

丘陵山地总辐射的计算模式*

李占清

(北京气象中心)

翁笃鸣

(南京气象学院)

提 要

本文根据对丘陵山地地形参数(平均坡向、坡度和地形遮蔽角)的数值模拟结果,应用试验观测资料,较详细地讨论了山地总辐射的理论计算模式。文中主要讨论了三个问题:山地总辐射理论模式的建立;模式参数的数值试验;模式在大别山南部局部地区的模拟结果及其分析。结果表明,山区总辐射受地形影响非常明显。本模式原则上适用于任何地区各种地形下总辐射的数值模拟。

一、引 言

在山区,复杂的地形条件可使总辐射状况产生很大差异,继而引起山地温、湿度、风状况等的不同,形成不同的小气候环境。因此,山地总辐射分布状况在山地气候形成中起着主导和决定性的作用。

国内外学者对山地总辐射的推算问题做过较多研究。对此,R.G.Barry^[1]和傅抱璞^[2]等进行了综述。归纳起来,此方面的研究可分为两类,即不考虑周围地形影响的单一坡面上的总辐射推算问题和实际山地中的总辐射推算问题。傅抱璞^[3]曾给出坡面天文辐射日总量的计算公式;李怀瑾^[4]则提出一种图解方法确定坡面上的日射总量。Revfeim^[5-6]在这方面也有较多研究。

实际山地直接辐射日总量的计算问题,以 Garnier 等^[7-8]为开端,到目前已出现了多种计算山地直接辐射日总量的计算机模式(如 Williams^[9]、Dozier 等^[10])。但由于这些模式都是从 Bouguer-Lambert 定律出发,应用某一日的大气透明度资料进行数值积分求得。因此,模式的输出结果只是某一特定日期的直接辐射。而从实用观点来看,更重要的是如何计算长年平均的山地直接辐射。至于实际山地中的散射辐射和总辐射的计算问题,就笔者所知,至今尚未有过。

本文试图在前人研究的基础上,提出一种计算山地总辐射日平均(24小时平均)通量密度的计算机模式。模式的输入参数主要是所研究山区地形高度场的网格化资料、网格距、时间步长、邻近气象站多年平均的云量、日照等资料。模式的输出结果则为山地总辐射的分布及一些分析结果。所以,用此模式就能客观定量地分析评价山区的辐射资源状况,为进一步开发利用山区气候资源奠定基础。

我们选取安徽省潜山县境内大别山南段(30°33'N, 116°28'E)一个 3×3.5km²的丘陵山区为试验地区,采用 100 m 的网格距将该区划分为 31×36 个网格点,进行山地总

* 本文于1986年4月30日收到,1987年5月7日收到最后修改稿。

辐射的数值模拟,由此,分析出地形对总辐射影响的基本特点和规律。

二、模式的建立

在山区,总辐射日平均通量密度可表示为:

$$\bar{Q}'_{a\beta} = \bar{S}'_{a\beta} + \bar{D}'_{a\beta} + \bar{R}'_{a\beta} + \bar{T}'_{a\beta} \quad (1)$$

式中 $\bar{S}'_{a\beta}$, $\bar{D}'_{a\beta}$ 分别为研究点所获得的太阳直接辐射、天空散射辐射的日平均通量密度; $\bar{R}'_{a\beta}$ 表示来自周围地形的短波反射辐射日平均通量密度; $\bar{T}'_{a\beta}$ 为来自研究点与地形遮蔽物间的空气散射辐射(即程辐射)。作者的研究^[11]表明, $\bar{R}'_{a\beta}$ 在无积雪的山区,其量值远较前二项小(一般不足 5%), $\bar{T}'_{a\beta}$ 的量值更是微乎其微。所以,实用时为方便起见,可暂不考虑后二项。因而就有:

$$\bar{Q}'_{a\beta} = \bar{S}'_{a\beta} + \bar{D}'_{a\beta} \quad (2)$$

类似于平面情况,山地直接辐射日平均通量密度的气候计算公式可表示为:

$$\bar{S}'_{a\beta} = f' \bar{S}'_{oa\beta} \quad (3)$$

式中 $\bar{S}'_{oa\beta}$ 表示无大气条件下的山地直接辐射日平均通量密度, f' 为山地中的大气透明函数。傅抱璞研究^[3]指出,在我国范围内, f' 基本上可用水平面的大气透明函数 f 表示。这里, f 采用日照百分率 S_1 的二次函数形式^[12]:

