

山 地 气 候

王利溥 编

西南林学院

一 九 八 五

前 言

山地因地形地势的影响，形成特殊的气候，称为山地气候。

我国是一个多山的国家，山地（包括丘陵）面积占全国总面积69%，西南区尤其多山，有的省份山地可达85%以上。山区地貌类型众多，高差悬殊，形成复杂的气候环境和丰富的气候资源，在山区组织农林业生产，由于气候资源丰富，必然物产丰富，但气候类型极其复杂，就某一种种植对象而言因受气候环境的限制，难以建设成大面积的生产基地，商品率低。可以说山区农林业生产：好也好在气候复杂，坏也坏在气候复杂。因此研究山地气候，了解山地气候资源，对于开发利用山区气候资源，促进农、林、牧、渔全面发展有重大意义。

为了使同学们掌握山地气候的基本知识，我们把山地气候在《气象学》里扩大成一章来讲解。《山地气候》主要取材于南京气象学院翁笃鸣等编著的《小气候和农田小气候》（农业出版社1981年出版），并参考有关论著，结合我们的需要编写而成。从1983年在我院试讲以来，曾应邀到有关产业部门、科委系统、院校讲授过。各地又纷纷来函索取本教材，虽曾在院内外四次印刷，也不能满足社会的需要。值此五次印刷之机，谨向本教材引用有关文献的原著者和资料提供者致谢！

由于我们在教学上有所侧重，更由于我们业务水平关系，本教材必有偏颇，敬请读者指正！

一九八四年十一月

目 录

第一节	地形对日照的影响	
一、	海拔高度对日照的影响	(1)
二、	坡向坡度对日照的影响	(2)
第二节	地形对辐射的影响	
一、	海拔高度与辐射的关系	(6)
二、	坡向坡度与辐射的关系	(9)
第三节	地形对温度的影响	
一、	海拔高度对气温的影响	(18)
二、	地形对温度条件的影响	(22)
三、	山区逆温	(27)
第四节	地形对降水的影响	
一、	高原的降水	(32)
二、	山坡的降水	(32)
三、	山坡降水随海拔高度的变化	(33)
第五节	地形对风的影响	
一、	地形对风的动力影响	(37)
二、	地形对风的热力作用	(39)

第一节 地形对日照的影响

地形对日照的影响，是通过海拔高度、坡向、坡度的变化而产生差异的。

一、海拔高度对日照的影响

从理论上来讲，海拔高度增加，测点的视地平扩展，有可能当太阳还在地平线下时就开始接受日照，当太阳没落低于地平线之后，也仍可能接受日照。因此海拔愈高，日出时间愈早，日落时间愈晚。也即是海拔愈高，一日日照时数愈长。

从实际情况来看，由于日照时数是纬度和赤纬的函数，在我国所处纬度范围内，及山高小于3,000米的情况下，据计算，海拔高度对日照的影响不超过14分钟。西南山区年日照时数，虽然与海拔高度有一定的关系，但受山区云雾量的影响很大。以西双版纳为例，年日照时数随海拔高度分布如图1所示，曲线呈抛物型。它表明年日照时数由低处向上受云雾量的

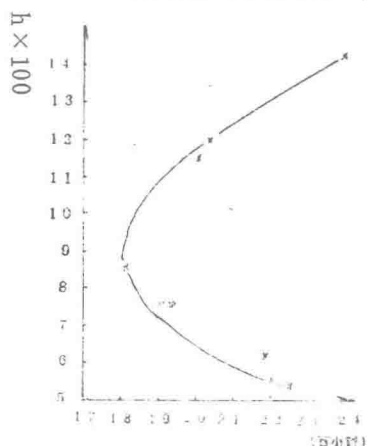


图1 年日照时数随高度的分布

影响开始是递减的，大致在850米处达到最小，然后随海拔高度增加日照时数又增多起来。日照时数与海拔高度的关系，可用经验公式表达如下：

$$Y = 4176.634 - 4.9822H + 0.002662H^2 \quad (1)$$

式中：Y为年日照时数；H为测点高度（米）。

国外有些观测资料，也有类似结果，看来这种分布具有普遍性。

二、坡向坡度对日照的影响

我们可以用坡地上的辐射公式，推导出坡地上日出、日落时角（ W_s ）。其公式如下：

$$W_s = \arccos \frac{-U \cdot V \cdot \operatorname{tg} \delta \pm \omega \sqrt{1 - U^2} (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}{1 - U^2} \quad (2)$$

