

山区短波反射辐射的计算模式

李占清

翁笃鸣

(北京气象中心)

(南京气象学院)

提 要: 本文提出计算山区测点可接受到的来自周围山地的短波反射辐射日平均通量密度的通用计算机模式, 并以大别山南段赵公岭山区为例进行了试验, 结果表明, 该式通用性强、精度较高。

主题词: 反射辐射 山区

在山区, 除了个别突出的山顶以外, 任一山地测点所获得的散射辐射都包括两部分: 即来自测点上方可视天空的散射辐射和来自测点四周山地的短波反射辐射 (这一部分也以散射辐射的形式出现)。当地形起伏较大时, 一些遮蔽度较大的点所获得的来自周围山地的反射辐射量相当、甚至大于它所获得的天空散射辐射。

因观测和计算条件的限制, 迄今为止, 这方面的工作做得很少。过去, 在计算山地辐射平衡时, 这一分量通常用如下简单模式:

$$R_a = R_0 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

计算。式中 R_a 为坡度为 α 的坡面上所获得的来自坡前平面的反射辐射通量密度, R_0 表示坡前平面的反射辐射通量密度。

Кондратьев К. Я.^[1]对此做了较多的工作, 指出: 1. 来自四周山地的反射辐射量, 当反射率较大时, 其值可以与天空散射辐射具有相同量级, 甚至远大于它, 尤其当坡度较大时。2. 来自周围山地的反射辐射量还取决于坡地相对于太阳的相对位置。3. 朝向太阳的陡坡, (1)式的计算值小于实际值; 背向太阳的陡坡, (1)式的计算值大于实际值; 垂直于太阳的陡坡, (1)式计算值的误差不大。

上述结论与我们在大别山考察期间所作试验结果一致, 表1给出相对太阳的四个基本朝向的垂直坡面上所获得的山地的反射辐射和水平面上获得的天空散射辐射值。这些资料是利用一架安装在经纬仪上的天空辐射表和一个简易遮蔽装置, 在考察地区的一个小山顶上观测得到的。遮蔽装置应尽可能多地遮挡来自天空的散射辐射, 同时又尽可能减小对测点地面的遮阴作用。观测时, 利用遮阳伞将辐射仪上方的天空全部遮挡, 这样观测值就基本上代表垂直坡面上所接收到的四周山地的反射辐射。

表 1. 不同方位的垂直面所获得的反射辐射和水平面天空散射辐射
Reflected radiation received by vertical planes with different azimuthes from
the surrounding terrains and diffuse radiation dy hori zontal one from sky

(地点：大别山，1984年8月1日11:30)

坡 面 方 位 角	—	59.8	149.8	239.8	329.8
相对太阳的位置	水 平 面	朝向	垂直	背向	垂直
辐射值 (W/m ²)	18.13	188.7	132.9	55.8	125.8

此外，在实际山地中，测点所获得的反射辐射不仅受自身坡向、坡度的影响，还受周围遮蔽条件的影响。如在深谷中的平地测点所获得的来自周围山地的反射辐射仍可达到相当大的量级。

在理论上，到达山地测点的反射辐射可由下式计算：

$$R'_{\alpha\beta} = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{h_s(\psi)}^{z'(\psi)} \gamma_{\psi h} (\sin\alpha \cos\psi \cos^2 h + \cos\alpha \sinh \cosh) dh \quad (2)$$

式中 α 为计算点所在的坡地的坡度、 $h_s(\psi)$ 、 $z'(\psi)$ 分别为来自 ψ 方位的坡地自身遮蔽角和周围山地对其所造成的遮蔽角(仰角)， ψ 为以测点所在的坡地方位开始计算的相对方位角。 $\gamma_{\psi h}$ 则表示来自方位角为 ψ ，高度角为 h 的方向上的周围山地的反射辐射强度。在实际计算时，由于周围山地对测点所做成的遮蔽角无法用数学方法表示， $\gamma_{\psi h}$ 也是一个随 ψ 、 h 改变的变量，所以，在实用上，(2)式的通用性受到很大限制。

傅抱璞只在假定 $\gamma_{\psi h}$ 为常数的情况下，给出了几种理想地形中的 $R'_{\alpha\beta}$ 的理论计算式^[2]。显然还不足以解决实际山地的反射辐射计算问题。