$$f = as_1 + bs_1^2 \quad (4)$$

式中 a 、 b 为经验系数,可从作者所给的分布图中读取。故得:

$$\bar{S}'_{a\beta} = (aS_1 + bS_1^2) \bar{S}'_{oa\beta} \quad (5)$$

山地天文辐射瞬时值的计算公式为:

$$\bar{I}'_{oa\beta} = \frac{I_0}{r^2} (U \sin \delta + V \cos \delta \cos \omega + W \cos \delta \sin \omega) \quad (6)$$

$$U = \sin \varphi \cos \alpha - \cos \varphi \sin \alpha \cos \beta \quad (7)$$

$$V = \sin \varphi \sin \alpha \cos \beta + \cos \varphi \cos \alpha \quad (8)$$

$$W = \sin \alpha \sin \beta \quad (9)$$

式中 I_0 为太阳常数,取 $1367.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; φ 为地理纬度; α , β 分别为坡度、坡向,其计算方法作者有专文介绍^[13]。 δ 为太阳赤纬,在一日中可视作常数; r 为以天文单位表示的日地距离。为便于在计算机上应用, δ 及 r 可采用如下近似式^[14]。

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \theta_0 + 0.070257 \sin \theta_0 \\ & - 0.006758 \cos 2\theta_0 + 0.000908 \sin 2\theta_0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} r = & 1.000110 + 0.034221 \cos \theta_0 + 0.001280 \sin \theta_0 + \\ & 0.000719 \cos 2\theta_0 + 0.000077 \sin 2\theta_0 \end{aligned} \quad (11)$$

计算, 式中 $\theta_0 = \frac{2\pi dn}{365}$, d_n 表示太阳历的日期排列序号, 平年以 1 月 1 号为 0, 至 12 月

31 号为 364, 闰年为 365。

(10) 式的最大误差为 0.2° , (11) 式的精度高于 10^{-4} 。

理论上, 山地天文辐射日平均通量密度可由 (6) 式对各可照时段进行积分平均求得。但因实际地形极端复杂, 各可照时段的开始和终止时间无法确定。故我们提出一种以遮

蔽系数为权重因子的等步长数值积分方法计算 $\bar{S}'_{\alpha\beta}$ 。

考虑到山地中任一点日出(日落)时间不早于(不迟于)平地的特点,先由关系式:

$$\mp \omega'_0 = \mp \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (12)$$

计算出平地的日出、日落时角 $-\omega'_0, \omega'_0$ 。再取适当的时角步长 $\Delta\omega$, 将 $2\omega'_0$ 分为 $m+1$ 段, 前 m 段的长度均为 $\Delta\omega$, m 由下式确定:

$$m = \operatorname{int}\left(\frac{2\omega'_0}{\Delta\omega}\right) \quad (13)$$

式中 $\operatorname{int}(x)$ 表示舍去 x 小数部分的取整函数。第 $m+1$ 段为 $(-\omega_0 + m \cdot \Delta\omega, \omega'_0)$ 。

这样, 可将 $\bar{S}'_{\alpha\beta}$ 表示为:

$$\bar{S}'_{\alpha\beta} = \frac{I_0}{2\pi r^2} \sum_{i=1}^{m+1} g_i \int_{\omega_{i-1}}^{\omega_i} (U \sin\delta + V \cos\delta \cos\omega + W \cos\delta \sin\omega) d\omega \quad (14)$$

此定义

$$\omega_0 = -\omega'_0, \quad \omega_{m+1} = \omega'_0$$

积分(14)式, 有:

$$\begin{aligned} \bar{S}'_{\alpha\beta} = \frac{I_0}{2\pi r^2} & \left\{ U \sin\delta \left[\sum_{i=1}^m g_i \Delta\omega + g_{m+1}(\omega_{m+1} - \omega_m) \right] \right. \\ & + V \cos\delta \left[\sum_{i=1}^m g_i (\sin\omega_i - \sin\omega_{i-1}) + g_{m+1}(\sin\omega_{m+1} - \sin\omega_m) \right] \\ & \left. + W \cos\delta \left[\sum_{i=1}^m g_i (\cos\omega_{i-1} - \cos\omega_i) + g_{m+1}(\cos\omega_m - \cos\omega_{m+1}) \right] \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

