

用卫星资料计算我国东部地区晴空太阳辐射

傅炳珊, 陈渭民

(南京气象学院电子信息与应用物理系, 南京 210044)

摘要: 根据光的多次散射理论的离散纵标法, 利用我国东南沿海地区探空站的资料, 计算出不同高度上分谱段的太阳直接辐射和向上、向下散射辐射, 与相应时刻的卫星测值(可见光、红外通道 S-VISSR 计数值)进行逐步回归拟合, 建立晴空状况下卫星测值与大气中各高度太阳直接辐射和散射辐射的统计模式, 并将拟合方程进行稳定性检验。据此可以利用卫星资料计算各高度分谱段的太阳直接辐射和散射辐射。

关键词: 太阳直接辐射, 向上散射辐射, 向下散射辐射, 时空分布

中图分类号: P422. 4; P405 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2001) 02-0178-08

大气辐射在大气科学、卫星遥感、天体物理学、行星学、应用光学以及应用物理学等领域有着重大而广泛的应用。为了探讨全球地面入射太阳辐射, 许多辐射观测站进行着日常观测工作。但我国地面辐射观测站偏少且分布不均匀, 同时由于仪器仪表等存在的误差给这方面的研究应用带来诸多困难。中光谱分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN) 较低光谱分辨率大气辐射传输模式(LOWTRAN) 不但提高了光谱分辨率, 而且还包括了多次散射辐射传输精确算法——离散纵标法, 对有散射大气的辐射传输如太阳短波辐射, 比 LOWTRAN 中的二流近似算法有更高的精度和更大的灵活性。采用实时大气温、压、湿廓线、实时能见度以及美国标准大气的微量气体, 由 MODTRAN3 输出的地面太阳直接辐射、向下散射辐射与地面辐射观测资料比较, 在除去系统误差的情况下, 比较结果说明采用模式近似计算得到的太阳直接辐射、向下散射辐射可以替代实况加以应用^[1]。但单独依靠地面气象观测资料难以得到太阳辐射的时空分布。而气象卫星多个谱段、较高时空分辨率的地气系统的测值, 为研究大气的光学特性, 进而为计算太阳直接辐射和散射辐射提供了基础。另外有人用有限个窄波段上的卫星测量值来推算宽波段或其余波段的太阳辐射^[2,3]。

本文旨在利用 MODTRAN3^[4] 中分辨率大气辐射传输模式的离散纵标法以及 GMS 的卫星资料建立我国东南沿海地区夏秋季晴空条件下分谱段、各高度上的太阳辐射计算模式, 以弥补我国辐射站稀少及太阳辐射资料时空分布匮乏的不足。

1 资料

(1) 云图资料: 包括 1994-06 ~ 1994-07 逐日逐时两个通道的 GMS-4 卫星云图资料, 1999-

收稿日期: 2000-09-15; 修订日期: 2000-12-30

作者简介: 傅炳珊, 女, 1967 年 4 月生, 硕士, 工程师

07~1999-12, 2000-01~2000-03 逐日逐时 3 个通道(IR_1 、VIS、水汽)的 GMS-5 卫星云图资料。GMS-4 有一个可见光通道和一个红外通道, 两个通道的光谱带宽分别为 $0.5 \sim 0.75 \mu\text{m}$ 和 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 。GMS-5 除了现有的可见光通道传感器外, 还装载了水汽传感器和红外分裂窗传感器以取代以前的红外传感器。水汽通道的光谱带宽是 $6.5 \sim 7.0 \mu\text{m}$, 这几乎和 GOES 卫星的水汽通道一样。分裂窗通道的光谱带宽为 $10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$ (IR_1) 和 $11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ (IR_2), 又几乎和 NOAA 卫星的分裂窗通道一样。可见光通道也略有改变, 现为 $0.55 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 。从 S-VISSR 计数值可使用定标表或转换表转换成亮温。还可以用定标系数利用转换方法计算得到辐射值。本文使用的是 S-VISSR 计数值, 可见光的计数值范围是 $0 \sim 63$, 红外及水汽通道的计数值范围是 $0 \sim 255$ 。

