

申彦波. 近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述[J]. 气象, 2010, 36(9): 111-115.

近 20 年卫星遥感资料在我国 太阳能资源评估中的应用综述^{*}

申彦波

中国气象局风能太阳能资源评估中心, 北京 100081

提 要: 卫星遥感资料的应用是提高太阳能资源评估时空分辨率的有效手段。我国从 20 世纪 80 年代中后期开始将卫星遥感资料应用于太阳能资源(地面太阳总辐射、直接辐射和散射辐射)的计算和评估中, 至今已取得较大的进展, 主要表现在两个方面: (1) 卫星遥感资料的直接利用(统计反演法), (2) 卫星遥感资料的间接利用(物理反演法)。通过对近 20 余年我国在这两个方面研究成果的总结和论述, 说明卫星遥感资料在太阳能资源评估应用中的优点是提供了一种自上而下的、时空分辨率较高的观测资料, 可以弥补当前地面气象观测站的不足, 而难点则主要在于对云和气溶胶的处理还不够完善。

关键词: 太阳能资源评估, 卫星遥感资料, 辐射传输理论

Review of Applications of Satellite Remote Sensing Data to Solar Energy Resources Assessment in China in Recent 20 Years

SHEN Yanbo

Center for Wind and Solar Energy Resources Assessment of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract: The applications of satellite data are effective methods for solar energy resources assessment. These methods were applied in China from the 1980s at two aspects, one is using satellite remote sensing data directly (Statistical Methods), and the other is using satellite remote sensing data indirectly (Physical Methods). With the summary of these two aspects, the advantages and difficult points of the satellite data application in solar energy resources assessment are discussed. It is considered that the observation method from above to below and the high resolution are the main advantages. However, the calculations of the influences of cloud and aerosol on surface radiation are the two difficulties.

Key words: solar energy resources assessment, satellite remote sensing data, radiative transfer theory

引 言

太阳是地球表层最终的能量来源, 人们所利用的绝大部分能源本质上都来源于太阳。当前, 随着世界性能源危机的逐渐到来以及人类环保意识的提高, 太阳能这样一种清洁可再生的资源越来越受到重视。世界能源委员会(WEC)的研究报告认为^[1], 到 21 世纪下半叶, 可再生能源将获得迅速发展, 其中太阳能将成为一种非常重要的能源。

我国的太阳能资源非常丰富, 相比于欧美地区,

我国大部分区域都有着优越的太阳能资源条件。当前, 随着我国太阳能资源开发和利用的力度逐渐加大, 对太阳能资源的准确、详细评估显得越来越重要和迫切。

人们通常所说的太阳能资源往往是狭义的, 是指太阳以电磁波形式到达地面并可直接为人们所利用的辐射能量^[2]。因此, 对于太阳能资源的评估实质上就是计算到达地面的太阳辐射量。结合当前太阳能资源利用的实际情况, 本文只关注与到达地面的太阳总辐射、直接辐射和散射辐射有关的计算方法, 对于其他地面辐射分量, 如净辐射、反射辐射、辐

* 国家自然科学基金面上项目“人为热释放气候效应的数值模拟研究”(编号:40775008)资助
2008 年 10 月 4 日收稿; 2010 年 2 月 26 日收修定稿
作者: 申彦波, 主要从事太阳能资源评估及气候变化研究工作. Email: shenyb@cma.gov.cn

射平衡等,则不在论述范围之内。

尽管地面辐射观测资料可以比较精确地反映观测点及附近的太阳能资源状况,但由于全球大部分地区(包括我国)的地面辐射观测台站数量较少(截止 2006 年,我国的辐射观测站为 99 个)且分布不均^[3],研究者往往需要通过间接的方法来计算地面辐射量。20 世纪下半叶以来,随着卫星遥感观测技术的逐渐成熟^[4]及其观测资料在时空连续性方面的明显优势,越来越多的研究者开始将其应用于地面和大气的观测与反演^[5-8]。同时,随着辐射传输理论的发展^[9],有关地面太阳辐射量的计算中也开始越来越多地应用到卫星遥感资料。我国在这方面的研究从 20 世纪 80 年代中后期开始,至今已取得较大的进展,本文从卫星遥感资料的直接利用以及卫星遥感资料与辐射传输理论的结合两个方面分别进行论述。

