

太阳能热利用基础

太阳是地球最主要的能量来源,除了核能之外,地球上的一切能源归根结底都来源于太阳能辐射。经测算表明,太阳每秒能够释放出 $3.91 \times 10^{23} \text{ kW}$ 的能量,而辐射到地球表面的能量虽然只有它的 22 亿分之一,但也相当于全世界目前发电总量的 8 万倍,因此太阳能资源十分丰富。太阳能作为一种洁净的能源,有着矿物能源不可比拟的优越性,是可再生能源中最引人注目、开发研究最多、应用最广的清洁能源。

1.1 太阳能热利用基本知识

1.1.1 太阳的结构

太阳是距离地球最近的一颗恒星。根据最新的测定,日地间的距离为 $1.4959 \times 10^8 \text{ km}$ 。从地球上望去,太阳的张角为 $31^\circ 59' 26''$,把角度转换成弧度,再乘以日地距离,便可得出太阳的直径为 $1.392 \times 10^6 \text{ km}$,是地球直径的 109 倍,就体积而论比地球大 130 多万倍。太阳的体积硕大,其质量亦很可观。根据万有引力定律,在已知地球的质量是 $6.0 \times 10^{21} \text{ t}$ 的情况下,可推算出太阳的质量为 $1.989 \times 10^{27} \text{ t}$,即太阳的质量是地球质量的 33 万倍。知道了太阳的体积和质量,就不难求出太阳的平均密度为 1.4 g/cm^3 ,即约为水的密度的 1.5 倍。实际上太阳内部的密度也各不相同,外部的密度很小,内部在承受巨大的压力的情况下,密度高达 160 g/cm^3 ,因此日心的引力要比地心的引力大 29 倍。

粗略地讲,太阳是由大气和内部两大部分组成的(见图 1-1)。太阳的大气自里向外分为光球、色球和日冕三个层次,内部自外向内则是对流层、辐射层和日核三个层次。太阳物质的组成,就质量而言,氢占 78.4%,氦占 19.8%,至于种类繁多的金属和其他元素只占 1.8%。太阳一刻不停地向四周空间放射出巨大的能量,其总量平均每秒钟达 $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$,相当于每秒烧掉 $1.321 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤所释放出来的能量。而地球大气层所能接受的能量仅为其中的 22 亿分之一。尽管如此,每秒也有

$1.757 \times 10^{17} \text{J}$, 折合标准煤约 $6.6 \times 10^6 \text{t}$ 。太阳核心温度为 $(8 \sim 40) \times 10^6 \text{K}$, 表面温度为 6000K 左右。太阳内部通过核聚变把氢转变为氦, 在反应过程中, 产生巨大的热量, 并向四周辐射。据估算太阳还将有 100 亿年的寿命, 相对于人类的有限生存时间而言, 太阳能可以说是取之不尽、用之不竭的。太阳能是最重要的基本能源, 生物能、风能、潮汐能、水能等都来自太阳能。太阳内部进行着由氢聚变成氦的原子核反应, 不停地释放出巨大的能量, 不断地向宇宙空间辐射能量, 这就是太阳能。

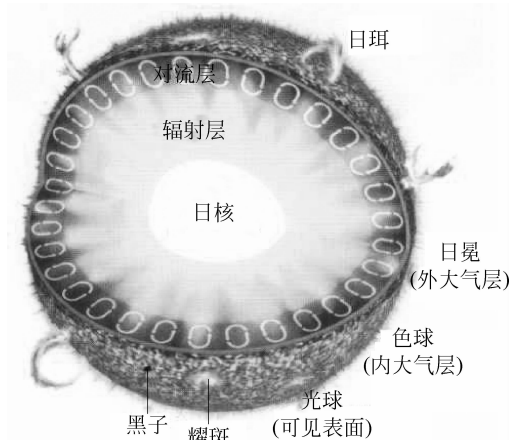


图 1-1 太阳结构示意图

1.1.2 太阳与地球

1. 经度和纬度

一切通过地轴的平面同地球表面相交而成的圆叫经度圈, 经度圈都通过地球两极, 因而都在南北极相交。这样每个经度圈都被南北两极等分成两个 180° 的半圆, 这样的半圆叫经线, 或子午线。全球分为 180 个经圈, 360 条经线。1884 年经国际会议商定, 以英国伦敦的格林尼治天文台所在的子午线为全世界通用的本初子午线, 如图 1-2 所示。

