

孙娴,姜创业,程路,等. 一个改进的理想大气太阳辐射计算模型[J]. 气象,2012,38(9):1053-1059.

# 一个改进的理想大气太阳辐射计算模型<sup>\* 1</sup>

孙 娴 姜创业 程 路 王娟敏 何晓媛

陕西省气候中心,西安 710015

**提 要:** 文章选取多个国外应用广泛、得到公认并且其主要的大气消减过程都有单独的透射率公式的宽广谱太阳辐射机理模型,在理想大气下将各模型的透射率( $T_R$ 、 $T_O$ 、 $T_{UM}$ )以及直接辐射、散射辐射与精确的谱模型 SMARTS 逐一进行严格的比较、评述。在此基础上选取模型精确度较高的 METSTAT 模型,对模型中的相对光学质量、臭氧吸收透射率、均一混合气体吸收透射率等存在的缺陷和不足进行逐一修正,获得一个改进的理想大气太阳辐射模型 METSTAT\_M。经过严格的比较, METSTAT\_M 模型优于其他模型。

**关键词:** 理想大气, 大气透射率, 光学质量, 太阳辐射模型

## An Improved Daily Solar Radiation Model in Ideal Atmosphere

SUN Xian JIANG Chuangye CHENG Lu WANG Juanmin HE Xiao'ai

Shaanxi Climate Centre, Xi'an 710015

**Abstract:** In this paper we select 10 broad spectrum solar radiation mechanism models widely used in foreign countries and achieved recognitions, and there are separate transmittance formulas in the main atmospheric attenuation process. The transmission ( $T_R$ ,  $T_O$ ,  $T_{UM}$ ), direct radiation, and diffuse radiation by selected models in relation to the exact spectrum model SMARTS are compared and reviewed strictly in an ideal atmosphere. On this basis, we then selected the model of high precision METSTAT, and corrected its defects and inadequacies regarding optical mass, transmission rate of ozone absorption and uniformly mixed gas absorption transmittance of the model, then an improved solar radiation model METSTAT\_M in an ideal atmosphere is obtained. After a rigorous comparison, it is demonstrated that the METSTAT\_M model is superior to other models.

**Key words:** ideal atmosphere, atmospheric transmissivity, optical mass, solar radiation models

## 引 言

太阳辐射是地球大气运动的最主要能源,是气候形成和演变过程中重要的外参数<sup>[1]</sup>,也是生态系统过程模型、水文模拟模型和生物物理模型研究中的重要输入参数<sup>[2-5]</sup>。太阳辐射通过大气时,要受到空气分子( $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{O}_2$  等)、水汽以及气溶胶质粒的吸收和散射而减弱<sup>[6]</sup>。由于大气中水汽和气溶胶含量的不确定性,因此,要准确描述辐射过程是比较困

难的。

近年来,大规模太阳能发电已成为国际上应对气候变化、调整能源结构的重要举措。高精度太阳能资源计算是太阳能资源评估的基础。同时,随着大规模集中并网光伏发电系统容量的增加,为了避免发电系统输出功率固有的间歇性和不可控等点对电网的冲击,有效减轻太阳能并网发电对电网的影响,开展了太阳能发电量预报技术研究。逐时、逐日等高时空分辨率的太阳能资源量计算和预测是太阳能发电量预报的基础。在太阳能资源计算中,起

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006036)和 2011 年陕西省科学技术研究发展计划项目(2011K09-23)共同资助  
2011 年 9 月 15 日收稿; 2012 年 5 月 29 日收修定稿  
第一作者:孙娴,主要从事气候资源和气候变化研究,Email:sunxian@163.com