1 卫星遥感资料的直接应用

关于卫星遥感资料在地面太阳辐射计算中的直接应用,其方法的基本原理来源于传统的气候学方法。所谓地面太阳辐射的气候学计算方法指的是通过气候学原理,利用与太阳辐射有关的其他地面气象台站观测的气候要素间接计算到达地面太阳辐射的方法。该方法的一般表达式为:

$$R = R_0 f(x_1, x_{2A}) \quad (1)$$

其中 R 是所要计算的到达地面的太阳辐射量,这里指总辐射、直接辐射或散射辐射; R_0 是计算每个辐射量时所用的初始值,如天文辐射、理想大气总辐射或晴天总辐射; x_1, x_2, \dots, x_n 是地面观测的气候学要素,可以为一个,也可以为多个,其函数形式可以为线性,也可以为非线性,视不同的方法而定,我国目前多采用的是日照百分率(由日照时数计算)或云量。此外,与所选取气候学要素的个数以及函数的次数相对应,式(1)中还会有若干个计算系数,可通过有地面太阳辐射观测的值回归得到^[10-16]。

根据上述思路,由卫星遥感资料直接或间接得到的与地面太阳辐射相关的物理量也可以用于计算到达地面的太阳辐射。

1.1 云量反演法

云量反演法的基本思路是首先利用卫星遥感资料反演得到云对太阳辐射的影响因子(可以是云量,也可以是由云量派生出的其他因子),然后利用传统的气候学方法计算到达地面的太阳辐射。

在早期的研究中首先根据红外和可见光云图来确定云量。周允华等^[17-18]和项月琴^[19]利用 TIROS-N 的卫星云图,直接根据地物目标确定经纬度,得到青藏高原地区 $2^\circ \times 2^\circ$ 的总云量分布,进而根据气候学基本原理建立其与地面总辐射的函数关系,计算得到青藏高原夏季的月旬总辐射分布。由于该方法在地理定位和云的判读方面存在着一定的人为因素,因此也给计算结果带来较大的误差;尽管如此,作为我国采用卫星资料进行地面辐射量计算的最早尝试,这种方法仍然为后来的研究提供了参考和启示。

国际卫星云气候计划 (ISCCP) 从 1984 年开始提供全球的总云量卫星遥感资料,该资料可以直接用于气候学方法中对地面总辐射的计算。翁笃鸣等^[20]通过经验拟合并根据边界条件对经验函数作调整,得到地面总辐射与 ISCCP 总云量的如下关系:

$$Q = Q_0(1 - cn^2) \quad (2)$$

式中 Q 是地面总辐射, Q_0 是晴天总辐射; c 是计算系数, n 即是总云量;并据此反演了青藏高原的地面总辐射场。由于 ISCCP 的总云量资料空间分辨率较低($2.5^\circ \times 2.5^\circ$),同时该方法中函数关系和经验系数的确定还有赖于地面观测资料,这都在很大程度上影响了计算结果的空间分辨率和精度。

利用卫星遥感资料还可以得到行星反射率,由于一定时间、空间尺度平均的行星反射率决定于平均云量(一定时间、空间尺度的地表和大气反射率均可以看作是不变的),所以行星反射率的观测值可以用来确定相应的云量因子,该因子即反映了云对于太阳辐射的遮蔽程度,因而也可采用它根据气候学方法计算地面太阳辐射。采用这种方法,钟强等^[21-22]建立了地面总辐射与行星反射率的相关关系:

$$Q = Q_0 [1 - (1 - K) \frac{\alpha_p - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}] \quad (3)$$

式中 K 是计算系数,是全天有云时的总辐射与晴天总辐射的比值; α_p 为行星反射率, α_{\min} 和 α_{\max} 分别是最小和最大行星反射率;并利用 Nimbus-7 的行星反射率观测资料估算了青藏高原地区月平均总辐射的分布。该方法的误差主要取决于行星反射率观测值的时空分辨率以及 α_{\min} 和 α_{\max} 的确定。

