

墙面太阳辐照的理论计算与模式估计

——以上海为例

朱 志 辉

(中国科学院地理研究所)

提 要

倾斜面和墙面的太阳辐射和日照状况对于农林生态、建筑环境工程以及城市气候研究具有重要意义。为了充分利用水平面日照与日射的丰富资料以得到倾斜面和墙面相应变量的细致分布规律,本文将理论计算与模式估计相结合的方法具体应用到一个平原城市(上海)。在倾斜面直接辐射计算中,本文以倾斜面与水平面天文辐射月值的比值(\bar{R}_s)取代各月代表日的 R_{so} 。在倾斜面日照时间的估计中,本文提出利用水平面日照百分率的简单方法。在倾斜面辐射与日照的时空分布规律方面主要突出其随方位与随季节(月份)的变化。

作为例子,本文计算分析了上海市每月各方位墙面上的天文辐射与可能日照时间,对相应的实际日照时间进行了估计。并在计算给出的 \bar{R}_s 值的基础上,利用散射辐射各向同性与非各向同性模式研究了上海各月墙面直接辐射与总辐射随方位的变化特征。

关键词 倾斜面 铅直墙 日照时间 太阳辐照

一、墙面可能日照时间和天文辐射日总量计算

墙面可能日照时间和天文辐射虽不考虑大气影响,但作为实际情况的基础背景,有必要研究其变化规律。文献[1,2,3]的作者曾作过许多工作。

要计算铅直墙面的可照时间,必须首先确定墙面的日出日没时角 ω_{sr} 和 ω_{ss} ,在不考虑地形和障碍物遮蔽情况下,联合比较倾斜面的两个临界时角 h_1 、 h_2 和水平面日没时角 ω_s 就可确定 ω_{sr} 和 ω_{ss} 的数值。

临界时角 h_1 和 h_2 是太阳光线与倾斜面平行时(即入射角 $\phi = 90^\circ$ 时)的两个时角,因此满足以下条件:

$$\begin{aligned}\cos \phi &= (\sin \phi \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \cos \beta) \sin \delta \\ &+ (\cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha \cos \beta) \cos \delta \cos \omega \\ &+ \sin \alpha \sin \beta \cos \delta \sin \omega \\ &= 0\end{aligned}\tag{1}$$

式中 ϕ 为倾斜面(或墙面)上太阳直接辐射入射角(太阳光线与倾斜面法线的夹角), ϕ 为

地理纬度, 北纬为正, 上海的 ϕ 取为 31.17°N ; α 为倾斜角 (墙面 $\alpha = 90^\circ$); β 为倾斜面或墙面的方位角, 代表朝向, 取南向为 0° , 顺时针方向为正 ($0^\circ-360^\circ$), 反时针方向为负 ($0^\circ-360^\circ$), 因此东、西、北向倾斜面的方位角分别为 -90° 、 90° 和 180° , 或 270° 、 -270° 和 -180° , 余类推; ω 为时角, 正午为零, 下午为正, 上午为负, 每 15° 相当于 1h; δ 为太阳赤纬。水平面日没时角 $\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \phi)$ 。

设

$$x = \sin \alpha \sin \beta \cos \delta$$

$$y = (\cos \phi \cos \alpha + \sin \phi \sin \alpha \cos \beta) \cos \delta$$

$$z = (\sin \phi \cos \alpha - \cos \phi \sin \alpha \cos \beta) \sin \delta$$

则(1)式变为

$$\cos \phi = x \sin \omega + y \cos \omega + z = 0 \quad (2)$$

令 $\omega = 2u$, 则

$$\sin \omega = \sin 2u = \frac{2 \operatorname{tg} u}{1 + \operatorname{tg}^2 u}, \quad \cos \omega = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 u}{1 + \operatorname{tg}^2 u}$$

将以上二式代入(2)得:

$$(z - y) \operatorname{tg}^2 u + 2x \operatorname{tg} u + (z + y) = 0$$

根据其两个解得到

$$h_1 = 2u_1 = 2 \arctg \left(\frac{-x + \sqrt{x^2 + y^2 - z^2}}{z - y} \right) \quad (3)$$

$$h_2 = 2u_2 = 2 \arctg \left(\frac{-x - \sqrt{x^2 + y^2 - z^2}}{z - y} \right) \quad (4)$$

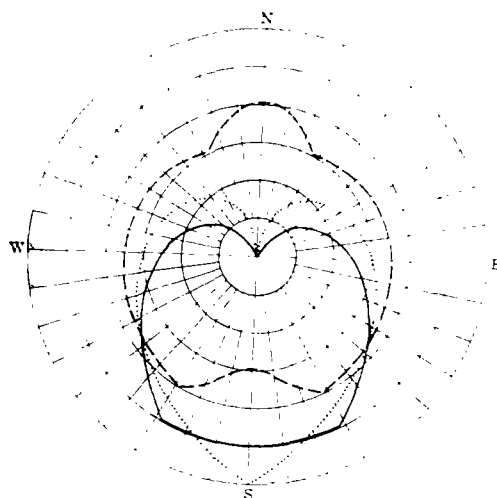


图1 冬至、夏至和二分日上海墙面日可照时间 T_{0t} 随方位的变化

(——冬至, -----夏至,二分日由内, 向外的圆圈每圈代表 2h, E、S、W、N 分别代表东、南、西、北朝向)

Fig. 1 Azimuth distribution of daily possible sunshine duration on vertical wall surfaces, T_{0t} , at winter solstice, summer solstice and equinoxes, in the city of Shanghai

