

地表太阳总辐射通量 计算 方法 概述

张炯远 冯雪华

(中国科学院自然资源综合考察委员会)

中央气象局农业气候区划办公室印

一九八〇年六月

前言

太阳辐射是气候形成的三大要素之一，为地表各种物理过程和生命活动的基本能源，因此了解和计算太阳辐射到达地球表面的总能量分布是十分重要的。这种能量一般是以太阳总辐射通量表征。

关于总辐射通量的计算方法，国内外已有许多论述。本文是在今年三月为中央气象局举办的全国农业气候资源分析和区划的研究学习班上，作这方面介绍的基础上写成的。作者在计算我国太阳总辐射的工作过程中，根据所涉及的有关文献和一些体会，试图对各种总辐射的计算方法从理论和实际计算上予以概述，并提出了计算我国太阳总辐射通量时应该注意的几个问题。由于作者的水平和时间有限，错误在所难免，望读者予以指正。

本文承江爱良、韩湘玲和王懿贤先生审阅，在此谨致谢意。

目 录

一、太阳总辐射通量的影响因子和理论 计算方法	1
二、计算总辐射通量的各类经验关系式	3
三、用第一类经验关系式计算总辐射通 量的几个问题	11

一、太阳总辐射通量的影响因子和理论计算方法

到达地平面的太阳总辐射通量 (Q) 由来自太阳平行光线的直接辐射通量 (I) 和来自天空的散射辐射通量 (D) 组成。用公式表达为:

$$Q = I + D \quad 1-1$$

总辐射通量的大小受到大数因子的影响, 这些影响因子概括起来可分成五大类^[1]:

第一类为天文因子: 太阳常数、日地距离、太阳赤纬、时角;

第二类为地理因子: 测站的纬度、经度、海拔高度;

第三类为几何因子: 太阳高度、太阳方位角、接收器平面对地平面的倾斜度及倾斜面的方位角;

第四类为物理因子: 纯大气 (Rayleigh) 的消光、大气中水汽含量、Angström 混浊度公式中的波长指数 λ 、大气中的臭氧含量;

第五类为气象因子: 天空云量、地面反射率。

当天空全部有云或部分有云, 但太阳为不透光的云所遮蔽的情况下, 总辐射通量等于散射辐射通量即:

$$Q = D \quad 1-2$$

在十分晴朗的天空条件下, 根据布格-朗伯定律 (Bouguer-Lambert), 垂直于太阳光线的表面上, 波长为 λ 的单色光的直接辐射强度 I_λ 为:

$$I_\lambda = \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 I_{0\lambda} e^{-\sigma_\lambda m} \quad 1-3$$

式中 $I_{0\lambda}$ 表示在大气外界波长为 λ 处的太阳辐射强度, σ_λ 为大气光学厚度, 表示垂直方向上单位气柱内大气对太阳辐射

~ 2 ~

的衰减系数； m 为大气质量； $(R_0/R)^2$ 为平均日地距离修正因子； R_0 为日地之间的平均距离； R 为某一时间的实际日地距离。

$$\text{令 } T_\lambda = e^{-\sigma_\lambda m}$$

则公式 1-3 写成：

$$I_\lambda = (R_0/R)^2 I_{0\lambda} T_\lambda \quad 1-4$$

式中 I_λ 为单色光线透射比函数。

对于某一太阳高度下，所有波长的太阳直接辐射通量只要对 1-4 式积分便可得到：

$$\begin{aligned} I_h &= (R_0/R)^2 \int_0^\infty I_{0\lambda} T_\lambda d\lambda \\ &= (R_0/R)^2 I_0 L_h \end{aligned} \quad 1-5$$

式中 I_0 为平均日地距离时的太阳常数； L_h 为太阳高度为 h 时总的太阳辐射透射比函数。

计算水平面上某一个太阳高度 h 下的太阳直接辐射 I'_h 为：

$$I'_h = (R_0/R)^2 I_0 L_h \sinh \quad 1-6$$

水平面上太阳直接辐射日总量 I' 为：

$$I' = (R_0/R)^2 I_0 \int_{-t_0}^{t_0} L_h \sinh dt \quad 1-7$$

其中

$$\sinh = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad 1-8$$

式中 φ 为计算地点的纬度； δ 为赤纬； ω 为时角， $\omega = \Omega t$ 其中 Ω 为地球角速度； $-t_0$ 、 t_0 为日出、日落时间。