由于我国在青藏高原地区的地面气象观测站非常稀少,即便利用云量或日照百分率间接计算到达地面的太阳辐射,也无法完全满足气象/气候学方面不同研究的需要。因此,上述 3 种直接或间接利用卫星遥感的云量资料计算地面辐射的方法,其研究

的地域范围主要在青藏高原地区,而对于中东部地区目前还涉及较少;此外,由于青藏高原地区很少有直接辐射或散射辐射的观测,因此上述方法只是针对总辐射的计算,而对于直接辐射和散射辐射则并不适用。

1.2 统计反演法

上述云量反演法从本质上而言也属于应用卫星遥感资料进行地面太阳辐射量计算的统计反演法,而这里所说的则是狭义的,其基本思路是建立卫星测值与所要计算地面辐射量之间的回归关系,然后根据地面辐射量的观测值确定回归系数。采用这种方法的前提是要从理论上确定卫星测值与所要计算的地面辐射量之间存在着物理上的联系,只有这样,才能保证所建立的回归关系具有充分的物理根据。

气象卫星携带的辐射仪以多个波段测量地球反射的太阳辐射和发射的红外辐射。极轨气象卫星提供的资料可以用于计算全球大部分地区地面太阳辐射的季节变化,而静止气象卫星的观测资料则具有较高的时间分辨率,可用来估算某一固定区域比较连续的地面太阳辐射日变化。陈渭民等^[23-24]推导了静止卫星测量的可见光和红外辐射与到达地面太阳总辐射之间的物理关系,并据此选择统计因子,建立多个卫星资料估计地面总辐射的统计模式,经比较分析得到一个最佳的估计模式:

$$Q = a_0 C_{\text{VIS}} + a_1 C_{\text{VIS}}^2 + a_2 C_{\text{IR}} + a_3 C_{\text{IR}}^2 + a_4 \mu_0 + a_5 \mu_0^2 + a_6 \quad (4)$$

式中 C_{VIS} 和 C_{IR} 分别是卫星在可见光和红外光通道的编码计数值, μ_0 是太阳天顶角的余弦, a_0, a_1, \dots, a_6 是经验系数,根据地面辐射观测资料确定;通过多个地面站点的观测数据给出经验系数的分布图,对无站点处采用内差的方法确定,进而利用 GMS (Geostationary Meteorological Satellite) 卫星资料根据上式给出某一区域地面总辐射的空间分布。

对于直接辐射和散射辐射,同样可以采用上述方法建立与卫星测值之间的统计关系^[25-26]:

$$R_{D,S} = a_0 C_{\text{VIS}} + a_1 C_{\text{VIS}}^2 + a_2 C_{\text{IR}} + a_3 C_{\text{IR}}^2 + a_4 \mu + a_5 \mu^2 + a_6 VV + a_7 \quad (5)$$

式中 $R_{D,S}$ 是所要计算的直接辐射或散射辐射,相比于总辐射的计算,这里增加考虑了能见度项,即 VV 。此外,由于我国地面直接辐射和散射辐射观测资料的缺乏,在建立上述统计关系时,研究者是根据光的多次散射理论的离散纵标法,利用地面探空站的观测资料,计算出不同高度上的太阳直接辐射和向上、向下的散射辐射,因此,式(5)可用于确定不同

高度直接辐射和散射辐射的区域分布,尽管各高度层的误差会有所不同。

尽管以上两组统计关系均是在理论推导的基础上建立,具有比较可靠的物理依据,但其计算结果与地面观测资料相比仍然存在一定误差,误差主要来源于:(1)云的影响,这两组关系均是在晴天条件下建立,没有考虑云对太阳辐射的削弱作用,因此在天空有云时计算结果会有较大误差;(2)大气中的水汽和气溶胶的影响,尽管在式(5)中引入了能见度项,但由于它只是表征地面附近的水平能见度,因此气溶胶的影响也并没有被完全考虑;(3)卫星对地球的观测是在一个较大范围内进行的,而地面辐射的观测则是对单一的站点进行,由于地形的起伏,地表特性的不均匀,两者间会存在明显的差异。这些均使得该方法在推广使用中还存在着一定的局限性。

