

变倾角倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算^{*}

Calculation of Global Solar Radiation on Inclined Plane in Different Inclination Angles

蒙沛南 郑宏飞 何小荣
Meng Peinan Zheng Hongfei He Xiaorong

(广西大学物理系 南宁 530004)
(Dept. of Phys., Guangxi Univ., Nanning, 530004)

摘要 以水平面上的太阳辐射日总量的气候学计算公式为基础, 导出了不同方位变倾角倾斜面上的太阳辐射日总量的气候学计算公式, 并根据广西的太阳辐射数据, 选定南宁地区为实例, 计算了南宁地区斜面倾角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化, 方位角分别为 0° 、 45° 、 90° 等情况下, 斜面上的太阳辐射收入的旬平均日总量, 作出了 $H_t - d - s$ 三维图及它们的等值图。

关键词 气候学计算 太阳辐射总量 变倾角 倾斜面

Abstract Based on the climatology formulas of daily amount of solar radiation on horizontal plane, the climatology formulas of daily amount of solar radiation on inclined plane in different position and inclination angle are presented. Using the data of solar radiation of Guangxi and selecting Nanning region as a practical example, the ten-day mean daily amount of the solar radiation on an inclined plane is calculated for the inclination of inclined plane varying from 0° to 90° and its azimuth being 0° , 45° , 90° , respectively. $H_t - d - s$ three-dimension figures and its isograms are given out.

Key words climatology calculation, global solar radiation, variational inclination angle, inclined plane

中图法分类号 P 422.1

太阳辐射平均日总量的气候学计算, 是评估当地太阳能资源的重要参数, 也是太阳能利用工程中不可缺少的理论依据。以往人们对太阳辐射量的气候学计算多注重于水平面上的数值计算, 但绝大多数太阳能利用装置均是倾斜放置的。对倾斜面最佳倾角的研究, 国内外都

给出了不少报道^[1,2]。对不同朝向变倾角斜面的气候学计算也有报道^[3]。但由于斜面斜角与日历天数的关系密切,同时考查辐射量、日历天数和斜面倾角三者关系,往往需要进行相当繁琐的计算,所以对这方面进行研究的不多。

另外,目前国内外已有不少学者对朝南倾斜面作了不少研究^[3,4,5]。朝南的倾斜面计算起来较为简单,相关参数也相对较少。但对整年来看,特别是对低纬度地区,一年中有不少时间,例如夏季朝东、朝西和朝北 3 个方向的倾斜面上的太阳辐射收入往往比朝南的还多^[3]。因此,对朝东、朝西和朝北 3 个方向的倾斜面上的太阳辐射的数值计算也是很重要的。特别对在夏季需要最大辐射收入的太阳能利用装置,如太阳能空调装置、太阳能开水器和太阳能发电等更是如此。

本文正是基于上述讨论,以水平面上的太阳辐射日总量的气候学计算公式为基础,导出了不同方位变倾角倾斜面上的太阳辐射日总量的气候学计算公式,并根据广西的太阳辐射数据,选定南宁地区为实例,计算了南宁地区斜面倾角在 0°~ 90°之间变化,方位角分别为 $Q/2$ 、 $-Q/2$ 等情况下,斜面上的太阳辐射收入的旬平均日总量,作出了 $\bar{H}-d-s$ 三维图及它们的等值图。

1 倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算公式

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^[4]

$$\bar{H} = \bar{H}_0 [a + b(\bar{n}/\bar{N})] \quad (1)$$

式中 \bar{H} 和 \bar{H}_0 分别表示水平面上太阳辐射总量的日平均值和当地太阳天文辐射的日平均值; (\bar{n}/\bar{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。

根据晴天模型,倾斜面上太阳辐射总量的计算公式一般可写为:

$$\bar{H}_i = \bar{R}_b \bar{H}_0 + \bar{R}_s \bar{H}_d + d \bar{R}_g \bar{H} \quad (2)$$

