

不同地形下辐射收支各分量的差异与变化

傅抱璞

(南京大学大气科学系, 南京 210093)

摘要 给出了确定山区辐射收支各分量的方法, 并根据计算结果分析了在不同纬度和季节各种地形下辐射收支各分量的差异及其随坡地倾角或谷地周围地形遮蔽角的变化规律。

关键词 地形 辐射收支 分量 变化规律

1 引言

在山区, 由于地形不同, 其下垫面上的辐射收支各分量可以相差很大, 且在不同纬度和季节的差异情况也大不一样。在以往的工作中, 关于坡地对太阳辐射的影响研究较深, 且有一定实际观测资料^[1~7]; 对于其他地形下的辐射收支各分量, 虽然也有不少研究, 但这些研究一般都只是探讨理论计算模式^[8~16], 很少给出辐射收支各分量随地形变化的具体计算和分析, 还不能满足生产实际的需要。本文是在作者过去理论研究的基础上, 对不同地形在不同纬度和不同季节的辐射收支各分量, 根据计算结果绘成图表, 进行分析比较, 以揭示其变化规律与差异对比。

2 计算模式和方法

山地的地形是千变万化的, 我们不可能对每一种具体地形都进行计算, 只能选择一些典型地形做代表。因为比较常见的地形是各种不同坡向的坡地、不同走向的谷地(包括长谷、河谷和峡谷等)和近乎圆形的山谷或盆地。为此我们就以东、南、西、北坡及东西走向谷地、南北走向谷地和圆形山谷作为一些常见地形的代表, 通过计算结果来分析各种坡地的坡面上及谷地中心的平地上辐射收支各分量日总量的差异及其与开旷地面上的对比。为计算和相互对比方便起见, 我们假定: 1) 各种走向谷地两边的地形高度相同, 且互相平行, 其对谷地中心的正交可蔽视角(即两边地形对谷地中心的最大遮蔽角)均为 α ; 2) 圆形山谷周围地形高度相同, 其各方位对山谷中心的遮蔽角或可蔽视角均为 α ; 3) 坡地的坡度与以上两种谷地的可蔽视角相同, 也为 α 。

山地地面的辐射收支方程为

$$B_m = (S_m + D_m + R_m^{\uparrow})(1 - a) - (E_m + G_m + E_m^{\downarrow}) = Q_m - F_m,$$

式中 B_m 为山地研究面上的净辐射; S_m 为直接太阳辐射; D_m 为天空散射辐射; $R_m^{\uparrow}$ 为由周围地形下垫面向研究地点反射来的短波辐射或简称之为外反射辐射; a 为下垫面的

反射率; E_m 为研究点地面向外发射的长波辐射; G_m 为大气逆辐射; E_m^l 为来自周围地形下垫面的长波辐射; $Q_m = S_m + D_m + R_m^l$, $F_m = E_m - G_m - E_m^l$ 分别为山地总辐射和有效辐射, 其与开旷平地不同之处是前者多了一项外反射辐射, 后者多了一项来自周围地形下垫面的长波辐射。

关于在不同地形下辐射收支各分量日总量 S_m 、 D_m 、 R_m 和 F_m 的计算模式和方法, 作者在文献[2.11,14,16]中已有详细论述, 这里只把本文所选各种代表地形除极昼和极夜区外所需用到的计算公式分别列出。

2.1 S_m

$$S_m = \frac{I_0 \tau n}{2\pi r^2} [(\omega_2 - \omega_1)(\sin\varphi\cos\theta - \cos\varphi\sin\theta\cos\beta)\sin\delta + (\cos\varphi\cos\theta + \sin\varphi\sin\theta\cos\beta)(\sin\omega_2 - \sin\omega_1)\cos\delta - \sin\beta\sin\theta\cos\delta(\cos\omega_2 - \cos\omega_1)]f \quad (1)$$

这里 I_0 为太阳常数; τ 为一天的时间长度; r 为以日地平均距离为单位的日地距离; φ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬; β 和 θ 为接受辐射的地形坡向和坡度; $f = S/S_0$ 为开旷平地上实际直接太阳辐射日总量 S 与天文太阳辐射日总量 S_0 的比值 (表示大气的透射系数); n 为等于 1 或 2 的乘数; ω_1 和 ω_2 为研究地点日出和日没的时角。关于各种地形下的 ω_1 、 ω_2 及 β 、 θ 详见表 1。其中 α 为坡地的坡度或各种谷地中心的最大可蔽视角; ω_0 、 ω_S 、 ω_N 、 ω_E 和 ω_V 为各种地形下日没的时角, 并分别由下列公式表示:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 2\arctan\sqrt{\frac{1+\tan\varphi\tan\delta}{1-\tan\varphi\tan\delta}}, & \omega_S &= 2\arctan\sqrt{\frac{1+\tan(\varphi-\alpha)\tan\delta}{1-\tan(\varphi-\alpha)\tan\delta}}, \\ \omega_N &= 2\arctan\sqrt{\frac{1+\tan(\varphi+\alpha)\tan\delta}{1-\tan(\varphi+\alpha)\tan\delta}}, \\ \omega_E &= 2\arctan\frac{\sec\varphi\tan\alpha + \sqrt{\sec^2\varphi\tan^2\alpha - \tan^2\varphi\tan^2\delta + 1}}{1 - \tan\varphi\tan\delta}, \\ \omega_V &= 2\arctan\sqrt{\frac{1 - \sin\alpha\sec\varphi\sec\delta + \tan\varphi\tan\delta}{1 + \sin\alpha\sec\varphi\sec\delta - \tan\varphi\tan\delta}}. \end{aligned}$$