式中， $U = \sin \varnothing \cos \alpha - \cos \varnothing \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$

$V = \sin \varnothing \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \varnothing \cdot \cos \alpha$

$\omega = \sin \varnothing \cdot \sin \beta$

式中， δ 为赤纬； $\varnothing$ 为地理纬度； β 为坡向，由正南算起由 0° 至 $\pm 180^\circ$ ，向西为正，向东为负； α 为坡度。式中分子第二项的正负号，表示坡地日出和日落时角，对于日出时角取正号，日落时角取负号。由此可见，任一坡地的日出、日落时角将取决于 $\varnothing$ 、 δ 、 α 、 β 。

（2）式表明当时角为 W_s 时，坡地上的直接辐射将为零，表示开始（或终止）接受日照。这是几何上得出的结论。在某种情况下可能与实际情况有出入。例如，冬季 δ 为负，如按（2）式计算，则海平面日出、日落时角（ W_0 ）将小于（ W_s ），

这与实况不符。所以讨论坡地日出、日落时角时，还得考虑 W_0 的条件。决定坡地日照的首要条件是：

$$|W_0| \geq |W_1|, |W_2|$$

也即是任一坡地上的实际日出 (W_1) 和日落 (W_2) 时角，最大也不能超过海平面日出、日落时角 (W_0)。

下面我们用图示法来定性讨论各坡向在不同坡度下的日照条件。为了讨论方便，先将图的绘法予以说明。

以讨论地点 (O) 为国心，取任意半径作一圆，表示该测点的视地平。之后在圆心上取两个坐标。第一个是方位角座标，从正南算起，由 0° 至 180° ，向西为正，向东为负。第二个

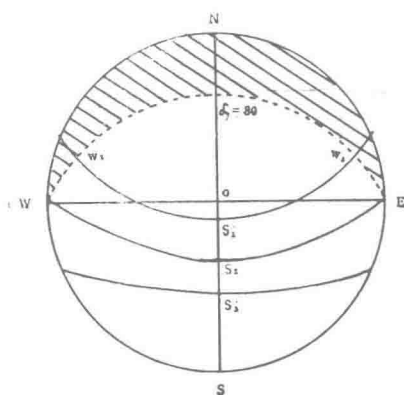


图2 南坡日照条件示意图

是高度角 (仰角) 座标，由圆周边上算起，沿半径划分成 $0 \sim 90^\circ$ 的刻度。然后，将研究地点的坡度点在半径上。图2表示南坡 30° 的坡面，因此，要在正北方位上找出仰角为 30° 的一点，这一点在上图中是从正北周边沿半径向内的 30° 刻度上。再找出与正北方位相差 $\pm 90^\circ$ 的方位，本图是正东、正西方位上两点。通过这三点作一圆弧，圆弧与地平大圆所包部份即为南坡 30° 坡度所造成的遮蔽范围，涂以阴影。

为了讨论方便，再在图上绘上夏至日、二分日、冬至日三条太阳视轨道（图中的 S_1 、 S_2 、 S_3 ）。凡是太阳视轨道通过阴影范围，即表示太阳被坡地所挡，无日照。太阳视轨道在阴影以外部份则表示测点有日照。太阳轨道与阴影相交的点，即为坡地上实际开始（ W_1 ）、终止（ W_2 ）接受日照时刻。

讨论其他坡向时，图中三条太阳视轨道不变，只需将坡度所造成的遮蔽范围，画在各自坡向正对面的半圆上，就可以分析不同季节不同坡向在不同坡度下的日照条件了。

1、南坡的日照条件

南坡的日照条件，在不同季节按图2分析，可归纳成以下几点：

第一，在夏半年，当太阳开始从地平线上升起时，光线从坡背后射来，山坡自身挡住阳光。坡地上无日照。此后，随太阳逐渐升高，在北回归线以外地区，太阳方位角向南移，至时角为 W_1 时，山坡开始接受日照，直至 W_2 时结束。随坡度变化的升高，坡地对日出后、日没前的影响时间加长，从而一日日照时间缩短。

第二，在二分日，此时太阳从正东方升起，正西方没落，日照时数与平地相同，且不受坡度的影响。

第三，在冬半年日照时间最长，坡度对日照时数没有影响。

2、北坡的日照条件

北坡的日照条件，在不同季节按图示法可归纳成以下几点：

第一，夏半年，对 $\alpha < 40^\circ$ 的北坡而言，坡地对阳光无阻挡。全天有日照。一直要 $\alpha > 75^\circ$ 时，坡地对阳光才产生影响。