上述直接利用卫星遥感资料的两种方法在本质上与传统的气候学方法是一致的,区别只在于这里采用的是自上而下的卫星观测要素而不是自下而上的地面观测值,进而使得所用函数形式和回归系数的个数也有所不同。从计算的简便程度和精度来看,目前的这些计算方法并不优于气候学方法。但由于卫星遥感资料在空间连续性和分辨率方面通常都比地面观测资料优越,在我国太阳能资源丰富而地面观测台站稀疏的西部(尤其是青藏高原)地区,这些方法依然很值得进一步研究和利用。

2 卫星遥感资料的间接应用

太阳辐射在经过大气层到达地面的过程中,会受到云、气溶胶、水汽和各种气体成分的散射、吸收、反射等作用而被削弱,这些因素的时空变化在不同程度上使到达地面的太阳辐射发生变化^[9]。上述统计方法直接建立卫星测值和地面辐射量的相关关系,很难考虑这些复杂的物理过程,而这也正是统计方法在进行外推应用时计算误差的主要来源。现代辐射传输理论的发展为详细考虑太阳辐射在大气中的传输、削弱过程提供了基础。由于地面气象台站的资料在观测项目和空间(垂直和水平)分布上均无法为辐射传输理论的应用提供足够的初始资料,而卫星遥感的观测资料恰恰具有这两方面的优势,因此研究者们在应用辐射传输理论时往往需要利用卫星资料,这种根据辐射传输理论利用卫星遥感资料计算地面太阳辐射量的方法被称作物理反演法^[23]。

结合我国的研究者近几年在综合应用辐射传输理论和卫星遥感资料进行地面太阳辐射量(总辐射、

直接辐射和散射辐射)计算的研究成果,这里将其分为两个方面进行论述。

2.1 参数化方法

该方法是将各种因子对太阳辐射的影响程度,如大气分子的吸收和散射、水汽的吸收、气溶胶的散射和吸收等均通过国内外已有的参数化方法分别进行计算,然后将各计算结果与大气顶的太阳辐射相乘,即可近似得到晴天条件下的地面总辐射。例如,陈仁升等^[27]根据 Bird^[28]的研究,对晴空水平面直接辐射采用如下计算模型:

$$R_D = H_0 \mu_0 T_r T_a T_w T_o T_u / E_R \quad (6)$$

式中 H_0 为太阳常数, E_R 为日地距离校正系数; T_r 为瑞利散射传输函数, T_a 为气溶胶衰减函数, T_w 为水汽吸收函数, T_o 为臭氧吸收函数, T_u 为混合气体吸收函数,其中气溶胶、水汽和臭氧等函数的计算均需利用卫星遥感资料。对晴空水平面散射辐射的计算分为两个部分:

$$R_S = R_{as} + R_g \quad (7)$$

式中 R_{as} 表示天空散射,主要考虑气溶胶对太阳辐射的散射; R_g 是地气之间的多次散射,通过卫星遥感的地表反照率和天空反射率等来考虑。据此,晴空水平面太阳总辐射即可以将直接辐射和散射辐射求和得到:

$$R_G = R_D + R_S \quad (8)$$

对于有云的天气条件下,目前尚很难通过复杂的理论计算考虑云对太阳辐射的反射、散射和吸收等物理过程,通常都是通过总云量采用类似式(3)的方法进行简便的计算。

以上只是采用参数化方法将卫星遥感资料和辐射传输理论综合应用于地面辐射计算的一个例子,事实上,辐射传输理论发展到今天,其中对于各种影响因子的参数化方案均不止一种^[29-31],不同研究者会由于选取的具体方案不同而使计算结果有较大差异。此外,由于参数化计算中所需要的气溶胶、水汽、臭氧等卫星遥感资料目前还存在着时空分辨率和精度均不是很高的问题,因此而影响到计算结果的精度和计算方法的推广应用。

2.2 辐射传输模式的应用

现代辐射传输理论发展的一个重要方向就是建立辐射传输模式。利用国际上已有的辐射传输模式也可以进行地面太阳辐射量的计算,具体来说,就是将足够的大气信息(如温度、湿度、气压的探空资料等)作为初始值直接输入到模式中,运行之后即得到

