

# 基于非均质大气模型的太阳辐射计算方法

曾理,程晓舫

(中国科学技术大学热科学和能源工程系,安徽合肥 230026)

**摘要:**提出一种非均质大气模型,推导得到不同海拔的地表或任意大气层高度的太阳辐射计算公式.通过分析将大气层视为水平的假设对太阳辐射计算带来的误差,推导得到减少这种误差的修正公式,并指出天顶角小于 $75^\circ$ 时,这种误差可忽略.1 d内海平面的太阳辐照度实测数据和此模型的计算数据基本相差不到5%,不同海拔的实测数据和此模型的计算数据也基本相差不到5%,验证了提出的非均质大气模型.

**关键词:**光谱分布;太阳辐射;比尔定律;海拔;非均质大气模型

**中图分类号:**TK511 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2015.06.010

**引用格式:** Zeng Li, Cheng Xiaofang. Calculation of solar radiation based on inhomogeneous atmosphere model [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(6): 490-496.

曾理,程晓舫. 基于非均质大气模型的太阳辐射计算方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(6): 490-496.

## Calculation of solar radiation based on inhomogeneous atmosphere model

ZENG Li, CHENG Xiaofang

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** An inhomogeneous atmosphere model was proposed to derive formulas which can be used to calculate single-wavelength solar radiation and solar irradiance at any height, from the Earth's surface to various levels of the atmosphere. Besides, the error from ignoring the curvature of the atmosphere was considered, and a correction method was given to reduce it. The validation results show that calculated values are closely consistent with measured data.

**Key words:** spectral distribution; solar irradiance; Beer's law; altitude; inhomogeneous atmosphere model

## 0 引言

太阳辐射是地球上一切活动的主要能量来源,其变化对农业生产、气候变化以及日常生活都有重要影响,故精确地计算太阳辐射在时间和空间的分布,有着十分重要的理论和实践意义.我国虽然现有

各种气象观测台站2 500多个,但进行太阳辐射观测的台站只有100多个<sup>[1]</sup>,专为太阳能利用进行的辐射测量几乎没有<sup>[2]</sup>,即实测资料远远不能满足研究的需要,故需要建立合适模型开展理论计算.

相关文献<sup>[1-5]</sup>提出的太阳辐射计算公式一般只适用于海平面或低海拔地方.本文为得到计算任意

海拔的太阳辐射公式,提出了非均质大气模型,即大气均匀混合<sup>[6]</sup>且大气分子浓度垂直分布,同一离地高度的浓度相同且浓度随高度变化.则由比尔定律可知,大气层的吸收系数  $K(x, \lambda) = A(\lambda)n(x)$ <sup>[7]</sup>,其中,  $n(x)$  是大气分子浓度,  $A(\lambda)$  是与分子浓度无关的常数(与波长相关),可由文献<sup>[8]</sup>中的海平面和外太空的光谱分布(如图 1)得到.这样就将计算复杂的吸收系数转化为计算分子浓度,从而得到通用的计算不同海拔的地表和任意大气层高度的太阳辐射公式.

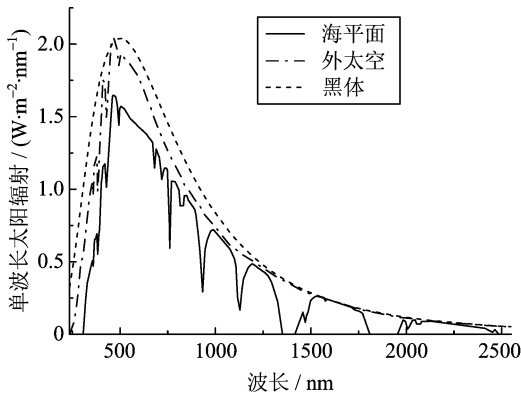


图 1 太阳辐射的光谱分布<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Spectral distribution of solar radiation<sup>[8]</sup>