一切垂直于地轴的平面同地球表面相割而成的圆都是纬线, 它们彼此平行。其中通过地心的纬线叫赤道。赤道所在的赤道面将地球分成南半球和北半球, 如图 1-3 所示。

不同的经线和纬线分别以不同的经度和纬度来区分。所谓经度, 就是本初子午线所在的平面与某地子午线所在的平面的夹角。因此, 经度以本初子午线为零度线, 自零度线向东分为 180° , 叫东经, 向西分 180° , 称为西经。纬度(φ)是地球表面某地的本地法线(地平面的

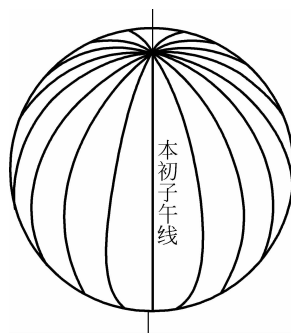


图 1-2 地球经度圈

垂线)与赤道平面的夹角,是在本地子午线上度量的。赤道面是纬度的度量起点,赤道面上的纬度为 0° ,自赤道面向北极方向分为 90° ,称为北纬,向南极方向分为 90° ,称为南纬,如图 1-4 所示。

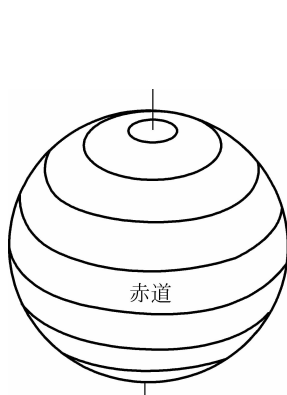


图 1-3 地球纬度圈

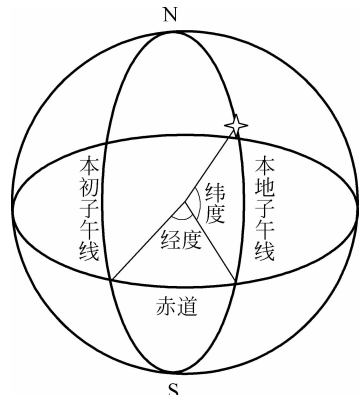


图 1-4 本初子午线与本地子午线

2. 四季

四季是因地球公转而形成的。地球绕太阳逆时针旋转称为公转,其运行轨道的平面称为黄道平面。地球绕太阳的运行轨道接近椭圆形,而太阳所处位置稍有偏心。因此太阳与地球之间的距离逐日变化。地球除公转外,还绕其轴(地轴)自转,地球的倾斜角即地轴与黄道平面的法线的交角始终保持 $23^{\circ}27'$ 或 23.45° ,亦常被近似表述为 23.5° ,见图 1-5。