(2) 与卫星云图相对应的我国东南沿海 20 个站的 08 时探空资料: 包括 100、150、200、300、400、500、700、850 hPa 共 8 个高度的气压、温度、露点以及 08 时的地面能见度。

2 辐射在大气中的基本衰减过程

晴空大气中, 吸收太阳辐射的物质主要是水汽和臭氧, 其次是氧和二氧化碳, 气溶胶也有较少吸收。在 $\lambda < 0.3 \mu\text{m}$ 谱段, 氧、臭氧和氮是高层大气吸收太阳辐射的主要物质, 臭氧主要分布在 $10 \sim 40 \text{ km}$ 高度层, 极大值在 $20 \sim 25 \text{ km}$ 高度层; 在 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 谱段, 吸收很少, 仅有弱的臭氧吸收, 为大气可见光窗区; 在 $\lambda > 0.7 \mu\text{m}$ 谱段, 主要是水汽吸收, 且水汽主要集中在对流层的下部, 另外, 还有氧和二氧化碳等的弱吸收。在晴空大气中, 对太阳辐射的散射主要是分子散射和气溶胶粒子散射; 对于有云天空, 云对太阳辐射的影响比其他因子要大一个量级, 是决定到达地面太阳辐射的主要因子。

为计算太阳辐射, 首先要对各因子实行参数化, 如对于臭氧在可见光谱段($0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$) 和紫外谱段($0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$) 的两个吸收带, Lacis 等^[5] 提出的太阳辐射吸收百分率的经验解析表达式。水汽在波长 $0.7 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 谱段存在着不同的吸收带, Lacis 等^[5] 根据水汽的吸收系数的离散概率分布, 把水汽吸收系数的几率分布分为 8 个间区得水汽吸收系数及水汽的光学厚度。气溶胶数浓度随高度增加而迅速递减, 5 km 以上变化平缓, 而且海陆差异基本消失。气溶胶对太阳的散射起重要作用, Angstrom^[6] 提出气溶胶的光学厚度的计算公式。但气溶胶的数密度不易测准, 获得大范围的气溶胶的时空分布也是不可能的, 而能见度较易测量和比较。本工作利用 Koschmieder^[7] 能见度理和 Middleton^[7] 得出的能见度与消光系数关系。MODTRAN3 模式给出了 8 种大气气溶胶的消光系数, 模式计算中采用“背景平流层气溶胶廓线和相应的消光系数”。分子散射随波长的增加而急剧减小, 总的垂直光学厚度从紫外处接近于 1 后随波长增加而迅速减小, Marggraf 和 Griggs^[8] 给出分子散射光学厚度。对于任意一个光谱区间的光学厚度, 则由该区间两个节点处的光学厚度平均得到。弱吸收主要是氧和二氧化碳在 $\lambda > 0.7 \mu\text{m}$ 存在吸收。Leckners^[9] 提出氧和二氧化碳的光学厚度计算公式。

3 分波段辐射计算、统计模式的建立及检验

3.1 分波段各高度上的辐射计算

本工作将太阳光谱分为 4 个波段, 其中紫外 1 为 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{m}$, 紫外 2 为 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$, 可见光为 $0.40 \sim 0.76 \mu\text{m}$, 近红外为 $2.0 \sim 4.0 \mu\text{m}$ 。根据探空曲线, 将大气分成 8 个层次: 100、150、200、300、400、500、700、850 hPa。将辐射计算参数输入模式, 分别计算晴空状况下 136 个个例(包括 1994 年 82 个, 1999 年 54 个) 的 8 个高度、4 个谱段的太阳直接辐射、向上和向下散

射辐射。作为例子, 图 1 ~ 图 4 给出了各波段的太阳直接辐射、向上和向下太阳散射辐射的光谱图。这些光谱图特征与全波段图中所对应部分非常类似, 存在着明显的臭氧及水汽吸收带。