## 1 太阳辐射计算公式

### 1.1 单波长太阳辐射

如图 2,天顶角为  $\varphi$  的一束光穿过大气层时为容积辐射,采用非均质大气模型,由比尔定律<sup>[7]</sup>可知:

$$dI(x, \lambda) = -K(x, \lambda)I(x, \lambda)dx \quad (1)$$

式中,  $I(x, \lambda)$  是  $x$  处的单波长太阳辐射,积分得

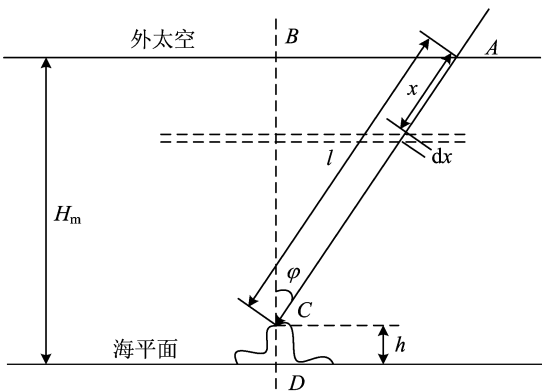


图 2 太阳光穿过大气层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sunlight through the atmosphere

$$I(l, \lambda) = I(0, \lambda) \cdot e^{-\int_0^l K(x, \lambda) dx} \quad (2)$$

式中,  $I(l, \lambda)$  和  $I(0, \lambda)$  是地表和大气层外单波长太阳辐射. 又由概率统计的方法导出浓度计算公式<sup>[9]</sup>:

$$n_r = n_{r_0} e^{\frac{GM}{RT} (\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0})}$$

式中,  $G$  是万有引力常数;  $M$  是地球质量;  $m$  是空气的平均分子量,  $m = 28.97 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $R$  是气体常数,  $R = 8.3144 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;  $T$  是计算位置的温度;  $r_0$  是地球半径,  $r_0 = 6\,371 \text{ km}$ ;  $n_{r_0}$  是海平面的大气分子浓度;  $g$  是重力加速度;  $r$  是计算位置到地心的距离,其计算公式为

$$r = r_0 + H_m - x \cos \varphi \quad (3)$$

式中,  $H_m$  是大气层高度. 又  $GM = gr_0^2$ , 故

$$n_r = n_{r_0} e^{\frac{mgr_0^2}{RT} (\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r})} \approx n_{r_0} e^{-\frac{mgz}{RT}} \quad (4)$$

式中,  $z = r - r_0 = H_m - x \cos \varphi$ , 是从海平面计算起的大气层高度. 则有

$$\int_0^l K(x, \lambda) dx = \int_0^l A(\lambda) n_{r_0} e^{-\frac{mgz}{RT} (H_m - x \cos \varphi)} dx = \frac{n_{r_0} R A(\lambda)}{mg \cos \varphi} \int_{H_m}^h \frac{T^2}{T - z} \frac{dT}{dz} dz \quad (5)$$

又有标准大气的温度计算公式<sup>[10]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} T &= T_0 - az, \quad z < 11 \text{ km}; \\ T &= 216.65 \text{ K}, \quad 11 \text{ km} \leq z \leq 20 \text{ km} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中,  $a = 6.5 \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ ;  $T_0 = 288.15 \text{ K}$ , 是海平面平均温度. 用  $n_{r_0+H_m}/n_{r_0} = e^{-mgH_m/(RT)}$  表示  $H_m$  的精确度, 代入  $T = 216.65 \text{ K}$ , 并取  $n_{r_0+H_m}/n_{r_0} = 5\%$ , 则  $H_m = 19 \text{ km}$ .

令  $f(z) = T^2 / (T - z dT/dz)$ , 则由中值定理可知, 存在  $\bar{z} \in (h, H_m)$ , 使

$$\int_0^l K(x, \lambda) dx = \frac{n_{r_0} R A(\lambda)}{mg \cos \varphi} f(\bar{z}) \int_{H_m}^h e^{-\frac{mgz}{RT}} dz = \frac{n_{r_0} T_0 R \cdot A(\lambda)}{mg \cos \varphi} \frac{f(\bar{z})}{T_0} e^{-\frac{mg h}{RT}} \quad (7)$$

式中,  $h$  是海拔高度. 令

$$C(\lambda) = n_{r_0} T_0 R A(\lambda) / (mg),$$

体现了波长对吸收系数的影响;  $D = e^{-1000mg/(RT_h)}$ ,  $F = f(\bar{z})/T_0 \approx T_h/T_0$ , 是与  $T_h$  (海拔为  $h$  处的温度) 有关的无量纲数. 将式(7)代入式(2), 得

$$I(l, \lambda) = I(0, \lambda) \cdot e^{-\frac{C(\lambda) \cdot F \cdot D^h / 1000}{\cos \varphi}} \quad (8)$$

若测得某种天气下某时刻  $t$  (对应天顶角  $\varphi_t$ ) 的单波长太阳辐射, 则可求出对应天气的  $C(\lambda)$  值, 从而得到对应天气的任意海拔的地表和任意大气层高度的单波长太阳辐射(光谱分布).