始辐射数据是影响计算精度的重要基础数据,选择一个好的起始数据,对提高计算精度具有非常重要的意义。目前,大多采用天文辐射作为起始数据。由于我国地域广阔,海拔高度变化大(天顶角范围变化大、海拔高度差大)等原因,海拔高度对太阳辐射的影响天文辐射是无法考虑的。因此,王炳忠等<sup>[7]</sup>也提出利用理想大气辐射量作为计算太阳能资源的基础辐射量。理想大气(指不含水汽和气溶胶的干洁大气)对太阳辐射的影响(主要受到空气分子 Rayleigh 散射、O<sub>3</sub> 以及其他气体分子的选择吸收)是可以获得的。因此,理想大气太阳辐射成为高时空分辨率太阳辐射计算的重要起始数据,理想大气太阳辐射计算的准确与否直接影响着太阳辐射估算的精度。最早由 Moon 1940 年<sup>[8]</sup>提出的太阳辐射机理模型使得太阳辐射模型由统计模式向大气传输的物理过程模式发展。1975 年 McMaster University 的 Davies 等提出的 MAC 模型<sup>[9-10]</sup>是太阳辐射机理模型的代表。在近几年,太阳辐射机理模型的研究得到了广泛的发展和应用。比较有影响的是:得到广泛应用的 Bird Clear Sky Model<sup>[11]</sup>、Iqbal Model C<sup>[12]</sup>、被用于美国国家太阳辐射数据库建设的 METSTAT Model<sup>[13]</sup>,以及广泛应用于工程与建筑业的 ASHRAE Model<sup>[14]</sup>、用于制作《欧洲太阳辐射图集》的 Page Model<sup>[15]</sup>、多层透射率的 MLWT2<sup>[16-17]</sup>等模型。最复杂的太阳辐射模型是以 LOWTRAN<sup>[18]</sup>和 MODTRAN<sup>[19]</sup>为代表的频谱模型。Gueymard<sup>[17,20]</sup>曾对许多宽光谱太阳辐射模型是直接辐射模型进行理论、实验数据检验,结果表明许多模型由于不正确的透射率方程或者简单的假设造成模型缺陷或严重的局限性。这表明太阳辐射模型还有改进的空间。

本文在对宽广谱模型与精确的谱模型比较的基础上,提出一个修正的理想大气太阳辐射模型。

## 1 理想大气太阳辐射模型

### 1.1 宽光谱模型

宽光谱的大气辐射模型是指:研究对象为直接太阳光,它包含了波长为 0.2~4 μm 的波动,通常考虑的是整层大气,即将大气看成一层(Broad-band)。经过大量模型的初步筛选,选取了几个应用广泛、国外公认并且其主要的大气消减过程都有单独的透射率公式的宽光谱太阳辐射机理模型:Iqbal Model C<sup>[12]</sup>、METSTAT<sup>[13]</sup>、MMAC<sup>[9-10]</sup>、MLWT2<sup>[17]</sup>、Perrin<sup>[21]</sup>、REST<sup>[17]</sup>和 Yang 等<sup>[22]</sup>模型。表 1 是所选取的太阳辐射模型的结构,其详细的模型描述可参阅参考文献,这里不再分别给出。

在晴空条件下 METSTAT 模型基本上与 Iqbal Model C 是一致的。Rayleigh 分子散射、O<sub>3</sub> 吸收、均一混合气体吸收的透射率计算公式没变。标准大气压下的空气质量  $M_r$  据 Kasten 等<sup>[23]</sup>公式计算。经过严格的理论和观测数据检验,该模型具有较高精确度,属于 Gueymard 推荐的 7 个模型之一。因此,这里仅研究 METSTAT 模式。

在理想大气下,将各模型的大气透射率( $T_R$  为空气分子 Rayleigh 散射; $T_O$  为 O<sub>3</sub> 的吸收; $T_{UM}$  为均一混合气体的吸收)和直接辐射计算结果与基于 MODTRAN 基础上发展的、精确的谱模型 SMARTS<sup>[24-25]</sup>计算结果逐一进行严格的比较。据比较,SMARTS2 和 MODTRAN 取得很好的一致性:在天顶角  $Z < 66.5^\circ$  范围内,误差小于 1%。

所有的比较均以美国标准大气(U. S. Standard Atmosphere, USSA)作为参考大气,海拔高度分别取 0、1、2、3 和 4 km 5 个高度、天顶角的计算范围为 0~87°。