L_h 是随波长、时间而变化的复杂函数。它包括普莱 (Rayleigh) 大气消光、气溶胶的消光、大气中臭氧、二氧化碳和某些气体及大气中水汽含量对太阳辐射吸收等各项因子的作

用。每项因子的作用大小可以根据文献[1]、[2]，从理论上或根据经验公式进行估计。

散射辐射 D 是莖莖散射和气溶胶散射作用的混合结果。某一太阳高度 h 下，入射到地面上总的天空散射辐射 D_h 可看作只从气体吸收的微光线与直接辐射光线之差。可以用下式(1)计称：

$$D_h = K_h (I_{wh} - I_n) \sinh \quad 1-9$$

式中 K_h 为经验系数，受地面反射率 (A)、天气条件等影响，如例果，在 $A=0.25$ 的情况下， $K_h = 0.5 \sin^2 h$ 。在晴天条件下 $K_h = 0.5$ 。

I_{wh} 为缺乏大气分子和尘埃散射的太阳直接辐射。 $I_{wh} = (R_0/R)^2 I_0 \tau_{wh}$ ，其中 τ_{wh} 为只包括大气水汽、臭氧、二氧化碳等气体吸收的透射比函数。 τ_{wh} 值同样可以根据文献[1]或(2)计称得到。

一天的散射辐射日总量只要对 1-9 式进行积分便可得到：

$$D = \int_{-t_0}^{t_0} K_h (I_{wh} - I_n) \sinh dt \quad 1-10$$

将 1-7 和 1-10 式代入 1-1 式，就可以得到晴天情况下地球表面某一纬度点的地平面上的太阳辐射日总量的计称公式：

$$Q = (R_0/R)^2 I_0 \int_{-t_0}^{t_0} (\tau_n + \tau_{wh}) \sinh dt \quad 1-11$$

二、计称总辐射通量的各类经验关系式

总辐射的理论计称比较复杂困难，所以在实际计称时，一般都采用半经验半理论的方法。这种方法就是先根据日射站实测的总辐射和其它一些基本的气象要素如日照、云量等资料，用统计方法建立它们之间的某种经验关系式，然后用确定的经验公式计称没有日射观测站的总辐射通量。

关于计标总辐射通量的经验关系式可表达成如下的一般函数形式：

$$Q = Q_0 f(a, b) \phi(X) \quad 2-1$$

式中 Q 为实际条件下的总辐射通量，用卡·厘米⁻²·日⁻¹ 或卡·厘米⁻²·旬⁻¹、千卡·厘米⁻²·月⁻¹ 或年⁻¹ 表示； Q_0 为计标总辐射的某种基数值，单位与 Q 的相同， $f(a, b)$ 为大气透明状况对总辐射的减弱函数； $\phi(X)$ 表示 X 为某种气象因子表在天空遮蔽程度的减弱函数。

按照 X 所表示的气象因子的不同，可以将计标总辐射通量的经验关系式分为以下四类：

第一类： X 为日照百分率 (S) 的经验关系式。

以这个因子建立的经验关系式计标太阳总辐射通量、世界上用的最为普遍，效果也较好。这类经验关系式依选择的基数值 Q_0 的不同，又可分为下列三种形式：

$$Q = Q_0 (a + b \cdot S) \quad 2-2$$

$$Q = Q_A (a + b \cdot S) \quad 2-3$$

$$Q = Q_m (a + b \cdot S) \quad 2-4$$

式中 Q_0 为晴天条件下的总辐射； Q_A 为天文辐射； Q_m 为理想大气（干洁大气）中的总辐射； S 为日照百分率， $S = \frac{\Sigma t}{\Sigma t_0}$ 。其中 Σt 为日照记录中测得的日照时数即实测日照时数， Σt_0 可以确定为：(1) 天文日长即可照时数，(2) 根据同样的日照记录中记录的最大观测值，(3) 当地白天的最长时间根据地形确定，(4) 太阳位置在地平面以上大于 30° 的时间； a, b 为特定方程系数； Q 为实际条件下的总辐射日或旬、月、年总量。

