

天山乌鲁木齐河源冰川与空冰斗 辐射气候的计算结果^①

白重瑗

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

大畑哲夫 樋口敬二

(日本名古屋大学水圈科学研究所)

提 要 在朝向、坡度和山体遮蔽度影响下, 与水平面相比朝北冰川和朝南空冰斗在太阳偏角为 15° , 0° 和 -10° 时的平均太阳辐射能量损失分别是 40.6% 和 21.0%。1 号冰川东支夏季消融期内自然冰雪面辐射场内辐射平衡各分量平均日总量值受地形因素和反射性能的控制而显示出由西北侧向东南侧逐渐降低的带状分布规律。晴朗少云天气下的总辐射和有效辐射的垂直梯度分别是 $14.52 \text{ W m}^{-2} / 100 \text{ m}$ 和 $2.77 \text{ W m}^{-2} / 100 \text{ m}$ 。

关键词 坡地辐射系数 冰川辐射平衡 辐射能量场 辐射垂直梯度

在中国西部大多数山地冰川上, 能量平衡中起主导作用的是太阳辐射。然而, 冰川的陡峭程度和接受太阳暴晒的差别却是很大的。因此, 任何给定的冰川观测点上的数值都不能恰如其分地反映整个冰川上积分总和。所以进一步研究地形对辐射平衡的影响以及相互间的定量关系是需要的。为此, 我们在天山乌鲁木齐河源选择了两个高度相似的冰斗, 即 1 号冰川东支和空冰斗, 在 1983 年夏季 6—7 月研究了坡向、坡度和周围山体地形遮蔽度对太阳辐射收入的影响。1 号冰川东支位于天山天格尔第二峰 (海拔 4477.4 m) 的东侧, 其地理位置为 $43^\circ 06' - 07' \text{ N}$, $86^\circ 48' - 49' \text{ E}$ 。冰川面积为 1.24 km^2 , 最大长度 2.33 km, 占据着海拔 3740—4300 m 之间的高度空间。1 号冰川东北面, 6 号冰川南侧是一个与 1 号冰川高度相近而朝向相反的空冰斗, 既没有冰, 也没有积雪长期覆盖。其地理位置为 $43^\circ 07' - 08' \text{ N}$, $86^\circ 49' - 50' \text{ E}$ 。空谷最大延伸长度为 1.55 km, 面积约为 1.62 km^2 。并以山峰三面环绕、向东南方向扩展为开阔坡地的空谷型式占据着海拔 3820—4360 m 的高度空间。

1 坡度和坡向对太阳辐射的影响

按照 Wendler (1974) 所提出的坡度和坡向分级方法, 运用地面立体摄影测量编绘

^① 本文系中日合作《天山冰川对气候变化的响应研究》课题成果之五。

的, 比例尺为 1: 1 万的乌鲁木齐河源冰川图^①, 以四个坡度等级 ($<5^\circ$, $5\text{—}15^\circ$, $15^\circ\text{—}25^\circ$, $>25^\circ$) 对两个区域进行量算。为了计算方便, 将 $<5^\circ$ 的坡面近似地看作与坡向无关的平面, 其他坡度区间近似地取其平均值为 10° 、 20° 和 30° 。图 1 的 A、B 分别表示 1 号冰川东支和空冰斗的坡度图。从图 1 可以看出, 冰川上大多数是 $5^\circ\text{—}15^\circ$ 的平缓坡面, 约占冰川总面积的 41.0%, 超过 25° 的坡面面积为 37.2%, 主要出现在粒雪盆围谷上部陡峭山坡上。空冰斗处, 坡面的倾角较大, 大多数是 $>25^\circ$ 的陡坡。它围绕着中部盆地呈半围状分布, 占总面积 70.5%。而在中央洼地呈片状分布着的 $5^\circ\text{—}15^\circ$ 的缓坡, 其面积仅占 14.8%。这两个区域的坡向可分为 N、NE、E、SE、S、SW、W 和 NW 8 个方位, 并用不同符号分开。这意味着有 24 个不同坡向和坡度的区域存在, 其面积百分率列于表 1 中。描述两个区域 8 个方位坡向分布图分别绘制于图 2 A、B 中, 相应的坡向分布频率图则表示于图 3 中。

从图 3 和表 1 可以清楚地看到 1 号冰川东支北向方位 (包括 NE、N、NW) 的坡向占优势 (82.5%)。朝东坡大多在冰舌前段和粒雪盆地的西侧陡壁下出现 (10.6%)。朝东南坡所占面积最小 (0.2%), 缺失朝南、西南和西坡。然而空冰斗则以南向方位 (包括 SE、S 和 SW) 坡向占优势 (60.3%)。朝西坡集中于东侧 (11.7%)。东坡和东北坡则于西南两侧出现 (13.7% 和 10.7%)。缺失朝北坡, 而西北坡也不甚明显 (0.5%)。表明它是典型的朝南围谷空冰斗。

为了判断给定的坡度坡向区对接受太阳辐射的影响, 我们引用 Swift(1976)提出的坡地表面及水平表面可能太阳辐射总量计算方法和程序框图进行坡地辐射系数 F (%) 计算。根据 Swift 等人的研究, 坡地辐射系数 (F) 为给定时期内坡面上的可能太阳辐射总量 (SR_s) 与水平面上可能太阳辐射总量 (SR_0) 的比率 ($F=SR_s/SR_0$), 并能用来计算实际的太阳辐射。当在坡地附近的水平面上测得太阳总辐射量 (GR) 时, 将其乘以坡地辐射系数 (F), 其乘积 ($GR \times F$) 即是坡地单位面积上太阳总辐射量。而这种计算包括云量和大气透射率对太阳总辐射的作用和影响的估算, 其参量均可由邻近气候观测站水平面上的观测记录求出 (Swift et al., 1973)。按照上述文献所列计算程序, 对乌鲁木齐河源冰川与空冰斗区的纬度区间内 ($43^\circ 05' N\text{—}43^\circ 08' N$), 给定的 8 个坡向和 3 个平均坡度在 5 种不同太阳偏角情况下的坡地辐射系数进行计算, 其平均值如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 在夏至 (23.5°), $<20^\circ$ 的所有坡面上接受太阳辐射的能力与水平面相近。相反在太阳偏角较低, 太阳光程轨迹短的时期 (0° , -10°), 坡向、坡度的影响则显得比较突出。除东、西向坡面与水平面接受太阳辐射的能力相近外, 在 N、NE 和 NW 坡面上, 坡地辐射系数将随着坡度增大而减小, 然而在 S、SE 和 SW 坡面上, F 值反而随坡度增大而增大。值得注意的是 F 值在冬季期间上述变化更加显著, 其南、北坡 F 的差值将进一步增大。 F 值随太阳偏角、坡向和坡度的变化决定了一年中冰川与冰斗区内接受太阳辐射能力的明显差别。根据表 1 和表 2 所列数据, 对给定太阳偏角条件下的各个不同坡向坡度区所接受的太阳辐射总能量进行计算总和。在假定无遮蔽水平面的太阳辐射总能量为 100% 时, 整个冰川与空冰斗区接