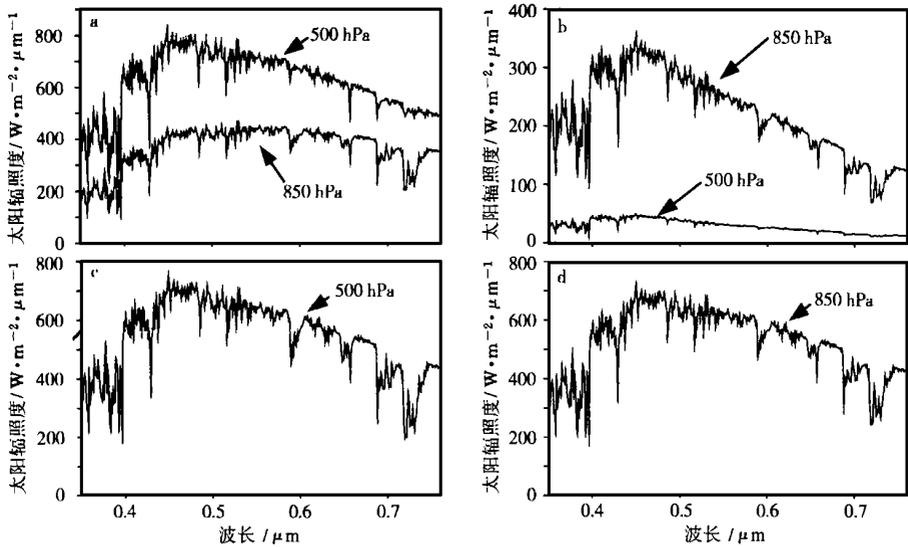


图 1 模式输出的香港 1999-09-22T 08 可见光波段光谱图

a. 太阳直接辐射; b. 向下太阳散射辐射; c. 500 hPa 向上太阳散射辐射; d. 850 hPa 向上太阳散射辐射

Fig. 1 Visible radiation spectrum computed by the model at 0800 Sep. 22, 1999 in Hongkong
a. direct radiation; b. downward scattered radiation;
c. upper diffuse radiation at 500 hPa; d. upper scattered radiation at 850 hPa

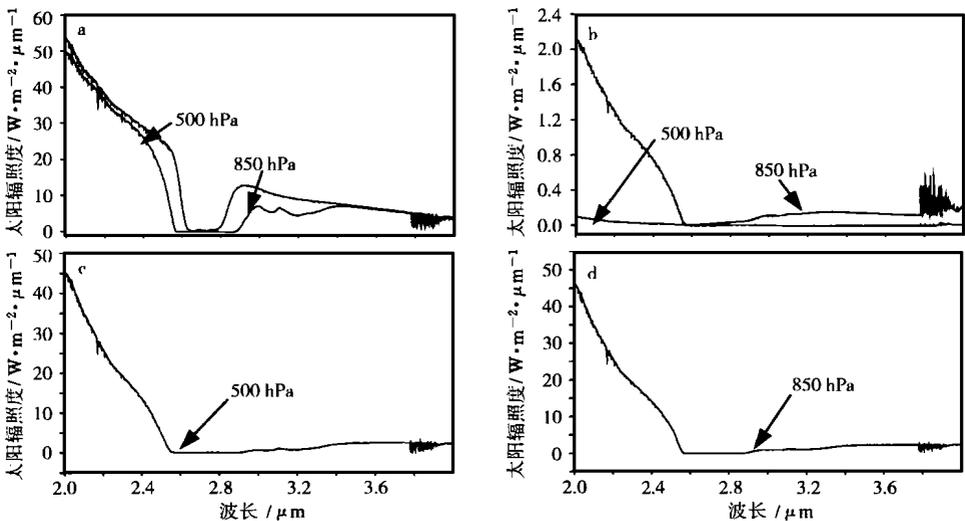


图 2 模式输出的广州 1994-06-28T 08 近红外波段光谱图

a. 太阳直接辐射; b. 向下太阳散射辐射; c. 500 hPa 向上太阳散射辐射; d. 850 hPa 向上太阳散射辐射

Fig. 2 Near-infrared radiation spectrum computed by the model at 0800 Jun. 28, 1994 in Guangzhou
a. direct radiation; b. downward scattered radiation;
c. upper diffuse radiation at 500 hPa; d. upper scattered radiation at 850 hPa