为此，我们提出了一个计算山地各网格点所获得的来自周围山地的反射辐射日平均通量密度的理论计算模式。该模式可以完全在计算机上计算。本文着重讨论模式建立的思路及其结构，并对大别山南段的丘陵山区进行了计算。试验区地面为浅草覆盖，草高一般不足10厘米，周围山区分布有松、杉、竹等林木和某些作物。其客观反射率与绿草地大体一致。

一、模式的建立

如设山地中任一地点向外的短波反射辐射为各向同性，则有：

$$\gamma_{\psi h} = \frac{1}{\pi} A_{\psi h} \cdot Q_{\psi h} \quad (3)$$

式中 $A_{\psi h}$ 、 $Q_{\psi h}$ 分别表示反射点的反射率与总辐射通量密度。

据山地总辐射理论计算模式的试验结果^[1]，发现即使在一个很小的山区内，因地形条件的不同， $Q_{\psi h}$ 仍可有显著的差异。尤其在1月份，较开阔的南坡上所获得的 $Q_{\psi h}$ 比之较封闭的

1) 李占清、翁鸣：一个山地总辐射的理论计算模式(待发表)，气象学报。

北坡多出 2 倍以上。因此,在实际山地中,计算来自周围山地的反射辐射通量时, $v_{\psi h}$ 是一个变量,而不应视作常数。

同时,山地中产生反射辐射的周围地形也极其复杂,不能简单地当作均一的平面或坡面看待。实际上,四周地形对研究点的遮蔽往往是交错重叠的,很难用数学方法描述。举例可见示意图 1。图上小山顶 A 点可获得由 A₀ 至 D 点及 E 点至 F 点间的坡面反射辐射;山坡 B 点可获得 B 点至 C 点及 C 点至 D 点间的坡面反射辐射;而山谷 C 点则可获得 A 点至 C 点及 C 点至 D 点间的坡面反射辐射。而且,随着方位角 ψ 的改变,反射面的状况不断变化。所以,只有借助计算机对 (2) 式进行数值积分方能求得来自周围山区的反射辐射通量密度。

将 (3) 式代入 (2) 式,为了演算和书写方便,且令:

$$\gamma'(\psi) = \int_{h_s(\psi)}^{z'(\psi)} \frac{1}{\pi} A_{\psi h} \cdot Q_{\psi h} (\sin \alpha \cos \psi \cos^2 h + \frac{1}{2} \cos \alpha \sin^2 h) dh \quad (4)$$

则有

$$R'_{\alpha\beta} = \int_0^{2\pi} \gamma'(\psi) d\psi \quad (5)$$

利用梯形公式将 (4)、(5) 式表示为:

$$\begin{aligned} r'(\psi) &= r'_p \\ &= \frac{1}{\pi} \left\{ \Delta h \sum_{q=1}^{m_p-1} A_{pq} \cdot Q_{pq} [\sin \alpha \cdot \cos(p \cdot \Delta \psi) \cdot \cos^2(h_{sp} + q \cdot \Delta h) \right. \\ &\quad + \frac{1}{2} \cos \alpha \cdot \sin 2(h_{sp} + q \cdot \Delta h)] + \frac{1}{2} (\Delta h + \Delta h'_p) A_{pmp} \cdot Q_{pmp} \\ &\quad \times [\sin \alpha \cdot \cos(p \cdot \Delta \psi) \cdot \cos^2(h_{sp} + m_p \cdot \Delta h) + \frac{1}{2} \cos \alpha \cdot \sin 2(h_{sp} + m_p \cdot \Delta h)] \\ &\quad + \frac{1}{2} \Delta h'_p \cdot A_{pz/p} \cdot Q_{pz/p} [\sin \alpha \cdot \cos(p \cdot \Delta \psi) \cdot \cos^2 z'_p \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \cos \alpha \cdot \sin 2z'_p] \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

$$R'_{\alpha\beta} = \Delta \psi \cdot \sum_{p=1}^n r'_p \quad (7)$$

式中 r'_p 表示来自 $p \Delta \psi$ 方位上的反射辐射强度, Δh 、 $\Delta \psi$ 分别为高度角步长和方位角步长(均为模式的输入参数)。p、q 分别为方位角和高度角的循环变量。p 取值时以坡地方位为零,并按顺时针方向计量。故当各要素的下标为 pq 时,表示在 $p \Delta \psi$ 方位、 $h_{sp} + q \Delta h$ 高度角的反射面上该要素的值, z'_p 表示 $p \Delta \psi$ 方位上的地平遮蔽角。 m_p 表示在 $p \Delta \psi$ 方位上,整个反射面高度角区间的整划分数,故有

$$m_p = \text{int} \left\{ \frac{z'(P \Delta \psi) - h_s(P \Delta \psi)}{\Delta h} \right\} \quad (8)$$

