

## 广东省倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算

毛慧琴 杜尧东 刘爱君

(广东省气候与农业气象中心, 广州 510080)

**摘要** 本文根据广州 1961~2002 年历年各月的总辐射、直接辐射、散射辐射和日照百分率资料, 采用最小二乘法拟合太阳辐射总量计算公式经验系数  $a_0$ 、 $b_0$  以及散射辐射总量经验计算公式经验系数  $a_s$ 、 $b_s$ , 得到广东省不同方位变倾角倾斜面上月太阳辐射总量的气候学经验计算公式。同时结合广东省各县市气象站累年各月的日照百分率资料, 以  $45^\circ$  倾角为例, 分析了广东省东、西、南、北四个朝向的倾斜面上太阳辐射总量的年月分布特征。

**关键词:** 太阳辐射 倾斜面 气候学计算

**中图分类号:** P422.1 P468.0

**文献标识码:** A

地球表层 99.8% 的能量来源于太阳。太阳辐射是地球表层上的物理、生物和化学过程的主要能源, 如何充分利用太阳能这种洁净能源一直是人类孜孜以求的目标。随着农业学、生态学研究领域的拓展, 太阳辐射的空间分布特征日趋重要, 然而由于太阳辐射观测设备复杂, 成本费用高, 其观测密度远小于温度、降水等气象要素的观测密度(广东省仅广州和汕头两个站), 如何利用已有的辐射资料, 结合各地与太阳辐射总量紧密相关的气象参数(如日照百分率)进行当地太阳辐射总量的气候学计算是有效利用太阳能资源的基础。另外, 以往人们对太阳辐射总量的气候学研究多注重于水平面上的数值计算<sup>[1-3]</sup>, 但实际上不论是农作物叶片的生长还是太阳能利用装置均是倾斜的, 这使得倾斜面上的气候学计算更具实际意义。广东省地处低纬, 太阳能资源十分丰富, 探讨适用于广东省倾斜面上太阳总辐射的气候学计算以及了解其分布状况, 对评估我省农作物生产潜力、调整农业产业结构、改善生态环境是十分有意义的。

### 1 计算方法和资料说明

水平面上太阳辐射总量的气候学计算一般都采用 Angstrom 给出的经验公式<sup>[4]</sup>:

$$H = H_0(a + b \frac{n}{N}) \quad (1)$$

式中  $H$  和  $H_0$  分别表示水平面上太阳辐射总量日平均值和当地太阳天文辐射日平均值;  $\frac{n}{N}$  为当地的日照百分率的日平均值;  $a$ 、 $b$  是与当地气候条

件、大气透明状况等因素有关的经验系数。该经验公式由于能给出较满意的计算结果, 所以被许多专家学者所采用。

水平面上太阳辐射总量计算出来后, 可根据晴天模型<sup>[5]</sup>来计算倾斜面上太阳辐射总量, 其计算公式为:

$$H_t = R_b H_b + R_s H_d + \rho R_g H \quad (2)$$

式中  $H_t$  为斜面上太阳辐射;  $H_b$ 、 $H_d$  分别为水平面上太阳辐射的直射分量和散射分量;  $\rho$  为地面反射率, 一般取为 0.2<sup>[6]</sup>;  $R_b$ 、 $R_s$  和  $R_g$  分别为直射、散射和漫射分量的倾斜因子。

水平面上太阳散射辐射与总辐射、太阳天文辐射关系<sup>[7]</sup>为

$$H_d = H \left[ a_0 - b_0 \frac{H}{H_0} \right] \quad (3)$$

式中  $a_0$ 、 $b_0$  是经验系数。

则水平面上太阳辐射直射分量为:

$$H_b = H - H_d \quad (4)$$

直射倾斜因子  $R_b$ 、散射倾斜因子  $R_s$  和漫射倾斜因子  $R_g$  计算公式为:

$$R_s = (1 + \cos\beta)/2 \quad (5)$$

$$R_g = (1 - \cos\beta)/2 \quad (6)$$

$$R = \left[ \frac{\pi}{180} (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \sin\delta (\sin\varphi \cos\beta - \cos\varphi \sin\beta \cos\gamma) + \cos\delta (\sin\omega_{ss} - \sin\omega_{sr}) (\cos\varphi \cos\beta + \sin\varphi \sin\beta \cos\gamma) - (\cos\omega_{ss} - \cos\omega_{sr}) \cos\delta \sin\beta \cos\gamma \right] \quad (7)$$

式中  $\delta$ 、 $\varphi$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\omega_{ss}$ 、 $\omega_{sr}$  分别为太阳赤纬、地理纬