①该图由王文颖、张惠兴等编绘, 1983年, 其地形等高距为5m。

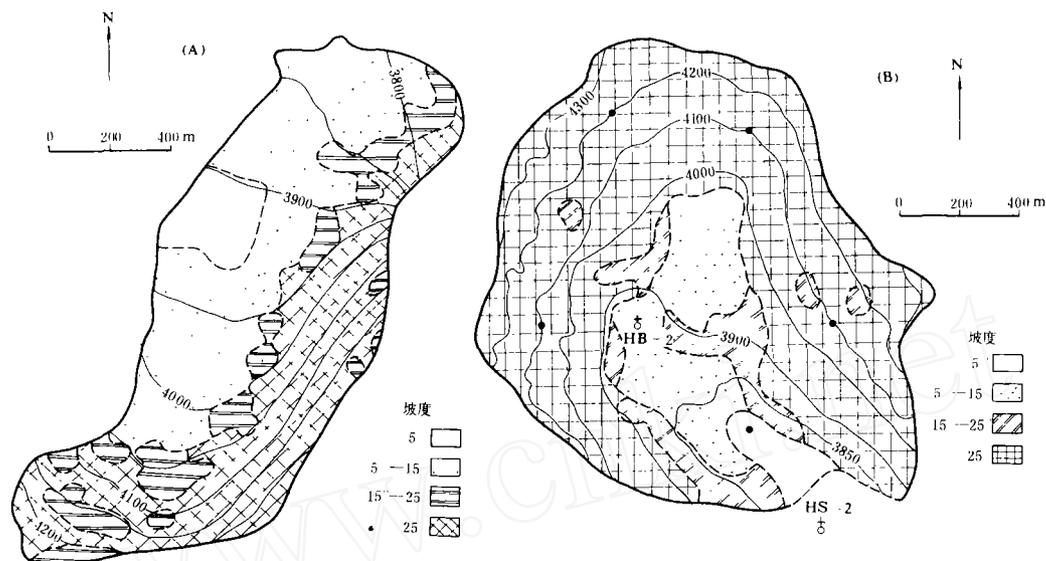


图1 天山乌鲁木齐河源1号冰川东支(A)和空冰斗(B)坡度图
(根据张惠兴资料编绘)

Fig. 1. Maps of the inclination of the east-branch of Glacier No. 1 (A) and the Glacier-free Cirque (B) at headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains (Data from Zhang Huixing, 1984)

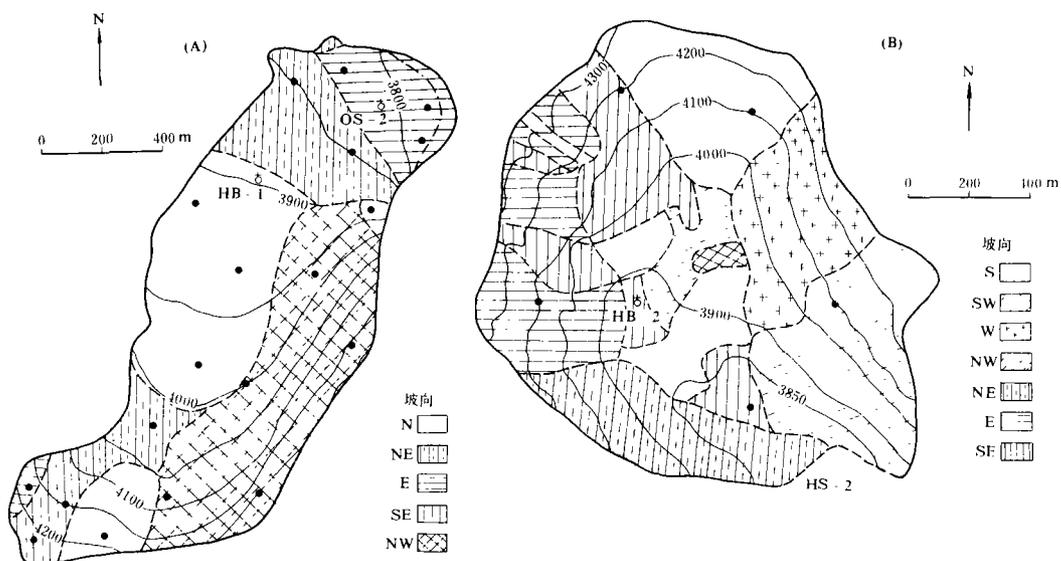


图2 天山乌鲁木齐河源1号冰川东支(A)和空冰斗(B)坡向图
(根据张惠兴资料编绘)

Fig. 2. Maps of the slope direction of the east-branch of Glacier No. 1 (A) and the Glacier-free Cirque (B) at headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains (Data from Zhang Huixing, 1984)

表 1 1号冰川东支和空冰斗内给定各类坡向和坡度区所占面积百分率(%)