地面以及各高度层的太阳辐射量。

MODTRAN 中分辨率大气辐射传输模式近年来应用较为广泛,该模式基于 Stamnes 等发展的离散纵标法,其中可以考虑云的影响,目前已经发展到第 4 版本。它利用无线电探空资料计算太阳和大气辐射,其精度已得到检验^[32]。由于我国探空资料比较有限且分布不均,研究者采用卫星资料来代替。NOAA 系列卫星上装载的泰罗斯业务垂直探测仪(TOVS)可以反演得到从地面到高空 10 hPa 的大气温度廓线和 3 个层次以上的水汽含量及臭氧含量,通过这些资料输入到 MODTRAN 模式中,傅炳珊等^[33-34]计算了我国东南地区晴空和有云情况下 5 个层次直接辐射和散射辐射的时空分布,并与由实测探空资料得到的结果进行了比较,发现晴空状况下两者基本一致,而有云时则存在一定误差。

法国大气科学实验室开发的 6S(The Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)模式在我国也有较多的应用,该模式主要用于模拟机载或机载遥测仪器在 250 nm 到 4000 nm 光谱区间无云条件下传感器应该接收到的辐射值,它具有高达 2.5 nm 的光谱分辨率,通过采用更为合理的近似和逐次迭代算法,在瑞利和大气气溶胶散射(包括多次散射)的计算方面有更高的精度^[35]。采用该模式,卢士庆等^[36]建立了晴空条件下 4 个时次的大气辐射参数背景底图,为反演陆地大气气溶胶光学厚度提供了基础;徐青山等^[37]计算了厦门海域大气层顶 550 nm 大气散射辐射的空间分布和 300~3000 nm 光谱区间的地面总辐射,所计算的地面总辐射与地面观测值具有较好的一致性。

此外,还有 DISORT 模式、Dedieu 模式以及逐线积分模式等也都可以用于太阳和大气辐射的计算^[37-38],而卫星遥感资料的选择和应用则是其中的关键。

上述两种方法本质上是一样的,只是前者需要研究者自行选择参数化方案并进行计算,而后者则是辐射传输模式已经设立好的。这些方法充分利用了卫星遥感资料在时空分布上的优点和辐射传输模式在物理依据上的充分性,计算结果可以弥补地面辐射观测站空间分布的不足,同时还可以实现地面辐射量的分光谱计算^[26],这对于太阳能资源的实际应用也是有用的。但由于这些方法的计算精度还依赖于卫星遥感资料的分辨率和准确性以及辐射传输模式和参数化方案自身的性能,尤其是在当前对于云和气溶胶辐射效应的处理还存在不足的情况下,计算结果还存在较大误差。

3 小 结

以上从统计反演法和物理反演法等两个方面简要回顾了近20年来卫星遥感资料在我国太阳能资源评估(地面太阳辐射量的计算)中的应用。总的来说,卫星遥感资料为地面太阳辐射量的计算提供了一种自上而下的、时空分辨率较高的观测资料,可以弥补当前地面气象观测站的不足^[39]。但由于目前资料本身的精度还不够高,对于云和气溶胶的处理方法也还不够完善,此外,上述各种方法还缺乏对地形遮蔽影响的考虑,因而导致目前对地面太阳辐射量计算结果的精度尚不够高,同时还使得上述各种方法不利于推广。尽管如此,卫星遥感资料的应用仍然是未来太阳能资源评估中的一个重要研究方向,有待于进一步深入的研究和探讨。