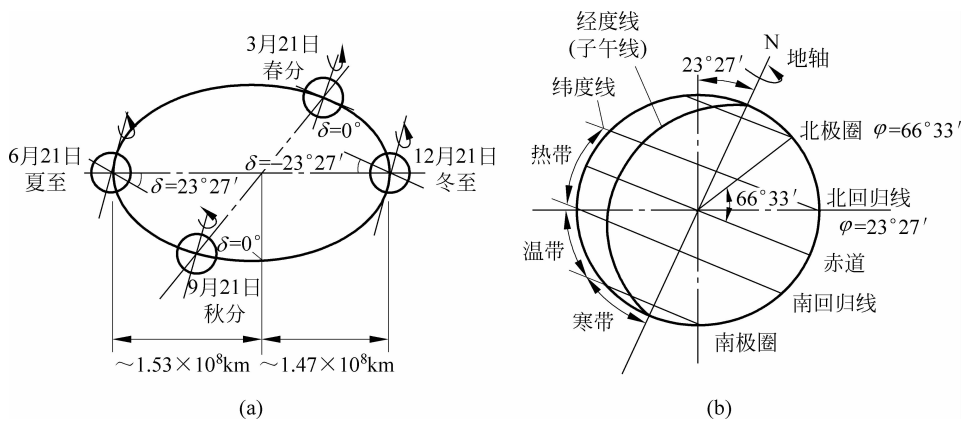


图 1-5 地球公转与自转

(a) 公转; (b) 自转

地球中心和太阳中心的连线与赤道平面的夹角称为赤纬 δ (或赤纬角), 由于地轴的倾斜角永远保持不变, 致使赤纬随地球在公转轨道上的位置随日期的不同而变化, 全年赤纬在 $-23.45^\circ \sim 23.45^\circ$ 之间变化, 从而形成了一年四季的更替。赤纬在一年中随时都在变化, 可用下列简化公式计算:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(360 \times \frac{284+n}{365}\right) \quad (1-1)$$

式中, n ——计算日在一年中的日期序号。

3. 关于昼夜

昼夜是因地球自转而形成的。一天时间的测定是以地球自转为依据的, 昼夜循环的现象给了我们测量时间的一种尺度。钟表指示的时间是均匀的, 均以地方太阳时为准。

所谓地方平均太阳时, 是以太阳通过当地的子午线时为正午 12 点来计算一天的时间。这样经度不同的地方, 正午时间均不同, 使用起来不方便。因此, 规定在一定经度范围内统一使用一种标准时间, 在该范围内同一时刻的钟点均相同。经国际协议, 以本初子午线处的平均太阳时为世界时间的标准时。把全球按地理经度划为 24 个时区, 每个时区包含地理经度 15° 。以本初子午线东西各 7.5° 为零时区, 向东分为 12 个时区, 向西分为 12 个时区。每个时区都按它的中央子午线的平均太阳时为计时标准, 作为该时区的标准时。相邻两个时区的时间差为 1h。

真太阳时是以当地太阳位于正南向的瞬时为正午 12 时, 地球自转 15° 为 1h。但是由于太阳与地球之间的距离和相对位置随时间在变化, 以及地球赤道与黄道平面的不一致, 致使当地子午线与正南方向有一定差异, 所以真太阳时与当地平均太阳时之间的差值称为时差。某地的真太阳时 T 可按下式计算:

$$T = T_m \pm \frac{L - L_m}{15} + \frac{e}{60} \quad (1-2)$$

式中, T ——当地的真太阳时, h;

T_m ——该时区的平均太阳时(该时区的标准时), h;

L ——当地子午线的经度, $(^\circ)$;

L_m ——该时区中央子午线的经度, $(^\circ)$;

e ——时差, h;

$\pm$ ——对于东半球取正值, 对于西半球取负值。

如果式(1-2)不考虑时差 e , 则求得的就是当地的地方平均太阳时, 即钟表时间 T_0 :

$$T_0 = T_m \pm \frac{L - L_m}{15} \quad (1-3)$$

我国地域广阔, 从东 5 时区到东 9 时区, 横跨 5 个时区。为计算方便, 我国统一采用东 8 时区的时间, 即以东经 120° 的平均太阳时为中国的标准时间, 称为“北京时间”。

间”。北京时间与世界时间相差 8 小时,即北京时间等于世界时加上 8 小时。

由于我国 5 个时区统一采用东 8 时区的时间作为标准时间,因此在用式(1-2)求取某地的真太阳时, T_m 和 L_m 均采用东 8 时区的标准时和中央子午线的经度。

若将真太阳时用角度表示时,则称太阳时角,简称时角 h ,是指当时太阳入射的日地中心连线在地球赤道平面上的投影与当地真太阳时 12 点时日地中心连线在赤道平面上的投影之间的夹角,其计算公式为

$$h = \left(T_m \pm \frac{L - L_m}{15} + \frac{e}{60} - 12 \right) \times 15^\circ \quad (1-4)$$

