

秦岭太白山的辐射状况*

傅抱璞 潘裕强 王月莲 李兆元

(南京大学气象系)

(陕西气象科学研究所)

提 要

本文根据1979年夏季在秦岭太白山布点观测的结果分析了辐射平衡各分量在高山上与山下平地的差异及其随海拔高度的变化规律,同时也分析了太白山南北两面水平面及坡面上辐射平衡各分量的差异及下垫面反射率与坡地方位的关系。此外,还提出了消除地形对直接太阳辐射和散射辐射影响的方法及计算日平均反射率的合理方法。

一、前 言

1979年7月30日至8月15日我们曾在秦岭主峰太白山(最高点八仙台海拔3767米)南北两面不同高度的坡地、谷地和山顶设置了九个测点进行为期半个月的小气候观测,其中北坡有辐射观测点五个(包括山下西安的辐射观测点在内)南坡有辐射观测点一个。用来进行辐射观测的仪器是沙维诺夫—雅尼舍夫斯基直接辐射表、雅尼舍夫斯基翻转式天空辐射表、米海逊—雅尼舍夫斯基辐射平衡表。

本文根据这次观测结果分析了太白山的辐射状况。

二、资料的处理

在山地进行辐射观测的目的主要是要了解(1)高山辐射与低处平地的差异;(2)辐射随地方海拔高度的变化;(3)不同地形下或不同坡地上的辐射差异。为了前两个目的,辐射仪器最好是都装设在周围开旷的平地或不同海拔高度的山顶上,以避免地形遮蔽的影响;为了第三个目的,最好是把辐射仪器安装在相同海拔高度的不同地形下,以保证除了所需要比较的因素不同外,其它条件都具有相似性。但是如果真的这样布置测点,不仅需要很多仪器和人力,而且实际自然界在彼此相隔不远的一定范围内也选不到或很难选到很多这样的理想点,在实际工作中只能因地制宜,在考察地区尽可能选择从各方面看来相对地比较最理想的

本文1982年8月14日收到,12月11日收到修改稿。

- * 本文是由陕西气象科学研究所组织、南京大学气象系参加的太白山气象考察的一部分。参加这一工作的还有韩福琦、李怀瑾、尤斯玉、虞静明、王双环、庞文保、程文学、徐兆寅、刘芳等同志及南京大学气象系气候专业76届23位同学。

地点布置测点。这些测点往往有些在这方面具有所需要的相似性, 在那方面则不符合要求; 有些是在那方面具有所需要的相似性, 而在这方面又不符合要求。因此, 在处理实际观测资料时就必须根据所需分析的项目特点设法消除一些未能保持相似因素的影响, 才能去伪存真, 找出所需要分析项目的真正特点和规律。例如, 当我们分析太阳辐射或日照随地方海拔高度的变化时, 就必须设法除去非海拔高度的地形遮蔽影响; 当分析太白山南北坡的辐射差异时, 就必须设法消去与坡向无关的因海拔高度和周围地形遮蔽不同等因素所引起辐射差异的影响。下面简要地说明一下我们在处理太白山辐射资料时消除地形和海拔高度影响的方法。

(一) 消除地形影响的方法

为了分析辐射随海拔高度的变化需要消除各个测点地形不同的影响, 而地形不同对太阳辐射的影响表现在三个方面, 一是有时(特别是在早晨和傍晚时间)会遮蔽直接太阳辐射, 二是遮蔽一部分天空减少散射辐射, 三是由于周围下垫面对太阳辐射的反射增加一部分在平地所没有的从周围地区向测点射来的额外的反射辐射。因此, 在消除地形对散射辐射的影响时, 在用天空辐射表所测得的散射辐射中, 必须把被地形所遮蔽的那部分天空的散射辐射 D_s 加进去, 同时减掉从周围地区下垫面所射来的那部分额外的反射辐射 R_s 。即若有地形遮蔽下用天空辐射表所实际测得的散射辐射为 D_a , 则在没有地形遮蔽时(即消除地形遮蔽影响以后)的散射辐射 D 应为

