

复杂地形对计算地表太阳短波辐射的影响^{*}

王开存^{1,2)} 周秀骥³⁾ 刘晶淼³⁾

1) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)
2) (中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029)
3) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘 要 首先利用数字高程数据 (DEM)、大气辐射传输模式 6S 以及野外观测资料计算了复杂地形 (青藏高原) 上地表入射太阳辐射, 然后计算不考虑地形产生的地表辐射的计算误差, 对误差进行归一化后得到相对辐射误差。结果显示, 相对辐射误差的标准差 (即相对地表辐射计算误差绝对值的统计平均值) S_r 随太阳天顶角的增加呈指数增长, 随高度标准差的增加几乎呈线性增长, 随数字高程数据的分辨率 (或卫星资料的分辨率) 降低而降低。利用分步拟合方法拟合了 S_r 随太阳天顶角、高度标准差和数字高程分辨率的变化。利用拟合方程可以计算任意地形条件下, 不同分辨率的卫星 (或数字高程) 资料在不同太阳天顶角情况下, 不考虑地形复杂性产生的平均地表入射太阳辐射的计算误差, 结果表明, 使用中分辨率的卫星 (如 MODIS) 资料计算地表太阳净辐射时, 需要考虑地形复杂性。

关键词: 短波净辐射; 中分辨率卫星资料; 相对辐射标准差; 地形复杂性

文章编号 1006-9895 (2004) 04-0625-09 **中图分类号** P422 **文献标识码** A

1 引言

地表太阳短波净辐射是驱动地表光合作用、蒸散发的能量, 是气候和水文模式所必需的物理参数。因此, 有必要确定地表短波净辐射局地、区域和全球尺度上的时空变化。

获得地表净辐射时空变化的传统方法是地表测量。当地表平坦, 在大气水平均一的假定下, 可以把地面站点的测量向二维空间外推。但当地表不均一或崎岖不平时, 就很难进行外推。利用卫星资料和地形并结合大气辐射传输模式或野外观测计算地表太阳净辐射, 是近 10 年来发展的新方法。地表入射太阳辐射是直接辐射、散射辐射、地形反射辐射之和。利用测量或大气辐射传输模式可以计算到达地表面上太阳直接辐射和散射辐射, 然后利用地表地形参数, 如坡度、坡向、高度、天空视角计算地形影响。多光谱高分辨率和中分辨率卫星反射率资料, 如 Landsat TM、SPOT HRV、AVHRR、MODIS, 被用来计算地表反照率。把通过卫星资料获得的地表反照率与计算得到的入射辐射相结合, 可以计算地表反射辐射, 从而获得地表太阳短波净辐射。

利用卫星资料准确地计算地表太阳短波净辐射的前提是准确地计算在卫星影像中

2003-03-24 收到, 2003-07-24 收到修改稿
^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040911 和国家自然科学基金资助项目 40275030 共同资助

每个像素点上的地表入射太阳短波辐射。在很多利用卫星资料计算地表太阳净辐射的研究中，地表入射太阳辐射的计算都是关键问题。Daguay^[1]提出了一个利用 Landsat-5 TM 和地形资料计算复杂地形条件下太阳净辐射的模式。Dubayah^[2]利用 Landsat-5 TM 和数字高程数据资料计算了 FIFE 站的地表太阳净辐射。Graton 等^[3]利用 Landsat-5 TM 和数字高程数据资料计算了加拿大山区复杂地形条件下的净辐射的空间分布。到目前为止，利用卫星遥感资料和数字高程数据计算地表净辐射已经发展成为一种公认的方法。研究发现^[1~3]应用高分辨率卫星资料（如 TM、SPOT 等分辨率在 10 m 量级的卫星资料）计算地表太阳净辐射时必须考虑地形影响。但已发表的研究集中在高分辨率卫星资料上，没有关于中分辨率卫星资料（如 MODIS 和 AVHRR）的讨论。而这些中分辨率的卫星资料是应用最为广泛的卫星资料。因此，迫切需要回答下列问题：应用中分辨率卫星资料计算地表净辐射时是否需要考虑地形影响？如果不考虑地形会产生多大的误差？误差和什么有关？这些就是本文要回答的问题。本文的讨论集中在地形对入射太阳辐射的影响上。