表 1 所选取太阳辐射模型的结构分析

Table 1 Title and structure of selected solar radiation models

模型名称	相对光学质量	$T_R$	$T_{UM}$	$T_O$	直接辐射模型	散射辐射模型
MMAC	单独	√	1	√	√	√
METSTAT	Kasten & Yang	√	√	√	√	√
Perrin	Kasten 1965	√		$T_{O+UM}$	√	√
MLWT2	MLWT		$T_{R+UM}$	√	√	无
Yang	Kasten 1965	√	√	√	√	√
REST	SMARTS	√	√	√	√	无

注:表中  $T_{O+UM}$  为 O<sub>3</sub> 与均一混合气体的吸收透射率, $T_{R+UM}$  为空气分子 Rayleigh 散射与均一混合气体的吸收透射率。

Note:  $T_{O+UM}$  and  $T_{R+UM}$  are transmittances for O<sub>3</sub> and mixed gas absorption, Rayleigh and mixed gas absorption, respectively.

在计算  $O_3$  的厚度时,为了更准确,引进订正系数  $C_i$ :

$$U_o = 0.3438C_i \quad (1)$$

$$C_i = 1 - 0.00898H \quad (2)$$

式中, $H$  为海拔高度(km); $U_o$  为  $O_3$  厚度(atm-cm)。

### 1.2 谱模型 SMARTS

SMARTS 是太阳大气辐射传输光谱模型(即 Simple Model for Atmospheric Transfer of Sunshine),它涵盖了具有不同波长间隔的全部太阳光谱区域(280~4000 nm),其中 280~400 nm 间的波长间隔为 0.5 nm,400~1700 nm 间的波长间隔为 1 nm,1705~4000 nm 间的波长间隔为 5 nm。各透射率、直射太阳辐射、散射辐射和总辐射由 SMARTS 代码计算获得(SMARTS 2.9.5,简称 SMARTS2)。SMARTS 代码可以选取 10 种不同的理想大气状况,本文选用其中的一个典型大气状况——标准美国大气状况。

### 1.3 模型性能评价指标

模型的性能评价指标包括:

均方差(Root Mean Square Error, RMSE)表明误差的离散程度。

$$RMSE = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (k_i - \hat{k}_i)^2 / n \right]} \quad (3)$$

平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(k_i - \hat{k}_i)| \quad (4)$$

平均相对误差绝对值(Mean Absolute Percentage Error, MAPE):表明估算相对误差的平均状况。

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{k_i - \hat{k}_i}{k_i} \right| \quad (5)$$

式中, $k_i$ 、 $\hat{k}_i$  分别为 SMARTS2 模型计算的参考值和其他模型的预测值。

## 2 模式比较

### 2.1 相对光学质量的比较

当考虑大气内发生的吸收和散射时,必须要知道辐射所通过的吸收和散射物质的总质量,这就是光学质量。在天顶角较大时,由于大气曲率和空气密度随高度的变化所引起的大气折射的影响就变得极为重要了。通常,相对光学质量都是采用近似的

经验公式计算。因此,相对光学质量计算公式的精确与否,直接关系到太阳辐射模型的准确度。

上述模型中涉及到的相对光学质量公式有:MMAC、Kasten<sup>[26]</sup>、Kasten & Yang 和 MLWT2,将其分别和 SMARTS 模型中的相对光学质量公式计算结果比较(图 1)。结果表明:当天顶角  $Z > 30^\circ$  时 MMAC 模型中相对光学质量计算有较大的误差(图略),Kasten 和 Kasten & Yang 的相对光学质量在  $Z > 80^\circ$  时稍有误差,MLWT、Kasten & Yang 和 SMARTS2 吻合得较好(REST 采用的是 SMARTS 中的相对光学质量公式),具有较高的精确度。

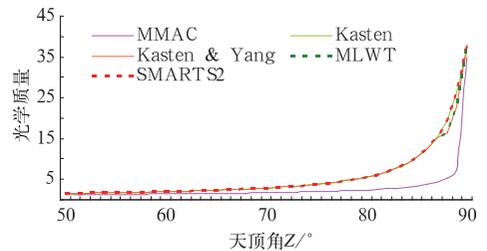


图 1 4 种相对光学质量计算结果与 SMARTS2 对比图

Fig. 1 The comparison of calculation results of 4 kinds of relative optical masses with SMARTS2