## 1.2 太阳辐照度

将式(1)对波长  $\lambda$  积分,得

$$\int_0^{\infty} dI(x, \lambda) d\lambda = - \int_0^{\infty} K(x, \lambda) I(x, \lambda) d\lambda dx$$

令  $a(x) = \int_0^{\infty} K(x, \lambda) I(x, \lambda) d\lambda / (\int_0^{\infty} I(x, \lambda) d\lambda)$ , 称

为全波长吸收系数;  $S(x) = \int_0^{\infty} I(x, \lambda) d\lambda$ , 是  $x$  处的全波长太阳辐射. 则上式可化简为

$$dS(x) = -a(x)S(x) dx \quad (9)$$

又由于存在  $\lambda_m \rightarrow \infty$ , 使

$$\int_0^{\infty} K(x, \lambda) I(x, \lambda) d\lambda = n(x) \int_0^{\lambda_m} A(\lambda) I(x, \lambda) d\lambda$$

则由中值定理可知, 存在  $\bar{\lambda} \in [0, \lambda_m]$ , 使

$$\int_0^{\lambda_m} A(\lambda) I(x, \lambda) d\lambda = A(\bar{\lambda}) \int_0^{\lambda_m} I(x, \lambda) d\lambda$$

则  $a(x) = n(x)A(\bar{\lambda}) = A \cdot n(x)$ , 所以由式(9)积分得到海拔为  $h$  处的全波长太阳辐射为

$$S_{\varphi, h} = S(0) \cdot e^{-\frac{C \cdot F \cdot D^h / 1000}{\cos \varphi}} \quad (10)$$

式中,  $C = n_{r_0} T_0 R A / (mg)$ ;  $S(0) = \int_0^{\infty} I(0, \lambda) d\lambda$ , 是外太空全波长太阳辐射. 计算表面法向与太阳光夹角为  $\theta$  (计算表面水平放置时  $\theta = \varphi$ ), 则接受到的太阳辐照度为

$$G_{\varphi, h} = S(0) \cos \theta \cdot e^{-\frac{C \cdot F \cdot D^h / 1000}{\cos \varphi}} \quad (11)$$

若测得海拔为  $h$  的地方某时刻  $t$  (对应天顶角  $\varphi_t$ ) 的太阳辐照度  $G_t$  (或全波长太阳辐射  $S_t$ ), 就可以求出对应天气的  $C$  值 (即  $C$  是与天气有关的参数). 从而得到任意海拔的地表和任意大气层高度的太阳辐照度.

用  $\Delta_s = (S(0) - S_{\varphi, 0}) / S(0) = 1 - e^{-C \cdot F \cdot D^{H_m} / 1000}$  来验证取  $n_{r_0+H_m} / n_{r_0} = 5\%$  的精确度, 代入  $T = 216.65 \text{ K}$  和  $H_m = 19 \text{ km}$ , 则  $\Delta_s = 0.69\%$ , 从而验证了取  $\Delta_n = 5\%$  计算得到的  $H_m = 19 \text{ km}$  的精确度很高. 若计算大于  $19 \text{ km}$  的大气层太阳辐照度, 也可用式(11).

## 1.3 不同时间的太阳辐射

考虑不同日期的地球轨道偏心率的影响, 则  $S(0) = S_c f$ . 其中,  $S_c = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  [11], 是太阳常数;  $f$  是考虑偏心率的修正系数, 其计算式 [11]:

$$f = 1 + 0.0344 \cos\left(2\pi \frac{n}{365}\right) \quad (12)$$

式中,  $n$  为日序, 即从元旦算起的天数.

又有天顶角和时间的转化公式 [12] 为

$$\cos \varphi = \sin L \sin \tau - \cos L \cos \tau \cos\left(\frac{\pi}{12} t\right) \quad (13)$$

式中,  $L$  为该点纬度;  $t$  为当地太阳时;  $\tau$  为太阳赤纬, 其计算公式为

$$\tau = \frac{23.45}{180} \pi \cos\left(2\pi \frac{n-173}{365}\right) \quad (14)$$

用式(13)计算天顶角, 则可以计算不同时间、纬度和季节的太阳辐射.