式中 g_i 称为 (ω_{i-1}, ω_i) 段的遮蔽系数, 其计算方法如下。

先根据太阳高度角和太阳方位角公式, 计算出 ω_{i-1}, ω_i 时刻的太阳高度角 h_{i-1}, h_i 和太阳方位角 A_{i-1}, A_i , 再应用作者所提出的地形遮蔽角的计算方法^[13]求得方位角为 A_{i-1}, A_i 方位上的地形遮蔽角 Z'_{i-1}, Z'_i , 由此求得二者之差:

$$D_{i-1} = h_{i-1} - Z'_{i-1} \quad (16)$$

$$D_i = h_i - Z'_i \quad (17)$$

再根据 D_{i-1}, D_i 之值分以下二种情况确定 g_i 。

(1) 当 D_{i-1}, D_i 不同时为零时

$$g_i = \begin{cases} 1 & D_{i-1} \geq 0 \text{ 且 } D_i \geq 0 \\ 0 & D_{i-1} \leq 0 \text{ 且 } D_i \leq 0 \\ 0.5 & D_{i-1}, D_i \text{ 的符号相反} \end{cases} \quad (18)$$

上式表示在 (ω_{i-1}, ω_i) 时段内, 研究点的日照状况完全取决于二端点时刻的日照状况。即若该二时刻可照(遮蔽), 则整段可照(遮蔽); 若一时刻可照, 另一时刻遮蔽, 则整段有一半时间可照(遮蔽)

(2) 当 $D_{i-1} = D_i = 0$ 时

$$g_i = \begin{cases} 1 & D > 0 \\ 0 & D < 0 \\ 0.5 & D = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中 D 表示 (ω_{i-1}, ω_i) 段的中间时刻 $\frac{1}{2}(\omega_{i-1} + \omega_i)$ 的太阳高度角与相应方位上的地形遮蔽角之差。(19)式表示当二端点时刻的太阳高度角恰好等于相应方位上的地形遮蔽角时, 整段的日照状况取决于中间时刻的日照状况。

式(5)–(19)即构成山地太阳直接辐射日平均通量密度的理论计算模式。

山地散射辐射的气候计算模式可表示为^[15]

$$\bar{D}'_{\alpha\beta} = K_D \bar{D}_{\alpha\beta} \quad (20)$$

式中 $\bar{D}_{\alpha\beta}$ 表示单一坡面所获得的天空散射辐射, K_D 为山地散射辐射的地形遮蔽系数。

$$\bar{D}_{\alpha\beta} = \bar{D}_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2} + 35.1 F(n_t, n_l) \cos 1.09 h' \sin 1.42 \alpha \cos(\beta - A') \quad (21)$$

$$F(n_t, n_l) = 1 - (0.08 n_t + 0.02 n_l) \quad (22)$$

$$K_D = \frac{\cos \alpha \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 z_i' \right) - \sin \alpha \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(z_i' + \frac{1}{2} \sin 2 z_i' \right) \cos \psi_i \right]}{\cos \alpha \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 Z_i \right) - \sin \alpha \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(z_i + \frac{1}{2} \sin 2 z_i \right) \cos \psi_i \right]} \quad (23)$$

$$\psi_i = \frac{i}{n} \cdot 2\pi \quad (24)$$

上述各式中 h', A' 分别为正午太阳高度角和太阳方位角, n_t, n_l 分别为总云量和低云量, n 为方位划分数, i 为方位循变量, 在正南方位为零, 顺时针方向计量; $\bar{D}_0$ 为水平面散射辐射日平均通量密度。

目前虽有多种确定水平面散射辐射日平均通量密度的计算公式, 但基本上都是云量和日照百分率的线性函数。我们考虑到云对散射辐射的影响特点, 提出如下形式的计算公式:

$$\bar{D} = Q_0(a + bn' - cn'^2) \quad (25)$$

$$n' = C_t n_t + C_l n_l \quad (26)$$

式中 Q_0 为水平面天文辐射日平均通量密度, C_t, C_l 为权重系数, a, b, c 为经验系数。这些系数均可利用相邻日射站的数据应用最优化方法拟合出来。对本试验, 我们根据合肥及其周围 4 个日射站的历年辐射和云资料, 拟合出 C_t, C_l, a, b, c 的值分别为 0.07, 0.03, 0.034, 0.701 和 0.710。拟合的相对误差为 7.31%。