Table 1 Areas (per cent) of the east branch of Glacier No. 1 and Glacier-free
Cirque having specified slope exposures and inclinations

| 坡 向 | 1号冰川东支(坡度) | | | | 空 冰 斗(坡度) | | | |
|-----|------------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| | 10° | 20° | 30° | 合计 | 10° | 20° | 30° | 合计 |
| N | 19.3 | 2.8 | 4.3 | 26.4 | - | - | - | - |
| NE | 14.1 | 5.0 | 4.4 | 23.5 | - | 3.6 | 5.8 | 10.7 |
| E | 5.8 | 2.1 | 2.7 | 10.6 | - | 0.9 | 12.8 | 13.7 |
| SE | 0.2 | - | - | 0.2 | 3.5 | 0.5 | 11.7 | 15.7 |
| S | - | - | - | - | 5.0 | 3.6 | 16.1 | 24.7 |
| SW | - | - | - | - | 3.9 | 1.9 | 14.1 | 19.9 |
| W | - | - | - | - | 0.6 | 1.1 | 10.0 | 11.7 |
| NW | 1.6 | 5.2 | 25.8 | 32.6 | 0.5 | - | - | 0.5 |
| 合 计 | 41.0 | 15.1 | 37.2 | 93.3 | 14.8 | 11.6 | 70.5 | 96.9 |

<5°的平坦冰面占6.7%

<5°的平坦地面占3.1%

表 2 乌鲁木齐河源给定坡向、坡度的无遮蔽表面在各种太阳偏角下的坡地辐射系数(%), 43°07' N

Table 2 The slope factor of solar radiation (%) for unshielded surface with specified exposures,
inclinations, and solar declinations at headwater of Urumqi River (43°07' N)

| 坡 向 | 坡 度 (°) | 太阳偏角(赤纬) | | | | |
|---------------------|------------|----------|-------|-------|-------|-------|
| | | -10° | 0° | 15.0° | 20° | 23.5° |
| 北 (N) | 10 | 76.0 | 82.9 | 93.4 | 96.4 | 98.7 |
| | 20 | 48.3 | 62.8 | 85.1 | 91.4 | 96.4 |
| | 30 | 18.4 | 43.2 | 76.9 | 87.5 | 96.1 |
| 东北、西北 (NE or NW) | 10 | 83.9 | 88.0 | 94.9 | 96.8 | 98.3 |
| | 20 | 67.3 | 75.5 | 87.5 | 91.0 | 93.6 |
| | 30 | 53.4 | 63.4 | 78.8 | 83.2 | 86.6 |
| 东、西 (E or W) | 10 | 100.6 | 99.9 | 99.6 | 99.4 | 99.3 |
| | 20 | 100.5 | 99.6 | 98.1 | 97.7 | 97.4 |
| | 30 | 100.0 | 98.4 | 95.8 | 95.1 | 94.5 |
| 东南、西南 (SE or SW) | 10 | 115.0 | 110.4 | 103.3 | 101.4 | 99.8 |
| | 20 | 126.8 | 118.5 | 104.6 | 100.9 | 98.1 |
| | 30 | 136.0 | 123.7 | 104.1 | 98.7 | 94.7 |
| 南 (S) | 10 | 120.4 | 114.4 | 104.2 | 101.5 | 99.4 |
| | 20 | 137.0 | 125.3 | 105.6 | 100.4 | 96.5 |
| | 30 | 149.3 | 132.4 | 104.2 | 96.6 | 91.1 |

受太阳辐射的能量损失汇总于表 3 中。从表 3 中可以看出, 由于朝向的不同, 冰川区的辐射亏损将随着太阳偏角 (δ) 的降低而明显增大。而在空冰斗则出现截然不同的相反情况, 随着 δ 降低, 辐射亏损反而减少, 并于冬季变为负值。这表明在秋分以后, 这里不仅没有亏损, 反而比平坦地面多接收太阳辐射能 9.5% 和 16.1%。

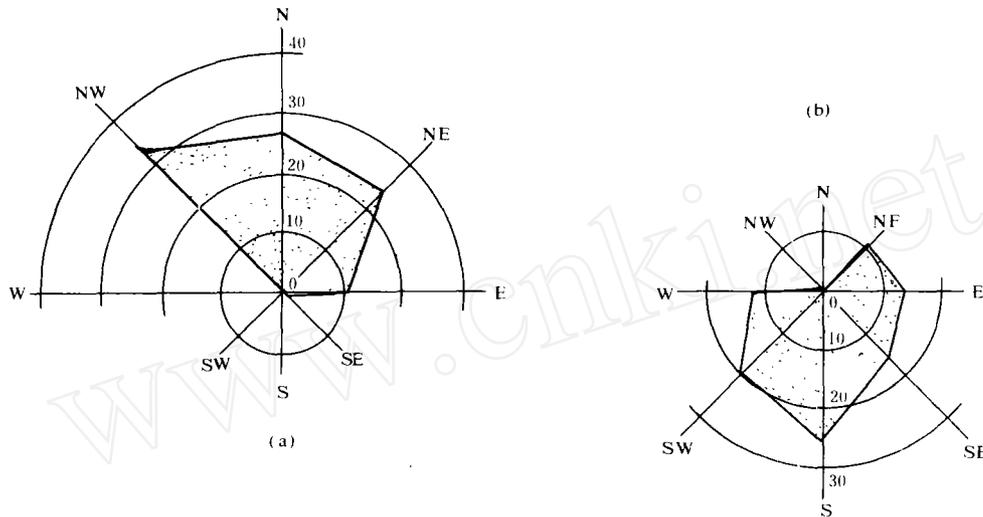


图 3 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支(a)和空冰斗(b)坡向分布频率图

Fig. 3 Frequency distributions of the slope direction of the east-branch of Glacier No. 1 (a) and the Glacier-free Cirque (b) at headwater of River, Tianshan Mountains

表 3 给定太阳偏角下, 整个 1 号冰川东支与空冰川区内接收太阳辐射能量的亏损率(%) (与无遮蔽的水平面相比较)

Table 3 Solar radiation energy deficit received on the whole east-branch of Glacier No. 1 and Glacier-free Cirque as compared with horizontal unshielded surface for given solar declinations

| 太阳偏角($^{\circ}$) | 相 应 时 期 | 辐射能量亏损(%) | |
|--------------------|---------|-----------|-------|
| | | 1 号冰川东支 | 空 冰 斗 |
| 23.5 | 仲夏 | 5.3 | 6.7 |
| 20 | 强烈消融期 | 7.8 | 4.4 |
| 15 | 整个消融期 | 10.0 | 1.5 |
| 0 | 春秋分 | 18.0 | -9.5 |
| -10 | 初冬 | 29.4 | -16.1 |