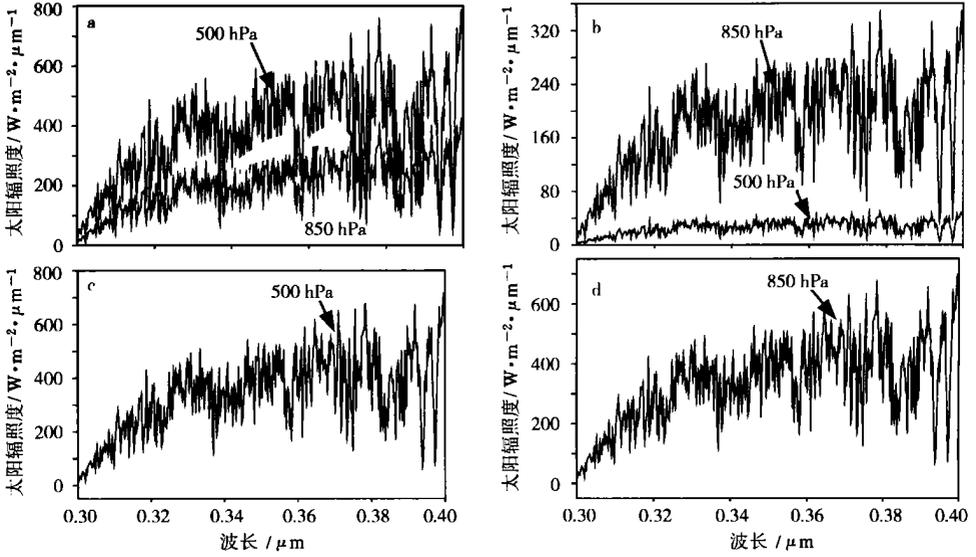


图 3 模式输出的汕头 1999-09-11T08 紫外 2 波段光谱图

a. 太阳直接辐射; b. 向下太阳散射辐射; c. 500 hPa 向上太阳散射辐射; d. 850 hPa 向上太阳散射辐射
 Fig. 3 Ultraviolet 2 radiation spectrum computed by the model at 0800 Sep. 11, 1999 in Shantou
 a. direct radiation; b. downward scattered radiation;
 c. upper diffuse radiation at 500 hPa; d. upper scattered radiation at 850 hPa

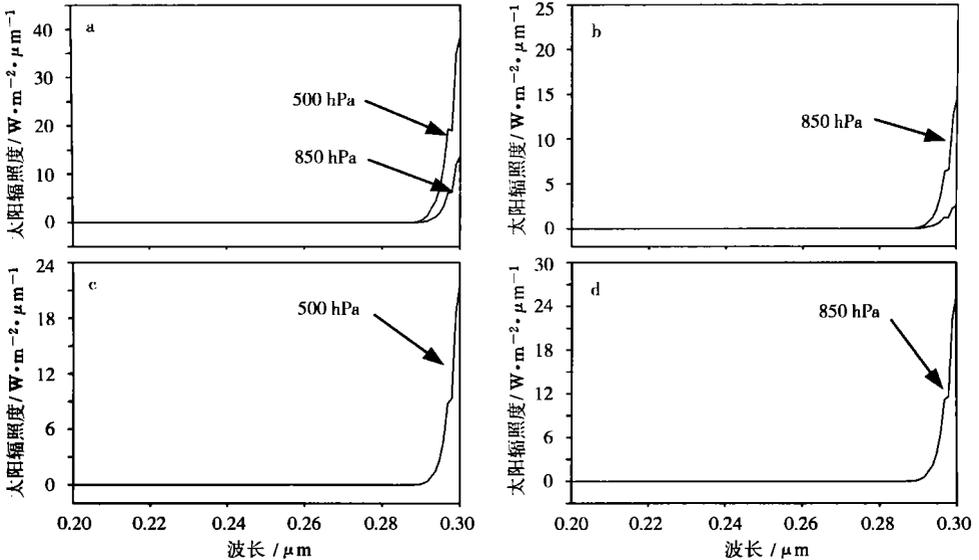


图 4 模式输出的厦门 1999-09-23T08 紫外 1 波段光谱图

a. 太阳直接辐射; b. 向下太阳散射辐射; c. 500 hPa 向上太阳散射辐射; d. 850 hPa 向上太阳散射辐射
 Fig. 4 Ultraviolet 1 radiation spectrum computed by the model at 0800 Sep. 23, 1999 in Xiamen
 a. direct radiation; b. downward scattered radiation;
 c. upper diffuse radiation at 500 hPa; d. upper scattered radiation at 850 hPa