表 1 极昼和极夜区外各种地形下的参量

地形	β	θ	夏半年				冬半年			
			ω_1	ω_2	限制条件	n	ω_1	ω_2	限制条件	n
开旷平地		0°	$-\omega_0$	ω_0	无	1	$-\omega_0$	ω_0	无	1
南坡	0°	α	$-\omega_S$	ω_S	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi - \delta$	1	$-\omega_0$	ω_0	无	1
			0°	0°	$\alpha > 90^\circ - \varphi - \delta$	1				
北坡	180°	α	$-\omega_0$	ω_0	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$	1	$-\omega_N$	ω_N	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$	1
			ω_N	ω_0	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$	2	0°	0°	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$	1
东(西)坡	-90°	α	$-\omega_0$	ω_E	无	1	$-\omega_0$	ω_E	无	1
南北走向谷地中心		0°	$-\omega_E$	ω_E	无	1	$-\omega_E$	ω_E	无	1
东西走向谷地中心		0°	$-\omega_S$	ω_S	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$, 且 $\alpha \leq 90^\circ + \varphi - \delta$	1	$-\omega_N$	ω_N	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$	1
			ω_N	ω_S	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$, 但 $\alpha \leq 90^\circ + \varphi - \delta$	2	0°	0°	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$	1
			0°	0°	$\alpha > 90^\circ + \varphi - \delta$	1				
圆形山谷中心		0°	$-\omega_V$	ω_V	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$	1	$-\omega_V$	ω_V	$\alpha \leq 90^\circ - \varphi + \delta$	1
			0°	0°	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$	1	0°	0°	$\alpha > 90^\circ - \varphi + \delta$	1

2.2 D_m

开旷平地

$$D_H = \frac{P\tau}{2} \left\{ u_0 + G \left[\frac{2a}{3} u_1 + \frac{b}{4} (u_0 + u_3) \right] \right\}. \quad (2)$$

坡地

当除坡地本身外,再无其他周围地形高于研究地点的地平面时,任意坡向为 β (用由正南向顺时针方向的方位角表示)、坡度为 α 的坡地上的散射辐射日总量 D_S 的计算公式是

$$D_S = \frac{P\tau}{2} \left\{ u_0 \cos^2 \frac{\alpha}{2} + G \left[\frac{2a}{3} (u_1 f_1(\alpha) + u_2 f_2(\alpha)) + \frac{b}{8} (2(u_0 - u_3) \cos^2 \frac{\alpha}{2} + u_5 \sin^2 \alpha + u_3 f_3(\alpha) + u_4 f_4(\alpha)) \right] \right\}, \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} f_1(\alpha) &= \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \cos \alpha + \frac{1}{\pi} \sin \alpha, & f_2(\alpha) &= \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \sin \alpha, \\ f_3(\alpha) &= 1 + 2 \cos \alpha + 3 \cos^2 \alpha - 2 \cos^4 \alpha, & f_4(\alpha) &= (1 + \cos \alpha + 2 \cos^3 \alpha) \sin \alpha. \end{aligned}$$

各种走向谷地中心的平地

在两边地形坡向为 β (东西走向谷地 $\beta=0^\circ$ 或 180° , 南北走向谷地 $\beta=\pm 90^\circ$) 的谷地中心的平地上散射辐射日总量 D_g 的计算公式是

$$D_g = \frac{P\tau}{2} \left\{ u_0 \cos \alpha + G \left[\frac{2a}{3} \left(u_1 + \frac{2}{\pi} T_1(\alpha) \right) + \frac{b}{4} T_2(\alpha) \right] \right\}, \quad (4)$$

其中

$$T_1(\alpha) = u_1 (\sin \alpha \cos^2 \alpha - \alpha), \quad T_2(\alpha) = (u_5 - u_3) \cos^3 \alpha + (3u_3 + u_6) \cos \alpha.$$

圆形山谷中心的平地

$$D_v = \frac{P\tau}{2} \left\{ u_0 \cos^2 \alpha + G \left[\frac{a}{3} (2u_1 (1 - \sin^3 \alpha)) + \frac{b}{4} ((u_0 - u_3) \cos^4 \alpha + 2u_3 (1 - \sin^4 \alpha)) \right] \right\}. \quad (5)$$

在以上各式中 τ 为一天的时间长度; P 为可根据开旷平地上散射辐射日总量的观测资料由 (2) 式来确定的常数; a 、 b 为反映天空散射辐射非各向同性的参数, 一般可取 $a=1.037$ 、 $b=3.693$; $G=1-(D_H/Q_H)^2$ 为天空晴朗度指数, 其中 Q_H 为开旷平面上的总辐射, 在晴天, 因 Q_H 远大于 D_H , $G \approx 1$, 在阴天, 因 $Q_H = D_H$, $G=0$; u_i ($i=0, 1, 2, \dots$) 的表达式分别为

$$\begin{aligned} u_0 &= 2(t_1 + t_2), \\ u_1 &= 2S_1^2 \omega_0 + 4S_1 t_2 + S_2^2 t_4, \\ u_2 &= (t_3 \sin 2\delta \sin \omega_0 - S_3 t_1 + H_1) \cos \beta, \\ u_3 &= 2S_1^2 t_1 + 6S_1^2 t_2 + 3H_3 + \frac{2}{3} S_2^2 H_2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_4 &= 2 \left[t_3 \left(S_1 \sin \omega_0 + \frac{1}{2} S_2 t_4 \right) \sin 2\delta - 2 S_1 S_3 t_1 + S_1 H_1 \right. \\
&\quad \left. + \frac{2}{3} S_2 S_4 H_2 - 2 S_1 S_2 t_2 \tan \delta \right] \cos \beta, \\
u_5 &= \left(2 S_3^2 t_1 + H_4 + \frac{2}{3} S_4^2 H_2 \right) \cos^2 \beta + \left(\frac{2}{3} S_2 \sin^3 \omega_0 + S_1 t_5 \right) \cos^2 \delta \sin^2 \beta, \\
u_6 &= \left(2 S_3^2 t_1 + H_4 + \frac{2}{3} S_4^2 H_2 \right) \sin^2 \beta + \left(\frac{2}{3} S_2 \sin^3 \omega_0 + S_1 t_5 \right) \cos^2 \delta \cos^2 \beta,
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
S_1 &= \sin \varphi \sin \delta, & S_2 &= \cos \varphi \cos \delta, & S_3 &= \cos \varphi \sin \delta, & S_4 &= \sin \varphi \cos \delta, \\
t_1 &= S_1 \omega_0, & t_2 &= S_2 \sin \omega_0, & t_3 &= \sin^2 \varphi - \cos^2 \varphi, \\
t_4 &= \omega_0 + \frac{1}{2} \sin 2\omega_0, & t_5 &= \omega_0 - \frac{1}{2} \sin 2\omega_0, \\
H_1 &= S_2 S_4 t_4, & H_2 &= t_2 (2 + \cos^2 \omega_0), & H_3 &= S_1 S_2^2 t_4, \\
H_4 &= S_4 t_4 (S_1 S_4 - 2 S_2 S_3) + 2 S_3 (S_2 S_3 - 2 S_1 S_4) \sin \omega_0.
\end{aligned}$$