## 2 太阳辐射的修正公式

### 2.1 误差分析

图 2 将大气层看成水平的, 这导致式(3)中计算  $|EF|$  时有误差. 将图 2 变成图 3, 发现式(3)有两步近似: 首先, 在  $AC$  方向, 天顶角是变化的, 只有在地表时天顶角才是  $\varphi$ , 在  $x$  (对应大气层半径  $r$ ) 处是  $\psi$ , 其准确的计算公式为

$$\cos \psi = \sqrt{1 - \left(\frac{r_0 + h}{r}\right)^2 (\sin \varphi)^2} \quad (15)$$

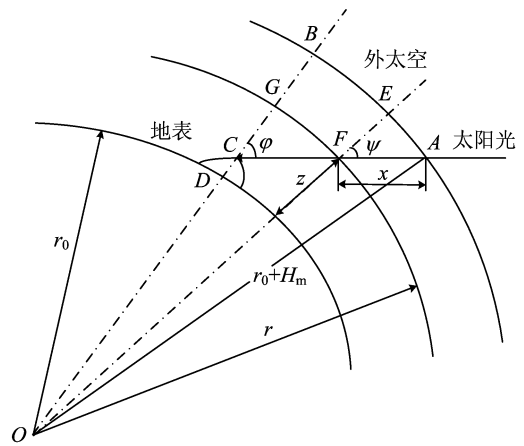


图 3 考虑了大气层的曲率的太阳辐射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solar radiation taking account of the curvature of the atmosphere

其次, 式(3)把  $AE$  弧线当成直线, 得到  $|EF| = x \cos \psi$ , 但  $|EF|$  的准确计算公式为

$$|EF| = r_0 + H_m + x \cos \psi - \sqrt{(r_0 + H_m)^2 - (x \sin \psi)^2} \quad (16)$$

设第一步近似(忽略天顶角的变化)引起的误差为  $\epsilon_1$ , 称为第一步误差, 其表达式为

$$\epsilon_1 = \frac{\cos \psi - \cos \varphi}{\cos \varphi} \quad (17)$$

由式(15)和式(17)可知,  $\epsilon_1$  随  $h$  增大而减小, 即在海平面时  $\epsilon_1$  最大. 画出海平面时的  $\epsilon_1$  随  $\varphi$  和  $r$  的变化图, 如图 4. 由图可知,  $\varphi$  或  $r$  越大, 则  $\epsilon_1$  越大. 当  $\varphi$

确定,  $r=r_0+H_m$  且在海平面时的误差最大, 设为  $\epsilon_{1m}$ , 其表达式为

$$\epsilon_{1m} = \frac{\sqrt{1-0.994(\sin \varphi)^2}}{\cos \varphi} - 1 \quad (18)$$

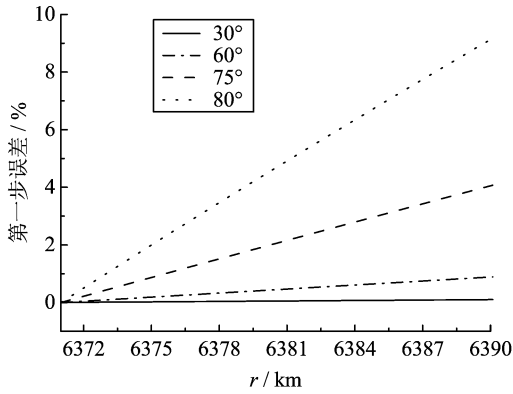


图 4 随  $r$  和天顶角变化的第一步误差图

Fig. 4 First error with the change of  $r$  and zenith angle

又从图 4 可知误差  $\epsilon_1$  与  $r$  几乎是线性关系, 则海平面时的第一步误差  $\epsilon_1$  可简化为

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} z \approx \epsilon_{1m} - \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} x \cos \varphi \quad (19)$$

设第二步近似(将  $AE$  弧线看成直线)引起的误差为  $\epsilon_2$ , 称为第二步误差, 其表达式为

$$\epsilon_2 = \frac{|EF| - x \cos \varphi}{x \cos \varphi} \quad (20)$$

画出海平面时的  $\epsilon_2$  随  $\psi$  和  $x$  的变化图, 如图 5。由图可知,  $\psi$  或  $x$  越大, 则  $\epsilon_2$  越大。当  $\psi=\varphi$  (点  $C$  和点  $F$  重合) 且在海平面时,  $x$  取最大值  $x_m$  ( $x_m = \sqrt{(r_0+H_m)^2 - (r_0 \sin \varphi)^2} - r_0 \cos \varphi$ ), 此时的误差  $\epsilon_2$  最大, 设为  $\epsilon_{2m}$ , 其表达式为