### 2.2 模型大气透射率的比较

#### 2.2.1 空气分子 Rayleigh 散射的透射率 $T_R$

大多数太阳辐射模型单独考虑空气分子 Rayleigh 散射透射率( $T_R$ ),但 MLWT2 将其和均一混合气体透射率  $T_{UM}$  结合起来计算的。

图 2 和表 2 是所选取模型中单独考虑  $T_R$  和谱

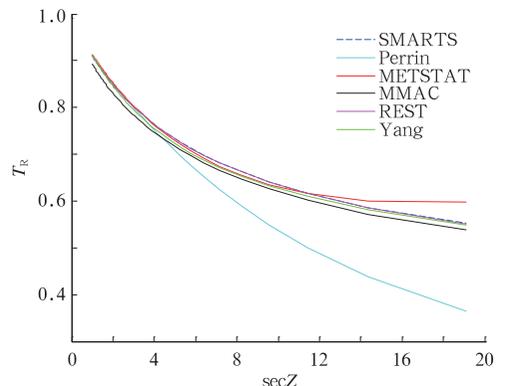


图 2 所有模型预测的 Rayleigh 分子散射大气透射率比较 ( $p=1013.25$  hPa, USSA)

Fig. 2 Transmittances for Rayleigh scattering predicted by all models ( $p=1013.25$  hPa, USSA)

表 2 所有模型预测的 Rayleigh 透射率  $T_R$  和 SMARTS2 模型比较的统计结果

Table 2 Performance statistics for Rayleigh transmittance relative to the reference model of SMARTS2

模型	Min	Max	RMSE	MAE	MAPE/%
SMARTS2	0.55189	0.94165	—	—	—
METSTAT	0.59694	0.94208	0.04	0.026	3.2
MMAC	0.53772	0.92506	0.06	0.047	5.6
Perrin	0.36447	0.93189	0.08	0.039	4.8
Yang	0.54964	0.94337	0.05	0.031	3.8
REST	0.55150	0.94158	0.04	0.029	3.6

模型 SMARTS2 计算的  $T_R$  进行比较的结果。表明：这几个模型  $T_R$  计算精度都较高，其 MAE 小于 0.05，除 MMAC 模型外，MAPE 均小于 5%，以 METSTAT 模型精度最高，其次是 REST、Yang 等模型。MMAC 的误差最大，Perrin 次之。它们对  $T_R$  估算严重低估，这主要是由于模型的局限性造成的，MMAC 的相对光学质量公式误差较大也是原因之一。

在天顶角  $Z > 85^\circ$  时 METSTAT 对  $T_R$  的估算偏大，这主要是由于该模型低估了 Rayleigh 散射对太阳短波辐射的影响，随着天顶角的增大误差也增大。

### 2.2.2 $O_3$ 分子透射率

Perrin 模型是将  $T_O$  和  $T_{UM}$  结合在一起考虑的，没有单独的  $T_O$  公式。表 3 和图 3 是所选取模型中考虑臭氧吸收的透射率  $T_O$  和谱模型 SMARTS2 计算的  $T_O$  进行比较的结果，各模型结果和 SMARTS2

表 3 所有模型预测的臭氧吸收透射率  $T_O$  和 SMARTS2 模型比较的统计结果

Table 3 Performance statistics for ozone absorption transmittance relative to the reference model of SMARTS2

模型	Min	Max	RMSE	MAE	MAPE/%
SMARTS2	0.90574	0.98056	—	—	—
METSTAT	0.87502	0.98254	0.004	0.004	0.41
MMAC	0.88172	0.97690	0.005	0.004	0.41
Yang	0.88799	0.98353	0.004	0.003	0.30
REST	0.92855	0.98053	0.003	0.001	0.10
MLWT2	0.93141	0.98057	0.004	0.001	0.10