$\text{int}(x)$ 表示舍去 x 小数部分的取整函数。于是 $\Delta h'_p$ 可定义为:

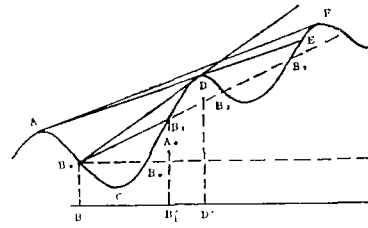


图 1 山区中反射的剖面示意图
A sectional skeleton map of the reflection in mountainous area

$$\Delta h'_p = z'_p - (h_{sp} + m_p \cdot \Delta h) \quad (9)$$

表示 $p \triangle \psi$ 方位反射面的整个高度角区间与被整划分的高度区间之差, 而任一地点处的地形参数 α 、 $z'(\psi)$ 、 $h_s(\psi)$ 的理论计算方法, 我们已有专文¹⁾介绍。

所以 (6) 式所代表的意义为: 右边第一部分表示来自测点所在坡面的自身遮蔽角以上至 $h_{sp} + (m-1) \triangle h$ 段的反射辐射通量, 第二、三部分则表示来自第 m_p 段和剩余高度区间内的反射辐射通量。

式 (6) - (9) 即构成山区测点所获得的来自周围山地的反射辐射通量密度的理论计算模式。

二、计算方案

应用该模式计算投射到山区测点的周围地区的反射辐射日平均通量密度时, 应先将所计算地区的地形等高线网格化, 尔后, 应用作者所提出的山地总辐射的理论计算模式, 求出每个网格点上的总辐射日平均通量密度, 并以此作为本模式的输入参数。再求得每一反射点上的总辐射日平均通量密度, 我们以示意图 1 中的 B 点为例说明它所获得的反射点 B_1 的总辐射 Q_{pq} 的计算方法。

由于 Q_{pq} 表示来自方位角为 $p \triangle \psi$ 、高度角为 $h_p + q \triangle h$ 的方向上距计算点最近的坡面反射点 B_1 (同一方位上的其它坡面如 B_2 、 B_3 等为它所遮挡) 的总辐射。因此, 计算时应先确定出它的水平位置, 然后, 根据每个网格点上的总辐射值, 采用一定的内插方法求出 Q_{pq} 。

如图 2 所示, 设计算点 B 沿方位角 $p \triangle \psi$ 方向的反射面的水平投影线为 $B'B''$, 而高度角为 $h_p + q \triangle h$ 的反射点 B_1 的水平投影为 B'_1 。水平投影线 $B'B''$ 与网格线的交点按与研究点 B' 的水平距离大小依次编为 1、2、...、 $K-1$ 、 K 、...、 B'' 。这些点上的海拔高度值可由各点所在网格线上相邻格点的高度值, 通过线性内插求得。然后, 依次算出这些交点分别对 B 点所形成的高度角 (遮蔽角) h'_1 、 h'_2 、...、 h'_{K-1} 、 h'_K 、...、 $h'_{B''}$ 。若反射点 B_1 的水平投影点 B'_1 位于第 $K-1$ 和第 K 点之间的话, 则 K 应满足如下条件:

- (1) $h'_{K-1} < (h_p + q \triangle h) \leq h'_K$
- (2) $h'_K > h'_i \quad (1 \leq i \leq K-1)$

上述条件的几何意义是清楚的。它规定向测点 B 投射地面反射辐射的山坡点 B_1 , 其对研究点 B 的遮蔽角应比 h'_1 、 h'_2 、...、 h'_{K-1} 大, 但小于或等于 h'_K 。故计算时, 应将 h'_1 、 h'_2 、...、 h'_K 、...