本文利用 GTOPO30 计算地表的坡度、坡向、天空视角。GTOPO30 是美国地质调查中心发布的全球数字高程数据，分辨率为经纬度 30″，高度误差在±30 m 以内^[4]。

2 计算方法与步骤

2.1 复杂地形上地表总入射太阳辐射

关于地表总入射太阳辐射的计算方法有很多研究^[5~9]。平坦地形上，如果忽略地表和大气之间的多次反射，地表总入射辐射可分为 3 部分：太阳直接辐射、天空散射辐射和地形附加辐射。在复杂地形上计算地表入射太阳辐射的复杂性来自以下 3 个方面：（1）太阳直接辐射与太阳入射光线和地表法线的夹角有关。有时，邻近的地形会投下阴影，使目标点根本无法接收到太阳直接辐射。（2）天空散射辐射随地表的天空视角变化。（3）邻近地形的附加辐射。

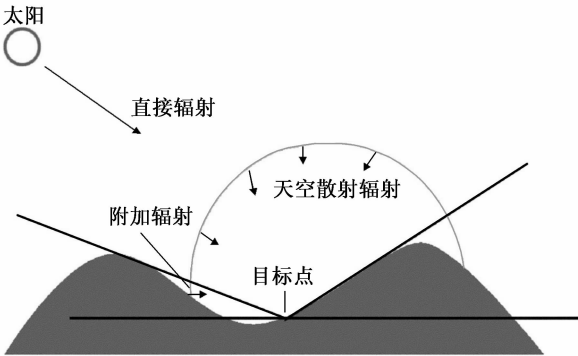


图 1 复杂地形上地表太阳入射辐射（引自文献 [10]）

复杂地形上地表总入射太阳辐射 E_t 可以表示为

$$E_t = E_{dir,t} + E_{dif,t} + E_{a,t}, \tag{1}$$

其中， $E_{dir,t}$ 是地表太阳直接辐射， $E_{dif,t}$ 是天空散射辐射， $E_{a,t}$ 是邻近地形的附加辐射。

2.1.1 太阳直接辐射

地面上垂直于太阳光线方向上的太阳直接辐射可以表示为

$$E_{\text{dir}} = S_0 e^{-\tau_0/\mu_0}, \tag{2}$$

其中， S_0 是大气上界太阳辐射， τ_0 是大气光学厚度， μ_0 是太阳天顶角的余弦。地表太阳直接辐射与太阳光线和地表法线所成夹角 I 的余弦有关：

$$E_{\text{dir},t} = \begin{cases} E_{\text{dir}} \cos I, & \text{当 } I < 90; \\ 0, & \text{当 } I > 90. \end{cases} \tag{3}$$

I 可以表示为

$$I = \arccos(\mathbf{S} \cdot \mathbf{N}) = \arccos \left[\begin{bmatrix} \sin Z_s \cos A_s \\ \sin Z_s \sin A_s \\ \cos S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin S \cos A \\ \sin S \sin A \\ \cos S \end{bmatrix} \right], \tag{4}$$

其中， $\mathbf{S}$ 是太阳光线向量， $\mathbf{N}$ 是地表法线向量， Z_s 和 A_s 分别是太阳天顶角和方位角， S 和 A 是地表坡度和坡向。

如果缺乏太阳直接辐射 E_{dir} 的测量值，可以利用大气辐射传输模式（如 6S 模式^[11]）和数字高程数据进行计算。6S 模式是法国大气光学实验室和美国马里兰大学联合开发的大气辐射传输软件包，可以用来计算 0.25~4.0 μm 波段上晴空条件下的不同高度的太阳辐射，也可以用来对卫星遥感资料进行大气订正。本文结果和讨论中应用的相对辐射误差是一个归一化的参量，它是散射辐射与直接辐射的比值的函数，而与太阳直接辐射和散射辐射的绝对值无关。对复杂地形上入射太阳辐射算法进行的控制实验表明，本文中使用的相对辐射误差对这一比值并不敏感（详见第 4 节的介绍）。因此，我们根据 6S 模式的模拟结果，天气晴朗的情况下取一个平均值（散射辐射与直接辐射的比值为 0.1）。