的吻合较好，精确度都较高。以 REST 和 MLWT2 模型的预测精度最高，其次为 Yang 和 METSTAT。

从图 3 中也发现：当  $M_r > 5.0$  (即天顶角  $Z > 80^\circ$ ) 时，各模型与 SMARTS 的  $T_O$  误差开始偏大。随着  $M_r$  的增大，误差也增大。这主要是由于大多数模型在计算  $T_O$  时臭氧的相对光学质量 ( $M_o$ ) 采用空气的相对光学质量  $M_r$  来代替的。事实上，臭氧相对光学质量  $M_o$  比空气光学质量 ( $M_r$ ) 要小，尤其在天顶角较大时，它们之间的差异更大，例如，在天顶角  $Z = 90^\circ$  时， $M_o = 16.601$ ，而  $M_r = 38.136$ 。这是影响模型精确度的一个主要原因。

### 2.2.3 均一混合气体吸收的透射率 $T_{UM}$

表 4 和图 4 是具有中  $T_{UM}$  和 SMARTS2 进行比

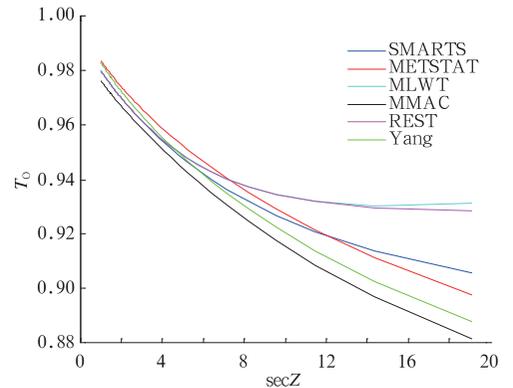
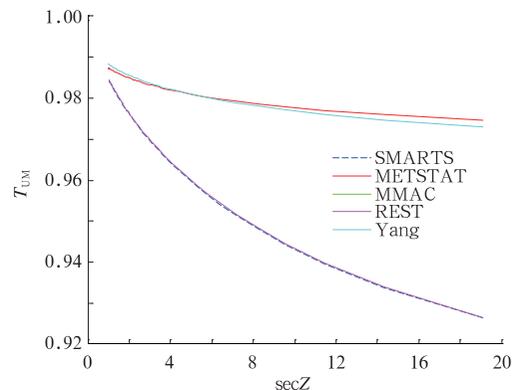
图 3 所有模型预测的  $O_3$  分子散射大气透射率比较 ( $p = 1013.25$  hPa, USSA)Fig. 3 Transmittances for ozone absorption predicted by all models ( $p = 1013.25$  hPa, USSA)图 4 所有模型预测的均一混合气体吸收透射率比较 ( $p = 1013.25$  hPa, USSA)Fig. 4 Transmittances for uniformly mixed gas predicted by all models ( $p = 1013.25$  hPa, USSA)

表 4 所有模型预测的均一混合其他吸收透射率  $T_{UM}$  和 SMARTS2 模型比较的统计结果

Table 4 Performance statistics for uniformly mixed gas transmittance relative to the reference model of SMARTS2

Model	Min	Max	RMSE	MAE	MAPE/%
SMARTS2	0.92639	0.98908	—	—	—
METSTAT	0.97458	0.98890	0.013	0.009	0.95
MMAC	1.0	1.0	0.027	0.024	2.48
Yang	0.97288	0.99040	0.013	0.0098	1.02
REST	0.92642	0.98905	0.0001	0.0001	0.01

较。MMAC 模型的  $T_{UM}$  固定为 1, MMAC 计算精度最差。除了 REST 模型和 SMARTS 吻合得很好, 精度较高, 其余模型的 RMSE 均大于 0.01。METSTAT、Yang 等模型由于主要考虑  $O_2$  和  $CO_2$  气体对短波辐射的吸收, 而 REST 充分考虑了  $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $N_2$  和  $N_2O$  等多种气体的吸收, 因此其  $T_{UM}$  较其他模型有所减小, 反映出均一混合气体对太阳短波辐射的影响增大。