第二，在二分日， $\alpha < 40^\circ$ 的北坡全天仍然有日照。 $\alpha > 55^\circ$ 时对日照产生影响， $\alpha = 90^\circ$ 则全天无日照。

第三，在冬半年， $\alpha < 30^\circ$ 的北坡上，开始有段时间无日照，从 W_1 起，太阳高度角超过坡地本身的遮蔽角，光线自坡后投至坡面上，坡地开始有日照，直到 W_2 终止。冬半年北坡坡度越大，日照时间越短，当 $\alpha > 40^\circ$ 时即全天无日照。

3、平行山脊中的日照条件

在平行山脊中，测点受两边山脊影响，其日照条件在假设山脊互相平行和山脊高度大致保持不变的情况下，理论上可以确定山脊对测点的遮蔽角随方位变化的情况：

$$\text{Sinh}(\varnothing) = \frac{\text{Cos } \varnothing}{\sqrt{\text{Ctg}^2 ha + \text{Cos}^2 \varnothing}} \quad (3)$$

式中， $h(\varnothing)$ 为前面一个山脊对测点的遮蔽角； $\varnothing$ 为测点至前面山脊任一点的方位角，以测点至山脊的法线方向为初终方向 ($\varnothing = 0$)，顺时针方向为正，逆时针方向为负；遮蔽角 $h(\varnothing)$ 是方位角 $\varnothing$ 的仰角， $h(\varnothing)$ 将是 $\varnothing$ 的函数。 ha 为前面山脊 (a 山脊) 的最大遮蔽角，即 $\varnothing = 0$ 时的仰角。

对于测点后面山脊所造成的遮蔽角，表达式与 (3) 式相同，由于 $\varnothing$ 正好相差 180° ，所以 $\text{Cos } \varnothing$ 前要加负号。即：

$$\text{Sinh}(\varnothing) = \frac{-\text{Cos } \varnothing}{\sqrt{\text{Ctg}^2 hb + \text{Cos}^2 \varnothing}} \quad (4)$$

第二节 地形对辐射的影响

地形对太阳辐射的影响，也是通过海拔高度、坡向、坡度的变化而产生差异的。

一、海拔高度与辐射的关系

随着测点高度的增加，测点空气柱的质量很快减小，气柱中的水汽、二氧化碳、气溶胶含量迅速减少，大气变得更透明，受到大气的吸收、散射而损耗的光照少。这种影响几乎遍及到辐射平衡各个分量。

1、太阳直接辐射

太阳直接辐射随海拔高度增加而增大，这种增加的速度从图3可见：开始时很快，然后递增有所减缓，到达6,000米以上就不明显了。据西北大学在秦岭山区观测结果，中午时，华山(3,064.7米)直接辐射强度平均可达1.55~1.42卡/厘米²·分，

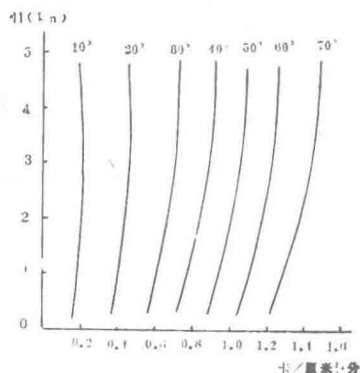


图3 不同太阳高度角下水平面上直接辐射随海拔高度的变化

为大气上界的71~74%；而西安（396.9米）由于地势较低，直接辐射明显减小，只为大气上界的31~64%。就平均状况而言，在中纬度对流层下部，高度每升高100米，太阳直接辐射要增加5~15%。有云时，由于云的影响，随海拔高度的变化就不如晴天明显。

2、散射辐射

在无云条件下，散射辐射随高度总是递减的。图4是我国青藏高原及其邻近地区的观测资料，从中可见不同太阳高度角下，晴天散射辐射随高度的分布，在2,000米以下低空散射辐射日总量随高度的增加递减较快，以上则递减速度要小些。