由 h_1 、 h_2 和 ω_s 确定 ω_{sr} 和 ω_{ss} 的总的原则是: 要求从 ω_{sr} 到 ω_{ss} (顺时针方向) 的时角范围内, 太阳既要在地平线以上, 又要在倾斜面的前面。当时角以度计量时, 某方位倾斜面日日照时间 T_{0i} 可由下式计算

$$T_{0i} = (\omega_{ss} - \omega_{sr}) / 15 \quad (5)$$

须要指出, 偏北朝向的墙面在夏半年可能会出现两段日照时间, 在这种情况下要分别计算, 然后相加。天文辐射的计算也要如此考虑。

在不考虑地形和障碍物遮蔽情况下, 倾斜面和水平面天文辐射日总量 S_{0i} 和 S_0 可分别表示为

$$\begin{aligned} S_{0i} &= \frac{I_0 \tau}{2\pi r^2} \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} (x \sin \omega + y \cos \omega + z) d\omega \\ &= \frac{I_0 \tau}{2\pi r^2} [z(\omega_{ss} - \omega_{sr}) + y(\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) - x(\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr})] \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{I_0 \tau}{2\pi r^2} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) d\omega \\ &= \frac{I_0 \tau}{\pi r^2} (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi) \quad (7) \end{aligned}$$

式中 I_0 为太阳常数, 取值为 1367 W/m^2 (相当于 $1.96 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$)^[4] r 为以天文单位表示的日地距离, τ 为日长 (86400s 或 1440min), 时角以弧度表示。当出现两段日照时间时, (6) 式要有所变化。

根据以上方法计算的上海二分日和二至日每日日照时间 T_{0i} 和天文辐射日总量 S_{0i} 随方位的变化曲线由图 1 和图 2 给出, 上海八方位墙面上 T_{0i} 和 S_{0i} 的年变化曲线分别

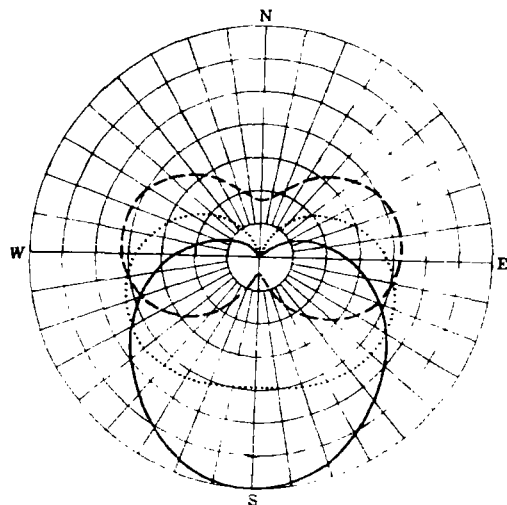
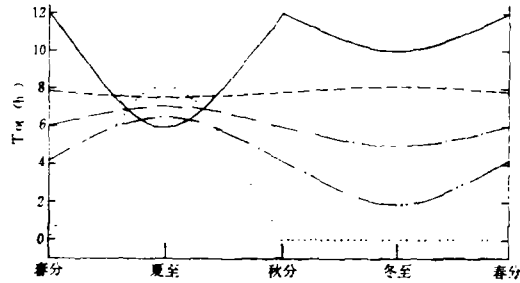


图 2 冬至、夏至和二分日上海墙面天文辐射日总量 S_{0i} 随方位的分布

(图例同图 1, 由内向外的圆圈每圈代表 5 MJ/m^2)

Fig. 2 Azimuth distribution of daily extraterrestrial irradiation on vertical wall surfaces, S_{0i} , at winter solstice, summer solstice and equinoxes in the city of Shanghai

图 3 上海八方位墙面上每日可照时间 T_{0t} 的年变化

(——南向, ----东南(西南)向, - · - · - 东(西)向, - - - - - 东北(西北)向,北向)

Fig. 3 Annual variation of daily possible sunshine duration on the 8-azimuth vertical wall surfaces in the city of Shanghai

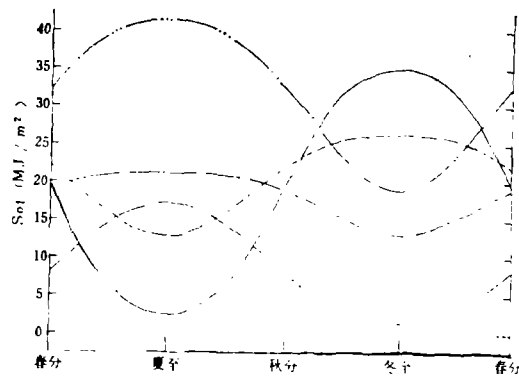
图 4 上海八方位墙面上天文辐射日总量 S_{0t} 的年变化(图例同图 3。另外增加水平面 S_0 曲线———)

Fig. 4 Annual variation of daily extraterrestrial irradiation on the 8-azimuth vertical wall surfaces in the city of Shanghai

由图 3 和图 4 给出。

二、墙面可照时间和天文辐射的月总量、年总量及月平均日总量计算

为了利用水平面实测辐射的月值资料讨论墙面上相应辐射量的分布特征,首先需要计算墙面可照时间和天文辐射的月值和年值。设 T_{0tm} 、 T_{0ty} 、 \bar{T}_{0t} 分别代表墙面上每月、每年和月平均每日可照时间, S_{0tm} 、 S_{0ty} 、 \bar{S}_{0t} 分别代表墙面天文辐射月总量、年总量和月平均日总量,则有

$$T_{0ty} = \sum_{n=1}^j T_{0tn}, \quad S_{0ty} = \sum_{n=1}^j S_{0tn} \quad (8)$$