复杂地形的坡度和坡向可以利用格点数字高程数据计算。通常一个数字高程数据的一个格点被看成倾斜的平面，这一斜面的坡度和坡向的计算方法如下^[10]：

$$S = \arctan \left\{ \left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}, \tag{5}$$

$$A = \begin{cases} \arccos \left\{ \frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}, & \text{当 } \frac{\partial z}{\partial x} \geq 0; \\ \pi + \arccos \left\{ \frac{\frac{\partial z}{\partial y}}{\left[\left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}, & \text{当 } \frac{\partial z}{\partial x} < 0. \end{cases} \tag{6}$$

为了计算方便，定义南方为坡向等于零的方向，坡向顺时针增加，坡向的大小范围是 0~2 π 。 $\partial z/\partial x$ 和 $\partial z/\partial y$ 可以利用差分获得，对于点 (i, j) ，有

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2\Delta h}, \tag{7}$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2\Delta h}, \tag{8}$$

其中， z 代表高度， x 为东西方向，东方为正； y 为南北方向，北方为正。

2.1.2 天空散射辐射

复杂地形上天空散射辐射计算是通过平坦地形上天空散射辐射进行天空视角因子 Φ_{sky} 这一修订因子进行修订的:

$$E_{\text{dif},t} = E_{\text{dif}} \cdot \Phi_{\text{sky}}, \quad (9)$$

$$\Phi_{\text{sky}} = \frac{A_{\text{sky}}}{\frac{\pi}{2}}, \quad (10)$$

其中, A_{sky} 为天空视角。地面平坦时, 天空视角为 $\pi/2$, 天空视角因子 $\Phi_{\text{sky}}=1$; 当地面为下凹时, 天空视角小于 $\pi/2$, Φ_{sky} 小于 1; 天空视角为 0, 完全遮蔽时 $\Phi_{\text{sky}}=0$ 。精确计算天空视角比较困难, 并且需要大量的计算机时间^[12]。本文采用 Ryuzo Yokoyama 等^[13]提出的“positive openness”来代替天空视角。这一方法把水平方位 360° 平均分为八个方向, 分别计算每个方向上的最小天空视角, 然后对八个方向进行平均。这一方法的特点是简单、快速。

2.1.3 附加辐射

附加辐射的计算可以应用精确方法^[8], 也可以应用近似方法^[9]。Dubayah^[2]和 Gratton 等^[3]发展了附加辐射的近似计算方法, 他们仅仅考虑了周围像元点的平均反射率、坡度和天空视角因子。本文中应用的算法是对 Dubayah 方法的简化^[14]:

$$E_{a,t} = C_t \rho_{\text{mean}} (E_{\text{dir},t} + E_{\text{dif},t}), \quad (11)$$

其中, C_t 为地形结构参数

$$C_t = \frac{1 + \cos S}{2} - \Phi_{\text{sky}}, \quad (12)$$

ρ_{mean} 是附近地形的平均地表反射率, 采用青藏高原平均值 $\rho_{\text{mean}}=0.22$ ^[15] (第一次青藏高原气象科学实验各测站 5~8 月的平均值)。Dubayah^[2]指出精确的模式计算相对于上述简单模式并不能有效提高计算精度。

2.2 平坦地面上地表太阳辐射

不考虑地形复杂性, 假定地表是平坦的, 地表总入射辐射是太阳直接辐射和天空散射之和

$$E_f = E_{\text{dir}} \cos Z_s + E_{\text{dif}}. \quad (13)$$

2.3 不考虑地形复杂性产生的地表太阳辐射的计算误差

利用公式 (1) 和 (13), 可以得到地表“真实”太阳辐射 (考虑复杂地形时计算出的总地表太阳辐射) 和考虑地形复杂性下 (平坦地形假定下) 计算出的地表入射太阳辐射之差:

$$E_d = E_t - E_f, \quad (14)$$

E_d 代表不考虑地形产生的地表入射太阳辐射计算误差。因为太阳入射辐射与海拔高度有关, 不同的高度上, 获得的太阳入射辐射不同, 因此, 相同的地形效应产生的辐射误差也会不同。为了减小太阳辐射的绝对值对本文结论的影响, 本文采用相对辐射误差:

$$E_{d,r} = \frac{E_t - M_f}{E_f} \times 100\%. \quad (15)$$

地形对太阳入射辐射的影响是使太阳辐射在不同区域的分布不同, 使向阳的坡地

地表辐射增加，背阴的坡地地表辐射减小。对于一个无整体倾斜的区域，整个区域上的总太阳辐射几乎不受地形影响，相对辐射误差的平均值几乎为零。所以，相对辐射误差的标准差可以表示整个区域上不考虑地形产生的相对辐射误差的统计平均值（绝对值）。相对辐射误差的标准差（单位：%）可以表示为