这类经验关系式的首创人是 Ångström, A. 他于 1924

年就指出，日照百分率和总辐射之间存在着线性相关：

$$Q = Q_0 [\alpha + (1 - \alpha) S] \quad 2-5$$

式中 Q_0 为晴天总辐射， α 为穿过平均厚度云层的短波太阳辐射的透射系数。

鉴于确定 Q_0 值的困难性，pressott 于 1940 年提出用 Q_A 代替 Q_0 值，建立经验关系式得：

$$Q = Q_A (a + b \cdot S) \quad 2-6$$

Q_A 为 Angot 值即大气顶部接收到的短波辐射； S 为相对于天文日长 S_0 确定的日照百分率； a, b 为经验系数。

Fritz S. 等 1949 年根据北纬 $25-44^\circ$ ，十一个站的观测资料统计得出：

$$Q = Q_0 (0.35 + 0.61 S) \quad 2-7$$

此式适用于日照百分率为 $35 \sim 97\%$ 的范围，所得计算值与观测值之间的相关系数为 0.88。

R. W. Hamon [3] 等 1954 年提出将公式 $Q = Q_0 (a + bS)$ 改写成如下形式：

$$Q/Q_0 = K + C_s (1 - K) \quad 2-8$$

其中 K 为减弱系数，它等于日照百分率为 0 ($S=0$) 时的总辐射值与日照百分率 $S=100\%$ 时的总辐射值之比。 K 值随纬度稍有变化如图 1，它随季节也有轻微的变化。

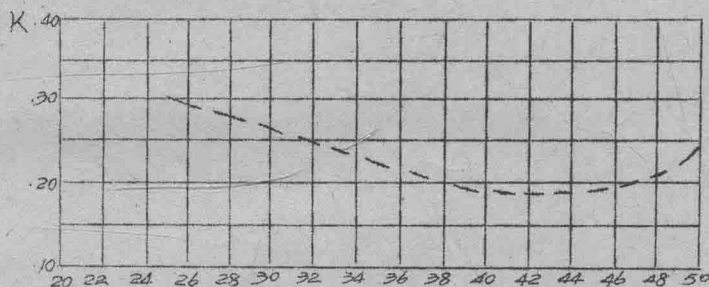


图 1. K 值随纬度的变化

~ 6 ~

C_s 称为可变日照系数, 它为日照百分率 S 的函数。 C_s 对 S 的经验关系如图 2, 这种关系对所有纬度的实际日照百分率 S 都是相同的。

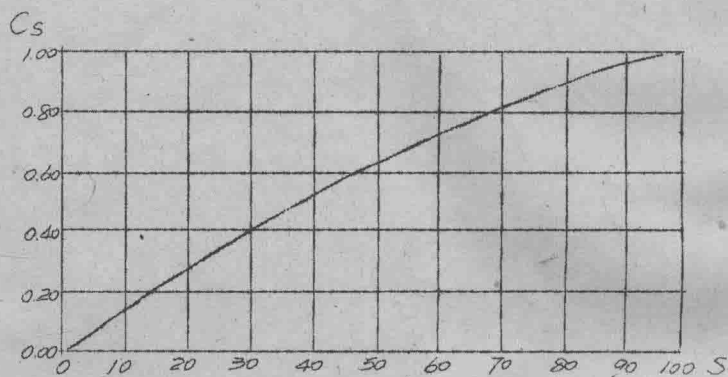


图 2. C_s 对 S 的经验关系

Hamon 又将上述关系式用图解方法表示如图 3 的形式。从这种图表上, 可以查知不同纬度一定日照百分率 S 下任何一天的太阳总辐射日总量。

我国左大康等 [4] 于 1962 年根据 26 个日射站 1957 ~ 1960 年三年半的资料, 在确定 Q_0 的基础上, 建立经验公式为:

$$Q = Q_0 (0.248 + 0.752 S) \quad 2-9$$

并用这公式计算了我国三百多个点的月总辐射值。

陆渝溶等 [5] 以 1964 年以前我国 70 多个站的日射资料分冬夏两半年建立如下形式的经验公式:

$$Q = a' + b Q_A S \quad 2-10$$

其中 Q_A 为天文辐射, 并作成图解形式计算月总辐射。公式 2-10 中, a' 实际上为 Q_A 的函数, $a' = a Q_A$, 所以 2-10 公式即为 $Q = Q_A (a + b S)$ 的形式。