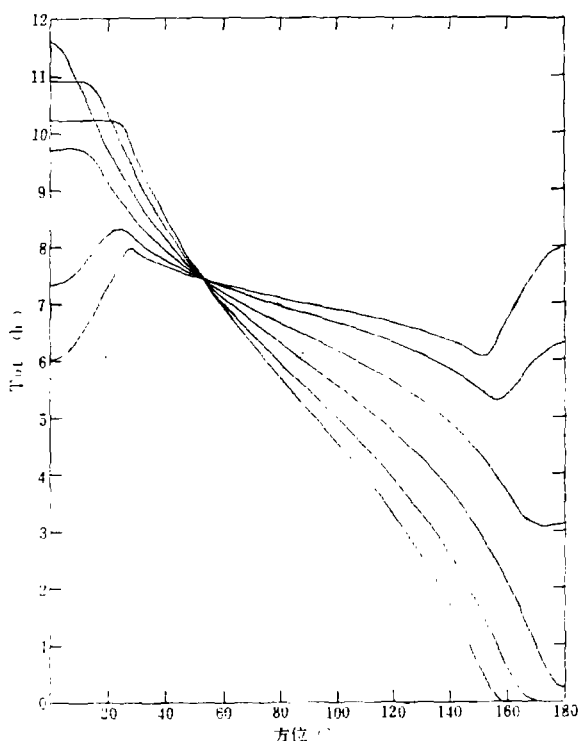


图5 上海墙面1—6月月平均每日可照时间 \bar{T}_{or} 随方位的分布
(横坐标各方位数值前均有正负号, 在方位 140° 处由下向上的6条曲线分别代表1、2、3、4、5、6月, 在方位 40° 处由上向下的6条曲线分别代表1、2、3、4、5、6月)

Fig. 5 Azimuth distribution of monthly mean daily possible sunshine duration on vertical wall surfaces, \bar{T}_{or} , in the city of Shanghai (January-June)

$$T_{ory} = \sum_{n=1}^{365} T_{or}, \quad S_{ory} = \sum_{n=1}^{365} S_{or} \quad (9)$$

$$\bar{T}_{or} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{n=i}^j T_{or}, \quad \bar{S}_{or} = \frac{1}{j-i+1} \sum_{n=i}^j S_{or} \quad (10)$$

(8)–(10) 式中, n 为一年中从1月1日开始的天数, 规定1月1日 $n=1$ 。 i 和 j 为某月的第一天和最后一天的天数, 从1月1日起算。

由(10)式计算的上海每月墙面月平均每日可照时间 \bar{T}_{or} 随方位的变化情况由图5和图6给出。由(9)和(10)式计算的上海每月40方位(每隔 10° 一个方位共36个, 另加东南、西南、东北和西北4个方位)墙面上天文辐射月平均日总量 \bar{S}_{or} 和年总量 S_{ory} 由下页表给出。

三、墙面直接辐射与墙面总辐射计算

设 S_r 和 S 分别代表墙面和水平面直接辐射日总量, 则 S_r 可由下式近似求得

上海 40 方位墙面天文辐射表
Tab. Monthly mean daily and annual sums of extraterrestrial irradiation, \bar{S}_0 and $\bar{S}_{0\gamma}$, on the 40-azimuth vertical surfaces at the city of Shanghai
单位: MJ/m²

方位角 (度)*	月份	月 平 均 日 总 量												年总量
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0		34.01	29.70	21.09	11.15	4.91	2.66	3.64	8.29	16.91	26.69	32.77	34.88	6875
10		33.49	29.25	21.17	11.97	5.66	3.32	4.34	9.10	17.40	26.32	32.28	34.35	6935
20		31.96	28.09	21.53	13.86	7.82	5.29	6.40	11.23	18.41	25.63	30.80	32.78	7095
30		29.64	26.90	22.01	15.90	10.77	8.37	9.44	13.67	19.51	25.05	28.76	30.26	7295
40		27.29	25.71	22.37	17.74	13.58	11.56	12.45	15.92	20.46	24.42	26.75	27.57	7467
45		26.11	25.06	22.46	18.55	14.87	13.04	13.84	16.92	20.83	24.03	25.73	26.24	7525
50		24.91	24.35	22.46	19.25	16.07	14.44	15.14	17.83	21.11	23.58	24.67	24.90	7557
60		22.40	22.74	22.15	20.31	18.12	16.90	17.40	19.29	21.34	22.44	22.42	22.15	7528
70		19.73	20.82	21.41	20.86	19.65	18.87	19.16	20.24	21.10	20.94	19.97	19.28	7359
80		16.90	18.60	20.21	20.87	20.62	20.27	20.36	20.64	20.37	19.08	17.31	16.30	7043
90		13.96	16.12	18.58	20.31	20.99	21.08	20.96	20.47	19.15	16.90	14.51	13.26	6581
100		11.00	13.45	16.55	19.22	20.75	21.26	20.94	19.73	17.48	14.45	11.62	10.24	5987
110		8.10	10.66	14.20	17.63	19.91	20.80	20.30	18.44	15.41	11.81	8.76	7.35	5280
120		5.40	7.89	11.62	15.58	18.49	19.72	19.07	16.65	13.03	9.09	6.04	4.71	4488
130		3.05	5.26	8.92	13.17	16.55	18.07	17.29	14.43	10.42	6.43	3.61	2.48	3649
135		2.06	4.05	7.57	11.86	15.41	17.04	16.21	13.19	9.08	5.16	2.55	1.58	3226
140		1.24	2.95	6.24	10.50	14.16	15.89	15.01	11.87	7.73	3.97	1.65	0.85	2809
150		0.19	1.18	3.77	7.71	11.42	13.26	12.34	9.09	5.11	1.93	0.38	0.05	2029
160		0	0.18	1.74	4.98	8.53	10.60	9.54	6.27	2.78	0.55	0.00	0	1381
170		0	0	0.44	2.66	6.41	8.89	7.63	3.90	1.03	0.03	0	0	948
180		0	0	0.04	1.69	5.67	8.31	6.98	3.01	0.28	0	0	0	795
水平面		20.66	25.37	31.47	36.89	40.13	41.26	40.57	37.97	33.35	27.33	21.86	19.22	11449