度、斜面倾角、斜面方位角、斜面上的日出和日落时角;  $\omega_s$  为水平面上的日落时角。斜面朝东、南、西、北四个方向时,  $\gamma$  分别取为  $-\pi/2, 0, \pi/2, \pi$ 。斜面上的日出和日落时角  $\omega_{ss}, \omega_{sr}$ , 一般与斜面倾角、地理纬度、斜面方位角等多个因素有关, 目前用得较多的是 Bushell<sup>[8]</sup> 提出的计算公式为:

$$\omega_{sr} = \min \left\{ \omega_s, \arccos \left[ \frac{a'}{D} \right] + \arcsin \left[ \frac{c'}{D} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\omega_{ss} = - \min \left\{ \omega_s, - \arccos \left[ - \frac{a'}{D} \right] + \arcsin \left[ \frac{c'}{D} \right] \right\} \quad (9)$$

$$a' = \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \quad (10)$$

$$b' = \cos \delta (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \quad (11)$$

$$c' = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \quad (12)$$

$$D = \sqrt{b'^2 + c'^2} \quad (13)$$

最后, 可得到倾角为  $\beta$ , 方位角为  $\gamma$  的倾斜面上太阳月辐射总量的气候学计算经验公式。

$$H_s = H_0 \left( a + b \frac{n}{N} \right) \left[ R_b \left( 1 - a_0 + b_0 \left( a + b \frac{n}{N} \right) \right) + R_s \left( a_0 - b_0 \frac{n}{N} \right) + \rho R_g \right] \quad (14)$$

由于汕头辐射站属于二级辐射站, 散射辐射和直接辐射资料不完整, 故本文采用广州 1961 ~ 2002 年历年各月的水平面上总辐射、直接辐射、散射辐射。所用资料还包括全省 86 个气象站的日照百分率资料、纬度资料。具体计算思路为:

(a) 由(5)、(6)、(7)式计算 86 站各地直射倾斜因子  $R_b$ 、散射倾斜因子  $R_s$  和漫射倾斜因子  $R_g$ 。

(b) 根据广州水平面上总辐射、直接辐射、散射辐射资料和日照百分率资料, 利用(2)式计算广

州倾角为  $\beta$ , 方位角为  $\gamma$  的倾斜面上太阳月辐射总量。

(c) 根据广州月天文辐射值、水平面上历年各月太阳辐射总量和日照百分率采用最小二乘法拟合(1)式中的经验系数  $a, b$ , 并进行统计检验。

(d) 采用最小二乘法计算出(3)式中经验系数  $a_0, b_0$ , 并进行统计检验。

(e) 根据全省其它 85 站的月天文辐射值、日照百分率资料, 计算出各地水平面上的水平面上的太阳总辐射、直接辐射、散射辐射。

(f) 根据(14)式计算全省其它 85 站倾角为  $\beta$ , 方位角为  $\gamma$  的倾斜面上太阳月辐射总量。

这样就可计算出广东省倾斜面上(任意倾角和任意方位角)各月太阳辐射总量。考虑到作物叶片的倾角平均大致为  $45^\circ$  的特点, 本文在经验公式的基础上, 分析  $45^\circ$  倾角东、西、南、北四个朝向的倾斜面上广东省太阳辐射总量的年月平均分布特征。

## 2 月太阳总辐射和散射辐射经验计算公式的建立和检验

根据广州 1961 ~ 2002 年历年各月的总辐射、散射辐射和日照百分率, 采用最小二乘法拟合出式(1)和式(3)中各月的经验系数。为了检验这些方程是否有意义, 计算了各月回归方程的复相关系数  $R$  和  $F$  值(表 1 和表 2)。可以看出, 广州各月的复相关系数均在 0.70 以上, 若取信度  $\alpha = 0.01$ ,  $F_{0.01} = 7.31$ , 所有  $F$  值大于  $F_{0.01}$ , 表明所有方程回归总体效果显著。

表 1 广州各月总辐射经验系数和统计检验

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
a	0.1367	0.1269	0.1041	0.1295	0.1585	0.1836	0.1858	0.1530	0.1940	0.1592	0.1885	0.1906
b	0.6194	0.6214	0.6866	0.5856	0.4899	0.4079	0.3950	0.4845	0.4370	0.5500	0.5210	0.5130
R	0.9506	0.9257	0.9660	0.8770	0.8566	0.8077	0.7649	0.8529	0.8453	0.8841	0.8675	0.8006
F	356.2	227.6	531.1	126.6	104.7	71.3	53.6	101.4	95.1	136.1	115.6	67.9