$$D = D_a + D_s - R_s \quad (1)$$

设周围地形在任意方位 ψ 对测点遮蔽的视角(以下简称可蔽视角)为 $h(\psi)$, 则根据文献〔1〕被周围地形所遮蔽的天空散射辐射 D_s 和由周围地形向测点所反射来的辐射 R_s 可以分别表示如下

$$D_s = \int_0^{2\pi} dx \int_0^{h(\psi)} i_{\psi, h} (\sin\alpha \cos\psi \cosh + \cos\alpha \sinh) \cosh dh \quad (2)$$

$$R_s = \int_0^{2\pi} dx \int_0^{h(\psi)} \gamma_{\psi, h} (\sin\alpha \cos\psi \cosh + \cos\alpha \sinh) \cosh dh \quad (3)$$

这里 $i_{\psi, h}$ 和 $\gamma_{\psi, h}$ 分别代表在 ψ 方位与 h 高度角方向射来的天空散射辐射强度和反射辐射强度。 α 代表用天空辐射表测量散射辐射时仪器感应面与水平面所成的倾角(当测量平地的散射通量时, 仪器水平放置, $\alpha = 0$; 当测量坡面的散射辐射通量时, 仪器感应面与坡面平行, α 就等于斜坡的坡度)。

假定 $i_{\psi, h}$ 和 $\gamma_{\psi, h}$ 与方向无关或取其平均值 $i_{\psi, h} = \bar{i} = \text{常数}$, $\gamma_{\psi, h} = \bar{\gamma} = \text{常数}$, 则考虑到 $D = \pi \bar{i}$, $R = \pi \bar{\gamma}$ (代表周围地区下垫面的反射辐射通量), 则将(2)和(3)对 h 积分可以得到

$$D_s = AD \quad (4)$$

$$R_s = AR \quad (5)$$

其中

$$A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [\sin\alpha \cosh(\psi) + \frac{1}{2} \sin 2h(\psi) + \cos\alpha \sin^2 h(\psi)] dh \quad (6)$$

因为测点各个方程的可蔽视角 $h(\psi)$ 我们都有实际测量, 所以根据(6)式可以用图解积分算出各个测点的A值。

将(4), (5)代入(1)可以得

$$D = \frac{D_a - A_R}{1 - A} \quad (7)$$

这就是我们用来消除地形对散射辐射影响的公式。

地形对直接辐射影响的消除方法很简单。因为周围地形遮蔽直接太阳辐射的时间主要是发生在早晨和傍晚时间, 而在没有地形遮蔽影响情况下水平面日出和日落的时间是可以用理论公式计算的, 所以在早晚时间当地形对直接太阳辐射发生遮蔽时, 我们可用直接太阳辐射强度为纵坐标, 一天中的时间为横坐标, 将早晨地形对直射阳光不遮蔽以后和下午地形对直射阳光遮蔽以前各时间的直接辐射资料点在图上, 并通过各点连接日出和日落时间(这时直接太阳辐射等于零)配一平滑曲线, 然后从曲线上估计测点被地形遮蔽各时的直接太阳辐射强度以补充没有观测到的资料, 就可消除地形对直接辐射遮蔽的影响。

(二) 消除海拔高度影响的方法

利用以上方法消除了地形的影响以后, 就可以根据各点的观测资料分析辐射各分量随地方海拔高度变化的规律, 然后利用这样所得的规律消除在分析地形影响时由于非地形因素的海拔高度所产生的影响。此外, 因为北坡在不同高度布置的测点多, 且分布比较均匀, 所得出的气象要素随高度变化的规律或所配出的随高度变化曲线比较准确可靠, 所以我们在分析太白山南北坡的辐射或其它气象要素的差异时, 一般是将北坡各点的观测资料订正到与南坡测点相同高度进行比较。