式(20)–(26)即构成山地天空散射辐射日平均通量密度的计算模式。将其与山地直接辐射计算模式耦合起来, 就构成山地总辐射的计算模式。

三、模式参数的数值试验

1. 积分参数的确定

从模式的结构上看, 数值积分的时间步长 Δt (或方位角步长 $\Delta \omega$) 与方位划分数 n 的

选取对计算精度有一定的影响。显然 Δt 越小或 n 越大, 精度越高, 但计算时间也越长。因此, 计算时应选择一个既满足精度要求, 又使计算时间最小的 Δt 和 n 值。

为此, 我们选取 40 min 为初始时间步长, 计算各网格点上的直接辐射日平均通量密度。每计算一次, 步长减小 2 min, 同时求出本次计算值与前次计算值及时间步长为 1 min 值的相对误差。结果表明, 当时间步长为 20 min 时, 两种误差均在 5% 以内, 已能完全满足精度要求。

采用类似的方法, 可确定出划分数 n 为 16 时, 也能满足要求。为了增强模式的通用性, Δt 和 n 均选作模式的输入参数。一般地说, 地形起伏较大时, 应适当缩短时间步长, 增加方位划分数。

2. 计算月平均值时代表日期的选取

在计算水平面上的天文总辐射时, 通常取每月 15 日的值代替月平均值。但据 Klein 的研究^[16], 每月代表日期并非均以 15 日最佳, 它还因计算月份的不同而变化于 10—17 日之间。

为了探求计算月平均山地总辐射日平均通量密度的代表日期, 我们计算了所有网格点以逐日之值代替月平均值时的最小误差以及最小误差出现的日期。结果发现, 最小误差出现的日期不仅有月际变化, 还因计算点的坡向、坡度的不同而稍有差异。但各点的平均出现日期与 Klein 所给的平面代表日期相同。因此, 计算时, 为简便起见, 各网格点的代表日期即取 Klein 所给的平面代表日期。

四、模式的试验结果及其分析

根据上述山地总辐射日平均通量密度的计算模式, 应用安徽省潜山县气象站的日照百分率和云量资料, 我们计算了每个月份各网格点上的总辐射日平均通量密度值, 并在计算山区的地形图或等高线图上绘制出总辐射的分布图。

图 1 给出 1 月份试验山区总辐射日平均通量密度的分布。由图可见, 1 月份山区各点所获得的总辐射的差异很大。但与坡向吻合得很好。一般都是南坡最大, 东西坡次之, 北坡最小。这一点也可以在图 2 中更清楚地看出。图 2 表示试验区内所有网格点平均求得总辐射、直接辐射、散射辐射日平均通量密度随坡向的变化。可以看出, 山地总辐射及其分量都大致具有随坡向按余弦规律变化的特点。且其变化幅度相当甚至大于它们在全国范围内水平面上的变化幅度。尽管如此, 由于计算区域内, 地形分布呈封闭型 (各类对称地形面积相当), 各点平均的总辐射日平均通量密度值与水平面上的值非常接近 (分别为 $87.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $89.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。这也从侧面证实了本模式的正确性。

上述特点表明, 在 1 月份坡向是影响山地总辐射的主要因子。

图 3 给出 7 月份总辐射日平均通量密度的分布图。与 1 月相比, 7 月份的总辐射分布较为平缓, 且与坡向关系不十分明显。相反, 遮蔽条件的作用比较显著。如图 3 中, 山谷区多为低值中心, 而山脊和山顶多为高值中心。这说明, 7 月份山地总辐射的主要地形影响因子是遮蔽条件, 而不是坡向。