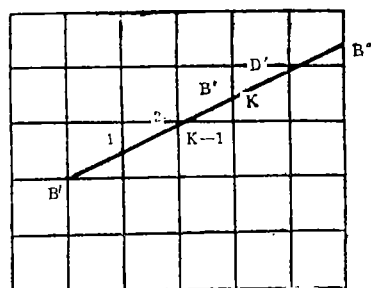


图 2 山区中反射的水平投影示意图
A projection skeleton map of the reflection in mountainous area

1) 李占清、翁笃鸣: 一个山地地形参数的理论计算模式。

h'_p 逐个与 $(h_p + q\Delta h)$ 比较, 直到找到满足上述条件的 K 。尔后, 根据这三点的相对地形高度角进行线性内插, 并计算出 Q_{pq} 。即:

$$Q_{pq} = \frac{h'_k - (h_p + q\Delta h)}{h'_k - h'_{k-1}} Q_{k-1} + \frac{(h_p + q\Delta h) - h'_{k-1}}{h'_k - h'_{k-1}} Q_k \quad (10)$$

式中 Q_{k-1} 、 Q_k 分别表示第 $k-1$ 点和第 k 点上的总辐射日平均通量密度, 也可由相邻网格点的总辐射值求得。由于交点上的高度值和总辐射值均由相邻网格点上的相应值, 通过线性内插的方法求得, 因此网格的取值直接影响到模式计算结果的精度。显然, 网格距越小精度越高, 但计算用机时间也大幅度增加。一般地说, 网格距的取值应视地形的起伏程度而定。针对大别山南段地形特点, 我们认为格距取 100 米已能说明问题, 地形和辐射场的模拟结果都表明这种选择是合适的。

山地中的反射率除了与下垫面的性质有关外, 还随坡向、坡度和时间变化而变化, 但后者均归结为坡面上的太阳入射角的单一函数。由于坡面反射率观测比较困难, 一般可借用与坡面表面性质相同的水平面上的观测结果通过换算途径得到。山地不同地表覆盖性质主要引起反射率的空间差异; 而坡地的坡向、坡度特点则决定该坡面的反射率日变化特点。此外, 考察到在一日中, 各时刻的反射率和太阳总辐射通量密度都有日变化, 所以在求算坡面反射率日平均值时, 傅抱璞^[2]建议用反射辐射日总量与总辐射日总量的比值计算。

我们用此法计算试验地区的 9 个坡度、16 个坡向的坡面和水平面的日平均反射率。结果表明, 坡面日平均反射率随坡向、坡度的变化在冬、夏季还有所差异。一般在 1 月份北坡的反射率最大, 东、西坡次之, 南坡最小。而在 7 月份则以南、北坡最大, 东、西坡最小, 但变化幅度较小。1、7 月份各坡面的日平均反射率的最大、最小值之差与水平面日平均反射率之比分别为 3.8% 和 3.3%。这主要是由于反射率一般随太阳入射角的增大而增大。冬季, 北半球偏北坡上的太阳入射角最大, 而偏南坡上的太阳入射角最小; 东、西坡面介于二者之间。而在夏季, 当所计算山区的纬度较低时, 各坡地的太阳入射角的变化较小, 故日平均反射率的坡向变化也很小(图略)。

三、试验结果及其分析

图 4 给出试验山地安徽潜山县境内大别山南段 ($116^{\circ}28'E$, $30^{\circ}33'N$) 一个 3×3.5 平方公里丘陵山地的地形等高线图和划分的网格线图。计算时, 网格距取 100 米, 方位角步长与高度角步长分别取 22.5° 和 2° 。将上述参数及相邻的潜山县气象站多年平均的云量、日照百分率资料依次代入有关的计算模式(山地地形参数, 山地总辐射和本模式)中, 我们计算中了研究山区中每个网格点所获得的来自周围地区的反射辐射日平均通量密度, 并依此绘出了其分布图。同时, 为了比较, 还利用常用的计算该量的近似公式(1), 在反射辐射为各项同性的假定下, 进行了计算。

图 5、图 6 分别给出按这两个模式计算的 1 月份来自周围山地和坡前平面的反射辐射日平均通量密度分布图。由图可见, 来自周围地区的反射辐射日平均通量密度与山地中的其他辐射分量相比为一小量, 由此我们可以推断, 在研究计算山区的辐射平衡时, 山区各点间的二