有云时情况比较复杂，此时云量、云状的影响将起重要作用。

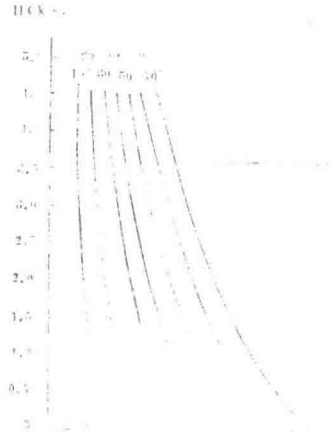


图4 晴天不同太阳高度角下散射辐射随海拔高度的变化

3、总辐射

总辐射随海拔高度的变化

取决于直接辐射和散射辐射，由于直接辐射在总辐射中所占比例很大（在高山上晴天可达90%左右），所以，总辐射随海拔的增高是增大的，前述西安和华山对比观测资料，两地晴天时总辐射日总量分别为639.7卡/厘米²·日和743.2卡/厘米²·日，所以每升高100米可增加4.4卡/厘米²·日。有云时，其影响就不如晴天明显了。

在晴空的条件下，国外有学者用如下经验公式计算总辐射随海拔高度的变化：

$$Q_H = Q_0 - (Q_0 - Q_m) e^{-\frac{H}{E}} \quad (5)$$

式中： Q_H 为海拔高度H米处的太阳总辐射； Q_0 为大气上界的太阳辐射； Q_m 为海平面的太阳辐射； E 为经验常数，在不同地区取不同的数值，在喀尔巴阡山约为6,500米，在斯洛伐克平均为5,000米。

在有云的天气条件下，计算太阳总辐射随海拔高度的变化可表示为：

$$Q_{nH} = Q_H [1 - (1 - K_H) n] \quad (6)$$

式中， n 为平均云量， K_H 为总辐射穿过云的平均系数，是高度的函数。根据捷克斯洛伐克、高加索、中亚细亚等山区辐射资料：

$$K_H = 0.01 \left(33 + \frac{2}{300} H \right) \quad (7)$$

将(5)及(7)式代入(6)式中，即可得出有云情况下实际总辐射随海拔高度的变化式。

这是经验公式，使用时会受到地理条件的限制，但它所反映的联系式对我们是有参考价值的。

4、反射率

在山区地表反射率的改变主要与地表覆盖特征有关。若山地地表覆盖特征无明显的差异，地表反射率也应大体一致。

5、有效辐射

在山区，地表有效辐射随海拔高度增加而递增，这主要由于大气逆辐射随高度急剧降低的结果。

6、辐射平衡

辐射平衡随海拔高度的变化比较复杂，因为作为它的收入部分——总辐射是随海拔高度而增大的，支出部份——有效辐射也随海拔高度而递增，所以最终要看那一项是变化的主要矛盾。据南京气象学院翁笃鸣等以有限资料的分析，初步推断认为（表1）辐射平衡随海拔高度的增加而减少。

表1 晴天各测点辐射平衡日总量（卡/厘米²·日）

测 点	南京	格尔木	拉萨	狮泉河	那曲	双湖
海拔高度（m）	39	3307	3633	4378	4507	4930
辐 射 平 衡	381.3	354.3	319.9	315.9	283.3	319.9

关于辐射平衡随海拔高度而递减的间接依据，他们根据青藏公路沿线青海境内各站地面温度资料，与海拔高度的关系是呈线性递减的，从而可以认为在某程度上辐射平衡是随海拔高度而递减的。另外，高山地区，总是夏季、日间云量较大，冬季、夜间云量较小，这样有利于削减高山上夏季和日间的短波射入辐射，增大冬季和夜间的有效辐射，于是更有利于辐射平衡随海拔高度递减规律性的形成。

二、坡向坡度与辐射的关系

坡向坡度不同，坡地上的日照时间和太阳辐射强度均有很大的不同，因而获得的太阳辐射总量也不一样。因此，要研究山区的太阳辐射分布情况，必须了解坡地上的辐射分布。

1、坡地上的直接辐射

若令任一坡面上，在太阳光线正照坡地时所获得的太阳辐射量为 S_{α} ，则：

$$S_{\alpha} = S_m \cdot \sin(\alpha + h_0) \quad (8)$$

式中， S_m 为垂直于太阳光线面上的直接辐射； α 为坡度； h_0 为太阳高度角。从(8)式可以看出，对于同一坡地来说，当 $\alpha + h_0 \leq 90^\circ$ 时，坡地上的直接辐射将随着 α 的增大而增加，并在 $\alpha + h_0 = 90^\circ$ 时达到最大。此后，若 α 更大，则 S_{α} 反而减小。