3.2 拟合因子的选取

由于 GMSS-VISRR 得到的计数值不是辐射值, 它与卫星测到的辐射值的关系是二次方

的关系。且考虑到太阳天顶角以及能见度对太阳直接辐射和散射辐射的作用, 选取 C_{VIS} 、 C_{VIS}^2 、 C_{IR} 、 C_{IR}^2 、 μ_0 、 μ_0^2 、 VV 共 7 个拟合因子, 建立拟合因子与分谱段的各高度的太阳直接辐射、散射辐射的统计关系

$$L_{A-\text{dir}(\text{dir})}(z) = a + b_1 C_{\text{VIS}} + b_2 C_{\text{VIS}}^2 + b_3 C_{\text{IR}} + b_4 C_{\text{IR}}^2 + b_5 \mu_0 + b_6 \mu_0^2 + b_7 VV. \quad (1)$$

式中 $L_{A-\text{dir}(\text{dir})}(z)$ 表示 z 高度上太阳直接辐射或向上、向下太阳散射辐射。 VV 为能见度。 C_{VIS} 、 C_{IR} 分别为可见光、红外通道计数值, 可以直接由卫星资料得到, μ_0 为太阳天顶角的余弦, 各站点的 μ_0 可以计算得到。

3.3 卫星测值与晴空大气各高度分谱段的太阳直接辐射和向上、向下散射辐射的统计关系

气象卫星在可见光波段的测量通常只有一个或二个波段, 从有限波段推算太阳辐射的分布有一定困难, 但是从太阳辐射的光谱分布可以看到各个波长的值之间有相对固定的关系, 为此, 这里采用统计相关的方法由多个光谱段的卫星资料推算其他光谱段的太阳直接辐射和散射辐射。本文选取了我国东南沿海探空站晴空的 136 条时探空曲线, 将太阳光谱分成四个谱段, 由离散纵标法计算这四个谱段各高度的太阳直接辐射和向上、向下散射辐射。然后, 将计算结果中 100 个个例作为统计变量与所选的拟合因子作逐步回归(另外 36 个个例作检验用), 置信度设为 0.1。

本工作计算了各谱段直接辐射和向下、向上散射辐射与卫星测值的拟合系数和复相关系数。结果如下。

(1) 对于紫外 1 波段由卫星测值估算各个高度上太阳直接辐射的拟合系数和复相关系数, 除 850 hPa 之外复相关系数都在 0.94 以上, 850 hPa 复相关系数变差, 为 0.86, 究其原因是在大气低层处, 一些可变气体成份如水汽和气溶胶明显增加, 这些气体和粒子对太阳辐射的吸收和散射有重要作用, 由此造成样本的不确定性, 引起精度下降。同时对于紫外 1 波段由卫星测值估算各个高度向下太阳散射辐射的拟合系数和复相关系数, 从高层到低层, 卫星测值与向下太阳散射辐射的复相关系数都较高, 即使在低层(850 hPa)相关系数也很高。如果仅从复相关系数看, 由卫星测值能较好地估算出紫外 1 波段向下太阳散射辐射。另外, 紫外 1 波段由卫星测值估算各个高度向上太阳散射辐射的拟合系数和复相关系数, 其复相关系数较卫星测值与太阳直接辐射和向下散射辐射的复相关系数要低, 一般在 0.77 以上, 这说明由卫星反演紫外 1 波段向上太阳散射辐射的精度相对要差一些。