2.3 $R_m^\perp$

坡地

$$R_s^\perp = \bar{R}_{SH} \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (6)$$

各种走向谷地中心的平地

$$R_g^\perp = \frac{1}{2} (\bar{R}_A + \bar{R}_B) (1 - \cos \alpha). \quad (7)$$

圆形山谷中心的平地

$$R_v^\perp = \bar{R}_e \sin^2 \alpha, \quad (8)$$

这里 $\bar{R}_{SH}$ 为坡前平地的平均反射辐射日总量, $\bar{R}_A$ 和 $\bar{R}_B$ 分别为各种走向谷地两测 A 山和 B 山的平均反射辐射日总量, $\bar{R}_e$ 为圆形山谷周围谷坡上的反射辐射日总量。

因为研究地点周围下垫面 i 的平均反射辐射 $\bar{R}_i$ ($i = SH, A, B, e$) 等于其所接受的平均外来短波总辐射日总量 $\bar{Q}_i$ 与其反射率 α_i 的乘积, 而 $\bar{Q}_i = \bar{S}_i + \bar{D}_i + \bar{R}_i^\perp$ 又与 i 周围的地形有关, 所以要精确计算 $\bar{R}_i$ 是非常麻烦的。但考虑到在研究地点的辐射收支中 $R_m^\perp$ 本身是个小量, 一般只有总辐射的百分之几, 故对 $\bar{R}_i$ 只需做近似估算就可以, 这样在计算周围下垫面的 $\bar{Q}_i$ 时, 可以用各向同性模式计算 $\bar{D}_i$, 并将 $\bar{R}_i^\perp$ 忽略不计。对于各种地形下垫面上的平均直接太阳辐射日总量 $\bar{S}_i$ 和平均散射辐射日总量 $\bar{D}_i$, 还可根据具体地形情况分片选择一些代表点, 先用文献[15]中的有关公式计算各点的 S_i 和 D_i , 然后再按各点所代表的面积大小用加权平均的方法求得各地形下垫面上的平均 $\bar{S}_i$ 和 $\bar{D}_i$ 。

2.4 F_m

坡地

$$F_s = F_H \cos^2 \frac{\alpha}{2} + \sigma (\beta_s T_s^4 - \beta_{SH} \bar{T}_{SH}^4) \sin^2 \frac{\alpha}{2}. \quad (9)$$

各种走向谷地中心的平地

$$F_g = F_H \cos \alpha + \sigma(\beta_g T_g^4 - \beta_c \bar{T}_c^4)(1 - \cos \alpha). \quad (10)$$

圆形山谷中心的平地

$$F_v = F_H \cos^2 \alpha + \sigma(\beta_v T_v^4 - \beta_c \bar{T}_c^4)(1 - \cos^2 \alpha). \quad (11)$$

这里 F_H 为在研究地点下垫面情况下开旷地面上的有效辐射; β 为灰体系数; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; T 为下垫面的绝对温度, $\bar{T}$ 为平均绝对温度; 右下标 S、g、V、SH 和 c 分别代表坡地、各种走向的谷地、圆形山谷、坡前平地 and 周围地形。

3 计算结果分析

利用上面所列公式我们计算了不同坡向的坡地、东西走向和南北走向谷地中心的平地及圆形山谷中心的平地上晴天辐射收支各分量日总量在不同纬度 (φ) 和不同季节 (以太阳赤纬 $\delta = 23.5^\circ$ 代表夏季, $\delta = -23.5^\circ$ 代表冬季, $\delta = 0$ 代表春、秋季) 随坡度 (对坡地) 或地形遮蔽的正交可蔽视角 (对谷地) α 的变化, 并绘制成图 1~5 和表 1。

由图 1 可以看出, 在北半球不同地形下晴天的直接太阳辐射差异是冬季大、夏季小, 且在冬半年都是纬度愈高, 相对差异愈大。

在冬季, 接受 S_m 最少的是北坡, 最多的是南坡, 且在所有坡度下都比开旷平地上大 ($K_s > 1$), 在最有利的坡度下可以是开旷地面上的 1.6 倍 (当 $\varphi = 10^\circ$ 时) 到 4.6 倍 (当 $\varphi = 50^\circ$ 时)。东 (西) 坡上的 S_m 虽比南坡小, 但比北坡和所有谷地大, 并在一定坡度下还可比开旷平地上大。东西走向谷地中地面上的 S_m , 在低纬度, 当 α 较小时比南北走向谷地中大, 当 α 大时则正好相反。在纬度较高的地方, 不论 α 大小, 都是南北走向谷地中的 S_m 大于东西走向谷地。

在春分、秋分时, 各种地形下的 S_m 也是北坡最小, 圆形山谷其次。当 $\alpha \leq 90^\circ - \varphi$ 时, 东西走向谷地中的 S_m 与开旷平地相同, 而比东 (西) 坡和南北走向谷地大; 当 $\alpha > 90^\circ - \varphi$ 时, 由于南面地形的全天遮蔽, 东西走向谷地与圆形山谷及北坡一样都全天没有直接太阳照射 ($S_m = 0$)。南坡上的 S_m , 除在赤道附近的低纬度外, 一般都比其他地形大。

在夏季, 当 $\alpha < \delta$ 时各种地形下的 S_m 是南坡最小, 圆形山谷其次, 而北坡最大。东 (西) 坡上的 S_m 在一定坡度以下要比东西走向谷地中小, 而比南北走向谷地中大。在纬度较高的地方, 几乎所有各种地形下的 S_m 都比开旷平地小, 且以圆形山谷中的平地上最小, 并随着纬度升高南坡上的 S_m 逐渐变得比北坡上大, 而东西走向谷地中的 S_m 逐渐变得比南北走向谷地中的小。