2 周围山体遮蔽程度对太阳辐射的影响

乌鲁木齐河源冰川作用区内各不同地形部位上的最大可能日照时间受四周环绕山体的遮蔽影响而产生明显差异。因此, 山体遮蔽程度对太阳辐射接收量的影响研究和测算就显得更为突出, 并成为地形状况对辐射和热量平衡影响的一个重要组成因素。根据地形图和图 1—2 中有关地貌状况资料, 在冰川和空冰斗区挑选的地形特征点 (29 点, 其

中 23 点在冰川区, 6 点在空冰斗区) 计算周围山地遮蔽影响下的可蔽视角和太阳偏角 (δ , 又称太阳赤纬) 为 23.5° , 20° , 15° , 0° 和 -10° 时的太阳视运动轨迹线 (sun path), 并将其计算结果绘制成图, 以图解法确定各地形特征测点实际日出、日没时间。绘于图 4 中冰川 HB-1 测站和空冰斗 HB-2 测站的可蔽视角图和五种太阳偏角下

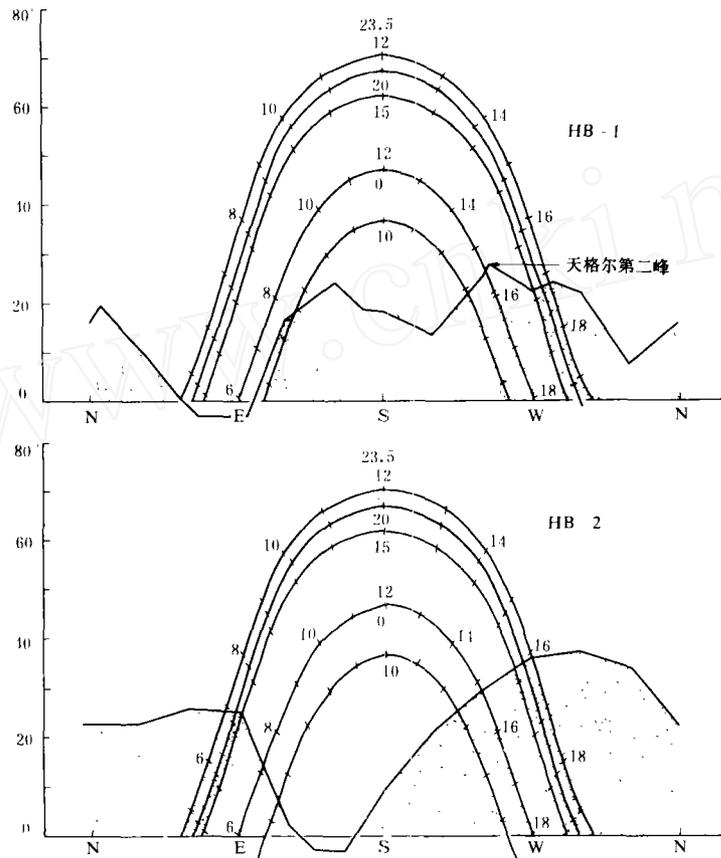


图 4 观测场 HB-1 和 HB-2 的可蔽视角图和太阳偏角为 23.5° , 20° , 15° , 0° , 和 -10° 时的太阳视运动轨迹线

Fig. 4 The screening of the mountains for the HB-1 and HB-2 sites, and five sun paths for the solar declinations of 23.5° , 20° , 15° , 0° and -10°

的太阳视运动轨迹线图就是这种计算的两个例证。值得注意的是 Williams 等 (1971) 所提出网格点法和 Escher-Vetter (1980) 所提的地形模式法都可以通过计算机求解出研究区内任何测点上的日照时间。为了使计算更接近实际, 我们采用了寇有观等 (1982) 所提出的计算高山区实际总辐射量的经验公式和上述方法对地形遮蔽下日照时间的缩减率 (与无遮蔽可能日照时间相比, 以 % 表示) 和相应的辐射能量亏损进行计算, 结果列于表 4 中。在冰川区, 由于南西面陡峭山体的地形遮蔽影响导致冰川上日照时间的缩短和相应的总辐射能量亏损。其缩减和亏损率随太阳偏角降低而呈线性增加。相反, 在西北面山体环绕的空冰斗, 由于东北向遮蔽影响较小而使缩减和亏损百分率随太阳偏角的降低而呈线性减弱。在假定无遮蔽水平面上收入的总辐射能量为 100%

时, 在给定太阳偏角条件下, 冰川和空冰斗两区域内, 在朝向和遮蔽作用的共同影响下所接收的总辐射能量之百分率计算结果列于表 5 中。随着太阳偏角的不断降低和太阳视运动轨迹线的逐渐缩短, 朝北向的冰川其总辐射能量接收量将以线性规律不断减小。而朝南向空冰斗则按同一规律不断增加。补充计算表明, 在秋分点以后的整个冬半年内, 冰川区辐射能量接收量显著下降。当 δ 值由 0° 降低至 -23.5° 时, 其相应的接收能量百分率由 59.7% 减少到 40.6%, 从而造成有利于冰雪积累的热量条件。而在空冰斗区内接收的辐射能量反而随 δ 值降低而增多, 其相应百分率由 80.5% 增大到 95.2%。这是由于朝南坡面接收辐射能量反比水平面要多, 从而抵销了周围山体遮蔽影响所引起的能量亏损的缘故。此时期内, 空冰斗接收的总能量平均为冰川区的 1.74 倍。因此形成了不利于冰雪积累的热量条件。这是现今许多山谷冰川仅在一定朝向的特殊谷地中存在, 而在其高度相同的毗邻地区, 尽管具有冰雪累积的围谷地形却没有冰川发育的主要原因之一。