式中 \bar{H}_i 为斜面上太阳辐射的日平均值; \bar{H}_b 、 \bar{H}_d 分别为平面上太阳辐射的直射分量和散射分量的日平均值; d 为地面反射率,一般取为 0.2; \bar{R}_b 、 \bar{R}_s 和 \bar{R}_g 分别为直射、散射和漫射分量的倾斜因子。分别可写为:

$$\bar{R}_b = (1 + \cos s) / 2 \quad (3)$$

$$\bar{R}_g = (1 - \cos s) / 2 \quad (4)$$

$$\bar{R}_s = \left\{ (\cos s \sin W \sin h) \frac{c}{180} (k_{ss} - k_{sr}) - (\sin W \cosh \sin s \cos V) \frac{c}{180} (k_{ss} - k_{sr}) + (\cos h \cos W \cos s) (\sin k_{ss} - \sin k_{sr}) + (\cos W \cos V \sin h \sin s) (\sin k_{ss} - \sin k_{sr}) - (\cos W \sin s \sin V) (\cos k_{ss} - \cos k_{sr}) \right\} / \left[2(\cosh \cos W \sin k_{ss} + \frac{c}{180} k_{ss} \sinh \sin W) \right] \quad (5)$$

式中 W 、 s 、 V 、 k_{ss} 、 k_{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; k_s 为平面上的日落时角。斜面朝东、南、西、北四个方向时, V 分别取为 $-c/2$ 、 Q 、 $c/2$ 、 c 。斜面上的日出和日落时角,一般与斜面倾角、地理纬度、斜面方位角等多个因素有关,因此是比较难于确定的。文献 [5] 给出为:

当 $V > 0$ 时,

$$k_{sr} = - \min \{ k_s, \arccos \left[(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / (A^2 + 1) \right] \} \quad (6)$$

$$k_{ss} = \min \{ k_s, \arccos \left[(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / (A^2 + 1) \right] \} \quad (7)$$

当 $V < 0$ 时,

$$k_{sr} = - \min \{k_s, \arccos [(AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / (A^2 + 1)]\} \quad (8)$$

$$k_{ss} = \min \{k_s, \arccos [(AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / (A^2 + 1)]\} \quad (9)$$

其中

$$A = \frac{\cosh \sin V \operatorname{tg} s + \sinh \operatorname{tg} V}{\sin V \operatorname{tg} s + \operatorname{tg} V} \quad (10)$$

$$B = \operatorname{tg} W \frac{\cosh \operatorname{tg} V - \sinh \sin V \operatorname{tg} s}{\operatorname{tg} V - \sin V \operatorname{tg} s} \quad (11)$$

当 $V = 0$ 时,

$$R_b = \frac{\cos(h - s) \cos W \sin k_s + \frac{C}{180} k_s \sin(h - s) \sin W}{\cosh \cos W \sin k_s + \frac{C}{180} k_s \sinh \sin W} \quad (12)$$

式中,

$$W = 23.45^\circ \sin \frac{360(284 + d)}{365} \quad (13)$$

d 为从元月 1 日算起的日历天数。

$$k_s = \arccos(-\operatorname{tg} h \operatorname{tg} W) \quad (14)$$

$$k_{ss} = \min \{k_s, \arccos [-\operatorname{tg}(h - s) \operatorname{tg} s]\} \quad (15)$$

根据以上公式, 如果再掌握当地水平面上的太阳辐射数据即可运算出当地任意倾斜面上的太阳辐射总量。

2 任意倾角斜面上太阳辐射总量的实际运算

从上面的理论分析, 我们可以看出, 对变倾角斜面上的气候学计算是相当复杂的, 计算工作量相当大, 而且它还跟当地的地理纬度有关, 使得具体的计算都只能适合某些规定的区域应用。所以我们在选择计算特例时, 充分考虑了用户的方便性。广西地处祖国的大西南, 纬度分布从 $21 \sim 26.5^\circ$, 大部地区都处在赤纬最大值 23.45 的南端。所以对于广西的大部分地区而言, 在夏季的许多时候太阳都是从我们的东北方向升起的。因而可以推断, 对变倾角倾斜面上的气候学计算, 一定具有更多的实际意义。南宁地区位于广西的中南部, 纬度小于最大赤纬, 加之南宁的太阳辐射资料较为丰富, 所以我们选择以南宁地区作为计算的特例是较为合适的。其计算结果可以大致推广用于广西及邻近省区。