$$\epsilon_{2m} = \frac{H_m}{x_m \cos \varphi} - 1 \quad (21)$$

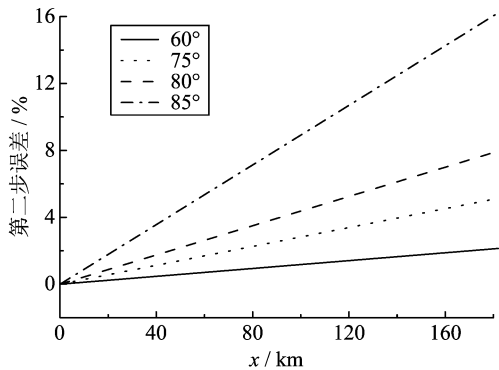


图 5 随  $x$  和天顶角变化的第二步误差图

Fig. 5 Second error with the change of  $x$  and zenith angle

又从图 5 可知误差与  $x$  也几乎是线性关系, 则海平面时的第二步误差  $\epsilon_2$  可简化为

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_{2m}}{x_m} x \quad (22)$$

### 2.2 修正公式

考虑误差  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$ , 得到  $|EF|$  的准确计算公式为

$$\begin{aligned} |EF| &= (1 + \epsilon_1)(1 + \epsilon_2)x \cos \varphi \approx \\ &(1 + \epsilon_1 + \epsilon_2)x \cos \varphi \approx \\ &\left(1 + \epsilon_{1m} - \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} x \cos \varphi + \frac{\epsilon_{2m}}{x_m} x\right)x \cos \varphi \quad (23) \end{aligned}$$

联立式(23)和式(5), 得到式(7)的修正式为

$$\int_0^1 K(x, \lambda) dx = \frac{n_{r_0} T_0 R \cdot A(\lambda)}{mg \cos \varphi} e^{-\frac{m \bar{z}}{kT h}} \times f(\bar{z}) \left(1 + \epsilon_{1m} - \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} \bar{x} \cos \varphi + \frac{\epsilon_{2m}}{x_m} \bar{x}\right) \quad (24)$$

比较式(7)和式(24), 得到  $F$  的修正公式为

$$\begin{aligned} F_\epsilon &= \frac{f(\bar{z})}{T_0} \left(1 + \epsilon_{1m} - \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} \bar{x} \cos \varphi + \frac{\epsilon_{2m}}{x_m} \bar{x}\right) \approx \\ &F \left(1 + \epsilon_{1m} - \frac{\epsilon_{1m}}{H_m} h + \frac{\epsilon_{2m}}{x_m \cos \varphi} h\right) \quad (25) \end{aligned}$$

由于在海平面时的误差最大, 则  $F_{\epsilon m} = 1 + \epsilon_{1m}$ , 故太阳辐照度的最大误差  $\epsilon_{Gm}$  为

$$\epsilon_{Gm} = \frac{e^{-C/\cos \varphi} - e^{-C(1+\epsilon_{1m})/\cos \varphi}}{e^{-C/\cos \varphi}} = 1 - e^{-\frac{C \epsilon_{1m}}{\cos \varphi}} \quad (26)$$

从图 6 可知, 若精度要求  $\epsilon_{Gm} \leq 3\%$ , 则  $\varphi \leq 75^\circ$ , 可取  $F_\epsilon = F$ 。

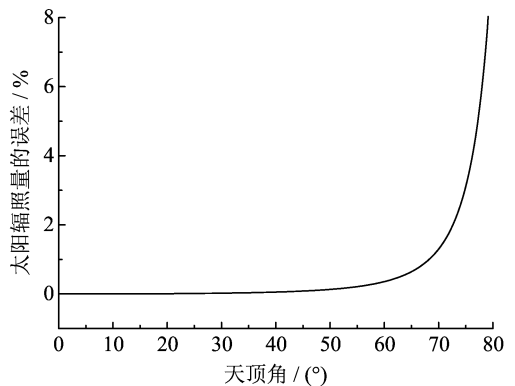


图 6 海平面太阳辐照度误差随天顶角的变化图

Fig. 6 The error of solar irradiance with the change of zenith angle

如图 7, 绘制海平面太阳辐射相对强度(相对于午时)随  $\varphi$  的变化图。从图中发现, 若精确度要求不高时, 当  $\varphi > 75^\circ$ , 可将太阳辐射线性处理。  $\varphi = 75^\circ$  和  $\varphi = 90^\circ$  对应的单波长太阳辐射为  $I_{75}$  和  $I_{90}$ , 则当  $\varphi >$