太阳正照坡面，在自然界里只是一种特殊情况，而普遍情况则不是正照坡面。太阳光线斜照坡面，坡向(β)与太阳方位角(A)之间要形成一个 $(A - \beta) = \varphi$ 的夹角。因此，在斜射的条件下，坡地上太阳辐射能量将是：

$$S_{\alpha\beta} = S_m [\sinh_0 \cos \alpha + \cosh_0 \sin \alpha \cos(A - \beta)] \quad (9)$$

式中，坡向 β 是从正南开始计算，顺时针方向为正，反时针方向为负，各180。

根据(9)式，只要有垂直于太阳光线面上的直接辐射观测资料，就可以算出各坡地上直接辐射的日变化。

现在以南坡为例，来看看坡地上坡向、坡度对太阳辐射分布的影响。

正午时，对于南坡有 $A = 0$ ， $\beta = 0$ ，于是(9)式可改写成：

$$\begin{aligned} S_{\alpha 0} &= S_m (\sinh_0 \cos \alpha + \cosh_0 \sin \alpha) \\ &= S_m \cdot \sin(h_0 + \alpha) \end{aligned} \quad (10)$$

我们知道正午时的太阳高度角：

$$h_0 = 90^\circ - \varphi - \delta \quad (11)$$

这里， φ 为测点纬度， δ 为太阳赤纬，如以(11)式代入(10)式，则得：

$$\begin{aligned} S_{\alpha_0} &= S_m \cdot \sin(90^\circ - \varphi - \delta + \alpha) \\ &= S_m \cdot \sin(90^\circ - \varnothing + \delta) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\varnothing = \varphi - \alpha$, 于是不难看出 $(90^\circ - \varnothing + \delta)$, 即纬度为 $\varnothing$ 的地方正午时的太阳高度角, 这样, 我们就得到 S_{α_0} 的大小相当于纬度比原来 φ 低 α 度的地方的水平面上的直接辐射强度。也就是说, 在北京 (纬度约 40°) 坡度为 15° 的南坡上, 正午时获得的太阳辐射强度, 相当于昆明 (纬度约 25°) 水平面上所获得的直接辐射强度。所以, 就正午的太阳辐射而言, 南坡上的 α 每增加一度, 相当于纬度降低一度, 也就是相当于测点向南推移了 110 公里。

对于北坡而言, 情况则恰恰相反。

坡地上太阳直接辐射强度随坡向的变化: 在偏东坡地上, 午前大于午后, 在偏西坡上则恰好相反。至于南坡和北坡的太阳直接辐射强度的变化, 上下午基本上是对称的。在我国广大地区, 最大辐射强度以南坡最高, 东南坡和西南坡次之, 东坡与西坡以及东北坡与西北坡又依次减低, 北坡最低。最大辐射强度出现的时间, 除南、北坡与水平面均出现于正午时刻 (真太阳时) 外, 东坡最早, 东北坡与东南坡次之, 均出现于午前; 西南坡比西北坡早, 西坡最晚, 均出现于午后。

2、坡地上的散射辐射

由于天穹各质点散射的辐射强度是各不相同的, 因之要从理论上来计算坡地上的散射辐射就难了。只有假设在天穹里每一质点的散射辐射强度都是相同的, 才能以下式近似的计算坡地上的散射辐射:

$$D_\alpha = \frac{D_0}{2} (1 + \cos \theta_0) = D_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (13)$$

式中, D_0 为坡前平面上的散射辐射。

由于 (13) 式是在假设天空里每一质点的散射辐射强度都是相同的条件上成立的, 因此, 它在天空中布满低云时比较符合实际, 在晴天时就有较大的误差。

3、投射到坡地上的反射辐射

在坡地上也能获得由邻近地面反射过来的反射辐射。如果也假设地平面上每单位面积上反射的辐射 I' 都是相同的, 那么, 投射到坡地上的反射辐射 D_A 将为:

$$D_A = \pi I' \cdot \frac{1}{2} (1 - \cos \alpha) = \frac{1}{2} R_0 (1 - \cos \alpha) \quad (14)$$