根据广西的太阳辐射资料^[6], 我们很方便地可以查出水平面上 H_b , H 的旬平均日总量值。散射辐射旬平均日总量可由 $\bar{H}_d = \bar{H} - \bar{H}_b$ 计算得出。再查出其它相应参数, 据 (3) ~ (5) 式可以计算出 (2) 式中的 \bar{R}_b , \bar{R}_s 和 \bar{R}_g 等值, 代入 (2) 式即可求出 \bar{H} 。

由于计算工作量十分巨大, 我们为此编程输入计算机进行计算。日历天数取 $5d$ 为一步长, 倾角以变 5° 为一个计算点, 最后得到约 5256 个数据。值得指出的是, 我们虽是计算倾斜面上的太阳辐射总量, 但由于没有指明斜面的大小 (应用时一般很小), 所以在运算倾斜面上的太阳升起和落下时角时, 有时会出现不合理现象, 应据物理意义纠正之。另外, 计算机不能识别极限状况, 应事先设定之, 如当 $V = c$ 时, A , B , 那么 $\arccos [(AB \pm \sqrt{A^2 - B^2 + 1}) / (A^2 + 1)]$ 应取 $\arccos(B/A)$, 等等。

3 计算结果及分析

我们把得到的 5256 个数据与其它文献的结果比较^[3],发现我们的计算结果还是相当准确和可靠的。由于数据太多,我们不能一一列出,选择了比较典型的一些数据列入表 1,供用户查用。同时还给出了 $H_t - d - s$ 的三维图及其等值图如图 1-3 所示。

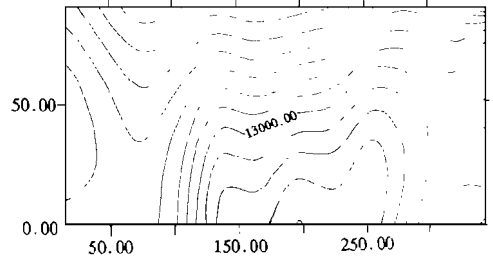
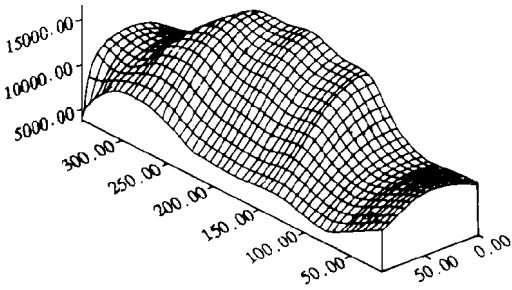


图 1 斜面朝南时的 $H_t - d - s$ 的三维图及其等值图 ($V = 0^\circ$)

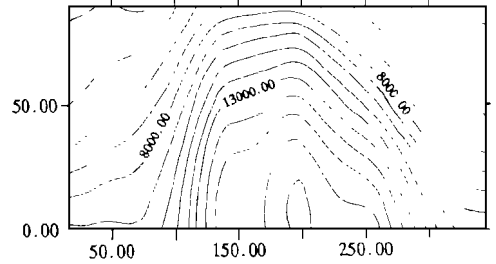
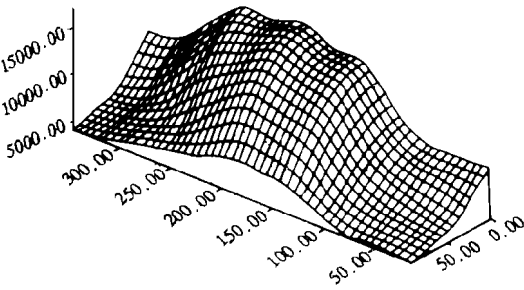


图 2 斜面朝北时的 $H_t - d - s$ 的三维图及其等值图 ($V = 180^\circ$)