### 3 理想大气太阳辐射模型修正模型

#### 3.1 大气透射率的修正

根据上述理想大气下宽光谱太阳辐射模型的透射率比较, 可以看出 REST 模型的透射率精确度最高, 预测效果最好。但是, 由于它的透射率公式是对谱模型透射率的拟合, 此模型的作者认为由于受比尔-布格-朗伯定律的限制, 当将其外推到宽光谱模型计算时, 不能保证总是很好<sup>[19]</sup>。所以选取应用广泛的、大气透射率精确度也很高的宽光谱模型 METSTAT 对其大气透射率进行改进。

模型修正是基于以下几点考虑:

(1) 相对光学质量的修正。虽然 METSTAT 模型中采用的相对光学质量的计算公式和 SMARTS 的计算结果较一致, 但在天顶角较大时仍略有偏差, 因此, 我们采用谱模型 SMARTS 中的相对光学质量, 进一步提高模型的计算精度。

(2) 臭氧吸收透射率的改进。在 METSTAT 模型中, 计算  $T_O$  采用空气相对光学质量替代臭氧的相对光学质量, 由于在天顶角较大时, 臭氧的相对

光学质量远远小于空气的相对光学质量, 是影响  $T_O$  精度的主要原因。因此, 在改进的模型中,  $T_O$  采用 SMARTS 模型中臭氧的相对光学质量<sup>[22]</sup> 计算, 减小模型的计算误差。

(3) 均一混合气体的吸收透射率的改进。由于 METSTAT 模型仅考虑了  $CO_2$  和  $O_2$  气体对太阳辐射的吸收。随着对太阳辐射的进一步认识, 基于最新的气体吸收谱线资料, 均一混合气体仅考虑  $CO_2$  和  $O_2$  对太阳辐射吸收的影响, 是远远不够的。因此, 在修正的模型中将采用 REST 模型考虑多种气体的吸收对太阳辐射的影响。

下面是修正的模型 METSTAT\_M 大气透射率公式:

$$T_R = e^{-0.0903M_a^{0.84}(1+M_a-M_a^{1.01})} \quad (6)$$

$$T_O = 1 - 0.1611X_O(1 + 139.48X_O)^{-0.3035} - 0.002715X_O(1 + 0.044X_O + 0.0003X_O^2)^{-1} \quad (7)$$

$$T_{UM} = e^{-0.0127M_a^{0.26}} \quad (8)$$

其中

$$M_a = M_r \left( \frac{p}{1013.25} \right) \quad (9)$$

$$M_O = [\cos Z + 1.0651Z^{0.6379} / (101.8 - Z)^{2.2694}]^{-1} \quad (10)$$

$$X_O = U_O M_O \quad (11)$$

式中,  $X_O$  为订正后的臭氧厚度, 单位(cm),  $U_O$  用公式(1)。  $M_r$  见文献[22]。  $M_a$  是无量纲, 为经气压订正后的空气质量。表 5 是 METSTAT\_M 与 SMARTS 模型透射率的比较。结合前面表 2 到表 4, 将 METSTAT\_M 和 METSTAT 模型的计算的大气透射率比较, 结果表明 METSTAT\_M 的大气透

表 5 METSTAT\_M 与 SMARTS 模型透射率比较的统计结果

Table 5 Performance statistics for Rayleigh transmittance of METSTAT\_M model relative to the other models

	Min	Max	RMSE	MAE	MAPE/%
$T_R$	0.59694	0.94207	0.025	0.024	2.98
$T_O$	0.90194	0.98254	0.0036	0.003	0.34
$T_{UM}$	0.92642	0.98905	0.0018	0.002	0.17

射率无论是在 RMSE 还是 MAE 上比 METSTAT 模型都有不同程度的提高,  $T_R$ 、 $T_{UM}$  和  $T_O$  的计算误差 MAPE 分别较原模型的 3.2%、0.41% 和 0.95% 提高到 2.98%、0.34% 和 0.17%, 明显优于原来的模型。可见, METSTAT\_M 模型精度是最高的, 且形式比 Yang、REST 等模型简单, 便于网格点上的海量数据的计算。