* 方位角 0、90 和 180 度分别代表南向、东(西)向和北向墙面,余类推。

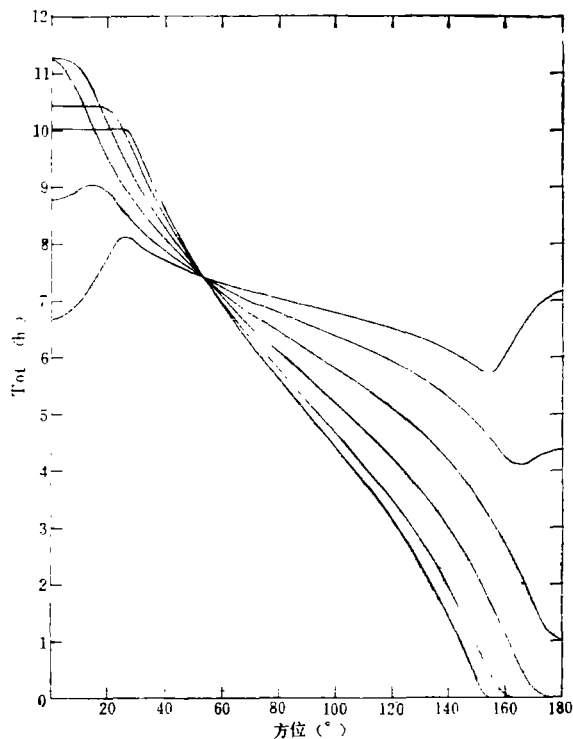


图 6 上海墙面 7—12 月月平均每日日照时间 \bar{T}_{0t} 随方位的分布
(在方位 140° 处由上向下的 6 条曲线分别代表 7、8、9、10、11、12 月, 在方位 40° 处由下向上的 6 条曲线分别代表 7、8、9、10、11、12 月)

Fig. 6 Azimuth distribution of monthly mean daily possible sunshine duration on vertical wall surfaces, \bar{T}_{0t} , in the city of Shanghai (July-December)

$$S_i = S \frac{S_{0t}}{S_0} = S \cdot R_b \quad (11)$$

式中 R_b 为 S_{0t} 与 S_0 的比值, 由(7)和(8)式得到 R_b 的表达式如下:

$$R_b = \frac{z(\omega_{is} - \omega_{ir}) + y(\sin \omega_{is} - \sin \omega_{ir}) - x(\cos \omega_{is} - \cos \omega_{ir})}{2[\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi]} \quad (12)$$

对于墙面直接辐射月平均日总量 \bar{S}_i 的计算而言, (11)式将变为

$$\bar{S}_i = \bar{S} \cdot \bar{R}_b \quad (13)$$

式中 \bar{S}_i 和 \bar{S} 表示 S_i 和 S 的月平均日总量, 因此有

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{S}_{0t}}{\bar{S}_0} = \frac{\frac{1}{j-i+1} \sum_{n=i}^j S_{0t}}{\frac{1}{j-i+1} \sum_{n=i}^j S_0} \quad (14)$$

式中 \bar{S}_0 为水平面天文辐射月平均日总量。由(13)和(14)式计算的上海每月墙面直接辐射月平均日总量 \bar{S}_i 随方位的变化曲线由图 7 和图 8 给出。

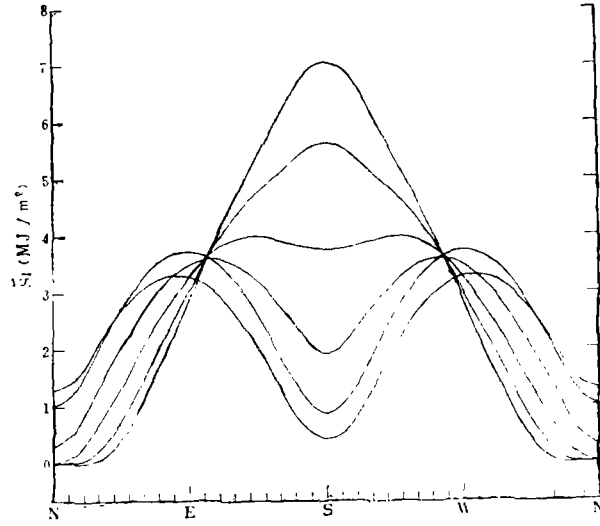


图7 上海1—6月墙面直接辐射月平均日总量 \bar{S}_d 随方位的分布
(E、S、W、N分别代表东、南、西、北朝向横坐标S处由上向下的6条曲线分别代表1、2、3、4、5、6月)
Fig. 7 Azimuth distribution of monthly mean daily direct solar irradiation on vertical wall surfaces, \bar{S}_d , in the city of Shanghai (January-June)