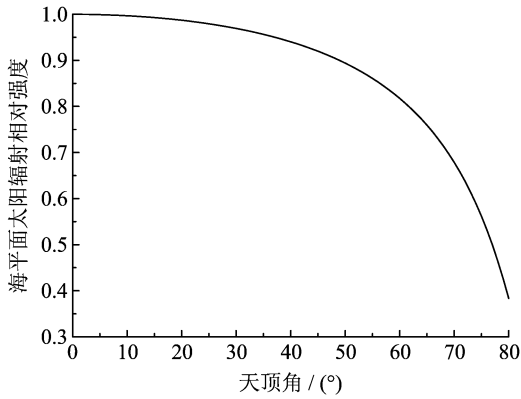
图 7 太阳辐射相对强度随  $\varphi$  的变化图

Fig. 7 The relative intensity of solar radiation at the sea level

75°, 单波长太阳辐射为

$$I(l, \lambda) = \frac{I_{90} - I_{75}}{15}(\varphi - 75^\circ) + I_{75} \quad (27)$$

$\varphi = 75^\circ$  和  $\varphi = 90^\circ$  对应的全波长太阳辐射分别为  $S_{75}$  和  $S_{90}$ , 则当  $\varphi > 75^\circ$ , 太阳辐射度为

$$G_{\varphi, h} = \left[ \frac{S_{90} - S_{75}}{15}(\varphi - 75^\circ) + S_{75} \right] \cos \theta \quad (28)$$

### 3 验证

#### 3.1 验证海平面的太阳辐射

为验证非均质大气模型的准确性, 引用文献[13]中日本名古屋(北纬 35°, 东经 137°)2007 年 6 月 16 日的晴天太阳辐照度实测数据和文献[3]中合肥(北纬 32°, 东经 117°)2006 年 8 月 27 日的多云天气太阳辐照度实测数据。

由标准测量条件<sup>[14]</sup>可知, 在海平面、晴天且  $\varphi = 48^\circ$  时,  $S = 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 求出晴天时  $C = 0.21$ ; 又由文献[3]中合肥的一个多云天气太阳辐照度实测

数据求出相应的多云天气时  $C = 0.53$ . 则可由式(11)算出本模型对应的太阳辐照度数据, 并绘制实测数据和计算数据的对比图, 如图 8 所示, 其中虚线是计算数据, 实线是实测数据. 由图可知, 计算数据和实测数据很接近, 误差基本小于 5%, 从而验证了本文提出的非均质大气假定的太阳辐射计算模型.

#### 3.2 验证海拔大于 0 时的太阳辐射

引用文献[15]中的国家气象信息中心 2003 年的气象辐射资料, 可以得到不同城市(不同海拔)的 7 月大气透明系数实际测量数据  $P_2$ , 如表 1 所示. 又  $P_2 = \sqrt{S_2/S_C}$ , 其中  $S_2$  是天顶角为  $60^\circ$  时的全波长太阳辐射<sup>[15]</sup>, 用表 1 前 3 个实测数据的平均值算出  $C = 0.46$ , 则可由式(10)算出本模型的大气透明系数数据, 并画出实测数据和本模型计算数据的对比图, 如图 9 所示. 由图可知, 实测数据在本模型的计算数据附近排列, 且计算数据和实测数据较为接近, 误差基本小于 5%, 从而验证了本文提出的非均质大气模型可以计算不同海拔的太阳辐射.

### 4 结论

本文基于非均质大气模型提出了一种新的太阳辐射(包括单波长太阳辐射和太阳辐照度)计算方法, 得到了通用的计算不同海拔的地表和任意大气层高度的太阳辐射公式. 式(8)给出一年内任意时间、任意地点的单波长太阳辐射(光谱分布)计算公式, 式(11)给出相应的太阳辐照度计算方法.

通过分析将大气层视为水平的假设带来的误差, 推导得到减少这种误差的修正公式, 即式(25).