三、高山上的辐射特点

在高山上因为在地面以上的大气层比较薄, 空气密度小, 灰尘杂质和水汽含量也少, 太阳辐射从大气外界到达地面所受到的损失小, 所以直接辐射和散射辐射的强度以及它们在总辐射中所占的比例与山下平地截然不同, 而且光谱成分也有改变。由图1太白山顶(海拔为3767米)与西安(海拔400米)晴天辐射各分量日变化的对比可以看出, 在高山上的总辐射Q和直接辐射S都远比平地强, 而散射D远比平地小, 且除早晨和傍晚时间外, 散射辐射全天变化不大。在晴天正午时间, 西安的总辐射为1.30卡/厘米²·分, 直接辐射为1.07卡/厘米²·分, 散射辐射为0.24卡/厘米²·分, 各占总辐射的82%和18%, 而太白山顶的总辐射则为1.66卡/厘米²·分, 直接辐射为1.54卡/厘米²·分, 各比西安大28%和44%, 但散射辐射则只有0.12卡/厘米²·分, 比西安小50%, 且直接辐射占总辐射的93%, 比在西安所占的比例大11%, 散射辐射只占总辐射的7%, 比在西安所占的比例小11%。

就辐射日总量而言, 在西安的总辐射、直接辐射和散射辐射各为584.6、468.6和116.0卡/厘米²·日, 在太白山顶则为744.9、681.1和63.8卡/厘米²·日, 前二者各比西安大27%和45%, 第三者则比西安小45%。

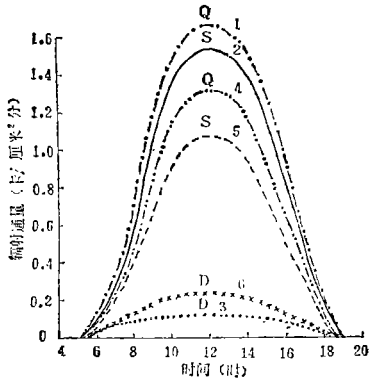


图 1 平地和高山辐射各分量的对比
(1979年8月晴天)

1, 2, 3, —秦岭太白山 (海拔3767米)

4, 5, 6, —西安 (海拔400米)

Fig. 1 Comparison of the components of radiations falling on the plain and the high mountain (August, clear days)

1, 2, 3—Tapaishan (3767mA.S.L.),

4, 5, 6—Xian (400m A.S.L.)

Q—total radiation, S—direct solar radiation,

D—diffuse solar radiation.

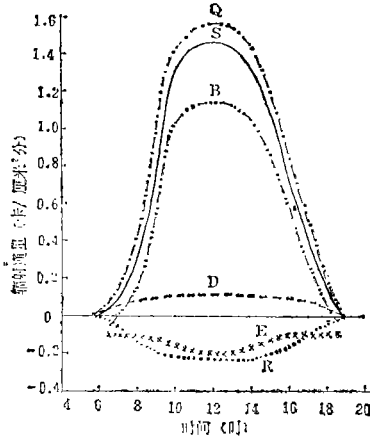


图 2 放羊寺 (3100米) 辐射收支各分量的日变化 (8月晴天)

Fig. 2 Diurnal variations of the components of radiation balance at Fangyangsi (3100m A.S.L.) (August, 1979).

R—reflected radiation,

E—effective radiation,

B—radiation balance.

图 2 是海拔高度为3100米的放羊寺晴天辐射平衡各分量的日变化, 该图除反映在太白山顶太阳辐射各分量所具有的相似特点外, 还表明, 在高山辐射平衡B的主要收入项是直接太阳辐射, 散射辐射除去早晨和傍晚时间以外, 相形之下是微不足道的。在夏季由于地面温度高, 热辐射强, 在辐射平衡的支出项中, 有效辐射E与反射辐射R是同样重要, 且其绝对值全天都大于散射辐射D, 在正午前后可大1倍左右。

四、 辐射随海拔高度的变化

如图 3 所示, 随着地方海拔升高, 直接辐射和总辐射都逐渐向上增加, 而散射辐射逐渐向上减小。根据这些资料我们求得这三个辐射量在晴天随海拔高度变化的实验关系如下:

$$S_z = S_0 - (S_0 - S_h)e^{-0.000194(z-h)} \quad (8)$$

$$D_z = D_h e^{-0.000226(z-h)} \quad (9)$$

$$Q_z = Q_0 - (Q_0 - Q_h)e^{-0.000177(z-h)} \quad (10)$$

其中 S_0 为大气外界的直接辐射, 即天文辐射; Q_0 为大气外界的总辐射, 实际上也就是天文辐射 ($=S_0$); S_h 、 D_h 、 Q_h 及 S_z 、 D_z 、 Q_z 为某一固定高度 h 和任意高度 z (米) 处的直接辐