表 4 在不同太阳偏角情况下, 周围山体遮蔽影响所引起的 1 号冰川东支和空冰斗区内日照时间缩减和总辐射能量亏损

Table 4 Loss in duration of sunshine and energy of global radiation for the whole east-branch of Glacier No. 1 and Glacier-free Cirque owing to the screening effect of the surrounding mountains for different solar declinations

| 太阳偏角($^\circ$) | 日照时间缩减率(%) | | 总辐射能量亏损率(%) | |
|------------------|------------|------|-------------|------|
| | 1号冰川东支 | 空冰斗 | 1号冰川东支 | 空冰斗 |
| 23.5 | 19.2 | 36.2 | 21.9 | 28.8 |
| 20 | 21.3 | 36.0 | 22.8 | 28.8 |
| 15 | 24.0 | 35.2 | 23.9 | 28.4 |
| 0 | 32.1 | 30.4 | 27.2 | 26.5 |
| -10 | 37.4 | 28.8 | 29.3 | 25.8 |

表 5 不同太阳偏角情况下, 冰川和空冰斗区内接收到的总辐射能量(%) (假定无遮蔽水平表面上的总辐射收入量为 100%)

Table 5 The energy of global radiation (%) received on east-branch of Glacier No. 1 and Glacier-free Cirque for different solar declinations (On the assumption that the incoming global radiation for horizontal unshielded surface is 100%)

| 太阳偏角($^\circ$) | 1号冰川东支(%) | | | 空冰斗(%) | | |
|------------------|-----------|------|------|--------|------|------|
| | 朝向 | 遮蔽 | 总量 | 朝向 | 遮蔽 | 总量 |
| 23.5 | 94.7 | 78.1 | 74.0 | 93.3 | 71.2 | 66.4 |
| 20 | 92.2 | 77.2 | 71.2 | 95.6 | 71.2 | 68.1 |
| 15 | 90.0 | 76.1 | 68.5 | 98.5 | 71.6 | 70.5 |
| 0 | 82.0 | 72.8 | 59.7 | 109.5 | 73.5 | 80.5 |
| -10 | 70.6 | 70.7 | 49.9 | 116.1 | 74.2 | 86.1 |

3 地形因素对辐射平衡各分量时空分布的影响

处于不同纬度和冰川气候区的山地冰川系统内, 物质平衡的变化取决于零平衡线高度波动和冰川发育的水热条件。而这些因素无不与太阳辐射和热量的能量交换过程紧密地联系着。不同地形因素(坡度、坡向、地形遮蔽和海拔高度等)对冰川自然表面上辐射平衡各分量时空分布的影响的研究是天山乌鲁木齐河源冰川与气候相互关系研究的主要内容之一。

3.1 计算原理

总汇 Черкасов (1980), Barry (1981) 等人对冰川和山区坡地上辐射平衡各分量的研究, 对于大多数坡度小于 30° 的冰川来说, 其自然表面上各不同坡度和朝向测点上的辐射平衡方程可以表达为:

$$B_{\alpha\beta} = (S_{\alpha\beta} + D_{\alpha\beta} + RH)(1 - Re_{\alpha\beta}) + B_{A,\alpha\beta} - B_E \quad (1)$$

式中: $B_{\alpha\beta}$ 是坡面上的辐射平衡; $D_{\alpha\beta}$ 是坡面上的散射辐射; RH 是来自毗邻积雪坡面上的短波反射-散射辐射; B_E 和 $B_{A,\alpha\beta}$ 是冰雪坡面上的长波地面辐射和大气长波逆辐射。各分量均采用以 $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 为单位的平均日总量计算。 $Re_{\alpha\beta}$ 是冰雪坡面上的平均反射率。

如果以 $GR_{\alpha\beta}$ 和 $B_{eff,\alpha\beta}$ 分别代表总辐射和有效辐射, 则 $GR_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta} + D_{\alpha\beta} + RH$, $B_{eff,\alpha\beta} = B_E - B_{A,\alpha\beta}$ 代入式(1), 则:

$$B_{\alpha\beta} = GR_{\alpha\beta}(1 - Re_{\alpha\beta}) - B_{eff,\alpha\beta} \quad (2)$$

假定 GR_o 、 S_o 、 D_o 和 B_{eff} 为无遮蔽水平面的总辐射、太阳直接辐射、天空散射辐射和有效辐射在晴天少云天气下的平均日总量, Re_s 为邻近冰雪坡面上的平均反射率, F 和 K_s 分别为坡地辐射系数和遮蔽系数(即山体遮蔽影响下的辐射收入量与无遮蔽水平面上的辐射收入量的比率)。此时, 对于坡度为 β 的坡面来说, 辐射平衡各分量的经验计算方程(Черкасов, 1980; Barry, 1981) 分别是:

$$\begin{aligned} GR_{\alpha\beta} &= (S_o + D_o + RH) \times F \times K_s \\ &= GR_o \times F \times K_s \end{aligned} \quad (3)$$

$$RH = GR_o \times Re_s \sin^2(\beta/2) \quad (4)$$

$$B_{eff,\alpha\beta} = B_{eff} \cos^2(\beta/2) \quad (5)$$

由此可知, 在对挑选地形特征点的 F 和 K_s 值的计算基础上, 根据冰川区给定时段内(日, 月或时期) GR 和 B_{eff} 的平均日总量, 随海拔高度的变化以及反射率的时空分布资料, 坡面上各地形特征点上的辐射平衡各组成分量是不难确定的。

3.2 计算结果

为了排除云层对日照时间、总辐射和有效辐射的复杂影响, 我们的计算仅限于夏季

消融期 (6—8 月, 其平均太阳偏角值为 20°) 晴天少云天气情势下的日平均状况。为便于研究总辐射随海拔高度的变化, 将乌鲁木齐河源和中国西部山地冰川消融期内不同海拔高度处的太阳辐射实测资料订正到无地形遮蔽状态。相关计算结果表明, 晴天少云下的总辐射平均日总量 (\overline{GR}_0 , $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) 随着海拔高度 (H, m) 升高而呈对数增大 (图略), 其回归方程为:

$$\overline{GR}_0 = 25.8184 + 5.6243 \ln H \quad (r = 0.9884) \quad (6)$$

根据上述经验方程, 对 1 号冰川东支所选定的 23 个地形特征点上的来自邻近雪坡的反射-散射辐射量 ($RH, \text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) 和夏季 6—8 月期间, 晴天少云天气下的 GR_0 值以及平均太阳偏角 20° 时的 F_s 、 K_s 和相应的实际日照时间 (S_p, h) 进行计算。嗣后, 按方程式 (3) 再计算出冰雪坡面上的 $GR_{\alpha\beta}$ 的平均日总量值。所有计算结果点绘于图 5 的 a, b, c 中。由图和计算结果得知, 来自邻近雪坡的短波反射-散射辐射在总辐射中的贡献比率变化于 0.1—3.1%, 而且仅发生在 $\beta > 10^\circ$ 的坡面上, 并随坡度增大而增加。其最大值出现在东南侧 $\beta > 25^\circ$ 的陡坡上。然而在西北侧 $\beta < 5^\circ$ 的平坦冰面上几乎没有雪坡反射-散射辐射存在。受周围山体遮蔽度主导影响下的实际日照时间, 在粒雪盆凹地中下部靠近东南陡坡的缓坡上出现最小值 (10.0 小时), 并随着地势开阔和高度升高而逐渐增大, 呈环状分布型式。而在东和东北朝向的冰舌区, 则随着地形遮蔽作用在东南侧的减弱和在东北侧的增强而呈东南高、西北低的分布型式。然而, 受坡度、坡向和周围山体地形遮蔽双重影响的总辐射, 其日平均总量的分布和变化则比较复杂。其分布型式具有自西北向东南降低的带状区中镶嵌着两个高值区 ($GR_{\alpha\beta, \max}$, $26.0 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) 的分布特色。

由于夏季消融区内, 冰川上自然冰雪面处于融化状态, 其表面温度除冰碛冰面外, 大都保持在 0°C 左右。此时融化冰雪面上的长波地面辐射辐照度由冰舌区的 $313.4 \text{ W}/\text{m}^2$ 减弱至 $300.7 \text{ W}/\text{m}^2$, 其变化极其微弱。因此, 对高度差仅有 550 m 的东支冰川来说, 晴天少云的稳定天气情势使近冰面空气层中的大气长波逆辐射也变化不大。这样一来, 夏季消融期内 (6—8 月), 冰川自然表面上的净辐射 ($B_{\alpha\beta}, \text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$) 主要取决于吸收辐射 ($GR_{\alpha\beta}(1 - Re_{\alpha\beta})$, $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 的大小。由乌鲁木齐河源 1 号冰川消融季节里的反射率变化研究得知, 冰川表面平均反射率变化于 0.25—0.70 之间。挑选反射率变化区间相近的 1962 年和 1983 年夏季在晴天和少云天气 (总云量 $C_N < 3.5$) 下, 坡度为 5° — 15° 坡面上的实际观测资料进行相关回归分析, 结果得出如下经验方程:

$$B_{\alpha\beta} = 0.9230 GR_{\alpha\beta} (1 - Re_{\alpha\beta}) - 2.8528 \quad (r = 0.9866) \quad (7)$$

由已计算出的 $GR_{\alpha\beta}$ 值和以实测值为基础的 1 号冰川东支的反射率分布图, 按照经验方程 (7) 亦可计算出给定地形特征点上的 $B_{\alpha\beta}$ 值, 并用余项法估算有效辐射 ($B_{\text{eff}, \alpha\beta}$, $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。消融期 6—8 月反射率场、净辐射场和有效辐射场内平均值分布状况如图 6 a, b, c 所示。在夏季冰川总辐射和反射率场内平均值的分布型式的背景条件下, 辐射平衡和有效辐射的平均日总量具有西北侧大, 东南侧小和随高度而递减的分布格局。由各辐射平衡组成分量的梯度计算表明: 在海拔 3775 m 至 4200 m 的高度