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_{d,r,i,j} - E_{d,r,mean})^2} \tag{16}$$

其中， $E_{d,r,i,j}$ 是点*i*，*j*的相对辐射误差， $E_{d,r,mean}$ 是整个区域上相对辐射误差的平均值。*m*、*n*分别是整个区域上的格点的行数和列数。

3 研究区域介绍

研究区域位于青藏高原中部（30~36°N，82~92°E）（图 2），是青藏高原上较为平坦的区域。高度标准差可以代表高度偏离平均高度的大小，所以利用高度的标准偏差可以表示地形复杂性，

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{i,j} - z_{mean})^2} \tag{17}$$

其中， $z_{i,j}$ 代表*i*，*j*点的高度， z_{mean} 是整个区域上高度的平均值，*m*、*n*分别是整个区域上格点的行数和列数。

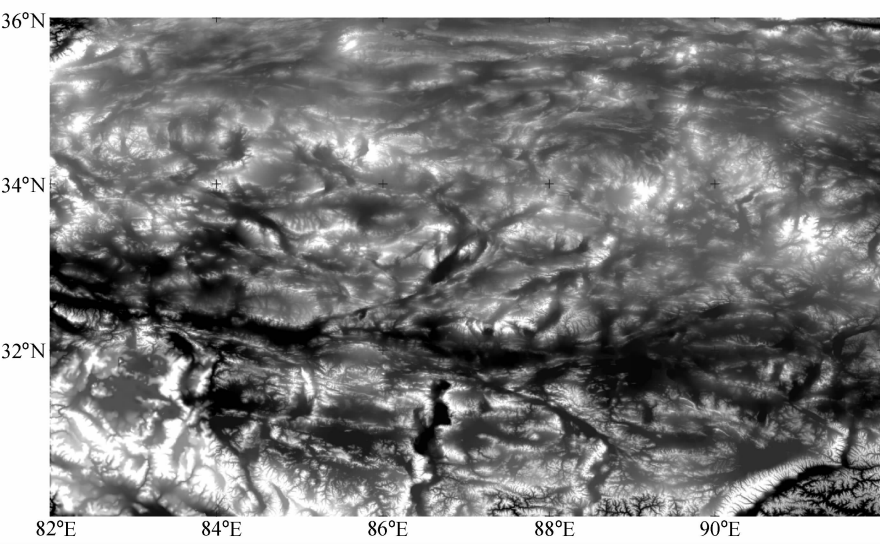


图 2 研究区域（灰度代表高度，亮的地方高，暗的地方低）

为了研究地形复杂性对地表入射太阳辐射的影响，把研究区域划分成 15 个 2°×2°的区域，每个区域有不同的复杂性（高度标准差），会产生不同的辐射误差。为了研究数字高程数据的分辨率（或卫星资料的分辨率）对相对辐射标准差的影响，从研究区域中划出 2 个 6°×6°区域，分别为（30~36°N，82~88°E）和（30~36°N，86~92°E），然后对每个区域的高度进行滑动平均处理，得到如下数字高程数据分辨率：60''（1700 m），90''（2550 m），120''（3400 m），180''（5100 m），和 270''（7650 m）。在本

地区 30'' 相当于 850 m。

4 结果与讨论

本文取平坦地表上天空散射太阳辐射与太阳直接辐射之比 $R_{\text{df}}=0.1$ ，而 R_{df} 与水汽、气溶胶、臭氧的含量有关，在晴空条件下，并不是稳定不变的常量。为了定量表示 R_{df} 的变化对本文计算结果的影响，我们进行了如下的数值实验。令 R_{df} 在 0.05~0.15 的范围变化，计算不同 R_{df} 条件下的相对辐射误差的标准差 S_e （结果见表 1）。可见， S_e 对 R_{df} 的变化并不敏感。当 R_{df} 从 0.05 到 0.15 变化时， S_e 的变化小于 10%。