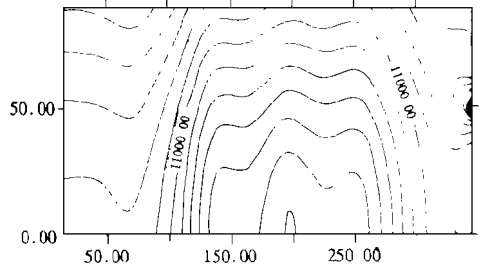
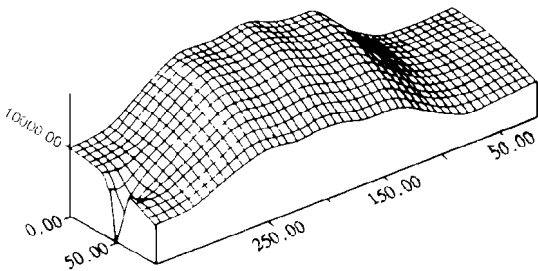


图 3 斜面朝东西向时的 $H_t - d - s$ 的三维图及其等值图

从计算的结果可以看出,当斜面朝东、朝西向时,所接收到的太阳辐射总量一般较差,这显然是东西朝向不能接收全天的太阳辐射的原因。朝东向只能接收到上半日的太阳辐射,而朝西向则只能接收后半日的太阳辐射。然而,在 5 月~8 月这四个月间,还有在 4 月及 9 月份且倾角较大时,东西朝向都要比朝南的斜面接收更多的太阳总量。这是与我们的想象相悖的。

表 1 斜面上太阳辐射值随倾角及日历天数的变化

d	S	\bar{H}_1 (kJ/m ²)			d	S	\bar{H}_1 (kJ/m ²)		
		r = ± 90°	r = 0°	r = 180°			r = ± 90°	r = 0°	r = 180°
15	0	9227	9227	9227	45	0	9222	9222	9222
	10	9184	9924	8365		10	9174	9605	8683
	20	9054	10433	7363		20	9029	9819	8005
	30	8833	10740	6251		30	8789	9860	7207
	40	8524	10836	5247		40	8458	9725	6315
	50	8128	10717	5010		50	8041	9419	5525
	60	7655	10387	4735		60	7548	8951	5205
	70	7114	9856	4430		70	6993	8335	4851
	80	6520	9140	4106		80	6389	7589	4474
	90	5888	8261	3772		90	5754	6738	4085
75	0	9167	9167	9167	105	0	11342	11342	11342
	10	9115	9300	8886		10	11274	11326	11171
	20	8960	9282	8466		20	11075	11124	10817
	30	8706	9112	7920		30	10749	10745	10291
	40	8358	8796	7263		40	10307	10197	9608
	50	7926	8344	6517		50	9761	9499	8790
	60	7421	7770	5704		60	9126	8673	7861
	70	6856	7090	5152		70	8420	7745	6849
	80	6248	6326	4736		80	7662	6747	5786
	90	5615	5500	4307		90	6877	5720	5144
135	0	15443	15443	15443	165	0	15649	15649	15649
	10	15348	15171	15447		10	15549	15226	15800
	20	15066	14647	15170		20	15257	14561	15658
	30	14609	13886	14620		30	14785	13670	15226
	40	13992	12911	13816		40	14149	12581	14581
	50	13234	11754	12780		50	13371	11333	13555
	60	12357	10458	11545		60	12473	9971	12366
	70	11386	9072	10147		70	11482	8559	10987
	80	10349	7667	8631		80	10427	7190	9461
	90	9278	6378	6550		90	9340	6126	7015
195	0	17128	17128	17128	225	0	16321	16321	16321
	10	17019	16676	17268		10	16222	16156	16179
	20	16701	15942	17072		20	15931	15697	15728
	30	16186	14947	16546		30	15458	14958	14980
	40	15494	13720	15706		40	14819	13960	13959
	50	14646	12303	14578		50	14030	12736	12695
	60	13667	10751	13195		60	13114	11327	11227
	70	12585	9132	11600		70	12097	9785	9599
	80	11433	7548	9841		80	11008	8177	7862
	90	10243	6241	7082		90	9878	6610	5974
255	0	16473	16473	16473	285	0	13537	13537	13537
	10	16381	16764	15855		10	13469	14182	12632
	20	16109	16720	14928		20	13262	14548	11495
	30	15662	16342	13721		30	12919	14624	10610
	40	15051	15642	12270		40	12443	14408	8669
	50	14290	14640	10620		50	11843	13905	7066
	60	13397	13368	8819		60	11131	13131	6136
	70	12394	11865	6924		70	10324	12110	5775
	80	11310	10177	6114		80	9444	10872	5390
	90	10174	8360	5697		90	8515	9457	4993
315	0	10281	10281	10281	345	0	9761	9761	9761
	10	10232	10973	9401		10	9719	10674	8665
	20	10083	11458	8363		20	9589	11376	7420
	30	9833	11721	7196		30	9367	11847	6064
	40	9482	11753	5936		40	9052	12071	5124
	50	9037	11555	5487		50	8646	12043	4903
	60	8506	11132	5189		60	8157	11763	4646
	70	7900	10495	4859		70	7593	11239	4363
	80	7236	9667	4507		80	6970	10487	4060
	90	6531	8670	4144		90	6304	3748	3748