(2) 对于紫外 2 波段由卫星测值估算各个高度太阳直接辐射、向下散射辐射和向上散射辐射的拟合系数和复相关系数, 从结果看出, 在紫外 2 波段, 卫星测值与太阳直接辐射和向上散射辐射的复相关系数都较高, 其相关系数达 0.99, 表明由卫星反演紫外 2 波段太阳直接辐射和向上散射辐射有好的结果。卫星测值与向下太阳散射辐射的复相关系数在高层要差一些, 其相关系数为 0.83 ~ 0.89, 但其反演效果仍然较好。

(3) 对于近红外波段由卫星测值估算各个高度太阳直接辐射、向下散射辐射和向上散射辐射的拟合系数和复相关系数, 从表中看出, 卫星测值与太阳直接辐射和向上散射辐射的复相关系数都较高, 表明由卫星反演近红外波段太阳直接辐射和向上散射辐射的效果较好, 相对而言, 卫星反演此波段的向下太阳散射辐射稍差一些。

(4) 对于可见光波段由卫星测值估算各个高度的太阳直接辐射、向下散射辐射和向上散射辐射的拟合系数和复相关系数, 从表中看出, 这一波段与近红外波段相类似, 卫星测值与太阳直接辐射和向上散射辐射的复相关系数都较高, 而卫星测值与向下太阳散射辐射的复相关系数相对较低, 所得结果与近红外波段相类似。

总之,在大气高层辐射与卫星计数值相关较好,而在低层,受能见度的影响比较明显。太阳天顶角与各高度各谱段的太阳辐射有着必然的联系,由此说明将太阳辐射与卫星测值建立关系,然后直接由卫星计数值计算东南沿海地区晴空大气分谱段的太阳直接辐射、散射辐射的时空分布是可行的,而且效果较理想。

3.4 拟合方程的检验及绝对误差

本工作计算了各谱段模式计算结果与卫星测值的拟合图(图略),由图看出,除了紫外1波段外,其他波段拟合得都很好。为了检验拟合方程的稳定性,除去用于拟合的100个个例,将剩余的36个个例用于拟合方程检验,我们将此36个个例的探空资料输入模式算出的结果作为实况值,将卫星资料及能见度代入方程,作为回归结果,进行比较,将二者之间的相对误差列于表1至表3中。

(1)由表1可以看出,由卫星测值代入回归方程算出的太阳直接辐射与模式输出的太阳直接辐射之间的相对误差,在近红外、可见光、紫外2波段都很小,均小于13%,而紫外1波段只有100 hPa较小,其他层次都比较大。说明紫外1波段的拟合方程不稳定,其他波段各层次的太阳直接辐射拟合方程都比较稳定。

表1 卫星测值与模式输出的太阳直接辐射拟合方程的相对误差(36个个例)

Table 1 Relative errors of direct solar radiation in the fitting equation between the satellite observation and model output %

高度/hPa	近红外波段	可见光段	紫外1段	紫外2段
100	11.9	1.2	11.9	1.3
150	11.9	1.2	31.0	1.3
200	11.9	1.3	41.6	1.3
300	11.8	1.3	47.6	1.3
400	11.7	1.3	51.3	1.3
500	11.7	1.3	54.9	1.3
700	12.3	1.2	63.5	1.2
850	12.3	7.2	59.3	10.1

(2)由表2看出,由卫星测值代入回归方程算出的向下太阳散射辐射与模式输出的向下太阳散射辐射之间的相对误差,在可见光、紫外2波段都很小,近红外波段只有850 hPa较大,其他层次均较小。而紫外1波段在高层较小,低层较大。说明向下太阳散射辐射在可见光、紫外2波段各高度的拟合方程均比较稳定,近红外波段除850 hPa层外也都稳定,紫外1波段150、200 hPa拟合方程稳定,而近红外波段850 hPa及紫外1波段300、400、500、700、850 hPa拟合方程不稳定。

(3)由表3看出,由卫星测值代入回归方程算出的向下太阳散射辐射与模式输出的向下太阳散射辐射之间的相对误差,在近红外、可见光、紫外2波段都很小,而紫外1波段均较大,说明向上太阳散射辐射在近红外、可见光、紫外2波段各高度的拟合方程均比较稳定,而紫外1波段均不稳定。

