去)。从中可以看出,7 月份太阳辐照达到最大,1 月份达到最小,6 月份可能是江淮之间梅雨季节多阴雨而造成地面太阳辐射减小。

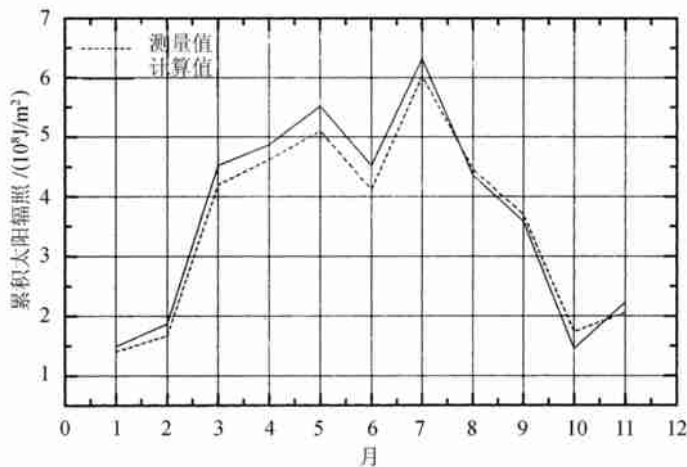


图 6 合肥地区总辐射月累计值的年变化(2000 年 4 月—2001 年 6 月)

Fig.6 The variation of cumulative insolation in Hefei district (from April of 2000 to June of 2001)

4 结论

本文根据地-气的物理模式,由GMS-5静止气象卫星可见光通道的行星反照率反演得到了地面的太阳辐射。反演的结果与地面辐射总表直接测量值有着非常好的一致性,相关系数在95%以上,日平均方差约为10%,阴天绝对差在 $45\text{W}/\text{m}^2$ 以内。说明本方法可以应用于估计地面总辐射。

由于在模式中考虑了晴天气溶胶及其变化对地表太阳辐射的影响的修正,并考虑了水汽对太阳辐射的吸收效应,反演的精度较已有的结果有所提高。

致谢 范爱媛同志提供了地面太阳辐射观测数据和晴天气溶胶光学厚度的观测数据,凌惠琴同志提供了地面露点温度的气象观测数据,作者对此表示感谢!

参考文献 (References)

[1] Tanre D, Deroo C, Duhaut P *et al.* The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)[R]. User Guide. Laboratoire d'Optique Atmospherique, Universite des Sciences et Technologies de Lille, 59655 Villeneuve d'aseq, France, 1986

[2] Stamnes, K, Tsay S-C, Wiscombe W, *et al.* Numerically Stable Algorithm for Discrete-ordinate-method Radiative Transfer in Multiple

Scattering and Emitting Layered Media[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**, 2502—2509

[3] Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, *et al.* Users Guide to LOWTRAN7, AFGL-TR-88-0177, Bedford MA, 1988

[4] Tarpley J. D. Estimating Incident Solar Radiation at the Earth's Surface from Geostation Satellite Data[J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1979, **18**, 1172—1181

[5] Dedieu G, Deschamps P Y, Kerr Y H. Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteosat Data[J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**(1), 79—87

[6] Pinker R T, Ewing J A. Modeling Surface Solar Radiation: Model Formulation and Validation[J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1985, **24**(5), 389—401

[7] Zhong Qiang, Gui Jin'e. Estimation of Global Radiation over the Qinghai-Xizang Plateau from Nimbus-7 Planetary Albedo Data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, **47**(2), 165—172 [钟强, 金娥. 利用 Nimbus-7 行星反照率估算青藏高原地区的总辐射[J]. *气象学报*, 1989, **47**(2), 165—172.]

[8] Lacis A J, Hansen J E. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere[J]. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**, 118—133

[9] Wei Heli, Zhao Fengsheng. Remote Sensing of Precipitable Water from Infrared Solar Spectra[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, **18**(4), 315—319. [魏合理, 赵凤生. 大气气柱内水汽总含量的红外光谱遥测[J]. *量子电子学学报*, 2001, **18**(4), 315—319.]

[10] Zhou Jun, Wang Zhi'en, Han Jiecai *et al.* Variability Of Aerosol Optical Properties over Hefei During September 1993 To September 1994[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, **10**(1), 81—95

Observation of Solar Irradiance at the Surface from GMS-5

WEI He-li, XU Qing-shan, ZHANG Tian-shu

(Key Laboratory for Atmospheric Optics of National High Technology Research and Development Plan, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Downward solar irradiance at the surface of the Earth is derived from the apparent satellite reflectance measurements from GMS-5 visible channel (0.4—1.1 μm) based on a physical model of earth-atmosphere system. The absorption and scattering of atmospheric molecule and aerosol on clear day are considered with standard mid-latitude summer atmospheric model using the 6S, the scattering for other weather is obtained from the real-time satellite albedo and the surface albedo acquired from the satellite measurements under clear sky condition. The effects of variations of aerosol and precipitable water on clear day to the surface solar irradiance are considered. Compared to the real-time measurements by surface pyranometer, the correlation coefficient is as high as 95%, the deviation is about 10% of mean daily solar insolation. From the comparison, the accuracy of hourly solar irradiance estimated from GMS-5 in the text is improved.

Key words: solar irradiance; GMS-5; observation; comparison; 6S