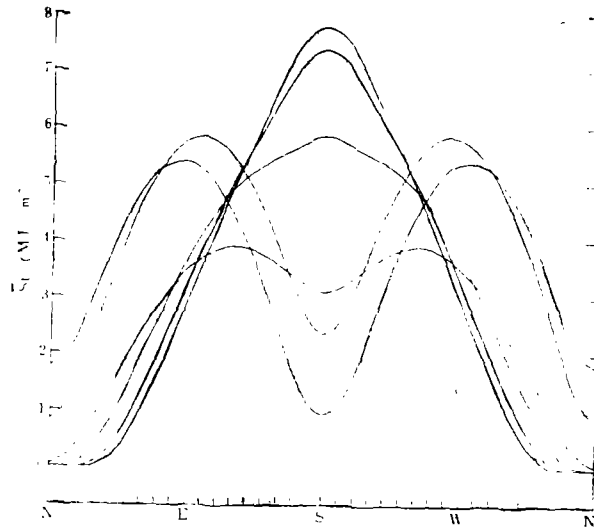


图8 上海7—12月墙面直接辐射月平均日总量 \bar{S}_d 随方位的分布
(E、S、W、N 分别代表东、南、西、北朝向横坐标S处由下向上的6条曲线分别代表7、8、9、10、11、12月)
Fig. 8 Azimuth distribution of monthly mean daily direct solar irradiation on vertical wall surfaces, \bar{S}_d , in the city of Shanghai (July-December)

墙面总辐射月平均日总量 \bar{Q}_d 的计算需要同时考虑直接辐射、天空散射和地面反射的贡献。直接辐射的计算如前所述,天空散射和地面反射的贡献一般通过模式估计。Liu 和 Jordan^[9] 在假定天空和地面分别为各向同性的漫射源和漫反射源的情况下提出了计算

倾斜面总辐射的以下公式

$$\begin{aligned}\bar{Q}_i &= \bar{S}_i + \bar{D}_i + \bar{R}_i \\ &= \bar{S} \cdot \bar{R}_b + \bar{D}(1 + \cos\alpha)/2 + \bar{Q}\bar{\rho}(1 - \cos\alpha)/2\end{aligned}\quad (15)$$

式中 \bar{Q}_i 、 \bar{S}_i 、 \bar{D}_i 和 \bar{R}_i 分别为倾斜面得到的总辐射、直接辐射、天空散射和地面反射的月平均日总量, \bar{S} 、 \bar{D} 和 \bar{Q} 分别为水平面太阳直接辐射、散射辐射和总辐射的月平均日总量, $\bar{\rho}$ 为地面反射率的月平均值, α 为倾斜角。 $(1 + \cos\alpha)/2$ 和 $(1 - \cos\alpha)/2$ 分别为天空散射和地面反射的调节因子。当 $\alpha = 0$ 时, (15) 式化为水平面情况 ($\bar{Q}_i = \bar{S} + \bar{D} = \bar{Q}$); 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 墙面得到半个天空的漫射和半个地面的漫反射。倾斜面所对应的地面反射率 $\bar{\rho}$ 可以根据实际情况采用各方位不同的数值。但主要适应于阴天的各向同性散射辐射假定如果用于其它天空状况则会不适当地估计某些方位倾斜面的天空散射量。因此近年来有一些非各向同性模式推出, 如 Klucher 模式^[6]和 Hay 模式^[7]等。

许多观测验证表明, Hay 模式拟合实际资料的误差在各个方位都比较小, 是一个较好的模式。Hay 模式将天空散射分为两部分, 一部分为日周附近的天空散射, 其余为各向同性散射, 并以大气透射率作为权重因子, 倾斜面得到的天空散射则由下式给出,

$$\bar{D}_i = \bar{D} \left[(\bar{S}/\bar{S}_0)\bar{R}_b + \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)(1 - \bar{S}/\bar{S}_0) \right] \quad (16)$$

根据上海 1961—1980 年期间多年平均的辐射观测资料, 用 (15) 和 (16) 式计算了上海每月各方位墙面上的 \bar{Q}_i (为了说明一般情况, 计算中 $\bar{\rho}$ 值采用了各向相同的数值)。由 Hay 模式计算的上海 1、4、7、10 各月墙面总辐射月总量 Q_{im} 随方位的变化由图 9 给出

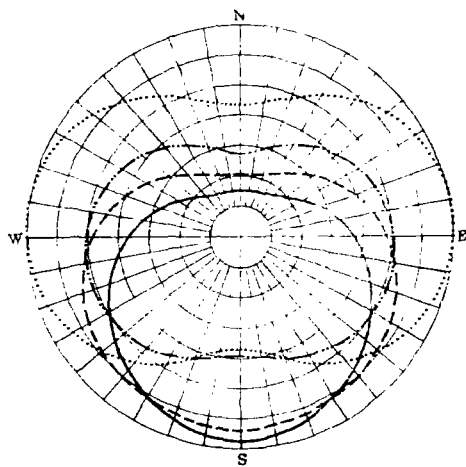


图 9 上海 1、4、7、10 各月墙面总辐射月总量 Q_{im} 随方位的变化(由 Hay 模式计算)

(由内向外的圆圈每圈代表 $50\text{MJ}/\text{m}^2$)

——1 月, - - - - - 4 月, 7 月, - · - · - 10 月)

Fig. 9 Azimuth distribution of monthly sum of global irradiation on vertical wall surfaces, Q_{im} , in the city of Shanghai (January, April, July, October), (Computed by Hay's model)