王炳忠等 [6] 计算了我国每隔四个纬距、若干个等压面的理想大气中太阳辐射月总量 Q_m , 并选择 $Q = Q_m (a + b S)$ 的形式计算总辐射月总量。系数 a 取平均值为 0.18, b 按 $b = 0.55 + 1.11 \frac{1}{e}$ 的经验公式确定, 其中 e 为地面年平均绝对湿度。

第二类: X 为云量 (n) 的经验关系式

这类经验关系式的形式很多。最早, 美国的 Kimball H [7] 于 1928 年用云量建立了计算总辐射的经验公式:

$$Q = Q_0 (0.29 + 0.71 (1 - n)) \quad 2-11$$

式中 Q_0 为计算得到的晴天总辐射月总量, n 为月平均总云量。

2-11 式可以改写成如下形式:

$$Q = Q_0 (1 - (1 - K) n) \quad 2-12$$

此式即所谓的沙文诺夫—埃斯川姆经验公式。式中 Q_0 为晴天总辐射; K 为全天有云时 Q 与 Q_0 的比值。对 2-12 式 T. F 别尔染德 (Берлянд, 1954) 指出, 月平均云量 n 与 Q/Q_0 之间并非为直线关系, 按此式计算的夏季值比观测值偏低, 冬季值偏高。因此, 他建议用公式:

$$Q = Q_0 [1 - (a + bn)n] \quad 2-13$$

J. N 勃兰克 (Black, 1956) 也提出了类似形式的经验关系式:

$$Q = Q_A (0.803 - 0.340n - 0.458n^2) \quad 2-14$$

其中 Q_A 为大气完全透明时的总辐射。

П. П 库兹明 (Kyzbunin, П. П, 1961) 认为 2-12 公式中系数 K 的变化主要是由各种云状、云量的年变化引起, 因此提出改用下式:

$$Q = Q_0 [1 - K_1(n - n_L) - K_2n_L] \quad 2-15$$

式中 n 和 n_L 分别为总云量和低云量; K_1 、 K_2 分别为中高云和低云的系数。他根据 $45^\circ \sim 62^\circ N$ 的苏联六个地点 3-4 月观测资料, 计算结果取平均值 $K_1 = 0.14$, $K_2 = 0.67$ 。

我国殷宗 equal [8], 1963 年, 还对 2-12 式中系数 K , 利用我国东部地区 13 个日射站的总辐射和云量资料, 计算了华南、华中、华北、内蒙等气候区的 K 值年分配。研究指出: 除内蒙古外, 在晴空和主要是低云的条件下, K 值较小; 在总云量大但主要是中、高云时, K 值较大; 在我国夏季 K 值较大, 是由于受到季风影响的结果。

M. C. 阿维耳基也夫 (Аверкиев, 1962) 建议用下式计算总辐射:

$$Q = 0.96 Q_0 (1 - K_2 \frac{n + n_L}{2}) \cdot \frac{1}{1 - \alpha r} \quad 2-16$$

式中 α 为地面反射率; $r = 0.2 + 0.25(n + n_L)$ 为从大气返回到地面的反射辐射成分。该式适用于 $40^\circ - 70^\circ N$ 的地区。

用云量为基本因子, 同时用其它参数建立的经验关系式还有:

F. 贝尔汉德等 (Bernhardt, F, 1958) 提出的计算式:

$$Q = [BQ_A + (1-\beta)I_0][1 - (1-K)h] \quad 2-17$$

式中 $\beta = I_0/(Q_A - D_0)$ ，其中 I_0, D_0 为晴天太阳直接辐射和散射辐射。

阿耳布里赫特 (Albrecht. F, 1955) 提出的适用于不同纬度、季节的所谓万能公式：

$$Q = Q_0 \{ 1 - [1 - f(h/h_c) \phi(h_m)] n \} \quad 2-18$$

式中 h_m 为月平均最大太阳高度。该式适用于暖季，在冬季下垫面反射率增大时，计算值误差很大。

用云量作为基本因子建立的这一类经验关系式计算总辐射通量，一般计算值误差较大。这是由于天空云量瞬时变化大，又以目测取值观测误差大引起的。而且在我国没有整编的云量资料可用，所以凡有日照百分率资料的地方一般都不采用云量作为计算总辐射的基本因子。