射、散射辐射和总辐射。

在图 3 中的三条曲线就是根据以上三个实验式配出的, 它表明直接辐射和总辐射是随高度按指数律增加, 而散射辐射则随高度按指数律减少。

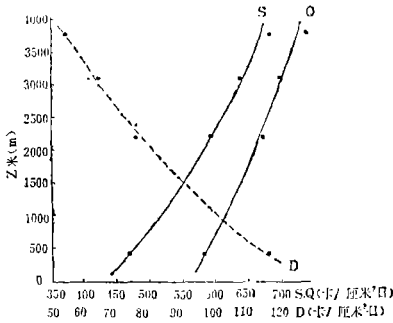


图 3 秦岭太白山晴天辐射日总量
随海拔高度 Z 的变化 (1979
年 8 月)

Fig. 3 Variations of daily amounts of
different radiations with height
 Z in clear days (August, 1979)

因为仪器条件的限制, 我们只在 3100 米和 3767 米两个高度上进行了有效辐射观测, 不能据此得出其随高度变化的规律。但根据鲍津科娃 (И.И. Борзенкова) [2] 所提供的高加索和中亚山地的资料 (见图 4) 我们求得以下实验关系:

$$E_z = E_h + 1.96 \times 10^{-6} [(5000 - z)z - (500 - h)h] \text{ 卡/厘米}^2 \cdot \text{日} \quad (11)$$

其中 E_h 和 E_z 分别代表在某一固定高度 h 和任意高度 z (米) 处的有效辐射。

(11) 式表明, 有效辐射随地方海拔高度的变化是呈抛物型, 即最初向上增大, 至某一高度 (在高加索和中亚山地为 2500 米左右) 达到最大值, 以后再往上去, 有效辐射便随海拔升高而减小。这是因为随着地方海拔升高温度逐渐降低, 空气变稀, 水汽减少, 一方面地面热辐射减小, 另一方面大气逆辐射也减小, 但在转折高度以下前者比后者减小得慢, 故有效辐射随高度向上增大; 在转折高度以上, 前者比后者减小得快, 故有效辐射随高度向上减小。

因为随着地方海拔升高, 晴天太阳辐射各分量发生变化主要是地面以上大气柱中空气粒子和水汽含量减少所引起, 而某一高度上气压的高低正是在该高度以上大气柱中空气和水汽含量的度量, 它不仅反映了海拔高度的影响, 也在一定程度上反映了地区气候条件 (包括季节变化) 的影响, 所以在寻求太阳辐射各分量随海拔高度变化的关系时, 采用地面气压 P 代替高度可以具有更大的代表性。根据太白山的观测资料, 我们求得任意高度 z 处晴天太阳辐射各分量与该高度气压 P_z 的关系如下:

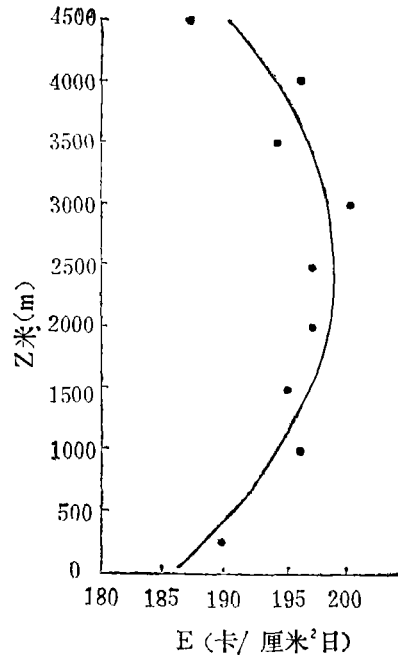


图 4 有效辐射 E 随地方海拔高度 Z
的变化

Fig. 4 Variation of effective radiation with height Z

$$S_z = S_0 - (S_0 - S_h) \left(\frac{P_z}{P_h} \right)^{1.464} \tag{8a}$$

$$D_z = D_h \left(\frac{P_z}{P_h} \right)^{1.936} \tag{9a}$$

$$Q_z = Q_0 - (Q_0 - Q_h) \left(\frac{P_z}{P_h} \right)^{1.516} \tag{10a}$$

五、 太白山南北两面的辐射差异

在太白山南北两面不仅因为坡向不同造成坡地上的太阳辐射各分量不同，而且也因为两面天气和气候条件不同，引起大气透射系数的变化和水平面上辐射的差异。在我国西北地区，因为夏季盛行东南风，太白山的南面是向风面，空气比较潮湿，云量较多；北面是背风面，空气湿度较低，云量较少。故南面大气透明度比北面小，水平面上的直接太阳辐射相对地比北面弱，而散射辐射则远比北面强。在我们观测期间，南面的大气透射系数平均比北面小 3 % 左右（见图 5）但其随高度的变化比北面快，在北面高度每上升 100 米大气透射系数增大 0.0045，在南面则增大 0.0059。在卡斯特罗夫公式（ $I = \frac{I_0}{r^2(1 + cm)}$ ）中与大气透明

度有关的参数 C 也是北面大，南面小，且在北面随高度减小比南面快。在 2000 米高度以下，晴天水平面上的直接太阳辐射南面要比北面小百分之几，而散射辐射比北面大 30 % 左右，故总辐射还是南面比北面大百分之几。

坡地上的太阳辐射与坡向、坡度、地理纬度及太阳赤纬或一年中的时间有关，对于坡地上的直接太阳辐射可以根据水平面的辐射利用文献〔3,4〕中的公式计算。坡地上的散射辐射，在阴天因为天空亮度分布比较均匀，接近于各向同性，也可以根据文献中〔1〕的公式计算，但在晴天，由于天空亮度分布不均匀，坡地上的散射辐射一般只能由实际观测决定。

根据观测和计算结果，太白山地区（北纬 34° 左右）在相同海拔高度（1450 米）上和坡度为 15° 左右的情况下，8 月晴天南坡和北坡太阳辐射各分量的日变化如图 6 所示。从这个图上可以看出，在夏季坡地上的直接辐射，散射辐射和总辐射在早晨和傍晚时间都是南坡比

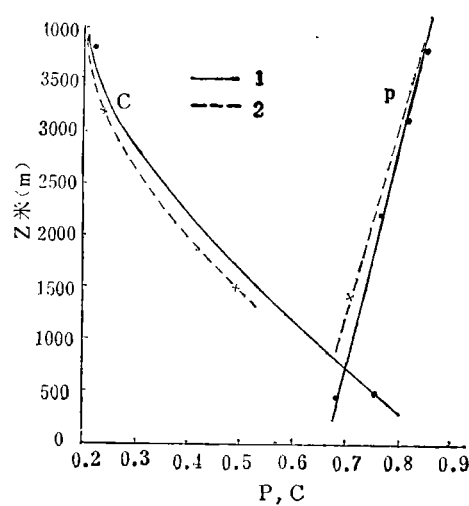


图 5 在大气质量 $m = 2$ 时太白山南北大气透射系数 P 及卡斯特罗夫公式参数 C 随高度 z 的变化

Fig. 5 Variations of the transparency of atmosphere (P) and the parameter C in Castrow formula with height at air mass $m = 2$

1 — in the north of the mountain,
2 — in the south of the mountain

根据观测和计算结果，太白山地区（北纬 34° 左右）在相同海拔高度（1450 米）上和坡度为 15° 左右的情况下，8 月晴天南坡和北坡太阳辐射各分量的日变化如图 6 所示。从这个图上可以看出，在夏季坡地上的直接辐射，散射辐射和总辐射在早晨和傍晚时间都是南坡比