(计算中以(16)式取代(15)式中的 \bar{D}_t), 由月值求和得到的墙面总辐射年总量 Q_{ty} 随方位的分布由图 10 给出。图 10 还同时给出了上海墙面天文辐射和直接辐射年总量 (S_{0ty} 和 S_{ty}) 随方位的分布及其与水平面相应辐射量的对比情况。

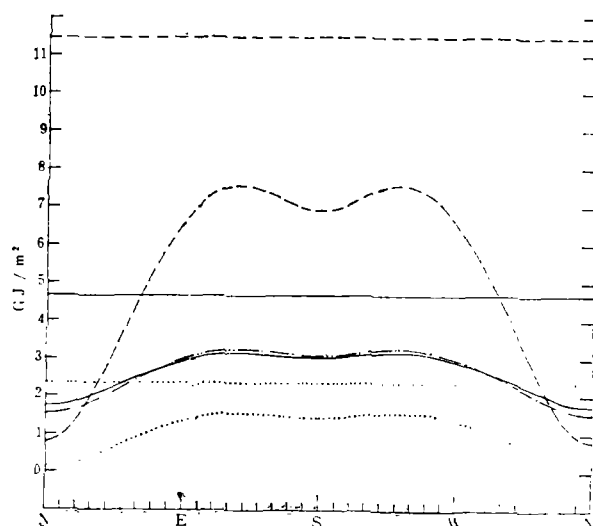


图 10 上海墙面直接辐射、总辐射和天文辐射年总量
(S_{ty} 、 Q_{ty} 、 S_{0ty}) 随方位的分布

(..... S_{ty} , ——— Q_{ty} (各向同性模式) —····— Q_{ty} (H_{0t} 模式) ----- S_{0ty}
平行与横轴的花样相同的直线代表水平面相应辐射量)

Fig. 10 Azimuth distribution of annual sums of direct, global and extraterrestrial solar irradiances on vertical wall surfaces, S_{ty} , Q_{ty} and S_{0ty} , in the city of Shanghai

四、结果分析讨论

1. 上海墙面日照时间分布特征

由图 5 和图 6 可知, 12 月份, 上海墙面月平均每日日照时间 \bar{T}_{0t} 在以朝南墙面(方位 0°)为中心的大约 $\pm 26^\circ$ 方位范围内的各墙面上几乎相等 (10.01 h), 以后随着朝向方位由南向北变化(偏南向 \rightarrow 东(西)向 \rightarrow 北向), \bar{T}_{0t} 逐渐减小, 从方位 154° 至 180° 都为零。1、2 和 11 月 \bar{T}_{0t} 随方位的变化特点与 12 月基本类似, 只是基本数值和变化程度不同。

\bar{T}_{0t} 的最大值和次大值出现于 3 月和 9 月的南向墙面, 数值分别为 11.61h 和 11.26h, 二分点为 12h (图 1)。3、9、10 月份 \bar{T}_{0t} 随着方位由南向北的变化而逐渐减小, 只是变化程度和基本数值不同。

6 月份 \bar{T}_{0t} 的最大值出现于北向墙面, 数值为 7.98h (夏至时 T_{0t} 为 8.14 小时, 图 1), 6 月 \bar{T}_{0t} 的最小值出现于南向墙面, 数值为 6.02h (夏至时 T_{0t} 为 5.89h)。由方位 0° 至 $\pm 28^\circ$ \bar{T}_{0t} 逐渐增加, 由 $\pm 28^\circ$ 至 $\pm 152^\circ$ 缓慢减小, 由 $\pm 152^\circ$ 至 180° 又逐渐增加, 180° 处 \bar{T}_{0t} 为 7.98h。4、5、7、8 月份 \bar{T}_{0t} 随方位的变化特征与 6 月分类似, 只是变化程

度、基本数值和最大值出现的方位不同。

图 1、5、6 表明,大约在方位 $\pm 52.8^\circ$ 处,上海墙面可照时间全年没有变化,大约保持每天 7.43h。

上海墙面年可照时间 T_{0r} , 随着朝向方位由南向北变化而单调渐小。

2. 上海墙面实际日照时间的估计

日照百分率 P 定义为水平面实际日照时间与水平面可照时间的比值。同样可以定义倾斜面(或墙面)的日照百分率 P_i , 只要将水平面改为倾斜面(或墙面)即可。 P 和 P_i 都反映一日中云雾等大气现象遮挡日光的时间长短。虽然倾斜面与水平面可照时段不尽相同,但可以粗略地认为 $P_i = P$, 因此墙面或倾斜面实际日照时间 T_i 可以表示为 T_{0r} 与 P 的乘积, 即 $T_i = T_{0r} \cdot P$, 同样有 $\bar{T}_i = \bar{T}_{0r} \cdot \bar{P}$, 其中的上横线表示月平均。上海多年平均的 1 至 12 月的 \bar{P} 值(%)分别为 43、39、37、40、39、40、55、62、46、49、48、46、45、7、8 两月数值较大。将各月 \bar{P} 值分别乘以该月各方位的 \bar{T}_{0r} , 则可得到该月各方位的 \bar{T}_i 。 \bar{T}_i 随方位的变化规律以 \bar{T}_{0r} 为基础, 只是各月的相对大小有些调整。