图 2 表明, 在冬半年, 坡地上晴天的散射辐射日总量 D_m 是南坡最大, 东 (西) 坡其次, 北坡最小, 且除南坡上的 D_m 在一定坡度以下随 α 增大而增大外, 其他地形下的 D_m 均随 α 增大而减小。各种谷地中的 D_m 是圆形山谷最小, 且均比东 (西) 坡小, 但在 α 小时可比北坡大, 在 α 大时则比北坡小。南北走向谷地中的 D_m , 除春分、秋分在低纬度比东西走向谷地略小外, 一般都比后者大。

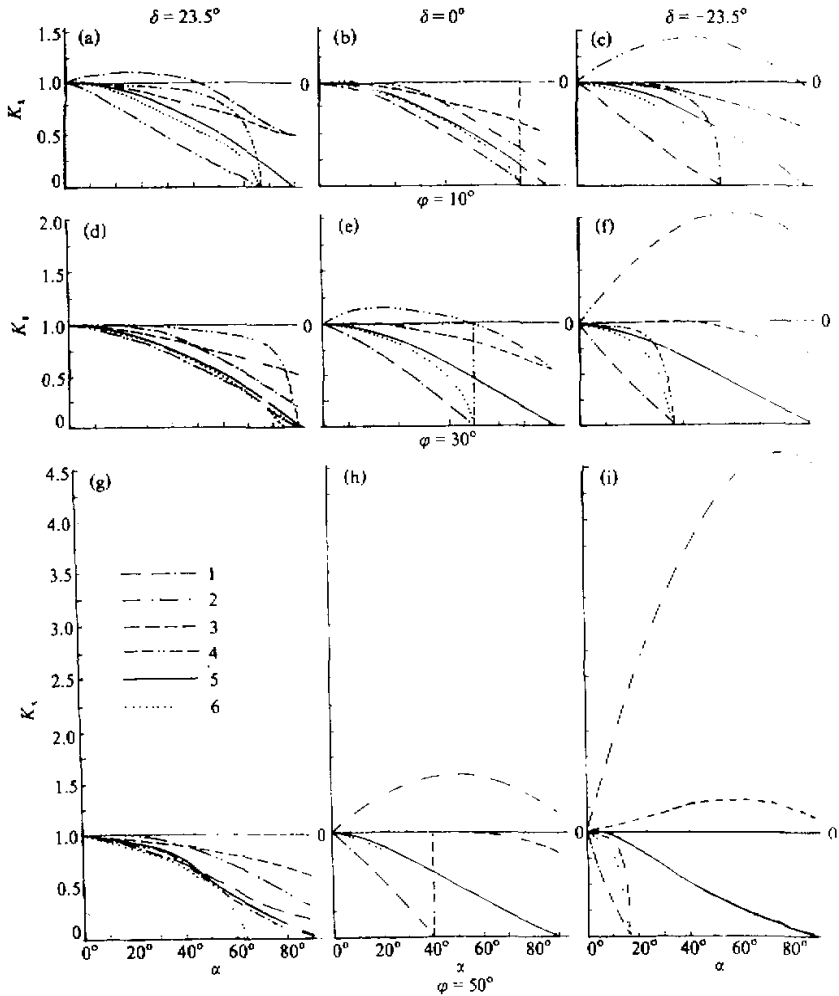
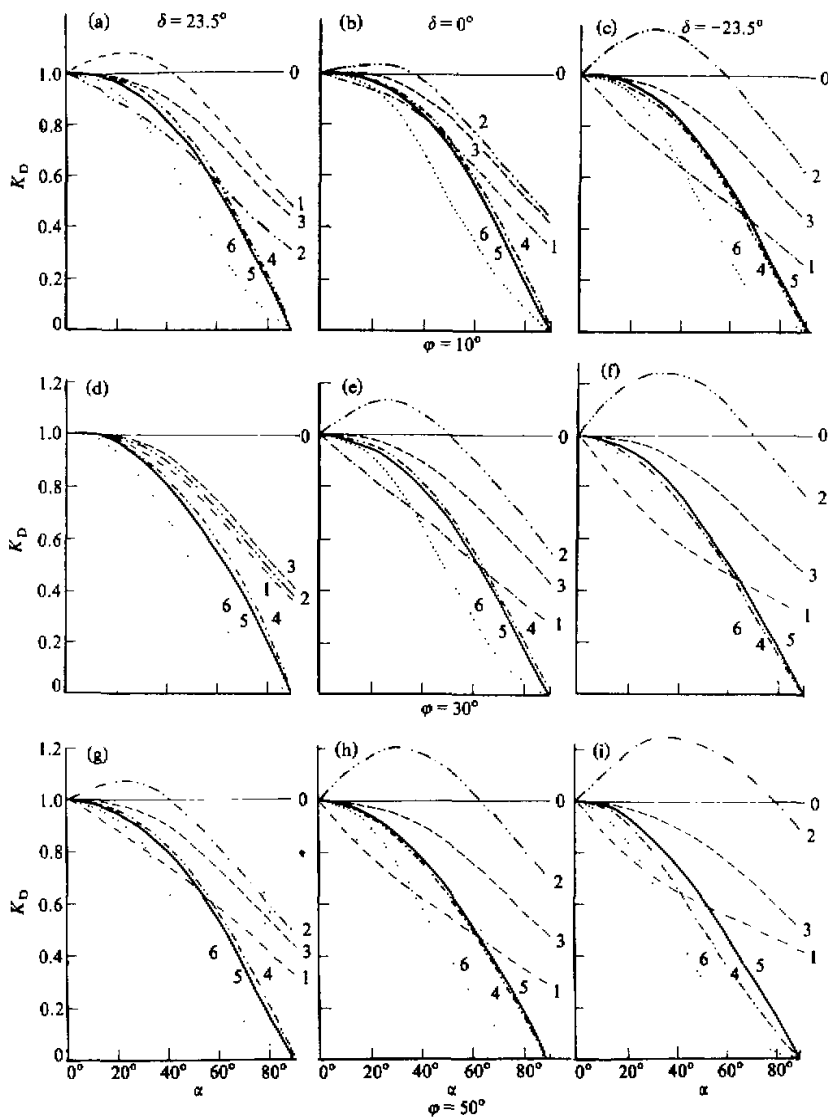