分析结果发现,造成紫外1波段拟合方程不稳定的原因可能是紫外1波段的太阳辐射值(包括直接辐射、向下散射辐射、向上散射辐射)都很小,其值范围在 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 2 卫星测值与模式输出的向下太阳散射辐射拟合方程的相对误差(36 个个例)

Table 2 Relative errors of downward scattered radiation in the fitting equation between the satellite observation and model output %

高度(hPa)	近红外波段	可见光段	紫外 1 段	紫外 2 段
150	3.4	1.3	12.2	1.3
200	2.6	2.9	15.7	2.9
300	3.9	1.5	22.6	1.6
400	4.1	1.6	26.9	1.6
500	4.8	1.4	29.5	1.4
700	5.1	2.9	33.3	2.8
850	32.4	11.2	59.1	9.4

表 3 卫星测值与模式输出的向上太阳散射辐射拟合方程的相对误差(36 个个例)

Table 3 Relative errors of upward scattered radiation in the fitting equation between the satellite observation and model output %

高度(hPa)	近红外波段	可见光段	紫外 1 段	紫外 2 段
100	10.9	2.1	28.5	2.2
150	10.8	2.1	28.3	2.2
200	10.9	2.1	27.4	2.2
300	10.8	2.1	26.3	2.2
400	10.9	2.1	25.8	2.2
500	10.9	2.1	25.9	2.2
700	10.9	2.1	26.5	2.1
850	11.8	1.9	34.3	2.1

4 结 论

(1) 由模式输出的 100 组分波段各高度的太阳直接辐射、向上、向下散射辐射与卫星测值(可见光、红外 1 通道)及能见度建立回归方程,复相关系数除了紫外 1 波段向上太阳辐射在 77% 左右,其他均在 85% 以上,说明用卫星资料反演晴空大气的太阳直接辐射、向上、向下散射辐射是可行的。

(2) 由另外的 36 个个例检验拟合方程,结果发现,近红外(除 850 hPa)、可见光、紫外 2 波段各高度上的太阳直接辐射、向下散射辐射、向上散射辐射拟合方程很稳定,紫外 1 波段大部分层次不稳定。

参考文献:

- [1] 傅炳珊,陈渭民,马 丽.利用中分辨率大气辐射计算模式 MODTRAN3 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
- [2] GRUBER A, WINSTON J S. Earth-atmosphere radiative heating based on NOAA scanning radiometer measurement [J]. Bulletin of American Meteorological Society, 1978, 59(12): 1570~1573
- [3] CHEN W M, FU B S, BIAN D. Estimating solar direct and diffuse radiation in a cloudless atmosphere from satellite

data[J]. *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds(SPIE)*. 1998, 3501: 591 ~ 603

- [4] 吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998
- [5] LACIS A, HASEN J. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere[J]. *J Atmos Sci*, 1974, 31(1): 118 ~ 133
- [6] ANGSTORM A. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere[J]. *Tellus*, 1961, 13(2): 214 ~ 221
- [7] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995
- [8] LECKNER B. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface elements of a model[J]. *Sol Energy*, 1987, 20(2): 143 ~ 150
- [9] MARGGRAF W A, GRIGGS M. Aircraft measurements and calculations of the total downward flux of solar radiation as a function of altitude[J]. *J Atmos Sci*, 1969, 26(3): 469 ~ 477

Estimating distribution of solar radiation in the clear sky in the eastern of China using satellite data

FU Bing-sang, CHEN Wei-min

(Department of Electronic Information and Applied Physics, NIM, Naging 210044)

Abstract: Based on discrete-ordinate-method of radiation transfer in multiple scattering and emitting layered media, computations of solar direct and scattered radiation have been done using the radiosonde observations in southeast of China. Values of solar direct and scattered radiation at different heights have been evaluated in spectral bands. The computed values are then used to set up the statistical relationships with simultaneous satellite observations in VIS/IR. Thus conveniently satellite-observed data in the VIS and IR channels may be used to estimate the spatial and temporal distribution of solar direct and scattered radiation in cloudless atmosphere.

Key words: solar direct radiation, upward solar scattered radiation, downward solar scattered radiation, spatial and temporal distribution