3. 上海墙面天文辐射分布特征

上海各月墙面天文辐射月平均日总量 \bar{S}_{0r} 随方位的变化与可照时间明显不同。

由表和图 2 可知, 冬半年 10、11、12、1、2 月, \bar{S}_{0r} 都随着墙面方位由南向北的变化而逐渐减小, 只是数值和变化程度不同。全年各月 \bar{S}_{0r} 的最大值出现于 12 月份的南向墙面, 数值为 34.88 MJ/m^2 , 冬至日更达 35.06 MJ/m^2 。由冬至日到二分日的冬半年内, 北向墙面的 \bar{S}_{0r} 都为零。12 月份 \bar{S}_{0r} 随方位的分布是冬半年各月分布情况的极端代表。

6 月份 \bar{S}_{0r} 的最大值出现于 $\pm 100^\circ$ 附近的墙面, 数值约为 21.26 MJ/m^2 , 在 $\pm 90^\circ$ 处为 21.08 MJ/m^2 。该月最小值出现于南向墙面, 数值为 2.66 MJ/m^2 , 夏至日为 2.49 MJ/m^2 。南向墙面的 \bar{S}_{0r} 约为东(西)向墙面数值的 $1/8$ 。该月北向墙面的 \bar{S}_{0r} 为 8.31 MJ/m^2 (夏至日为 8.57 MJ/m^2), 都大于南向墙面的相应数值。6 月份 \bar{S}_{0r} 随方位的分布是夏半年的 3 至 9 各月分布情况的极端代表。

除 12 月和 6 月外, 其它各月 \bar{S}_{0r} 随方位的分布形式都是这两个极端月份之间的过渡形式, 例如表中 3 月的情况以及图 2 中二分点的情况。

从 $\pm 90^\circ$ 到 180° 的所有方位墙面上, \bar{S}_{0r} 都是由冬到夏(12 月至 6 月)不同程度地单调增加, 而以南向墙面(方位 0°)为中心的大约 $\pm 50^\circ$ 方位范围内各墙面上的 \bar{S}_{0r} 都呈现出由冬到夏的不同程度的单调减小, 其中以南向墙面 \bar{S}_{0r} 减小的幅度最大。从 $\pm 50^\circ$ 到 $\pm 90^\circ$ 方位变化时, \bar{S}_{0r} 则是从由冬到夏的减小逐渐转变为由冬到夏的增加, 因此夏半年各月 \bar{S}_{0r} 最大值出现于不同方位的墙面, 3、4、5、6、7、8、9 各月 \bar{S}_{0r} 最大值出现的墙面方位分别约为 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 100^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 80^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 。

由表和图 2 可知, $\pm 70^\circ$ 的墙面是 \bar{S}_{0r} 季节变化最小的墙面(变化值约为该方位全年最大值的 12%, 最小值的 13%)。

4. 上海墙面直接辐射分布特征

由图 7 和图 8 可知, 上海各月墙面直接辐射月平均日总量 \bar{S}_i 随方位的分布形式与天文辐射 \bar{S}_{0r} 的分布相比有两点不同, 一是数值上的减小, 二是各月 \bar{S}_i 数值的相对大小有些调整, 这都是由于大气影响所致。

冬半年各月(10月至2月) \bar{S}_i 随方位的分布曲线为单峰型, 都以南向墙面的 \bar{S}_i 为最大, 这正是南向建筑利用太阳能采暖的优点所在。全年各月 \bar{S}_i 的最大值 (7.75 MJ/m^2) 仍出现在12月, 但南向墙面的次大值并不像 \bar{S}_{0i} 那样出现在1月, 而是11月 (7.35 MJ/m^2)。全年各月除5、6、7三个月 \bar{S}_i 的最小值出现于南向墙面以外, 其它各月的最小值都出现于北向墙面。

夏半年各月(3—9月) \bar{S}_i 随方位的分布曲线为双峰型, 这些月份 \bar{S}_i 最大值出现的墙面方位与 \bar{S}_{0i} 的情况相同。5、6、7、8月份东(西)向墙面的 \bar{S}_i 分别约为南向墙面 \bar{S}_i 的4.3、7.8、5.8和2.5倍。由于上海7月8月以方位 $\pm 90^\circ$ 和 $\pm 80^\circ$ 为中心的偏东(西)向墙面上获得太阳直接辐射热最多, 而且气温高(7月和8月的月平均气温分别为 27.8°C 和 27.7°C)、湿度大(绝对湿度超过 30 hPa), 所以偏西和偏东朝向的建筑具有最不利于致冷的外部条件。由于上海的特殊气候情况, 7、8月份偏东(西)向墙面的 \bar{S}_i 都大于5、6月份。

5. 上海墙面总辐射分布特征

若以各向同性散射模式(15)式计算, 则墙面总辐射月平均日总量 \bar{Q}_i 与相应墙面直接辐射 \bar{S}_i 的区别只是增加了(15)式中等号右端的两项, 由于这两项只与月份有关, 而与方位无关, 所以某月各方位墙面的 \bar{Q}_i 就等于 \bar{S}_i 加上一个固定数值。根据多年平均资料计算, 上海1月至12月所加的固定数值分别为2.9, 3.4, 4.0, 4.8, 5.5, 5.7, 5.9, 5.4, 4.7, 3.9, 3.2和 2.7 MJ/m^2 。因此 \bar{Q}_i 随方位的分布曲线在顶端与 \bar{S}_i 的分布相同, 但在原来 \bar{S}_i 为零的墙面上 \bar{Q}_i 却不为零, 而是等于这个固定数值, 例如冬半年各月北向墙面的情况。另外, 5、6、7、8月份东(西)向与南向墙面 \bar{Q}_i 的比值也较 \bar{S}_i 的相应比值为低, 分别为1.5, 1.5, 1.7和1.4。