第三类： X 为日照时数 Σt 的经验关系式

B. H 乌克拉莫采夫 (Украинцев, 1962) 研究认为总辐射与日照时数之间呈线性关系，因此用日照时数 Σt 与实测总辐射 Q 的资料建立了如下形式的经验关系式：

$$Q = m \Sigma t + n \quad 2-19$$

其中 m, n 为随纬度和季节变化的系数，根据 $35-70^\circ N$ 之间 11 个站的观测结果得出了 m, n 的纬度平均值； Σt 为总日照时数，以小时为单位。

参照文献 [9]，我们可以把这类经验关系式改写成如下形式：

$$Q = Q_i (a' + b' S) \quad 2-20$$

其中 $a' = n/Q_i$ ， $b' = m \Sigma t_0 / Q_i$ ， Q_i 为基数值， Σt_0 为可照总时数。由此可见，第三类公式实际上是与第一类经验公式是同

类的,而且由于2-19式没有考虑到 $m \pm t_0 / Q_i$ 及 h / Q_i 在时间和空间上的稳定性,反而使计标复杂化,计标精确度降低。有人指出利用该公式所计标出的总辐射一般小于5-10%,冬季误差更大。

第四类: X 为混合气象因子的经验关系式

从计标总辐射通量的观点来看,单用平均总云量(h)或日照百分率(S)表示天空遮蔽程度并不是令人满意的。因此C.M. 萨维诺夫(Савинов)^[10]引入了一个参数 n ,作阴空特征量,

$n = \frac{1-S+h}{2}$ 得到计标 Q 的公式为:

$$Q = Q_0 [1 - (1-K)h,] \quad 2-21$$

式中 K 为经验系数说明被云散射的太阳辐射有多少到达地表面。 K 值随着云状、云量、太阳高度和下表面的反射率而变化。

理论上 $h+S=1$,实际上等式在冬季才成立,其它季节特别是夏季 $S+h>1$ 。夏季的 S 比冬季大。因为 n 与 S 有上述关系,所以 n 可以通过 h 或 S 来确定。如B.M. 加里彼林(Гарипов)计标得 $0.8h < n < h$,所以提出用下列近似式代替2-21式

$$Q = Q_0 [1 - (1-K)r_n] \quad 2-22$$

式中 $0.8 < r < 1$ 。由此可见这类经验关系式与第二类实质上相同。

三、用第一类经验关系式计标总辐射通量须注意的问题

目前世界上利用第一类经验关系式 $Q = Q_i(a + bS)$ 计标总辐射通量的国家和地区很多,如美国、英国、南斯拉夫、瑞典、比利时、葡萄牙、荷兰、德国、挪威、澳大利亚、印度、意大利等等。我国各地也多用日照百分率 S 为因子的经验公式计标总辐射通量。实践证明,用第一类经验关系式计标总辐射是有

效的，而且计标方法上比较简便。但是，为了保证所建立的经验关系式的可靠性和提高计标值的精确度，在建立经验关系式的过程中，需要注意以下几点：

1. 对总辐射实测资料需要进行认真的鉴定分析。

日射观测站网获得的辐射资料是说明辐射气候特征的主要依据，也是确定和检验经验关系式是否好的根据。因此，使用的辐射观测资料要十分准确。我国自1957年开始进行日射观测，至今有辐射实测资料的台站约90多个，其中有十年以上完整资料的站有70多个。这些日射站的观测资料是极其珍贵的，为我们计标全国更多地点的总辐射通量提供了基础数据。但是，我国历年日射观测资料还没有进行过全面细致的分析、鉴定和整编。因此，这些日射资料特别是1966年以后的资料是否可靠？我们在使用之前必须进行认真的分析鉴定。

首先要分析测站资料序列是否均一性。如果日射站的位置、仪口类型、观测方法等在整個观测期间没有变化，这样的日射观测序列一般可以认为是均一的，观测资料也就比较可靠。如果发现观测序列不均一，就要找出原因。引起日射观测序列不均一的原因大致有以下几个方面：

(1) 大气候变化引起；

(2) 日射观测站的迁移或者台站周围地区的环境变化，如建筑物的兴建、荒地开垦、水库铁路等修建引起小气候的改变而造成；

(3) 由于仪口类型的更换或仪口受损失如感热部分变黄变黑，遮光板、座架等固定接装不好以及仪口长期没有检修而造成；

(4) 观测方法和观测时间的改变；

(5) 由观测员的观测误差引起的，如在电表表目测读数上。

的主观性。对日光状况的估计不准确等都会造成资料的不准确。

关于测站资料序列的均一性的分析方法可参看文选 [1] [2]。我们在抄录、整理、使用全国日射资料的过程中，分析了部分日射站的资料序列的均一性，初步得出我国日射站资料大部分是可信的。