真太阳时为 12 点时的时角为零,前后每隔一小时,增加 $360^\circ / 24 = 15^\circ$,如 10 点和 14 点均为 30° 。

4. 太阳在空间的位置

地球上某一点所看到的太阳方向称为太阳位置。太阳位置常用两个角度来表示,即太阳高度角 β 和太阳方位角 A 。太阳高度角 β 是指太阳光线与水平面之间的夹角。太阳方位角 A 为太阳至地面上某给定点连线在地面上的投影与当地子午线(南向)的夹角,太阳偏东时为负,太阳偏西时为正,如图 1-6 所示。图 1-7 为夏至到冬至这一段时间太阳在中午照射时的太阳高度角 β 与纬度 φ 之间的关系。 O 点表示地心, QQ' 表示赤道, NS 表示地球轴线。

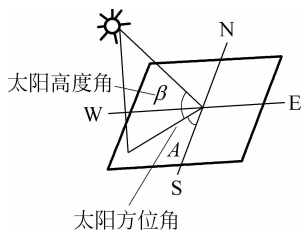


图 1-6 太阳高度角与方位角

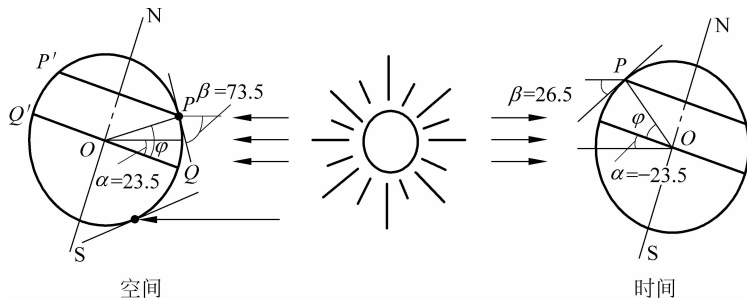


图 1-7 夏至和冬至时太阳高度角与纬度之间的关系

确定太阳高度角和方位角在建筑环境控制领域具有非常重要的作用。确定不同季节设计代表日或者代表时刻的太阳位置,可以进行建筑朝向确定、建筑间距以及周围阴影区范围计算等建筑的日照设计,可以进行建筑的日射的热量与空调负荷的计算、进行建筑自然采光设计。

影响太阳高度角和方位角的因素有三个:①赤纬 δ ,它表明季节的变化;②时角 h ,它表明时间的变化;③地理纬度 φ ,它表明观察点所在的位置。在一天之中,真太

阳时 12 点时太阳高度角达到最大值。太阳高度角 β 和方位角 A 可用下式来表示:

$$\sin\beta = \cos\varphi\cos h\cos\delta + \sin\varphi\sin\delta \quad (1-5)$$

$$\sin A = \frac{\cos\varphi\sin h}{\cos\beta} \quad (1-6)$$

1.1.3 太阳辐射

太阳辐射能是地球上热量的基本来源,是决定太阳能热利用的主要因素,也是建筑外部最主要的气候条件之一。

1. 太阳常数与太阳辐射

太阳辐射热量的大小用辐射照度来表示。它是指 1m^2 黑体表面在太阳辐射下所获得的辐射能通量,单位为 W/m^2 。地球大气层外与太阳光线垂直的表面上的太阳辐射照度为 $1353\text{W}/\text{m}^2$,称为太阳常数。

由于太阳与地球之间的距离在逐日变化,地球大气层上边界处与太阳光线垂直的表面的太阳辐射照度也会随之变化,1 月 1 日最大,为 $1405\text{W}/\text{m}^2$,7 月 1 日最小,为 $1308\text{W}/\text{m}^2$,相差约 7%。计算太阳辐射时,如果按月份取不同的值,可达到比较高的精度。表 1-1 给出了各月大气层外边界太阳辐射照度。

表 1-1 各月大气层外边界各月太阳辐射照度

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
辐射照度/ (W/m^2)	1405	1394	1378	1353	1334	1316	1308	1315	1330	1350	1372	1392