表 1 相对辐射误差的标准差 S_e 随散射与直射之比 R_{df} 的变化

R_{df}	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
S_e	3.40	3.37	3.33	3.29	3.26	3.22	3.19	3.15	3.12	3.09	3.06

注：太阳天顶角 $Z_s=\pi/6$ ，太阳方位角 $A_s=3\pi/4$ ，高度标准差 $S_z=302.5$ ，数字高程数据分辨率 $R=850$ m。

令太阳方位角以步长 15° ，从 0° 增加到 345° ，可以计算出不同方位角对应的相对辐射误差的标准差 S_e 。图 3 显示， S_e 几乎不随太阳方位角变化，对图中的某一点（代表一个斜面），太阳方位角的影响是很大的，它可以确定这点是向阳的还是背阴的，因此辐射误差的大小和符号都有可能随太阳方位角而改变。但对于整个区域来说，因为格点的方位角可以认为是大致呈均匀分布，使太阳方位角的变化对整个区域上的相对辐射误差的统计平均值影响不大。因此，在以下的讨论中，我们不再考虑太阳方位角对相对辐射误差标准差的影响。

与太阳方位角相反，太阳天顶角是影响 S_e 的一个主要因子。太阳天顶角增大，邻近地形投下的阴影的面积就会增大，因此，地形的作用就被放大。图 4 显示 S_e 随太阳天顶角 Z_s 呈指数上升，拟合方程为 $S_e=0.169+1.07\exp(Z_s/0.523)$ 。从图 4 可以看出，虽然数字高程数据的分辨率相当低（大约相当于卫星遥感资料的中分辨率），当太阳天顶角较大时，地形作用产生的相对辐射误差可以达到 20%，这是一个相当大的误差。

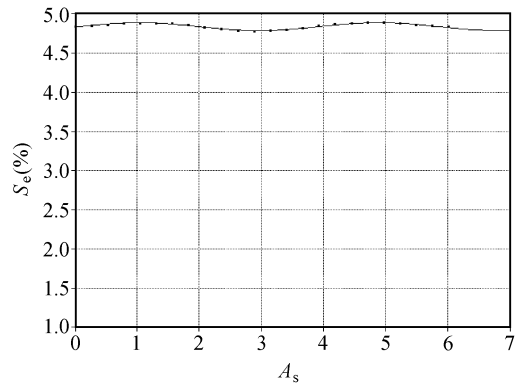


图 3 相对辐射误差标准差 S_e 几乎不随太阳方位角 A_s 的增加而变化。太阳天顶角 $Z_s=\pi/4$ ，高度标准差 $S_z=303$ m，数字高程数据的分辨率为 $R=850$ m。圆点代表实际计算结果，实线代表最佳拟合值

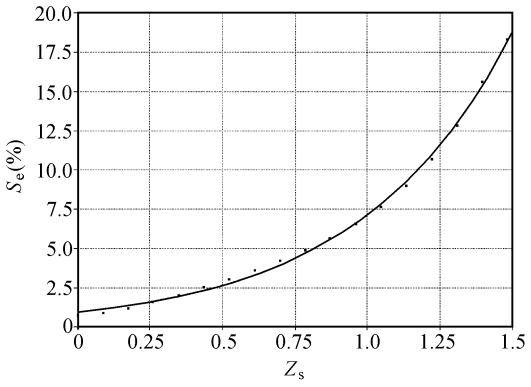


图 4 相对辐射误差的标准差 S_e 随太阳天顶角 Z_s 增加指数上升。太阳方位角 $A_s=7\pi/4$ （太阳在东南方），高度标准差 $S_z=303$ m，数字高程数据的分辨率 $R=850$ m。圆点代表实际计算结果，实线代表最佳拟合值

地形复杂性（整个区域上高度的标准差）是影响地表入射太阳辐射的另一重要因子。高度的标准差可以看成是区域上平均的高度差，高度差越大，则地形的坡度越大，天空视角越小，地形的影响越大。相对辐射误差标准差 S_e 随高度标准差线性增加（图 5），拟合方程为 $S_e=0.499+0.012S_z$ 。图 5 显示当太阳天顶角 $Z_s=\pi/4$ ，高度的标准差大于 300 m 时， S_e 就会大于 5%。