### 3.2 理想大气下直接辐射的比较

理想大气下总辐射:

$$E_t = E_b + E_d \quad (12)$$

$$E_b = E_0 T_R T_O T_{UM} \quad (13)$$

$$E_d = D_r + D_m \quad (14)$$

$$D_r = \frac{0.79 E_0 \cos Z T_O T_{UM} 0.5(1 - T_R)}{(1 - M_a + M_a^{1.02})} \quad (15)$$

$$D_m = \frac{(I_n \sin h_\theta + D_r) \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (16)$$

式中,  $E_t$ 、 $E_b$  和  $E_d$  分别为理想大气总辐射、直接辐射和散射辐射;  $D_r$  为空气分子 Rayleigh 散射;  $D_m$  为地表与大气间的多重散射;  $h_\theta$  为太阳高度角;  $\rho_g$  为地表反射率。大气透射率  $T_R$ 、 $T_{UM}$  和  $T_O$  应用修正的模型。

在理想大气下, 根据各模型计算的直接辐射和 SMARTS 的计算结果进行比较(表 6), 结果表明: 除了 REST 模型外, METSTAT\_M 模型的计算精度是最高的, 比改进前的 METSTAT 模型精度平均提高了近 50%。

将改进的散射辐射模型 METSTAT\_M 和 METSTAT 进行比较(表略), MAPE 由 7.51% 提高到 6.42%, 均方根误差(RMSE)为 3.33。

将改进模型与原模型的总辐射与 SMARTS 计算结果比较, METSTAT\_M 经计算, 平均相对误差(MAPE)为 0.65%, 均方根误差(RMSE)为 8.21, 而

METSTAT 的平均相对误差为 1.07%, 均方根误差(RMSE)为 12.84, 改进后的模型 METSTAT\_M 精度提高了许多。

## 4 讨论

本文选取多个国外应用广泛、得到公认并且其主要的大气消减过程都有单独的透射率公式的宽广谱太阳辐射机理模型, 在理想大气下将各模型的透射率( $T_R$ 、 $T_O$  和  $T_{UM}$ )以及直接辐射、散射辐射与精确的谱模型 SMARTS 逐一进行严格的比较; 并在此基础上选取模型精确度较高的 METSTAT 模型, 对模型中的相对光学质量、臭氧吸收透射率、均一混合气体吸收透射率等存在的缺陷和不足进行修正后, 获得一个改进的理想大气太阳辐射模型 METSTAT\_M。通过研究表明:

(1) 从相对光学质量比较结果来看, 当  $Z > 30^\circ$  时 MMAC 模型中相对光学质量计算有较大的误差, Kasten、Kasten & Yang 的相对光学质量在  $Z > 80^\circ$  时稍有误差, 总体是 MLWT、Kasten & Yang 和 SMARTS2 吻合的较好, 具有较高的精确度。

(2) 从大气透射率比较结果来看, 所选模型的  $T_R$  计算精度都较高, 以 REST 模型的精度最高; 所选模型的  $T_O$  计算结果和 SMARTS2 的吻合较好, 尤以 REST 和 MLWT2 模型的预测精度最高;  $T_{UM}$  计算结果以 REST 精度最好。

(3) 改进的理想大气太阳辐射模型 METSTAT\_M 的大气透射率无论是在 RMSE 还是 MAPE 上比 METSTAT 模型都有不同程度的提高,  $T_R$ 、 $T_{UM}$  和  $T_O$  的 MAPE 结果分别较原模型的 3.2%、0.41% 和 0.95% 提高到 2.98%、0.34% 和 0.17%。

(4) 改进的理想大气太阳辐射模型 METSTAT\_M 的直接辐射计算结果平均相对误差由 0.92% 提高到 0.48%, 散射辐射由 7.51% 提高到 6.42%, 总辐射由 1.07% 提高到 0.65%, 改进以后的模型精度提高了许多。

上述研究结果表明 METSTAT\_M 模型具有很高的精确度, 并且模型形式简单, 便于计算, 优于其他的模型。

## 参考文献

- [1] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997.