太阳辐射的波谱见图 1-8,在各种波长的辐射中能转化为热能的主要是可见光和红外线。太阳的总辐射能中约有 7% 来自于波长为 $0.38\sim 0.76\mu\text{m}$ 的可见光,45.2% 来自于波长在 $0.76\sim 3.0\mu\text{m}$ 的近红外线,2.2% 来自于波长在 $3.0\mu\text{m}$ 以上的长波红外线。当太阳辐射透过大气层时,由于大气层对不同波长的射线具有选择性的反射和吸收作用,到达地球表面的光谱成分发生了一些变化,而且在不同的太阳高度角下,太阳光的路径长度不同,导致光谱的成分变化也不相同。例如当太阳高度角为 41.8° 的时候,在晴天条件下到达海平面的太阳辐射中紫外线占不到 3%,可见光约占 47%,红外线占 50%,太阳高度角越高,紫外线及可见光成分越多;红外线则相反,它的成分随太阳高度角的增加而减少。

2. 大气层对太阳辐射的吸收

太阳辐射量的大小与太阳能热利用有着密切的关系,而太阳辐射量又与太阳辐射的性质和大气气候条件紧密相关。太阳辐射的性质取决于太阳结构和特性,气候条件则由地球和太阳之间的时间、空间关系所决定。因此,我们要开发和利用太阳能,首先得了解太阳与地球之间的关系。

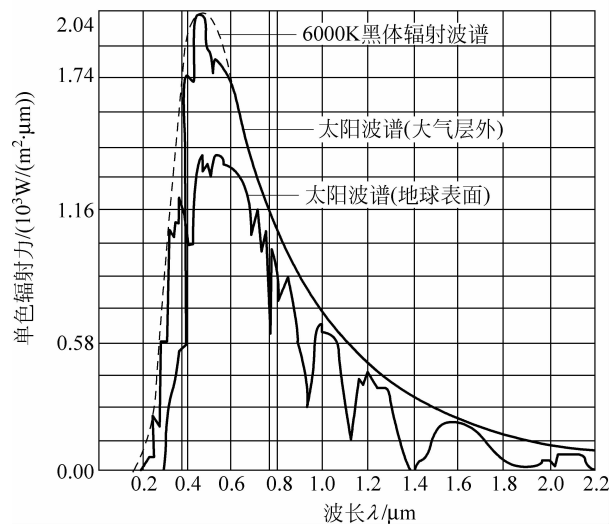


图 1-8 太阳辐射的波谱

地球外表面有一层厚度约 30km 的大气层,太阳辐射在穿过大气层时受到大气中的二氧化碳、臭氧、水蒸气、灰尘等物的吸收、反射、散射,使得到地面的太阳辐照量显著减少,如图 1-9 所示。

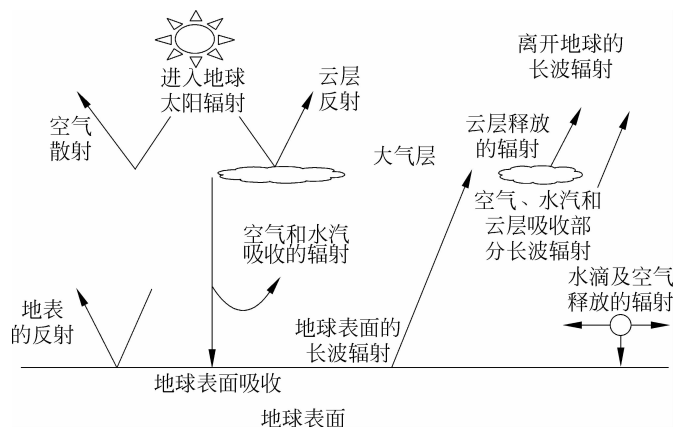


图 1-9 大气对太阳辐射的影响

据估计,大气层反射的能量约占太阳辐射总量的 30%,被吸收的能量约占 23%,其余 47%左右的能量才最终到达地球表面。到达地面的太阳辐射由两部分组成,一部分是太阳直接照射到地面的部分,称为直射辐射;另一部分是经过大气散射后到达地面的,称为散射辐射。直射辐射和散射辐射之和就是到达地面的太阳辐射能的

总和,称为总辐射。但实际上,到达地面的太阳辐射还有另一部分,即被大气层吸收掉的太阳辐射会以长波辐射的形式将其中部分能量送到地面,不过这部分能量相对于太阳总辐射能量来说是很小的一部分。