次反射辐射更小,可忽略不计。

比较图 5、6 还可以发现,来自周围地区的反射辐射的分布一般较坡前平面的反射辐射的分布形式复杂。在大多数测点上,由本模式计算的周围地区的反射辐射值比按地面反射各向同性模式计算的坡前平面的反射辐射大,尤其当计算点位于相对平坦的山谷中时,两者的差值达到最大。如在图 5 的山谷中,大多出现高值中心,而在图 6 上则看不出来。较典型的如图 3 中的峡谷 A 点,两侧山坡的平均坡度高达 30° 以上,在图 4 中 A 点的数值为 2.4 w/m^2 而在图 5 中 A 点的数值为零。显然,产生这种差异的主要原因是本模式考虑了周围山区的所有可能的反射辐射,而在各向同性模式计算的坡前平面反射辐射则仅仅与计算点的局地坡度有关。

其他月份的分布趋势与 1 月份类似,只是在夏季月份,来自周围山区的反射辐射分布较 1 月份分布更均匀。

为了进一步分析山区中来自周围山地的反射辐射作用大小,我们还计算了当试验地区完全被雪覆盖时(反射率取 0.9)来自周围地区的反射辐射值,结果发现其量值大幅度增大,最大值与平均值分别为 11.1 和 4.1 w/m^2 ,分别为同时期山地平均天空散射辐射的 24.7% 和 9% 。因此可以认为,在冬季月份,当山区全部被积雪覆盖时,必须考虑来自周围山地的反射辐射。这种情况在我

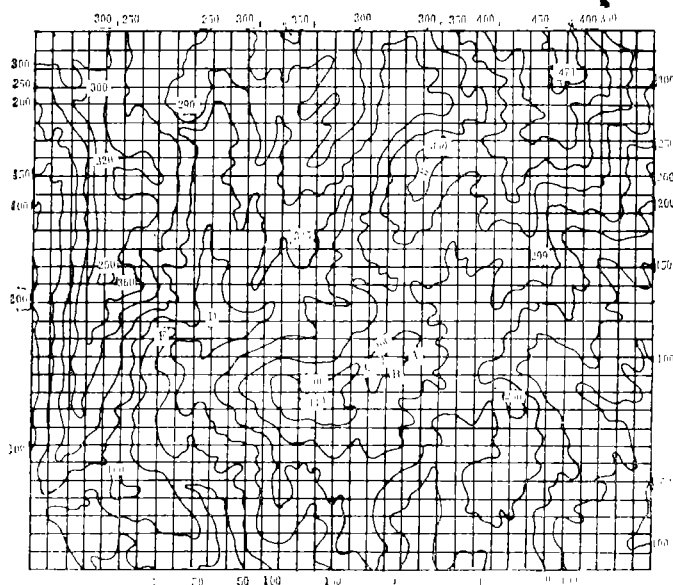


图 3 试验山区的地形等高线图和网格线
Contour map and networks in the test mountainous area
(Contour interval is 100m)

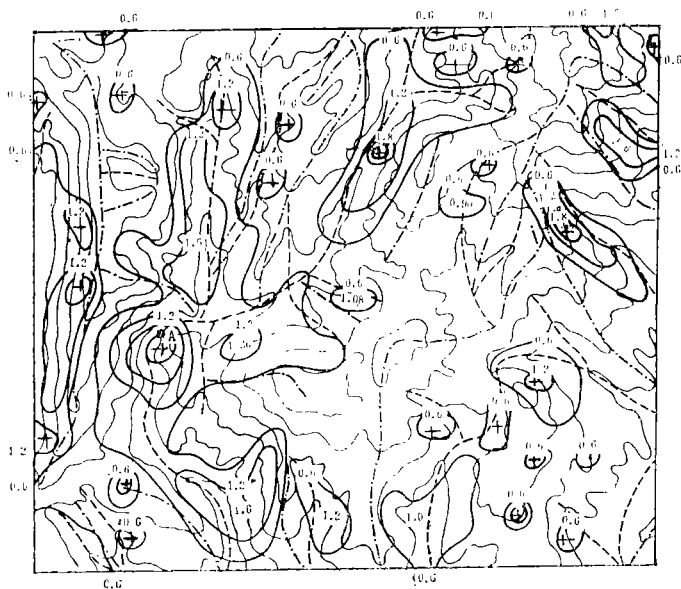


图 4 由本模式计算的 1 月份试验山区中来自周围山地的反射辐射日平均通量密度分布

The distribution of the reflected radiation from the surrounding terrains in the test mountainous area using our developing model in January. (Contour interval: 0.06 w/m^2)