北坡小, 其它大部分时间都是南坡比北坡大, 而且愈靠近正午南北坡上的辐射差异愈大。在正午时间南坡上的直接辐射 S 比北坡大 0.27 卡/厘米 2 ·分 (27%), 散射辐射 D 大 0.41 卡/厘米 2 ·分 (108%), 总辐射 Q 大 0.41 卡/厘米 2 ·分 (37%)。 S 、 D 、 Q 的日总量在北坡分别为 493.0 、 82.8 和 575.8 卡/厘米 2 ·日, 在南坡分别为 573.2 、 133.2 和 706.4 卡/厘米 2 ·日, 或分别比北坡大16%, 61%和23%。但就整个观测期而言, 由于南面多云, 南坡的总辐射只比北坡大12%

六、南坡和北坡的反射率

下垫面的反射率不仅与土壤性质和植被情况有关, 而且也在很大程度上依土壤湿度和太阳在地面上的高度角为转移。在夏半年因为南坡降水较多, 土壤比较潮湿, 在其它条件相同的情况下, 南坡的反射率照例比北坡小。在我们观测期间, 平均反射率南坡是11%, 北坡是15%, 晴天的反射率南坡是13%, 北坡是22%, 这反映下垫面对直接辐射的反射比对散射辐射的反射强, 因为晴天直接辐射在总辐射中所占的比例比有云的平均情况大。

图7是根据观测资料所得出的太白山南面下垫面反射率与太阳在地面上高度角 h 的关系。它表明下垫面反射率是随着太阳高度角增大而减小的。当太阳高度角很小时, 反射率可达25%, 在太阳高度角大时, 则减小到10%左右。因为同一时间太阳在不同方位坡地上的高度角不同, 即使其它条件完全一样, 坡面的反射率也不相同。

应当指出, 由于各时间的太阳辐射强度不同, 各时间的反射辐射在反射辐射日总量中所占的比重不同, 我们在计算日平均反射率时就不能将一天各时间的反射率相加后除以观测次数, 即用求算术平均数方法而求得。正确的方

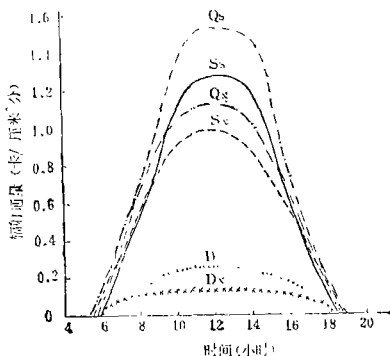


图6 在坡度 15° 左右情况下太白山南坡和北坡晴天太阳辐射的日变化 (1979年8月, 调整到相同海拔高度)

S_s , D_s , Q_s ——南坡的直接辐射, 散射辐射和总辐射。

S_n , D_n , Q_n ——北坡的直接辐射, 散射辐射和总辐射。

Fig. 6 Diurnal variations of radiations falling on the south and north slopes at an inclination about 15° in clear days (August, 1979)

S_s , D_s , Q_s ——direct, diffuse and total solar radiation on the south slope,

S_n , D_n , Q_n ——direct, diffuse and total solar radiation on the north slope.

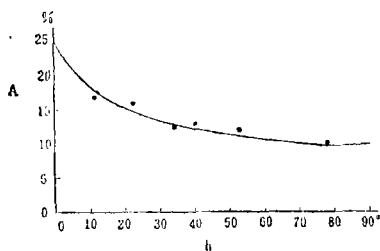


图7 下垫面反射率 A 与太阳相对于地面 (平地或坡面) 高度角 h 的关系

Fig. 7 Relation between albedo of surface (A) and the sun's elevation (h) (the inclination of the parallel radiation relative to earth's surface)

法应该用反射辐射日总量 R 与总辐射日总量 Q 之比来求日平均反射率 \bar{A} ，即

$$\bar{A} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} R(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} A(t) Q(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt} \quad (12)$$

其中 t_1 , t_2 为日出和日落的时间

在晴天各时刻的总辐射 $Q(t)$ 是近似地与太阳高度 h 的正弦成比例，即

$$Q(t) = C \sinh$$

以此代入 (12) 并消除常数 C ，有

$$\bar{A} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} A(t) \sinh dt}{\int_{t_1}^{t_2} \sinh dt} \quad \text{或} \quad \bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \sinh_i \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \sinh_i \cdot t \Delta t_i} \quad (13)$$