图1 晴天各种地形下与开旷平地上直接太阳辐射日总量的比值 K_s 随 α 的变化

0: 开旷平地, 1: 北坡, 2: 南坡, 3: 东(西)坡, 4: 东西走向谷地, 5: 南北走向谷地, 6: 圆形山谷

在夏季晴天, 各纬度谷地中地面上的散射辐射日总量 D_m 一般都是圆形山谷最小, 南北走向谷地远大于圆形山谷, 而稍小于东西走向谷地。坡地上的 D_m , 在靠近赤道的地方是北坡最大(在一定 α 以下还比开旷平地上大), 东(西)坡其次, 南坡最小, 且在 α 小时比各种谷地中的平地上还小, 只在 α 大时才比各种谷地中的平地上大。在纬度较高的地方, 则是南坡上的 D_m 最大, 东(西)坡其次, 北坡最小, 且在 α 较小时比各种谷地中地面上的 D_m 还小, 只在 α 大时才比各种谷地中地面上的 D_m 大。

图3是各种不同地形下晴天外反射辐射日总量 R_m^l 与开旷平地上反射辐射日总量 R_H 的比值 K_r 的变化。由此可以看出, 各种坡地上的 R_m^l 都随 α 增大而增大, 而各种谷

图2 晴天各种地形下与开旷平地上散射辐射日总量的比值 K_D 随 α 的变化

图例同图1

地中平地上的 $R_m^\perp$ 都是先随 α 增大而增大,在 α 超过一定限度以后又转为随 α 增大而减小。由图3还可看出:在 $\alpha < 50^\circ \sim 60^\circ$ 时(随 φ 和 δ 而不同),都是圆形山谷中平地上接受 $R_m^\perp$ 最多,东西或南北走向谷地其次;在 α 很大时,则坡地上的 $R_m^\perp$ 比各种谷地中平地上多,且谷地中的 $R_m^\perp$ 一般都是圆形山谷中最少。另外,坡地上的 $R_m^\perp$,在冬季是南坡最大,北坡最小;在夏季,则一般都是北坡最大,东(西)坡最小,只有在纬度高

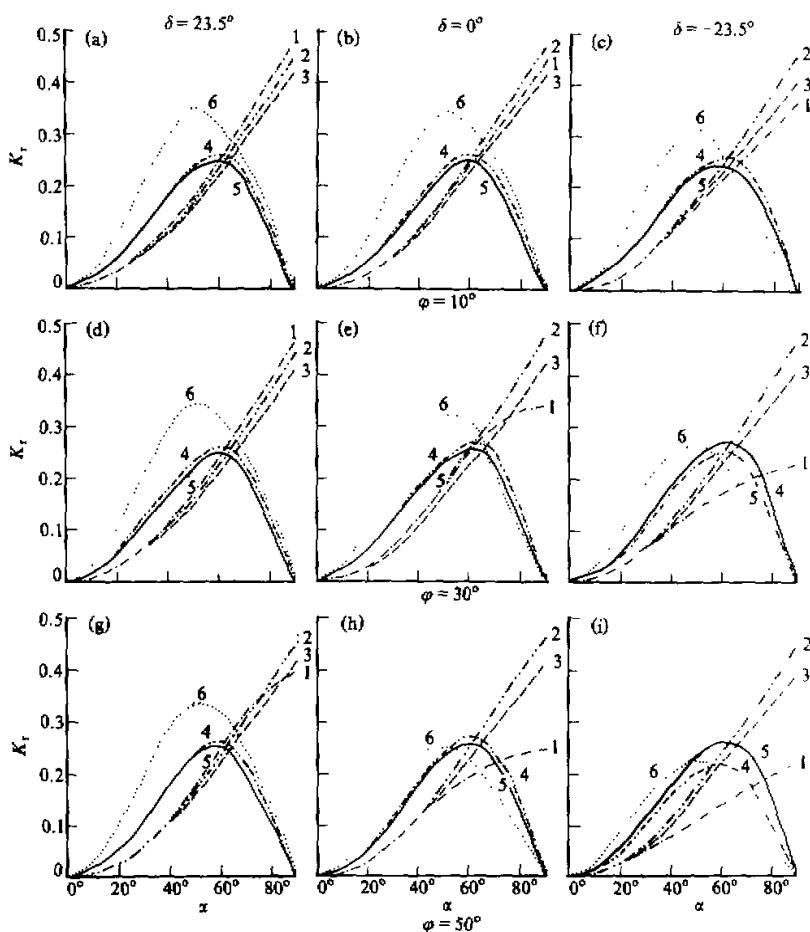


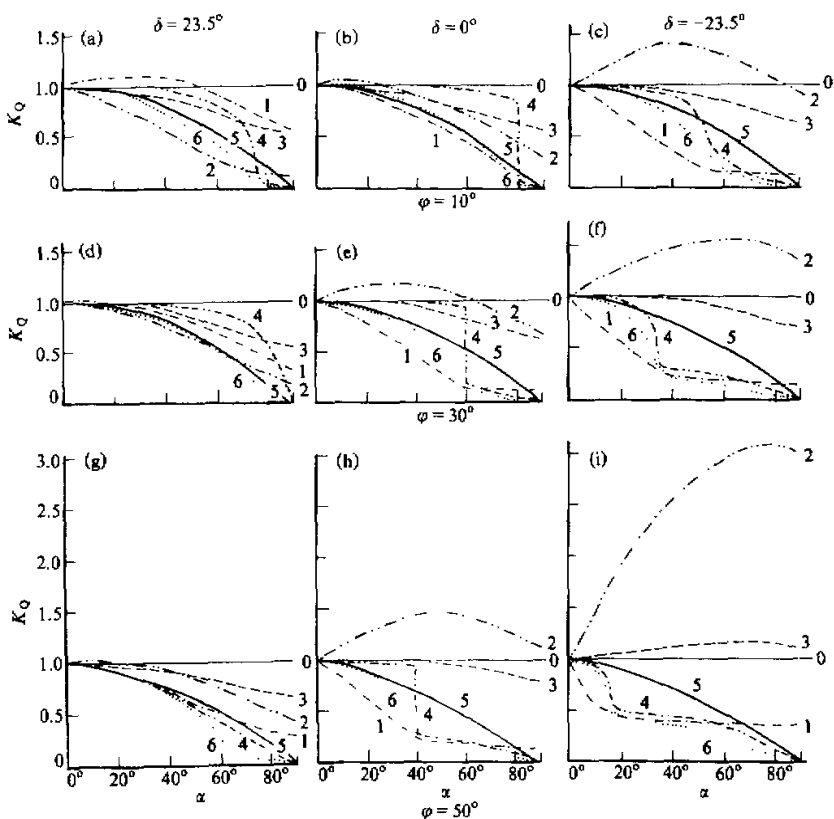
图3 晴天各种地形下外反射辐射日总量与开旷平地上反射辐射日总量的比值 K_r 随 α 的变化
图例同图1