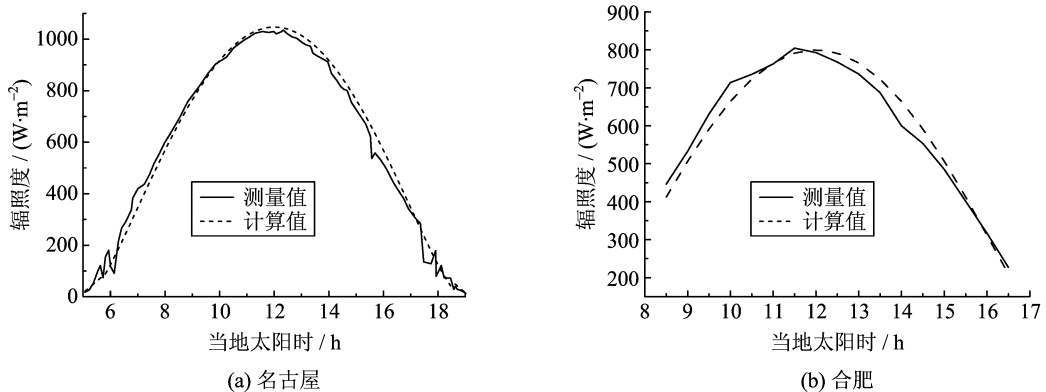


图 8 太阳辐照度的实测数据和计算数据的对比

Fig. 8 The comparison of measured data and calculated values of solar irradiance

表1 不同城市的7月大气透明系数实测数据<sup>[15]</sup>和本模型的计算数据  
Tab. 1 The actual measurement data<sup>[15]</sup> and calculated values of atmospheric transparency coefficient in different city in July

站台	海拔/m	测量值	计算值	误差/%	站台	海拔/m	测量值	计算值	误差/%
广州	6	0.629	0.630	0.19	库车	1099	0.700	0.667	4.71
杭州	42	0.638	0.631	1.03	银川	1112	0.703	0.667	5.06
长沙	45	0.623	0.632	1.37	喀什	1289	0.704	0.673	4.37
南宁	72	0.638	0.632	0.87	民勤	1367	0.688	0.676	1.78
福州	84	0.630	0.633	0.46	和田	1375	0.666	0.676	1.51
郑州	110	0.647	0.634	2.04	兰州	1517	0.652	0.681	4.39
赣州	124	0.643	0.634	1.36	腾冲	1648	0.698	0.685	1.89
河口	137	0.663	0.635	4.27	昆明	1891	0.678	0.693	2.14
桂林	162	0.659	0.636	3.56	威宁	2238	0.66	0.703	6.57
万县	186	0.596	0.636	6.78	西宁	2261	0.714	0.704	1.39
南充	298	0.603	0.640	6.17	格尔木	2808	0.703	0.721	2.51
西安	397	0.620	0.644	3.80	峨眉山	3047	0.762	0.728	4.49
侯马	434	0.694	0.645	7.08	昌都	3241	0.725	0.733	1.16
成都	506	0.598	0.647	8.24	拉萨	3658	0.762	0.745	2.18
遵义	844	0.645	0.659	2.11	玉树	3703	0.752	0.747	0.71
若羌	888	0.690	0.660	4.34	葛尔	4278	0.749	0.763	1.81
贵阳	1071	0.653	0.666	2.01	那曲	4507	0.776	0.769	0.93

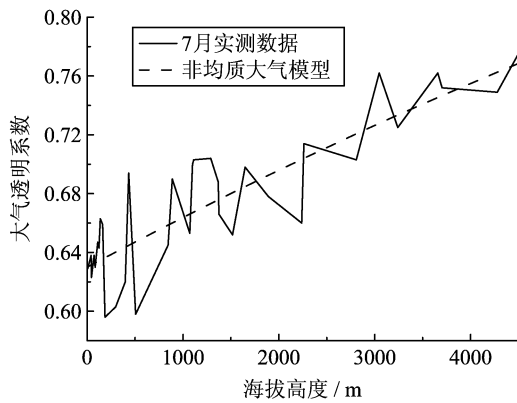


图9 大气透明系数计算数据和实测数据的对比图

Fig. 9 The comparison of measured data and calculated values of atmospheric transparency

并指出当 $\varphi \leq 75^\circ$ 时,可不做修正;当 $\varphi > 75^\circ$ 时,若精确度要求不高,可通过线性处理来简化修正公式。

1 d内海平面的太阳辐射度实测数据和本模型的计算数据基本相差不到5%,不同海拔的大气透明系数实测数据在本模型的计算数据附近排列,且本模型的计算数据和实测数据的误差基本小于5%,从而验证了本文提出的非均质大气模型可以计算不同海拔的地表和任意大气层高度的太阳辐射。

#### 参考文献(References)

[1] Tong Chengli, Zhang Wenju, Tang Yang, et al.

Estimation of daily solar radiation in China [J]. Agricultural Meteorology, 2005,26(3):165-169.