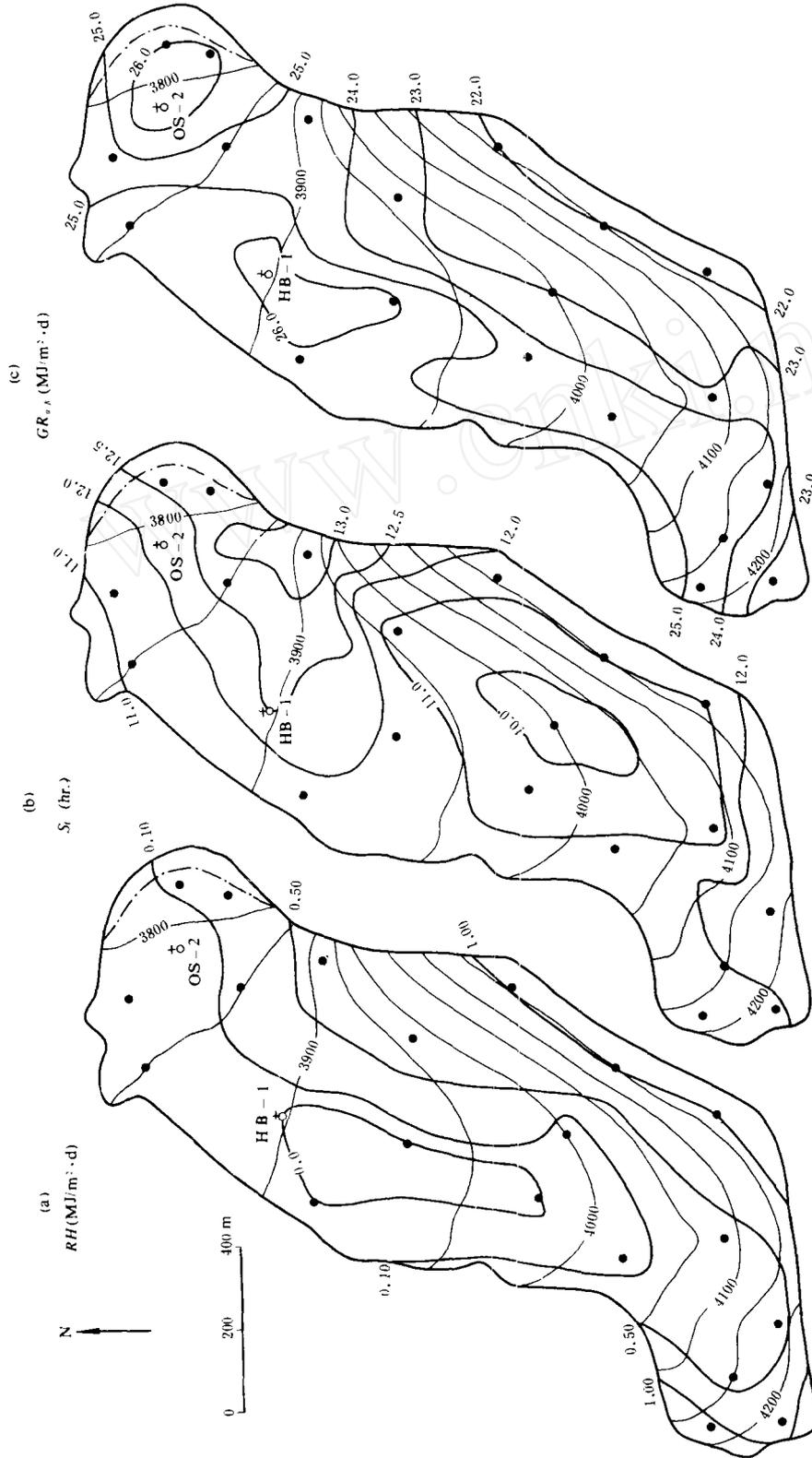


图 5 夏季消融期内晴天少云天气下, 1 号冰川东支自然冰雪面上反射-散射辐射(5-a, RH , $MJ/m^2 \cdot d$), 日照时间(5-b, S_r , h)和总辐射(5-c, GR_{gs} , $MJ/m^2 \cdot d$)平均日总量分布图

Fig. 5 Distribution charts of mean daily sum of the diffusively reflective radiation (5-a, RH , $MJ/m^2 \cdot d$), of insolation duration (5-b, S_r , in hours), and of global radiation (5-c, GR_{gs} , $MJ/m^2 \cdot d$) on the physical surface of the east-branch of Glacier No. 1 in clear and slightly clouded weather during summer ablation period (from June to August)

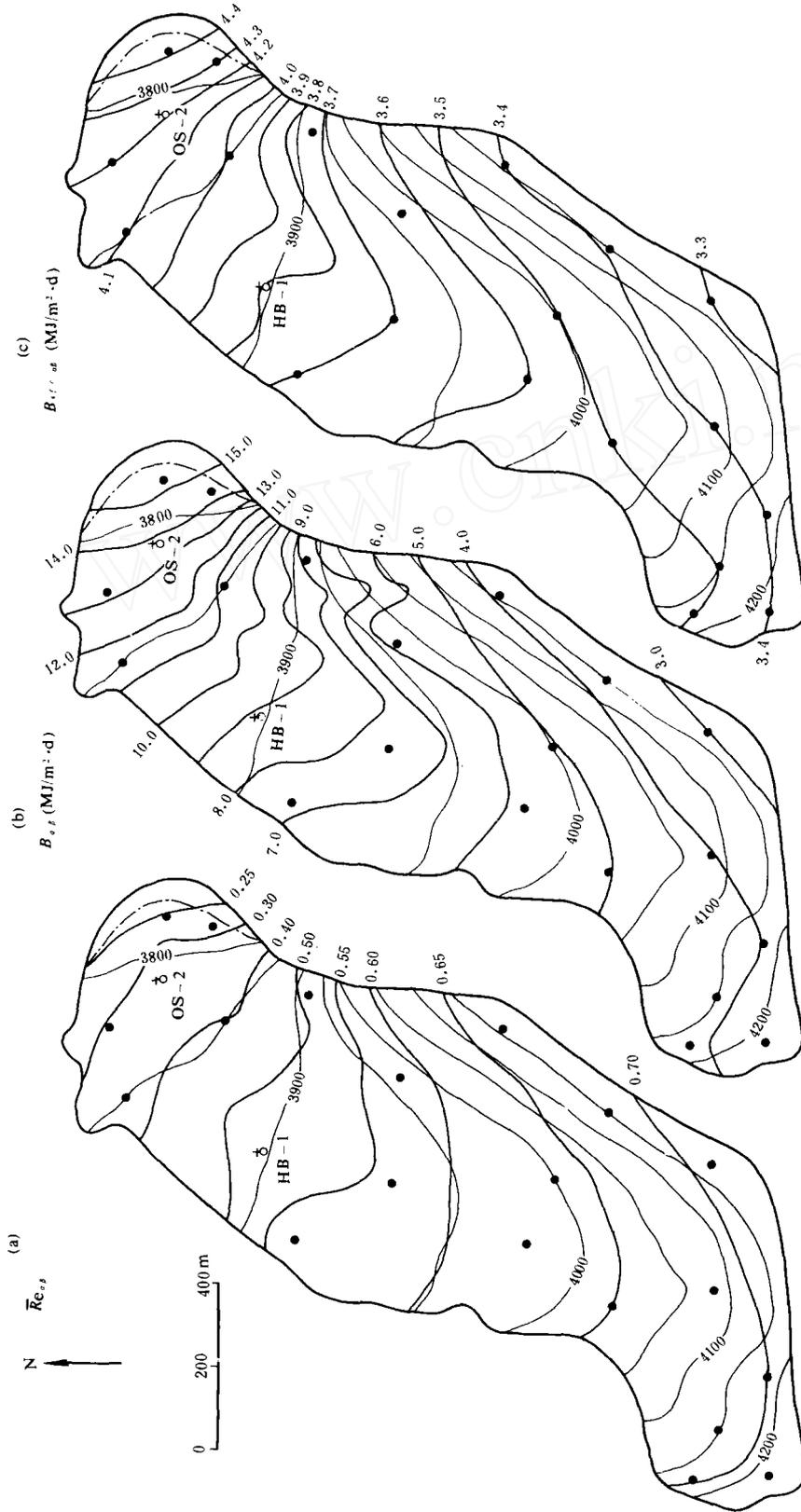


图 6 夏季消融期内 1 号冰川东支自然冰雪面上平均反射率(6-a, \bar{Re}_{sp})和晴天少云天气下净辐射(6-b, $B_{s,s}$, MJ / m² · d)及有效辐射(6-c, $B_{eff,sp}$, MJ / m² · d)平均日总量分布图