参考文献

- [1] World Energy Council. Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050[M]. London, 2007.
- [2] 大气科学辞典[M].北京:气象出版社,1994:608.
- [3] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface[J]. Science, 2005, 308:847-850.
- [4] 陈渭民. 卫星气象学[M].北京:气象出版社,2005.
- [5] 吴杨, 张佳华, 徐海明, 等. 卫星反演积雪信息的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(6):3-10.
- [6] 侯英雨, 王建林. 利用气象卫星资料估算全球作物总产研究[J]. 气象, 2005, 31(8):18-21.
- [7] 张兴赢, 张鹏, 方宗义, 等. 应用卫星遥感技术监测大气痕量气体的研究进展[J]. 气象, 2007, 33(7):3-14.
- [8] 侯英雨, 张佳华, 延昊, 等. 利用卫星遥感资料估算区域尺度空气温度[J]. 气象, 2010, 36(4):75-79.
- [9] 石广玉. 大气辐射学[M].北京:科学出版社,2007.
- [10] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报, 1964, 34(3):304-315.
- [11] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1980, 1(1):1-9.
- [12] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(一)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 1:15-24.
- [13] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 2:196-206.
- [14] 祝昌汉. 我国直接辐射的计算方法及分布特征[J]. 太阳能学报, 1985, 6(1):1-11.
- [15] 祝昌汉. 我国散射辐射的计算方法及其分布[J]. 太阳能学报, 1984, 5(3):242-249.
- [16] 武永利, 张洪涛, 田国珍, 等. 复杂地形下山西高原太阳潜在总辐射时空分布特征[J]. 气象, 2009, 35(5):74-82.
- [17] 周允华, 叶芳德, 周树秀, 等. 利用 TIROS-N 卫星云图对 1979 年夏季青藏高原云量分布的研究[J]. 高原气象, 1983, 2(1):39-51.
- [18] 周允华, 项月琴. 利用卫星云图对 1979 年夏季青藏高原月、旬辐射平衡场的研究[J]. 大气科学, 1985, 9(1):44-53.
- [19] 项月琴. 利用卫星云图对 1979 年夏季青藏高原月旬总辐射场的研究[J]. 太阳能学报, 1984, 5(1):12-27.
- [20] 翁笃鸣, 高庆先, 刘艳. 应用 ISCCP 云资料反演青藏高原地面总辐射场[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(1):41-46.
- [21] 钟强, 眭金娥. 利用 Nimbus-7 行星反射率观测资料估算青藏高原地区的总辐射[J]. 气象学报, 1989, 47(2):165-172.
- [22] 钟强. 青藏高原地区地气系统太阳辐射能收支的研究[J]. 高原气象, 1989, 8(1):1-12.
- [23] 陈渭民, 高庆先, 洪刚. 由 GMS 卫星资料获取我国夏季地表辐射收支[J]. 大气科学, 1997, 21(2):238-246.
- [24] 陈渭民, 缪英好, 高庆先. 由 GMS 资料估算夏季青藏高原地区地面总辐射[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(3):326-333.
- [25] 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.
- [26] 傅炳珊, 陈渭民. 用卫星资料计算我国东部地区晴空太阳辐射[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(2):178-185.
- [27] 陈仁升, 康尔泗, 李新, 等. 任意地形实际天气条件下小时入射短波辐射模型[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5):773-779.
- [28] Bird R E. A simple spectral model for direct normal and diffuse horizontal irradiance [J]. Solar Energy, 1984, 32:461-471.
- [29] 钱永甫. 散射辐射计算方法和气溶胶的气候效应[J]. 高原气象, 1991, 10(4):429-441.
- [30] 曹丽青, 高国栋. 太阳短波辐射分光谱计算模式[J]. 气象科学, 2004, 24(2):185-192.
- [31] 李云艳, 孙治安, 曾宪宁, 等. 晴天地表太阳辐射的参数化[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(4):512-518.
- [32] Kneizys F X, Robertson D C, Abreu L W, et al. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 Model [M]. North Andover: AFGL-TR Press, 1996: 140-147.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 卢士庆, 陈渭民, 高庆先. 使用 6S 模型由 GMS5 卫星资料反演陆地大气气溶胶光学厚度[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5):669-675.
- [37] 徐青山, 魏合理, 李正强, 等. 基于实测的大气参数计算厦门海域大气层顶大气散射辐射的角度分布[J]. 量子电子学报, 2003, 20(1):122-124.
- [38] 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.
- [39] 钟强. 地面辐射气候学研究进展——从卫星反演地面辐射能收支的若干问题[J]. 地球科学进展, 1996, 11(3):238-244.