童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J].中国农业气象,2005,26(3):165-169.

[2] Qiu Guoquan, Xia Yanjun, Yang Hongyi. An optimized clear-day solar radiation model [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2001,22(4):456-460.

邱国全,夏艳君,杨鸿毅.晴天太阳辐射模型的优化计算[J].太阳能学报,2001,22(4):456-460.

[3] Lin Yuan. The model of the solar radiation energy's establishment and verification [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry (Natural Science), 2007,12(5):44-46.

林媛.太阳辐射强度模型的建立及验证[J].安徽建筑工业学院学报,2007,12(5):44-46.

[4] 王炳忠,莫月琴,杨云.现代气象辐射测量技术[M].北京:气象出版社,2008:26-30.

[5] Li Jinping, Song Aiguo. Compare of clear day solar radiation model of Beijing and Ashrae [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 1998,19(1):35-38.

李锦萍,宋爱国.北京晴天太阳辐射模型与ASHRAE模型比较[J].首都师范大学学报,1998,19(1):35-38.

[6] 石广玉.大气辐射学[M].北京:科学出版社,2007:4-9.

[7] 赵凯华,钟锡华.光学[M].北京:北京大学出版社,1984:228-234.

[8] 李申生.太阳物理学[M].北京:首都师范大学出版

- 社, 1996: 28-68.
- [9] Xue Datong. Studies of altitude distribution of Earth's atmosphere density [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(S1): 1-8.  
薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(增): 1-8.
- [10] 寿荣中, 何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京: 北京航空天文学出版社, 2004: 6-12.
- [11] 刘鉴民. 太阳能利用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 9-35.
- [12] Ding Lixing, Liu Xianping, Ji Jie, et al. The research of numerical calculation of solar projected area on building surface [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(12): 1 662-1 665.  
丁力行, 刘仙萍, 季杰, 等. 建筑表面太阳投影面积的数值计算研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(12): 1 662-1 665.
- [13] Xu Qingshan, Zang Haiyang, Bian Haihong. Establishment and feasibility researches of practical solar radiation model [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(8): 1 181-1 185.  
徐青山, 臧海洋, 卞海红. 太阳辐射实用模型的建立与可行性研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(8): 1 181-1 185.
- [14] 顾皓楠. 太阳模拟器 AM1.5 滤光片的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2012: 8-9.
- [15] 国家气象信息中心. 中国辐射日值数据集[DB/OL]. (2005-06-18) [2015-04-05] <http://cdc.nmic.cn/dataSetLogger.do?changeFlag=dataLogger&tpCat=RADI&titleName=%E6%B0%94%E8%B1%A1%E8%BE%90%E5%B0%84%E8%B5%84%E6%96%99>.

(上接第 459 页)

- [8] Fan J, Li R. Variable selection via nonconcave penalized likelihood and its oracle properties [J]. Journal of the American Statistical Association, 2001, 96(456): 1 348-1 360.
- [9] Chang Y C I. Sequential confidence regions of generalized linear models with adaptive designs [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2001, 93: 277-293.
- [10] Lu H B, Wang Z F, Wu Y H. Sequential estimate for generalized linear models with uncertain number of effective variables [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2015, 28(2): 424-438.
- [11] Chang Y C I. Sequential estimation in generalized linear models when covariates are subject to errors [J]. Metrika, 2011, 73: 93-120.
- [12] Chow Y S, Robbins H. On the asymptotic theory of fixed-width sequential confidence intervals for the mean [J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1965, 36(2): 457-462.
- [13] Chang Y C I. Strong consistency of maximum quasi-likelihood estimate in generalized linear models via a last time [J]. Statistics & Probability Letters, 1999, 45(3): 237-246.
- [14] Siegmund D. Sequential Analysis: Tests and Confidence Intervals [M]. New York: Springer-Verlag, 1985.
- [15] Whitehead J. The Design and Analysis of Sequential Clinical Trials [M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [16] Anscombe F J. Large sample theory of sequential estimation [J]. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1952, 48(4): 600-607.
- [17] Woodroffe M. Nonlinear Renewal Theory in Sequential Analysis [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1982.
- [18] Willems J, Saunders J, Hunt D, et al. Prevalence of coronary heart disease risk factors among rural blacks: A community based study [J]. Southern Medical Journal, 1997, 90(8): 814-820.
- [19] Lai T L, Wei C Z. Least squares estimates in stochastic regression models with applications to identification and control of dynamic systems [J]. The Annals of Statistics, 1982, 10(1): 154-166.