Hay模式与各向同性模式估计的天空散射 \bar{D}_i 有所不同。它们之间的相对大小由 \bar{R}_b 与 $\frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)$ 的关系决定之, 如果 $\bar{R}_b > \frac{1}{2}(1 + \cos\alpha)$, 则 Hay 模式对 \bar{D}_i 的

估计值就大于各向同性模式的估计值, 反之则小于。由表1求得 \bar{R}_b 后, 则可对上海墙面的情况进行比较。1、4、7、10各月两个模式的比较表明, 若以 Hay 模式计算的 \bar{Q}_i 为标准, 则南向墙面7月 \bar{Q}_i 的各向同性计算值高估15%, 1月低估9%。东(西)向墙面的差别不超过3%。北向墙面各月 \bar{Q}_i 的各向同性计算值都估计过高, 达到10—19%(参见图9)。晴朗天气较多的地方将会有更大差别。

6. 上海墙面各辐射量的年总量比较

图10表明, 在以南向墙面为中心的大约 $\pm 80^\circ$ 方位范围内的各墙面上, 直接辐射和总辐射年总量 (S_{iy} 和 Q_{iy}) 均较其它方位为大, 而且各自具有几乎相同的数值, 即与方位的关系不大, 这是冬大夏小的月值分布型的综合平衡结果。在这一方位范围内, 墙面上的 S_{iy} 、 Q_{iy} 和 S_{0iy} 最接近其水平面上的相应数值。大约在 $\pm 150^\circ$ 以北的方位范围内, 总辐射年总量 Q_{iy} 超过相应的天文辐射年总量 S_{0iy} , 尤以北向墙面为最, 这是由于当这些方位墙面天文辐射为零或很小时, 仍有一定数量的天空散射和地面反射所致。

7. \bar{R}_b 值的其它应用

本文墙面直接辐射和总辐射的分布特征都以多年平均的日射资料的月值为基础, 这

对于研究其一般分布规律是很必要的。对于某年某月的 \bar{S}_t 和 \bar{Q}_t 分布, 仍可用 (13)、(15)、(16) 式计算, 输入数据为相应观测值。而关键参数是 \bar{R}_b 。由于表中同时列出了墙面和水平面的天文辐射 \bar{S}_{0t} 和 \bar{S}_0 , 因此实际上也就提供了上海各月各方位墙面的 \bar{R}_b 数值 ($\bar{R}_b = \bar{S}_{0t}/\bar{S}_0$), 另外, 由图 4 还可得到上海 8 方位墙面每日的 R_b , 这就为非气候值和其它模式计算提供了方便。

参 考 文 献

- [1] Fuh Baw-puh, *Scientia Sinica*, 8(7), 1959, 700—726.
- [2] 傅抱璞, 南京大学学报(自然科学), (2), 1958, 23—46.
- [3] 李怀瑾, 施永年, 地理学报, 36(1), 1981, 79—89.
- [4] Fröhlich, C. and Brusa, R. W., *Sol. Phys.*, 74, 1981, 209—215.
- [5] Liu, B. Y. H. and Jordan, R. C., *Solar Energy*, 7(2), 1963, 53—74.
- [6] Klucher, T. M., *Solar Energy*, 23(2), 1979, 111—114.
- [7] Hay, J. E., Study of Shortwave Radiation on Non-horizontal Surfaces, Rep. No. 79—12, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario, 1979.

更 正

本刊 41(4) 第 290 页 6 行中庐山 ($30^{\circ}09'N$, $120^{\circ}56'E$) 应改为庐山 ($30^{\circ}09'N$, $102^{\circ}56'E$)。

THEORETICAL COMPUTATION AND MODEL ESTIMATION OF SOLAR IRRADIATION INCIDENT ON VERTICAL WALL SURFACES—WITH AN EXAMPLE OF SHANGHAI

Zhu Zhihui

(*Institute of Geography, Academia Sinica*)

Key words Slopes, Vertical wall, Sunshine duration, Solar irradiation

Abstract

Quantitative assessment of sunshine duration and solar irradiation incident on tilted and vertical surfaces is very significant to the study of the ecological environment in mountain areas, to architecture, and to urban climate research. In this paper, the theoretical and modelling methods to compute and estimate sunshine duration and solar irradiation on inclined surfaces are discussed and applied to a specific city located in plain.

In the computation of the monthly average daily direct solar irradiation on slopes, the conversion factor R_b , calculated by using the characteristic declination of each month, is replaced by \bar{R}_b , which is the ratio of monthly extraterrestrial irradiation on a tilted surface to that on a horizontal surface. In the estimation of practical sunshine duration on slopes, a simple method by using the percentage of possible sunshine is proposed.

As an example, the daily, monthly and yearly possible sunshine duration and the extraterrestrial irradiation incident on vertical wall surfaces at various orientations in the city of Shanghai are computed and analyzed. The wall azimuths of $\pm 52.8^\circ$ in Shanghai are discovered to be a couple of particular wall orientations at which the daily possible sunshine duration is unvarying throughout the year, sustained at about 7.43 hours. The relevant actual sunshine durations are estimated. Based on the values of \bar{R}_b , computed by the author, the azimuth distribution features of monthly direct irradiation on vertical wall surfaces are analyzed. The isotropic model by Liu and Jordan and the anisotropic model by Hay are used to estimate the sky diffuse and global irradiation on vertical walls in the city, the modelling results according to the two models are compared with each other.