表 2 广州各月散射辐射经验系数和统计检验

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
$a_0$	0.1372	0.1276	0.1046	0.1299	0.1587	0.1836	0.1857	0.1527	0.1933	0.1584	0.1876	0.1905
$b_0$	0.6218	0.6248	0.6898	0.5871	0.4903	0.4079	0.3947	0.4836	0.4354	0.5471	0.5186	0.5127
R	0.8764	0.7627	0.8143	0.7161	0.8815	0.7089	0.7114	0.7291	0.7542	0.753	0.7823	0.8041
F	125.9	52.8	74.8	40.0	132.5	38.4	38.9	43.1	50.1	49.8	59.9	69.5

### 3 广东省倾斜面上太阳辐射总量的时间和空间分布特征

表3给出了乐昌(粤北)、广州(粤中)、南澳(粤东)、徐闻(粤西南)不同方位倾斜面上太阳总辐射的年变化。从表中全省各地倾斜面上太阳总辐射年变化趋势均以2月份最小,7月份最多,这是由于7月份副热带高压稳定控制广东,多晴好天气,2月份多低温阴雨天气的缘故。另外,从表中年总量值可以看出,朝北的斜面接受的太阳辐射总量最小,朝南的斜面接收的最多,朝东(西)斜面接收的太阳辐射总量居于两者之间,这是符合人们的常识的。但值得我们注意的是,在5月~8月这4个月中,东西朝向都要比朝南的斜面接收更多的太阳辐射总量,这是与我们的想象相悖的,

主要是因为在这几个月份太阳赤纬和太阳高度角较大不利于朝南的斜面接收<sup>[9]</sup>。

分析朝南向(图1)、东(西)向(图略)、北(图略)向45°倾角倾斜面上全省年太阳总辐射空间分布图可明显看出:全省各朝向上接受的太阳总辐射空间差异十分明显,东部和沿海多,北部、西部和中部少,粤东南澳、粤西南徐闻雷州地区为高值中心,粤北连山、粤西云浮地区为低值中心。以朝南倾斜面年太阳总辐射为例,南澳为 $4509 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,雷州半岛的雷州、徐闻年总辐射在 $4382 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,连山和云浮为两个低值中心,年太阳总辐射分别为 $3449.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $3603.0 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。龙川—紫金—河源—番禺—恩平—阳春一线以西、以北地区,朝南倾斜面上年太阳总辐射小于 $4000 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表3 广东省不同地区倾斜面上太阳总辐射的年变化(单位:  $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )

站名方位	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
北	142.1	142.4	164.0	205.7	257.9	273.4	320.1	318.7	284.8	246.8	183.0	152.3	2691.2
乐昌 东、西	189.8	171.4	183.6	232.0	298.3	326.6	412.0	407.5	361.5	322.7	271.6	243.3	3420.3
南	198.4	176.1	185.4	232.5	297.1	324.0	408.2	406.8	365.8	333.2	287.8	260.6	3475.9
北	166.6	156.3	181.8	206.9	271.7	294.5	330.5	313.1	292.9	272.8	200.8	167.9	2855.8
广州 东、西	240.2	190.6	206.5	233.4	319.6	361.1	432.6	397.0	374.7	368.5	311.1	284.7	3720.0
南	253.5	196.2	208.9	233.8	318.3	357.9	428.4	396.4	379.3	381.7	331.4	306.9	3792.7
北	182.8	198.4	246.4	280.3	306.1	319.8	354.7	346.6	318.3	298.6	206.8	170.5	3229.3
南澳 东、西	299.6	260.7	302.6	336.2	376.7	403.9	480.1	462.2	428.8	426.5	333.2	301.6	4412.1
南	320.7	270.9	307.9	337.1	374.6	399.9	475.0	461.3	435.0	444.2	356.4	326.4	4509.4
北	176.9	186.8	261.2	313.7	345.4	340.3	352.6	335.7	304.0	282.5	207.2	173.0	3279.3
徐闻 东、西	255.0	236.3	324.2	387.6	453.7	444.6	478.9	440.1	393.5	381.7	314.0	280.1	4389.7
南	269.2	244.3	330.1	388.8	450.5	439.6	473.7	439.3	398.5	395.4	333.6	300.5	4463.5