主要是因为在这几个月份, 赤纬较大, 太阳高度角较大而且是从南宁地区的北方划过天空的, 因而不利于朝南的斜面接收。这是值得我们注意。另外, 在 5 月 ~ 8 月这 4 个月中, 甚至朝北的斜面都要比朝南的斜面接收到更多的太阳辐射量。这对某些主要在夏季使用的太阳能利用装置来说是要特别引起注意的。若以一年所接收到的总太阳辐射量来说, 朝南的倾斜面占有绝对的优势。特别在冬、秋季及初春时期, 其它朝向的斜面更是无法比拟。这是与传统的认为是相符的。

有了上述数据和图表, 我们即可对斜面的最佳朝向及最佳倾角进行选择。一般地说, 秋冬朝南偏西为好, 倾角在 35 左右为佳。而在夏季, 斜面朝向并不特别重要, 关键其倾角要小, 对朝南来说, 倾角在 0°~ 10° 为佳。2 月、3 月、9 月及 10 月这 4 个月中, 斜面朝南最好, 倾角设计在当地纬度附近最佳。特别是, 有了本文的计算数据, 对那些经常可调方位角和倾斜角的太阳能利用装置, 我们可以根据时间、季节的变化, 经常调整到最佳方位及最佳倾角的附近, 这无疑会大大提高其太阳能的利用效率。

4 结束语

本文对变倾角斜面上太阳辐射总量的气候学计算, 主要归结为对 \bar{R}_b 的计算。由于斜面上的大小、高度等未加确定, 所以在对 R_b 的计算中所出现的一些不合理情况, 需要用物理意义上的解释进行校正。

本文的计算结果给实际工作中选择集热器的方位和最佳倾角提供了数学依据。由于夏季斜面上的太阳辐射收入随斜面倾角的变化很明显, 所以该时期要特别注意我们所设计的集热器的倾角, 以获得最大的太阳能收入。

参考文献

- 1 Kem J. On the optimum tilt of a solar collector, 1977, 19: 583.
- 2 朱超群等. 我国最佳倾角的计算及其变化. 1992, 13 (1).
- 3 蒙沛南. 广西主要城市倾斜面上太阳辐射总量的气候学计算. 广西科学, 1995, 2 (2): 18~ 20.
- 4 李申生等. 太阳能热利用导论. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- 5 K R 康德拉捷夫. 太阳辐射能. 北京: 科学出版社, 1962.
- 6 Angstrom A. Solar and terrestrial radiation, Q J Roy Met Soc. 1924, 50: 121.
- 7 Klein S A, Calculation of monthly average insolation of tilted surfaces a review, Solar Energy, 1977, 19: 325~ 329.
- 8 广西气象科学研究所, 广西太阳辐射. 1982.