大气对太阳辐射的削弱程度取决于射线在大气中行程的长短及大气层质量。而行程的长短又与太阳高度角和海拔高度有关,水平面上太阳直接辐射照度与太阳高度角、大气透明度成正比。在低纬度地区,太阳高度角高,阳光通过的大气层厚度较薄,因此太阳直接辐射照度较大。又如,在中午,太阳高度角大,太阳射线穿过大气层的射线短,直接辐射照度较大;早晨和傍晚的太阳高度角小,行程短,直接辐射照度较小。

太阳光的辐射路程如图 1-10 所示,距大气层上边界 x 处与太阳光线垂直的表面上(即太阳法向)的太阳直射辐射照度 I_x 的梯度与其本身的强度成正比:

$$\frac{dI_x}{dx} = -kI_x \quad (1-7)$$

式中, I_x ——距大气层上边界 x 处的法向表面太阳直射辐射照度;

k ——比例常数, m^{-1} ;

x ——太阳光线的行程, m 。

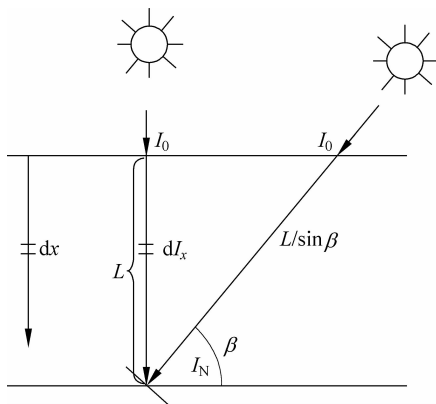


图 1-10 太阳光的路程图

对上面公式积分求解得

$$I_x = I_0 \exp(-kx) \quad (1-8)$$

式中, I_0 ——太阳常数, $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ 。

从式(1-8)可以看到, k 值越大, 辐射照度衰减越大, 因此 $a = kL$ 值又称为大气层消光系数, L 是当太阳位于天顶时(日射垂直于地面)到达地面的太阳辐射行程, 而 k 相当于单位厚度大气层的消光系数, 大气层消光系数 a 的大小与大气成分、云量等有关。云量的含义是将天空分为 10 份, 被云遮盖的份数。太阳光线的行进路程 x , 即太阳光线透过大气层的距离, 可由太阳位置来计算。

当太阳位于天顶时,到达地面的太阳辐射行程为 L ,有

$$I_L = I_0 \exp(-a) \quad (1-9)$$

令 $P = I_L / I_0 = \exp(-a)$ 称做大气透明度,它是衡量大气透明度的标志, P 越接近于 1,大气越清澈。 P 值一般为 0.65~0.75,即使是晴天天空透明度也是每月不同的,这是因为大气中的水蒸气含量不同的缘故,但在同一个月的晴天中,大气透明度可以近似认为是常数。我国将大气透明度做了 6 个等级的分区,1 级最透明。

当太阳不在天顶,太阳高度角为 β 时,太阳光线到达地面的路程长度为 $L' = L / \sin\beta$ 。地球表面处的法向太阳直射辐射照度为

$$I_N = I_0 \exp(-am) = I_0 P^m \quad (1-10)$$

式中, $m = L' / L = 1 / \sin\beta$ 称为大气层质量,反映了太阳光在大气中通过距离的长短,取决于太阳高度角的大小。因此,到达地面的太阳辐射照度大小取决于地球对太阳的相对位置(太阳高度角和路径)以及大气透明度。根据太阳直射辐射照度可以分别算出水平面上的直射辐射照度和垂直面上的直射辐射照度。

某坡度为 θ 的平面上的直射辐射照度

$$I_{Di} = I_N \cos i = I_N \sin(\beta + \theta) \cos(A + \alpha) \quad (1-11)$$

水平面上的直射辐射照度

$$I_{DH} = I_N \sin\beta \quad (1-12)$$

垂直面上的直射辐射照度

$$I_{DV} = I_N \cos\beta \cos(A + \alpha) \quad (1-13)$$

式中: i ——太阳辐射线与太阳辐射面法线的夹角;

A ——太阳方位角,太阳偏东为负,偏西为正;