这里 A_i , h_i 为第 i 观测时的反射率和太阳高度， Δt_i 为相邻两次观测的时距， N 为在一天中从日出到日落总共观测的次数，如果采取等时距观测，因 $\Delta t_i = \text{常数}$ ，我们可以将 (13) 写为

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i \sinh_i}{\sum_{i=1}^N \sinh_i} = \frac{A_1 \sinh_1 + A_2 \sinh_2 + \dots + A_N \sinh_N}{\sinh_1 + \sinh_2 + \dots + \sinh_N} \quad (14)$$

以上公式从数学上表明，由于每次观测时的太阳高度不同，该时间的反射率在日平均反射率中所占的比重（即权）也不同，因而日平均反射率不能根据各时间观测的结果用求算术平均数方法求得，而必须采用 (12) 式计算或用 (14) 式按太阳高度正弦加权平均的方法求得。例如太白山南坡的平均反射率按算术平均数计算是 16%，按正确的方法计算是 12%，二者相差很大。这是值得注意的一个问题。

七、小 结

根据以上分析，可以得到下面几点主要结果：

1. 山地直接太阳辐射和总辐射都随着地方海拔高度升高按指数律增大，而散射辐射随着高度增大按指数律减小，有效辐射随地方海拔高度的变化是抛物线型，即最初是随着高度升高而增大，到一定高度以后又转为随高度升高而减小。

2. 由于高山地区暖湿气流的迎风坡比背风坡空气湿度，吸收太阳辐射较多，秦岭山南的大气透射系数比山北小，但随高度的递增率比山北大。

3. 在秦岭太白山地区，南坡的直接太阳辐射在 8 月晴天比北坡大 16% 左右，而散射辐射可比北坡大 60%，总辐射可比北坡大 23%。

4. 在相同下垫面下坡面的反射率随着坡地方位（坡向和坡度）不同而不同，一般是南向坡地的反射率比北向坡地小，且冬半年比夏半年相差大。

5. 日平均反射率应用反射辐射日总量与总辐射日总量之比求得，或以太阳在地面上高度角的正弦为权重加权平均的方法求得。如果用简单的算术平均数计算，将会造成很大误差。

参 考 文 献

- 〔1〕 傅抱璞：起伏地形中辐射平衡各分量的计算，气象学报，第1期，1964年。
- 〔2〕 Борзенкова, И.И., О Некоторых Закономерностях Изменения Составляющих Радиационного И Теплового Балансов В Горных Районах. Труды ГГО, Вып. 179, 1965.
- 〔3〕 傅抱璞：坡地对日照和太阳辐射的影响，中国科学（外文版），第8卷第7期，1959年。
- 〔4〕 傅抱璞：论坡地上的太阳辐射总量，南京大学学报，第2期，1958年。

THE RALIAATION REGIME IN TAPAISHAN

Fu Baopu, Pan Yuqiang, Wang Yuelian

(Department of Meteorology, Nanjing University)

Li Zhaoyuan

(Shanxi Institute of Meteorological Science)

Abstract

Based on the observations from the 30th of July to 15th of August 1979, we have analyzed the radiation regime in Tapaishan, the highest mountain (3767 meters high) in the Tsinling Mountions. The main results are as follows:

- 1) The variations of direct solar radiation S , diffuse radiation D , total solar radiation Q and effective radiation E with elevation are shown in Fig 3, 4 and can be described by Eg. (8), (9), (10) and (11) respectively.
- 2) The transparency of atmosphere in the south of mountain is less than that in the north of the mountain, and, therefore, the direct solar radiation is weaker and the diffuse radiation is stronger in the south than in the north of the mountain.
- 3) On the south slope the direct, diffuse and total solar radiation are about 16%, 60% and 23% greater than those on the north slope respectively.
- 4) In conditions of similar underlying surfaces, the albedo of slope varies with slope orientation. It is less in south slope than in north slope.
- 5) The mean daily albedo should be calculated by the ratio of the daily amount of reflected radiation to that of total radiation, or by formula (14). The simple method to calculate mean daily albedo by arithmetic mean may lead to serious errors