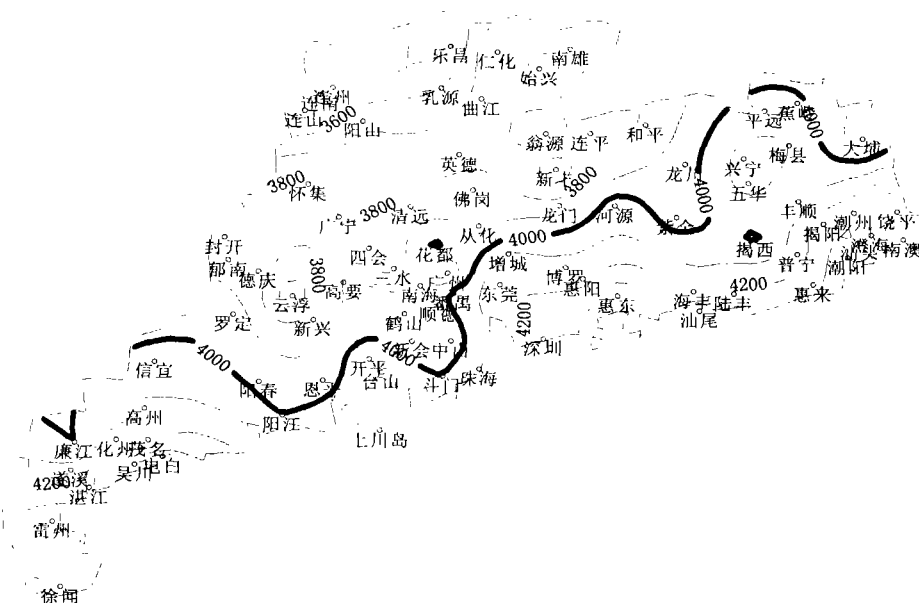


图1 广东省朝南倾斜面上太阳总辐射分布

#### 4 小 结

(1)用最小二乘法拟合出任意倾角和任意方位角的倾斜面上广东省太阳月辐射总量的计算公式。

(2)朝北的斜面接受的太阳辐射总量最小,朝南的斜面接收的最多,朝东(西)斜面接收的太阳辐射总量居于两者之间。在5~8月中,东西朝向比朝南的斜面接收更多的太阳辐射总量。

(3)全省各地东、西、南、北四个朝向45°倾角倾斜面上太阳总辐射年变化趋势均以2月份最小,7月份最多;年平均值空间差异十分明显,东部和沿海多,北部、西部和中部少,其中高值中心出现在粤东南澳和粤西南徐闻、雷州地区,低值中心出现在粤北连山和粤西云浮地区。

#### 参考文献

- 1 王炳忠,张富国,李立贤.我国的太阳能资源及其计算.太阳能学报,1980,1(1):1~9.
- 2 缪启龙,周锁铨,吴息.西部山区总辐射气候学计算及分布.南京气象学院学报,1994,17(2):177~182.
- 3 李晓文,李维亮,周秀骥.中国近30年太阳辐射状况研究.应用气象学报,1998,9(1):24~31.
- 4 李申生等.太阳能热利用导论.北京:高等教育出版社,1989.
- 5 Edward E, Anderson. Fundamentals of solar energy conversion. Addison - Wesley Publisher, 1983.
- 6 鹿世瑾. 华南气候. 北京:气象出版社,1990.
- 7 Edward E, Anderson. Fundamentals of solar energy conversion. Addison - Wesley Publisher, 1983.
- 8 Bushnell R H. A solution for sunrise and sunset hour angles on a tilted surface without a singularity at zero[J]. Solar Energy, 1982, 28(4): 359.
- 9 蒙冲南,郑宏飞等.变倾角倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算.广西科学院学报,1998,14(1):12~17.

## The Climatological Calculation of Total Solar Radiation on Slopes in Guangdong

Mao Huiqin Du Yaodong Liu Aijun

(Guangdong Climate and Agrometeorology, Guangzhou, 510080)

**Abstract** In this paper, an empirical formula calculating monthly total solar radiations on slopes with different directions is formulated based on the Fine Weather Model. With the monthly data of total solar radiation, incident radiation, scattered radiation and percentage of sunshine from 1961 to 2002 in Guangzhou, least square fitting methods are used to fit the empirical coefficients in the formula of total solar radiation and scattered radiation which was developed by Angstrom and Anderson. And the climatological formula for monthly total solar radiations on slopes at any angles and any directions in Guangdong was obtained. Furthermore, based on the empirical formula and the sunshine percentage over weather stations in Guangdong, taking the slopes with 45° angle facing south, north, east and west, respectively, as examples, the monthly and yearly total solar radiations in all parts of the province are calculated, and their spatial and temporal characteristics are analyzed.