国北方地区的冬季是有实际意义的。此外,我们还利用一个简单的依坡向而变的积雪覆盖模式,计算来自周围山地的反射辐射,结果表明,此时反射辐射的空间差异更大,由此引起的总辐射和辐射平衡的局地差异也是不容忽视的,在北方的过渡季节会出现这种情况。

根据以上分析表明:

1. 山区中来自周围山地的反射辐射日平均通量密度,完全可以利用计算机通过数值积分的方法求得。这里所介绍的模式不仅通用性强,且模式的计算精度随网格距的减小而一致提高。

2. 应用本模式进行的数值试验表明,山区中来自周围山地的反射辐射日平均通量密度,当无积雪存在时,一般量值较小,甚至可忽略不计;当山区完全被雪覆盖时,该辐射量可达相当大的数值,是不能忽略的。

3. 比较本模式与各向同性下的坡前平面反射辐射模式的计算结果,可以发现,在实际山区中,两者无论在分布趋势下或量值上都存在较大差异。

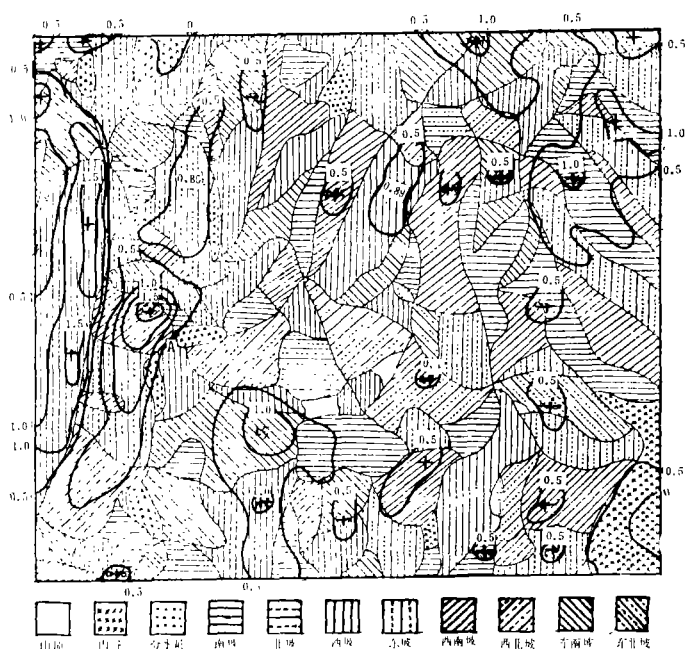


图 5 由单一坡面反射辐射模式计算的 1 月份试验山区来自坡前平面的反辐射日平均通量密度分布

The distribution of the reflected radiation from horizontal planes in front of slopes in the test mountainous area using single-slope reflection model in Jaunar (Contour interval is $0.5 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2}$)

参 考 文 献

- (1) Кондратьев К.Я, Актинометрия, Л., Гидрометеоиздат., 444—454, 1965.
- (2) 傅抱璞: 山地气候, 科学出版社, 1983年。

A NUMERICAL MODEL TO CALCULATE THE RADIATION REFLECTED FROM THE SURROUNDING MOUNTAINOUS AREAS

Li Zhanqing

Weng Duming

(National Meteorological Center) (Nanjing Institute of Meteorology)

Subject Indexing: reflected radiation, mountain region

Abstract

In this paper, a numerical model is presented to calculate the reflected radiation from the surrounding terrains in mountainous areas, on the basis of our developing models for calculating the terrain parameters and global radiation over rugged sites. The major input parameters of the model are altitude and albedo data at each grid, time interval, grid-space and the long-term average of the cloud amount and the sunshine percentage at the nearest adjacent weather station to the studied area. The output one of it is in the form of the map of its distribution.

The tests, made in Dabie Mountain, in the south of China, manifest that the reflected radiation from the surrounding terrains is in general much smaller than other components of radiation balance. However, it becomes so important that it must not be neglected if the mountainous areas in question are entirely covered with snow, which is of some representation in the north of China in winter.

The comparison of the results given by the present model and the single-slope one makes it clear that they are noticeably different in magnitude and distribution, the variation of the former being more intense from place to place than that of the latter, especially if snow-melting degree is not the same in the whole studied mountainous areas.