2. 基数值的选择必须一致

第一类经验关系式中 Q_i 我们称它为计算总辐射量的基数值。 Q_i 可以为晴天总辐射 Q_0 或天文辐射 Q_A 、理想大气中的总辐射 Q_m 。在确立总辐射和日照百分率之间的经验公式时，为了使计算范围内各地使用上的统一性，只能选定其中之一作为基数值。如计算时基数值不一致，就会导致较大的误差，计算结果也就失去比较性。

Q_A 、 Q_m 都是根据一些物理公式和常、系数进行复杂的运算得到的。它们的计算公式为：

$$Q_A = \frac{TI_0}{2\pi^2\sqrt{1-e^2}} \left[b_0(\lambda'' - \lambda') + \frac{\pi}{2} \sin \varepsilon \sin \varphi (\cos \lambda'' - \cos \lambda') - \frac{b_1}{2} (\sin 2\lambda'' - \sin 2\lambda') + \frac{b_2}{4} (\sin 4\lambda'' - \sin 4\lambda') \dots \right]$$

式中 I_0 为太阳常数； T 为地球公转周期（年）； e 为地球公转轨道偏心率； φ 为纬度； λ' 、 λ'' 为初、终时期的太阳黄经； ε 为黄道对赤道的倾斜角； b_0 、 b_1 、 b_2 ……为 Milankovicch 级数。

$$Q_m = \frac{1}{2} \left[\sum_{\Delta\lambda}^{\Delta\lambda_m} \bar{I}_{0\Delta\lambda} \cdot \bar{P}_{\lambda(0_3)}^m + \sum_{\Delta\lambda}^{\Delta\lambda_n} \bar{I}_{0\Delta\lambda} \cdot \bar{P}_{\lambda(0_3)}^{-m} \cdot \bar{P}_{\Delta\lambda(F)}^{-m} - \Delta k \right] \sin h$$

式中 $\bar{I}_{0\Delta\lambda}$ 为大气外 $\Delta\lambda$ 波段内的平均日射量， $\bar{P}_{\Delta\lambda(0_3)}$ 、 $\bar{P}_{\Delta\lambda(F)}$

分别为臭氧吸收和空气分子散射在 $\Delta\lambda$ 波段内产生的平均透明系数； Δk 为考虑 O_2 、 CO_2 吸收的修正值； m 为大气质量； h 为太阳高度角。

在计标 Q_A 、 Q_m 中，往往由于采用不同的太阳常数值、系数和订正值，或者计标方法上的略异，计标结果也很不一致。例如北纬 40 度七月十五日的天文辐射日总量和七月总量，在不同文献上所发表的值（见下表）是很不相同的，它们之间误

用不同太阳常数 I_0 和计标方法得出的 40°N 以上七月的 Q_A 值

I_0 (卡/厘米 ² 分)	1.90	1.94	1.94	1.98	2.00	2.00
七月十五日 (Q_A 卡/厘米 ² 日)	947.0	967.0	987.1	991.7	990.0	997.0
七月总量 (Q_A 卡/厘米 ² 月)	29357	29977	30600	30743	30690	30907

差可达 5%。就是同一太阳常数值如表中 $I_0 = 1.94$ 或 2.00 之下七月的 Q_A 值也是不同的。

由于 Q_A 、 Q_m 的计标十分复杂，在实际计标中往往只取月中 15 日的值作为月平均日总量，而真正月平均值并不与 15 日的值相等。虽然有各种 Q_A 和 Q_m 值的纬度分布图表可查，但因纬距间隔很大，纬距间的点要通过内插取得，这样也会造成一定的计标误差。

Q_0 是晴天条件下即天空晴朗无云的日子内到达地表面的实际太阳总辐射总量。 Q_0 值在理论上可以按 1-11 式进行计标。美国的 Kimball^[7] 曾通过不同大气质量、水汽含量、尘埃下的大气透明系数等一系列的计标得到 Q_0 。这种理论计标的方法比较复杂，所以一般 Q_0 用纯经验或半经验半理论的方法确定。如苏联的乌克兰英系夫 (Украинцев)，1956 年根据 35 个点的日射资料确定了从北纬 80° 到赤道范围内随纬度