式中, R_0 为坡前平地的反射辐射。

由 (14) 式可见, 当坡前平地反射辐射很大 (如有雪覆盖), 坡度比较大时, 考虑坡前平地的反射辐射是有意义的。

4、坡地上的有效辐射

从理论上讨论坡地上的有效辐射 F_α , 可以用下式计算:

$$F_\alpha = \frac{E_0}{2} (1 + \cos \alpha) \quad (15)$$

式中, E_0 是开旷平地的有效辐射。

如果坡地地面温度 θ_α 与坡前平地的地面温度 θ_0 有较大的差异, 那么还需考虑它们之间的长波辐射交换。坡面的长波辐射为 $\frac{S_\delta}{\pi} \theta_\alpha^4$, 平面长波辐射为 $\frac{S_\delta}{\pi} \theta_0^4$ 。故有:

$$U_{\alpha-0} = U_{\alpha'} - U_0' = S_\delta (\theta_\alpha^4 - \theta_0^4) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (16)$$

在日常情况下, 由于坡地与坡前平地的地面温度差较大, (16) 式之值可以较大, 不能忽略。

因此, 坡地上的有效辐射应为 (15) 式加 (16) 式, 接近于:

$$F_{\alpha} \approx F_0 \cos \alpha + S_{\delta} (\theta_{\alpha}^4 - \theta_0^4) \sin^2 \frac{\alpha}{2} \quad (17)$$

5、坡地上的辐射平衡

综合前面的讨论，从图 5 可见，任一坡地上的辐射平衡方程为：

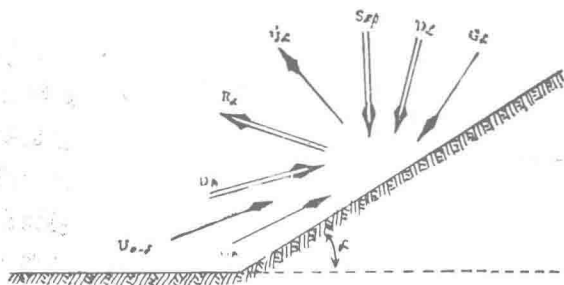


图 5 坡地上辐射平衡各分量示意图

$$B_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta} + D_{\alpha} + D_A - R_{\alpha} + SG_{\alpha} + SG_{oA} - SU_{\alpha-o} - U_{\alpha} \quad (18)$$

式中：

$S_{\alpha\beta}$ 为坡面直接辐射：

$$S_{\alpha\beta} = S_m [\sinh \theta \cos \alpha + \cosh \theta \sin \alpha \cos (A - \beta)] ;$$

D_{α} 为到达坡地上的天穹散射辐射：

$$D_{\alpha} = \frac{D_0}{2} (1 + \cosh \theta) = D_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2} ;$$

D_A 为由坡前地面反射而到达坡面的反射辐射：

$$D_A = \frac{R_0}{2} (1 - \cos \alpha) = R_0 \sin^2 \frac{\alpha}{2} ;$$

R_{α} 为坡地对于太阳辐射的反射辐射：

$$R_{\alpha} = (S_{\alpha\beta} + D_{\alpha} + D_A) A_{\alpha};$$

G_{α} 为坡地上的大气逆辐射:

$$G_{\alpha} = G_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} G_0 (1 + \cos \alpha);$$

G_{0A} 为由坡前地平面反射的大气逆辐射:

$$G_{0A} = (1 - S) G_0 \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

$U_{\alpha-o}$ 为坡地与平地间的辐射热交换:

$$U_{\alpha-o} = S_{\delta} (\theta_{\alpha}^4 - \theta_o^4) \sin^2 \frac{\alpha}{2};$$

U_{α} 为坡地向大气层放射的长波辐射:

$$U_{\alpha} = S_{\delta} \theta_{\alpha}^4 \frac{1}{2} (1 + \cos \alpha)$$

对于坡度比较小的坡面, (18)式可简化成:

$$B_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta} + D_{\alpha} - R_{\alpha} - F_{\alpha} \quad (19)$$

所以, 对于坡地辐射平衡, 只要有地面上的辐射平衡观测, 以及坡地温度观测资料就可相当精确地计算出来, 无需直接观测。

6、坡地上的太阳辐射总量

坡向和坡度对坡地太阳辐射到达量的影响, 可归纳为以下几点:

(1)、南坡和北坡的坡度大小, 对坡地上太阳辐射总量影响最大, 而接近东坡或西坡的坡地, 其坡度大小对太阳辐射总量的影响最小。夏半年, 南坡的坡度增加1度, 等于水平纬度向南移1度。而冬半年, 北坡的坡度增加1度, 等于水平纬度向北移1度。

(2)、夏半年, 偏南坡的太阳辐射总量(表2), 在低纬