而 α 又很大时,北坡上的 R_m^+ 才会变得比南坡甚至比东(西)坡还小。

图4表明,各种地形下晴天总辐射日总量 Q_m 随 α 、 δ 和 φ 变化的特点是:在可受到太阳直接照射时(即当能决定是否受到太阳直接照射的 α 在一定限度以下时)是与直接太阳辐射日总量的相应变化相似,在不能受到太阳直接照射时(当 α 超过一定限度后)则与散射辐射的相应变化相似,其差别只是数值不同而已。

假定周围地形下垫面性质和温度都与研究地点相同,则由公式(9)~(11)可以算出各种地形的有效辐射与开旷平地上有效辐射的比值 K_F 如表2。

由表2可以看出,各种地形下的 K_F 只随地形形状和 α 而变,而与坡地的坡向、山谷走向及季节和纬度无关,其变化规律是:各种地形下的 K_F 都单调地随 α 增大而减小,但谷地中减小快,坡地上减小慢;当 $\alpha=90^\circ$ 时,谷地中的 K_F 已降为0,而坡地

图4 晴天各种地形下与开旷平地上总辐射日总量的比值 K_Q 随 α 的变化

图例同图1

表2 各种地形下的有效辐射 F_m 与开旷平地上有效辐射 F_H 的比值 K_F 随 α 的变化

α	10°	25°	40°	55°	70°	90°
坡地	0.992	0.953	0.883	0.787	0.671	0.500
各种走向谷地	0.985	0.906	0.766	0.574	0.342	0
圆形山谷	0.970	0.821	0.587	0.329	0.117	0

上的 K_F 只减小到0.5。此外,还可看出,在相同 α 下,是坡地上的 K_F 相对最大,圆形山谷中的 K_F 最小,但两者都比开旷地上的小。

图5是各种地形下晴天净辐射日总量 B_m 与开旷平地上净辐射日总量 B_H 的差值 $\Delta B_m (= B_m - B_H)$ 的变化。因为净辐射有正有负,不便用比值表示,故这里与图1~4不同,改用了差值表示法。由图5可以看出,在冬季,各种地形下的 B_m 一般是南坡最大(要比开旷平地上大得多),北坡最小。在低纬度,东西走向谷地中的 B_m 比圆形山谷大,且在 α 小时也比东(西)坡和南北走向谷地大,在 α 大时则正好相反。在高纬度,则圆形山谷中的 B_m 要比东西走向谷地和东(西)坡大,且在 α 较大时还比南北走

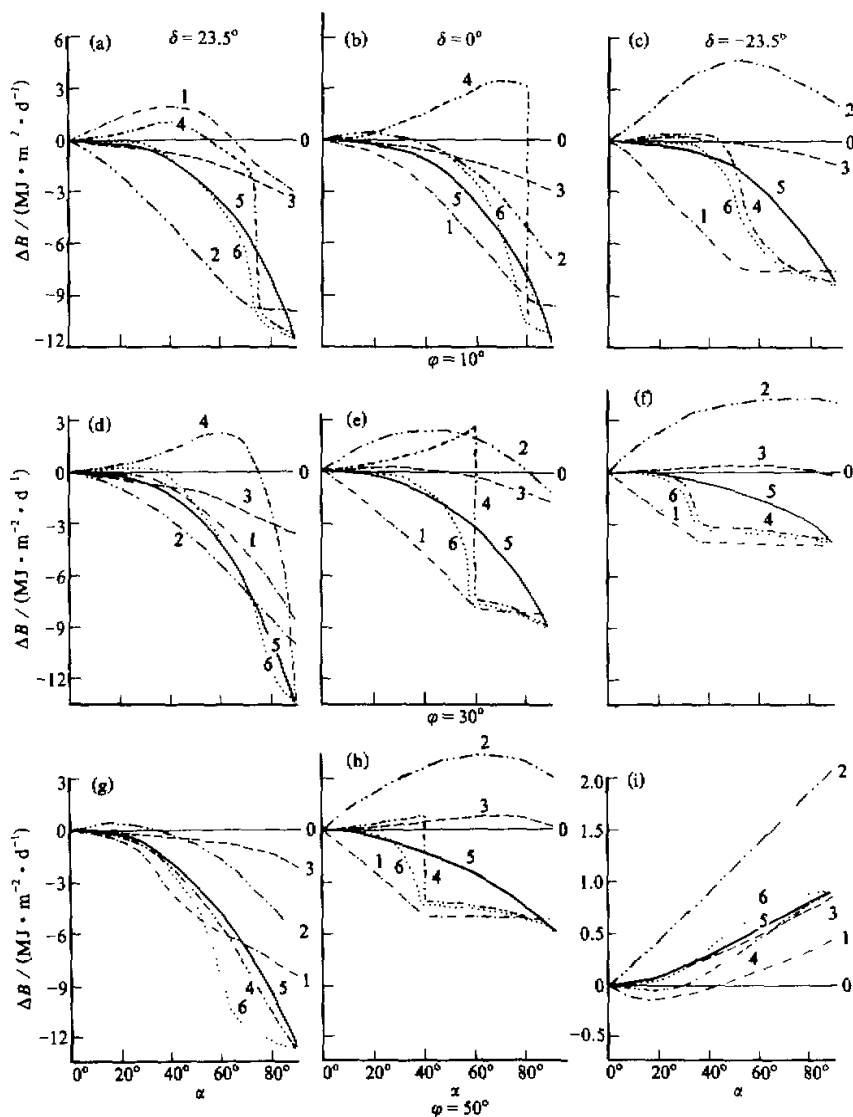


图5 晴天各种地形下与开旷平地上净辐射日总量的差值 ΔB 随 α 的变化
假定反射率 $a=0.2$ 。图例同图1

向谷地大。另外,值得注意的是,在高纬度当 α 较大时,各种地形下的 B_m 都比开旷平地上大,且 α 愈大相差愈大。

春分、秋分时,在低纬度(比如 $\varphi=10^\circ$),当 α 在 80° 以下时一般是东西走向谷地中的 B_m 最大,北坡上的 B_m 最小,圆形山谷中的 B_m 在 α 较小时与南坡接近,而比东(西)坡和南北走向谷地大,在 α 大时则比南北走向谷地小,甚至比北坡还小。在纬度