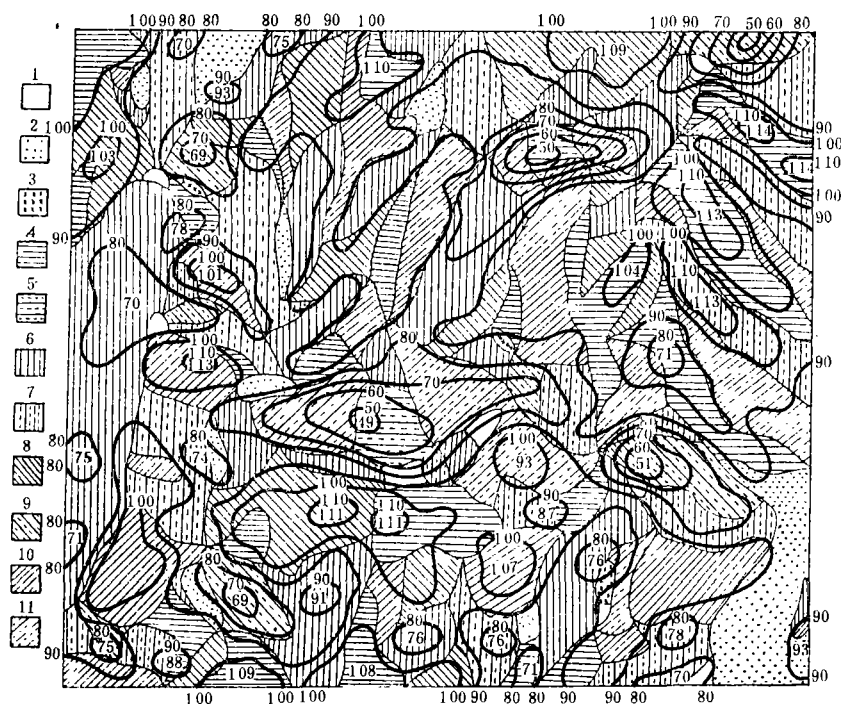


图 1 1 月份大别山南段试验山区总辐射日平均通量密度分布图

(1. 山顶, 2. 山谷, 3. 平缓分水岭, 4. 南坡, 5. 北坡, 6. 西坡, 7. 东坡, 8. 西南坡, 9. 东北坡, 10. 东南坡, 11. 西北坡)

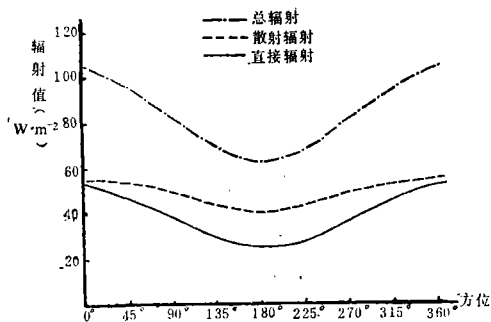


图 2 山区总辐射及其分量随坡向的变化

五、结 语

1. 本文所提出的山地总辐射的理论计算模式充分考虑了地形因素的影响。这些地形因素主要包括局地平均坡向、坡度和地形遮蔽角。模式的通用性较强,原则上适用于任何山区。

2. 对模式参数所作的试验表明,一般情况下,数值积分的时间步长可取 20 min,方位可划分为16个。对于地形起伏较大的山区,可适当缩小时间步长,划分较多的方位。计算山地总辐射月平均值时,代表日期可与平面相同。