α ——被照射面方位角,被照射面的法线在水平面上的投影偏离当地子午线南向的角度(偏西为负,偏东为正)。

图 1-11 表示了各种大气透明度下的直射辐射照度,图中表明了法线平面和水平面上的直射。

辐射照度随着太阳高度角增大而增强,而垂直面上的直射辐射照度开始随着太阳高度角的增大而增强,到达最大值后,又随着太阳高度角的增大而减弱。图 1-12 给出了北纬 40° 全年各月水平面、南向表面和东向表面每天获得的太阳总辐射照度。从图中可以看出,对于水平面来说,夏季总辐射照度达到最大;而南向垂直表面,在冬季所接受的总辐射照度为最大。

1.1.4 我国的太阳能资源

我国幅员广阔,有着十分丰富的太阳能资源。据估算,我国陆地表面每年接受的太阳辐射能约为 50×10^{18} kJ。从全国太阳年辐射总量的分布来看,西藏、青海、新疆、内蒙古南部、山西、陕西北部、河北、山东、辽宁、吉林西部、云南中部和西南部、广东东

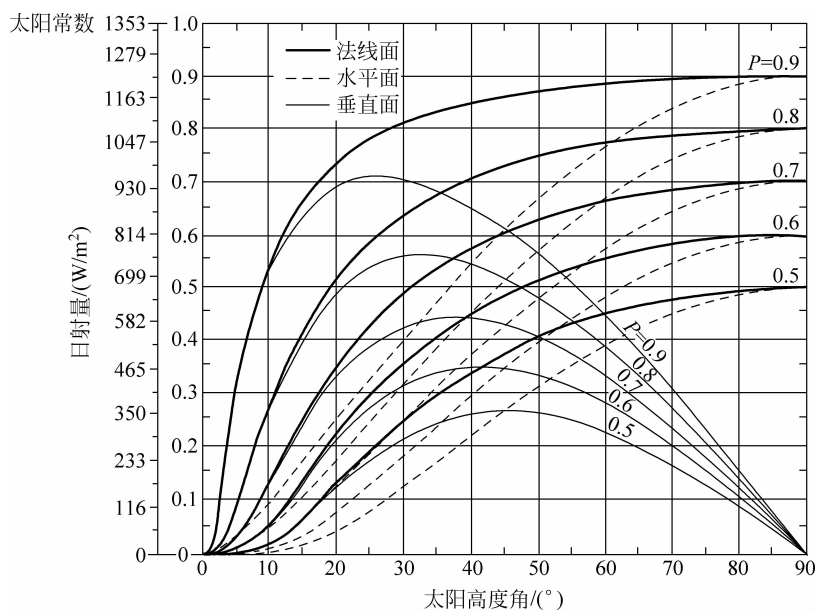


图 1-11 不同太阳高度角和大气透明度下太阳直射辐射强度

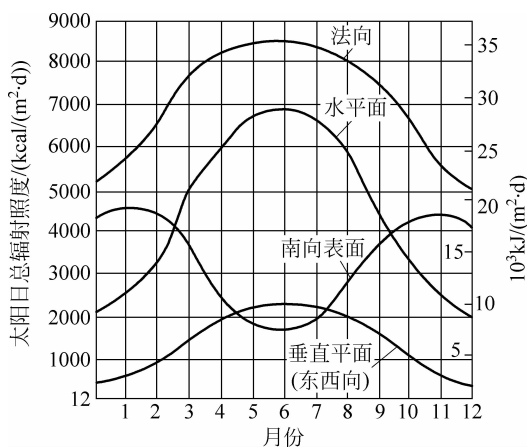


图 1-12 北纬 40° 的太阳日总辐射照度

南部、福建东南部、海南岛东部和西部以及台湾省的西南部等广大地区的太阳辐射总量很大。尤其是青藏高原地区最大,那里平均海拔高度在 4000m 以上,大气层薄而清洁,透明度好,纬度低,日照时间长,因而拉萨被人们称为“日光城”。1961—1970 年的平均值,年平均日照时间为 3005.7h,相对日照为 68%,年平均晴天为 108.5 天,阴天为 98.8 天,年平均云量为 4.8 成,太阳总辐射为 $816\text{kJ}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$,比全国其他省区