Fig. 6 Distribution charts of mean value of albedo (6-a, \bar{Re}_{sp}), and of mean daily sum of net radiation (6-b, $B_{s,s}$, MJ / m² · d) and effective radiation (6-c, $B_{eff,sp}$, MJ / m² · d) on the physical surface of the east-branch of Glacier No. 1 in clear and slightly clouded weather during summer ablation period (from June to August)

区间内以净辐射的垂直梯度最大为 $33.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$; 总辐射次之, 为 $14.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$; 有效辐射的垂直梯度最小, 仅为 $2.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$ 。这与 Черкасов (1980) 在准噶尔阿拉套山冰川区于晴天和少云天气情况下所算出的总辐射和有效辐射垂直梯度 (分别为 $9.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$ 和 $5.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$) 相比, 分别增大 48.6% 和减少 81.2%。这充分表明在不同冰川气候区内辐射能量分布也存在着显著的差异。

4 结 论

乌鲁木齐河源朝北冰川和朝南空冰斗的辐射气候计算证实, 其接受太阳辐射的能力有明显差别, 同时提供了对冰雪累积利弊截然不同的热量条件。这表明, 地形对辐射和热量交换的影响是形成同一地方气候区内冰川作用规模明显差异的主要原因。而冰川自然表面辐射平衡各分量能量场内的平均值分布型式受地形因素和下垫面反射能力的影响十分显著。在不同冰川系统内的典型冰川上开展辐射气候计算, 不仅可为冰川物质和能量交换研究提供参量和数据, 而且对山地冰川水文气候学的研究也有一定的理论和应用价值。

感谢: 野外工作中得到张祥松教授和天山冰川研究站的多方面帮助和所提供的后勤支援, 才使该项工作顺利完成。在总结中张惠兴先生进行了该地区坡度和坡向的计算, 并绘制了冰川和空冰斗坡向、坡度分布图。在此深表感谢。

参 考 文 献

- 寇有观, 曾群柱, 谢维荣等 (1982): 青藏高原总辐射研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 3 号 (中国西部冰川冻土发育的热量条件), 北京: 科学出版社, 1—12.
- Barry, R. G. (1981): *Mountain Weather and Climate*. Published in the USA by Methuen & Co., New York: 1—313.
- Escher-Vatter, H. (1980): *Der Strahlungshaushalt des Vernagtferners als Basis der Energie-haushaltsberechnung zur Bestimmung der Schmelzwasserproduktion eines Alpengletschers*. Wissenschaftliche Mitteilung aus Meteorologisches Institut, Universität Münchener, 39: 1—115.
- Swift, L. W. Jr. and Knoerr, K. R. (1973): Estimating solar radiation on mountain slopes. *Agricultural Meteorology*, (12): 329—336.
- Swift, L. W. Jr. (1976): Algorithm for solar radiation on mountain slopes. *Water Resources Research*, 12(1): 108—112.
- Wendler, G. and Ishikawa, N. (1974): The effect of slope, exposure and mountain screening on the solar radiation of McCall Glacier, Alaska: A contribution to the International Hydrological Decade. *Journal of Glaciology*, 13 (68): 213—226.
- Williams, L. D., Barry, R. G. and Andrews, J. T. (1971): Application of computed global radiation for areas of high relief. *Journal of Applied Meteorology*, 11(3): 526—533.
- Черкасов, П. А. (1980): Радиационный баланс физической поверхности горного ледника в период абляции. Издательство «Наука» Казахской ССР, (Алма-Ата,) 1—143.
- Черкасов, П. А. (1980): Основные положения метода расчета радиационного баланса физической поверхности горного ледника в период абляции. *Материалы Гляциологических Исследований, Хроника, Обсуждения*, вып. 38: 98—104.

Calculation Results of Radiational Climate in Glacierized Cirque and Glacier-free Cirque at the Headwater of Urumqi River in Tianshan Mountains⁽¹⁾

Bai Zhongyuan

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Tetsuo Ohata and Keiji Higuchi

(Water Research Institute, Nagoya University, Japan)

Abstract

In order to advancing studies on the relationship between the radiation energy transfer and topographical factors, the differences in solar radiation due to the influence of direction and angle of slope and mountain screening on solar radiation were calculated for east-branch of Glacier No. 1 and a Glacier-free Cirque at the headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains. According to computed data of the different directions and inclination of glacier and cirque, slope factor of solar radiation and the sunrise and sunset at various solar declinations under influence of shadowing effect of surrounding mountains at 29 points, the difference of energy reductions in solar radiation owing to northerly or southerly exposure and screening effect are small in whole ablation period about 31.5% and 29.5%. But in the period of shorter solar path the difference becomes more important. In the glacier area, the loss in energy is 40.3% at the equinox, and even reaches 50.1% in early winter (solar declination is -10°). Meanwhile in the glacier-free cirque area during the same period, the loss in energy is only 19.5% and 13.9% respectively. The mean loss in energy are 40.6% and 21.0% in glacier area and glacier-free cirque area during three periods and provides various solar radiation energy condition for glacial nourishment.

On the basis of spatial variations studies of mean value of the insolation duration and albedo during summer ablation period (from June to August, for a solar declination of 20°), the fields of radiation energy for components of the radiation balance of physical surface of east-branch of Glacier No. 1 under clear and slightly clouded weather are presented, using observed data and regression equations in this region and mountain glacier of West China. The spatial distribution charts of above factors obviously reflect the

⁽¹⁾This paper is part 5 of "The Researches on the Response of glacier to the climatic variation in Tianshan Mountains" carried out by the Sino-Japanese joint project.

control effects of topographic condition and albedo on the mean daily sum in fields of radiation energy during the summer ablation period, and has an obvious zonal distribution regularity with gradually decreases from northwestern flank to the southeastern flank. The vertical gradients of global radiation and effective radiation in the glacierized region under investigations (from 3775 mm to 4200 m) equal to $14.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$ and $2.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 100 \text{ m}$ respectively. Calculations presented this paper show that exposure and screening effect are very important to the maintenance of glaciers in particular valleys, and explain why there are no glaciers in certain cirque or valleys at same altitudes.

Key words: radiational factor of slope, glacial radiation balance, the field of radiational energy, the vertical gradient of radiation

www.cnki.net