表 6 所有模型预测的直接辐射  $E_{bm}$  与 SMARTS 模型对比结果

Table 6 The direct radiation  $E_{bm}$  predicted by all models in comparison with SMARTS model

Model	RMSE	MAE	MAPE/%
METSTAT	10.543	9.977	0.92
MMAC	9.085	8.412	0.77
Perrin	27.249	14.120	1.51
Yang	8.581	8.567	0.77
REST	3.066	1.121	0.13
MLWT2	14.950	13.105	1.27
METSTAT_M	5.496	5.205	0.48

- [2] 章建成, 刘奇俊. GRAPES 模式不同云物理方案对短期气候模拟的影响[J]. 气象, 2006, 32(7): 3-12.
- [3] 张立祥, 李泽椿. 短波辐射对东北冷涡强对流影响的模拟分析[J]. 气象, 2008, 34(12): 3-10.
- [4] Thornton P E, Running S W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation[J]. Agric For Meteorol, 1999, 93: 211-228.
- [5] Liu D L, Scott B J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations[J]. Agric For Meteorol, 2001, 106: 41-59.
- [6] Lion K N. 大气辐射导论(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [7] 王炳忠, 申彦波. 实用太阳能光谱应用模式[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [8] Moon P. Proposed standard solar-radiation curves for engineering use[J]. Franklin Institute, 1940, 230: 583-617.
- [9] Davies J A, Schertzer W, Nunez M. Estimating global solar radiation[J]. Bound Layer Meteorol, 1975, 9: 33-52.
- [10] Davies J A, McKay D C. Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces[J]. Solar Energy, 1989, 43: 153-168.
- [11] Bird R E, Hulstrom R L. A simplified clear-sky model for the direct and diffuse insolation on horizontal surfaces[R]. US-SERI/TR-642-761, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 1981.
- [12] Iqbal M. An introduction to Solar radiation[M]. Toronto: Academic Press, 1983.
- [13] Maxwell E L. METSTAT-the solar radiation model used in the production of the NSRDB[J]. Solar Energy, 1998, 62(4): 263-279.
- [14] American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) handbook: HVAC applications[M]. Atlanta (GA): ASHRAE, 1999.
- [15] Page J K. Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK[R]. Report FCIBSE, 1997.
- [16] Gueymard C. Multilayer-weighted transmittance functions for use in broadband irradiance and turbidity calculations[M]//Campbell-Howe R, Wilkins-Crowder B, eds. Proceedings of Solar'96, Annual Conference of the American Solar Energy Society, 1996, AS-ES, Asheville, NC, 281-288.
- [17] Gueymard C. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment[J]. Solar Energy, 2003, 74: 355-379.
- [18] Kneizys F X, Shettle E P, Abreu L W, et al. User's Guide to LOWTRAN 7[G], AFGL-TR, 88-177.
- [19] Berk A, Bernstein L S, Robertson D C. MODTRAN. A Moderate Resolution Model for OWTRAN 7. GL-TR-89-0122 [C]. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom Air Force Base, Massachusetts, 1989.
- [20] Gueymard C. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part II: Validation with high-quality measurements[J]. Solar Energy, 2003, 74: 381-395.
- [21] Perrin de Brichambaut C, Vauge C. Le Gisement Solaire Evaluation de la ressource énergétique[M]. Paris Lavoisier, 1982.
- [22] Yang K, Huang G W, Tamai N. A hybrid model for estimating global solar radiation[J]. Solar Energy, 2001, 70: 13-22.
- [23] Kasten F, Young A T. Revised optical air mass tables and approximation formula[J]. Applied Optics, 1989, 28: 4735-4738.
- [24] Atwater M A, Ball J T. A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations[J]. Solar Energy, 1978, 21: 163-170.
- [25] Gueymard C. SMARTS2, Simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine; Algorithms and performance assessment [C]. Rep FSEC-PF-270-95, Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL.
- [26] Kasten F. A new table and approximation formula for the relative optical air mass[J]. Arch Meteorol Geophys, Bioklimatol, 1965, Ser(B14): 206-223.