较高地方,除东西走向谷地比较特殊外,总是南坡上 B_m 最大,东(西)坡其次,南北走向谷地和圆形山谷又次之,而以北坡上 B_m 最小。东西走向谷地中的 B_m 在 α 较小时比南北走向谷地大,甚至比东(西)坡还大,在 α 大时则比南北走向谷地小,而与圆形山谷相接近。

夏季,在靠近赤道的低纬度,除 α 特大时外,一般都是北坡上 B_m 最大,东西走向谷地中其次,南坡上最小,南北走向谷地中的 B_m ,当 α 较小时与圆形山谷及东(西)坡相差不大,当 α 大时则比圆形山谷中大,而比东(西)坡上小,且除北坡和东西走向谷地中的 B_m 在一定 α 以下可比开旷平地上大外,其他均比开旷地上的 B_m 小。在纬度较高的地方,坡地上的 B_m 是北坡最小,其最大值当 α 小时出现在南坡,当 α 大时则出现在东(西)坡;谷地中的 B_m ,是南北走向谷地比东(西)坡小,而比东西走向谷地大,更比圆形山谷大,但各种谷地中的 B_m 在 α 小时都比北坡大,在 α 大时则比北坡小。

从图5还可看出,在高纬度,各种地形下的 B_m 在冬季一般都随 α 增大而增大,只有南坡和东西走向谷地在 α 小时 B_m 反随 α 增大而略有减小;但在夏季情况则正好相反,各种地形下的 B_m 一般都随 α 增大而减小,只有南坡在 α 小时 B_m 反随 α 增大而增大。

以上我们讨论了在晴天时各种地形下辐射收支各分量的对比变化。在阴天,由于没有直接太阳辐射,且天空散射辐射的分布是各向同性(在晴天为非各向同性),故各种地形下辐射收支各分量的变化自然是与晴天不同。另外,由于 $R_m^{\downarrow}$ 的绝对值随着下垫面的反射率 a 而变化,故当 a 改变时也会使各种地形下总辐射和净辐射发生变化,且纬度和季节不同,因下垫面温度不同, ΔB_m 也不同。为此,还计算了在阴天当下垫面反射率 $a=0.2$ 和 $a=0.6$ 时各种地形下的 K_D 、 K_R 、 K_Q 及夏至和冬至在 $\varphi=34^\circ$ 处的 ΔB ,其结果如表3。

由表3可以看出:在阴天,坡地上的 $R_m^{\downarrow}$ 都单调地随 α 增大而增大,谷地中的 R_m

表3 阴天不同地形下辐射收支各分量与开旷平地上相应量的比值或差值随 α 的变化

α		0.2						0.6					
α		10°	25°	40°	55°	70°	90°	10°	25°	40°	55°	70°	90°
K_D	坡地	0.992	0.953	0.883	0.787	0.671	0.500	0.992	0.953	0.883	0.787	0.671	0.500
	各种走向谷地	0.985	0.906	0.766	0.574	0.342	0	0.985	0.906	0.766	0.574	0.342	0
	圆形山谷	0.970	0.821	0.587	0.329	0.117	0	0.970	0.821	0.587	0.329	0.117	0
K_R	坡地	0.008	0.047	0.116	0.210	0.323	0.479	0.008	0.047	0.116	0.210	0.323	0.479
	各种走向谷地	0.007	0.042	0.094	0.145	0.162	0	0.007	0.042	0.094	0.145	0.162	0
	圆形山谷	0.029	0.152	0.276	0.328	0.313	0	0.029	0.152	0.276	0.328	0.313	0
K_Q	坡地	0.995	0.963	0.906	0.829	0.717	0.598	0.997	0.981	0.952	0.913	0.865	0.787
	各种走向谷地	0.986	0.915	0.785	0.603	0.374	0	0.989	0.931	0.822	0.661	0.439	0
	圆形山谷	0.976	0.852	0.642	0.395	0.180	0	0.987	0.912	0.752	0.588	0.305	0
ΔB MJ/(m ² ·d) $\varphi=34^\circ$, $\delta=23.5^\circ$	坡地	-0.003	-0.021	-0.052	-0.096	-0.169	-0.225	0.002	0.011	0.026	0.047	0.078	0.106
	各种走向谷地	-0.012	-0.074	-0.136	-0.253	-0.404	-0.669	0.001	0.004	0.006	0.002	-0.018	-0.109
	圆形山谷	-0.014	-0.086	-0.215	-0.375	-0.520	-0.669	0.006	0.031	0.047	0.072	0.009	-0.109
ΔB MJ/(m ² ·d) $\varphi=34^\circ$, $\delta=-23.5^\circ$	坡地	0.004	0.021	0.052	0.094	0.138	0.220	0.005	0.031	0.077	0.140	0.216	0.328
	各种走向谷地	0.006	0.038	0.093	0.168	0.254	0.368	0.009	0.056	0.139	0.251	0.380	0.551
	圆形山谷	0.013	0.077	0.172	0.271	0.348	0.368	0.020	0.115	0.258	0.417	0.520	0.551