3. 模式的计算结果表明,1 月份,山地总辐射主要受坡向影响。南坡最大,东、西坡

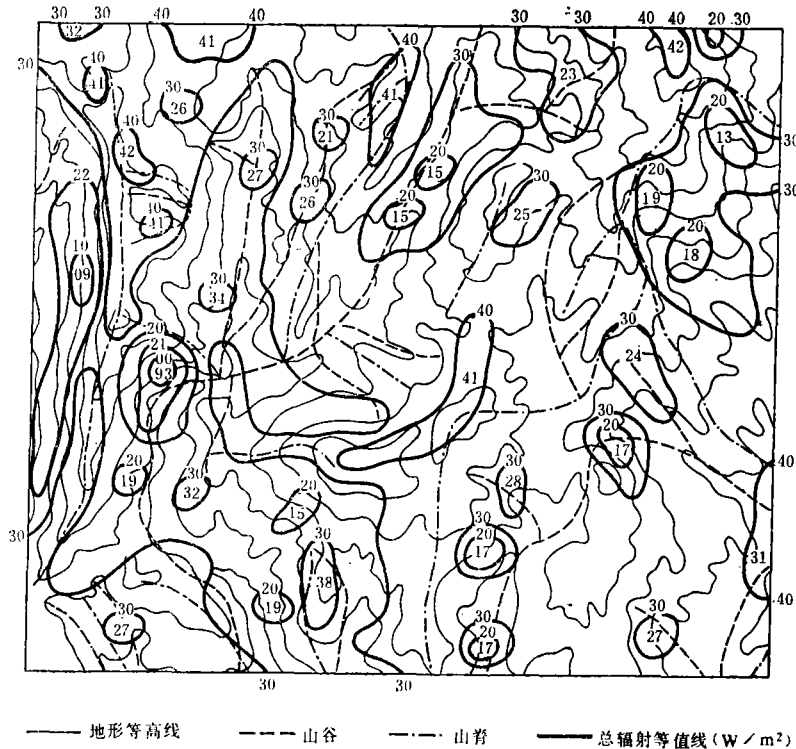


图 3 7 月份大别山南段试验地区总辐射日平均通量密度分布图
(图中数据省略了百位数 2)

次之,北坡最小;总辐射随坡向大体按余弦规律变化。7 月份则以遮蔽状况影响为主。相比之下,1 月份山地总辐射的局地变化远大于 7 月份。

参 考 文 献

- [1] Barry, R. G., Mountain weather and climate, 66—73, Methuen, London and New York, 1981.
- [2] 傅抱璞, 山地气候, 38—74, 科学出版社, 1983.
- [3] 傅抱璞, 论坡地上的太阳辐射总量, 南京大学学报(自然科学), 1958, 2, 23—46.
- [4] 李怀谨、施永年, 非水平面上日照强度和日射总量的计算方法, 地理学报, 36, 1, 79—89, 1981.
- [5] Revfeim, K. J. A., Solar radiation at a site of known orientation on the earth's surface, *J. Appl. Meteor.*, 15, 6, 651—656, 1976.
- [6] Revfeim, K. J. A., Simplified relationships for estimating solar radiation incident on any flat surface, *Solar Energy*, 28, 6, 509—517, 1982.
- [7] Garnier, B. J., and A. Ohmura, A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes, *J. Appl. Meteor.*, 7, 5, 796—800, 1968.
- [8] Garnier, B. J., and A. Ohmura, The evaluation of surface variations in solar radiation income, *Solar Energy*, 13, 1, 21—34, 1970.
- [9] Williams, L. D., R. G. Barry and J. T. Andrews, Application of computed global radiation for areas of high relief, *J. Appl. Meteor.*, 11, 3, 526—533, 1972.
- [10] Dozier, J., and S. I. Outcalt, A approach toward energy balance simulation over rugged terrain, *Geog. Anal.*, 11, 65—85, 1979.
- [11] 李占清、翁笃鸣, 一个山区中来自周围山地的短波反射辐射的计算模式, 地理研究, 6, 3, 42—49, 1987.
- [12] 翁笃鸣, 中国太阳直接辐射的气候计算及其分布, 太阳能学报, 7, 2, 121—130, 1986.
- [13] 李占清、翁笃鸣, 一个计算山地地形参数的计算机模式, 地理学报, 42, 3, 269—278, 1987.

[14] Spencer, J. W., Fourier series representation of the position of the sun, *Search*, 2, 172, 1971.

[15] 李占清、翁笃鸣, 起伏地形中的散射辐射及其计算模式, 南京气象学院学报, 10, 2, 139—151, 1987.

A NUMERICAL APPROACH TOWARD GLOBAL RADIATION OVER RUGGED AREAS

Li Zhanqing

(National Meteorological Center, State Meteorological Administration)

Weng Duming

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

Based on the simulated topographic parameters including slope, azimuth and screening angle and observed global radiation on flat-plate, a numerical model to calculate the long-term average of global radiation over rugged areas is developed. This paper consists of the development of the model, the numerical tests for selection the model parameters and discussion to the modeled results in the part of Dabie Mountain. It is manifested that the influence of terrain on global radiation is quite remarkable. In principle, the model is suitable for simulation the global radiation in any mountain with different scales.