却先随 α 增大而增大, 当 α 增大至一定限度以后再继续增大时, R_m 便转为逐渐减小; 但圆形山谷中的 R_m 始终都比其他谷地中大, 且在 α 小时还比坡地上大。各种地形下的 D_m 和 Q_m 都随 α 增大而单调减小, 且都是坡地上相对最大 (但比开旷平地上小), 圆形山谷中最小, 而随着下垫面反射率 a 的增大, 各种地形下的 Q_m 都相应增大, 且 a 愈大, 不同地形所接受的总辐射差异愈大。阴天各种地形下的净辐射 B_m 在一般下垫面反射率 ($a=0.2$) 下, 在夏季都比开旷平地上小, 且都随 α 增大而减小, 其中又以圆形山谷中最小, 坡地上相对较大。在冬季, 各种地形下的 B_m 都比开旷平地上大, 且 α 愈大, 大得愈多, 其中又以圆形山谷中的 B_m 最大, 坡地上的 B_m 最小。当下垫面反射率很大 ($a=0.6$) 时, 各种地形下的 B_m 在冬季仍与反射率小时的情况相似, 只是都比 a 小时增大得更多, 且彼此差别更大。在夏季, a 大时坡地上的 B_m 都随 α 增大而单调增大; 圆形山谷和各种走向谷地中的 B_m 开始也都随 α 增大而增大, 且圆形山谷中的 B_m 还比坡地上的大, 但当 α 大至一定限度以后再继续增大时, 则谷地中的 B_m 便都转为逐渐减小, 并变得比开旷平地上小, 但圆形山谷中的 B_m 始终都比其他谷地中大。

4 小结

根据以上计算分析, 可以得到下面几点主要结果:

(1) 在冬季晴天, 各种地形所接受的直接太阳辐射日总量 S_m 和总辐射日总量 Q_m 都是南坡最多, 东 (西) 坡其次。东西走向谷地中的 S_m 和 Q_m , 在低纬度, 当 α 小于一定限度时都比南北走向谷地中大, 当 α 超过一定限度时则比南北走向谷地中小; 在高纬度, 则总比南北走向谷地中小。圆形山谷中的 S_m 和 Q_m 虽比其他谷地都小, 但 S_m 总比北坡大, Q_m 则只在一定 α 以下可比北坡大, 当 α 超过一定限度以后就变得反比北坡上的 Q_m 小。在夏季, 当 $\varphi < \delta$ 时, 各种地形下的 S_m 和 Q_m 一般是北坡最大, 南坡最小, 圆形山谷其次, 东 (西) 坡上的 S_m 、 Q_m 比东西走向谷地中小, 而比南北走向谷地中大; 在纬度较高的地方, 则是南坡 (当 α 小时) 或东 (西) 坡 (当 α 大时) 上 S_m 、 Q_m 最大, 圆形山谷中最小, 而东西走向谷地中的 S_m 、 Q_m 可以变得比南北走向谷地中小。

(2) 各种地形下的有效辐射 F_m 都比开旷平地上小, 且 α 愈大减小愈多, 其中以圆形山谷中最小, 坡地上相对较大。

(3) 晴天的净辐射 B_m , 在冬季是南坡最大, 北坡最小。东西走向谷地中的 B_m , 在靠近赤道的低纬度总是比圆形山谷中大, 且在一定 α 以下还比东 (西) 坡和南北走向谷地大。但在纬度较高处, 则东西走向谷地中的 B_m 总比圆形山谷和南北走向谷地中小。夏季, 在低纬度一般是北坡 B_m 最大, 东西走向谷地其次, 东 (西) 坡上的 B_m 大多比南北走向谷地和圆形山谷中大, 更比北坡上大得多。在高纬度则是南坡 (在 α 小时) 或东 (西) 坡 (在 α 大时) 上 B_m 最大, 而南北走向谷地中的 B_m 总比东西走向谷地和圆形山谷中的大, 北坡上的 B_m 在 α 小时比各种谷地还小, 在 α 大时则比各种谷地都大。

(4) 在阴天, 各种地形下的 Q_m 全年都是圆形山谷中最小, 坡地上相对较大, 但仍比开旷平地上小, 且 α 愈大相差愈多。在阴天各种地形下的 B_m , 在冬季是圆形山谷中

最大,坡地上较小,但还比开旷平地上大;在夏季,则一般是圆形山谷中 B_m 最小,坡地上的 B_m 相对较大,但还比开旷平地上小。只有在终年积雪的地区,因地面反射率很大,外反射辐射很强,才会出现圆形山谷中的 B_m 反比坡地和开旷平地上都大的情况。

参 考 文 献

- 1 Городов, А. Н., 1938, Расчет прямой радиации на разно ориентированные наклонные поверхности для широты 42°, *Материалы по Агроклим, Районы Субтроп СССР*, вып.2.
- 2 Fuh Bawpuh, 1959, The influence of slope on sinness, *Scientia Sinica*, 8(7), 700~726.
- 3 傅抱璞, 1958, 论坡地上的太阳辐射总量, *南京大学学报 (自然科学)*, No. 2, 23~46.
- 4 Голубова, Т. А., 1966, О радиационном балансе пологих склонов за вегетационный период, *Труды ГГО*, вып. 190, 32~40.
- 5 Kondratyev, K. Ya., 1977, Radiation regime of inclined surfaces, Technical Note, No. 152, WMO, WMO-No. 467, Geneva.
- 6 Temps, R. C. and K. L. Coulson, 1977, Solar radiation incident upon slopes of different orientations, *Solar Energy*, 19, 179~184.
- 7 左大康等, 1991, 地球表层辐射研究, 北京: 科学出版社.
- 8 傅抱璞, 1964, 起伏地形中辐射平衡各分量的计算, *气象学报*, 34(1), 62~73.
- 9 傅抱璞, 1983, 山地气候, 北京: 科学出版社.
- 10 李占清、翁笃鸣, 1987, 山地短波反射辐射的计算, *地理研究*, 6(3), 42~49.
- 11 傅抱璞, 1989, 山地非各向同性的散射辐射计算模式, *气候学研究——天、地、生相互影响问题*, 北京: 气象出版社, 401~414.

The Differences and Variations in Components of Radiation Budget on Underlying Surfaces of Different Topographies

Fu Baopu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract The method to determine the components of radiation budgets in mountainous regions is presented. Based on calculation results, the differences between the components of radiation budgets on various slopes and on the flat grounds in various valleys and their variations with inclination of slope or preventing-view's angle of topography around valley at different latitudes and seasons are analyzed.

Key words topography radiation budget component variation characteristics