通过对原数字高程数据（GTOPO30）进行滑动平均，可以得到下列数字高程数据的分辨率：850 m、1700 m、2550 m、3400 m、5100 m 和 7650 m。同样的高度差，当数字高程数据的分辨率变低时，地形的坡度会减小，天空视角会变大，地形的影响会变小。计算结果与我们预期的相似，相对辐射误差标准差 S_e 随数字高程数据分辨率 R 的变小而变小（图 6），拟合方程为 $S_e^2=1.29+21085/R$ 。从图 5 可知， S_e 随高度标准差 S_z 线性增加。而与分辨率的倒数 R^{-1} 的关系也是线性的。因此，可以用高度标准差与数字高程数据的分辨率之比来表征地形复杂性。它是更加合理地表征地形复杂性的量，因为它表示单位距离上的高度差。

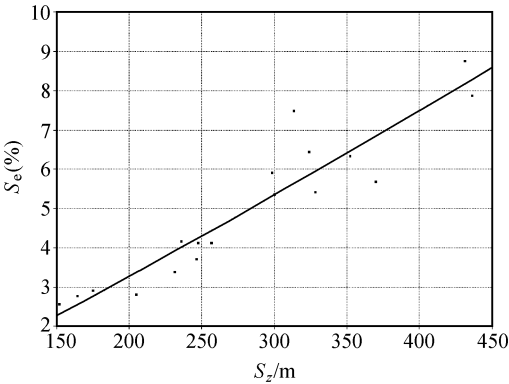


图 5 相对辐射误差的标准差 S_e 随高度标准差 S_z 增加而线性增加。太阳天顶角 $Z_s=\pi/4$ ，太阳方位角 $A_s=7\pi/4$ （太阳在东南方），数字高程数据的分辨率 $R=850$ m。圆点代表实际计算结果，实线代表最佳拟合值

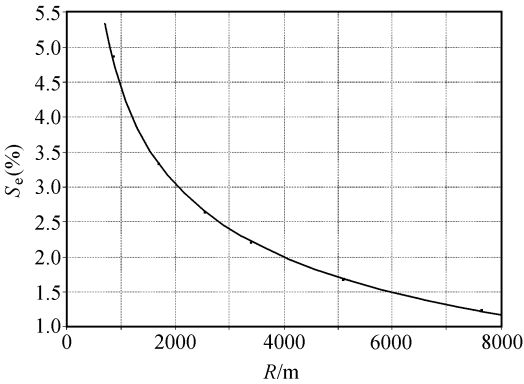


图 6 相对辐射误差的标准差 S_e 随数字高程数据的分辨率减小而减小。太阳天顶角 $Z_s=\pi/4$ ，太阳方位角 $A_s=7\pi/4$ ，高度标准差 $S_z=303$ m。圆点代表实际计算结果，实线代表最佳拟合值

综合图 3~6，利用分步拟合的方法，可以拟合出相对辐射误差标准差（单位：%）的方程（拟合样本为 30 个，拟合相关系数为 0.9829，拟合残差为 0.936）：

$$S_e = 0.088 - 5.09R_{hs}^{2.769} + (0.1899 + 8.24R_{hs}^{1.963})\exp\left(\frac{Z_s}{0.4290 + 0.4420R_{hs}^{1.384}}\right), \quad (18)$$

其中， $R_{hs}=S_z/R$ 是高度标准差与数字高程数据分辨率的比， Z_s 是太阳天顶角（单位：弧度）。利用（18）式，只要给定太阳天顶角、高度标准差、数字高程数据的分辨率（或卫星资料的分辨率），就可以计算出相对辐射误差的统计平均值。当利用中分辨率卫星（如 MODIS）资料来计算复杂地形上的地表辐射时，一般情况下， $S_z=350$ m， $Z_s=\pi/3$ （卫星过境的时间为当地时间 10：30 左右），对于 250 m 分辨率通道， S_e 高达 25.78%，对于 1000 m 分辨率通道， S_e 也达到 8.62%。

从以上的计算结果和讨论可知，如果地面不平坦，因不考虑地形复杂性产生的相对辐射的误差与很多因素有关，如太阳天顶角、高度标准差、数字高程数据的分辨率

(或卫星资料的分辨率)。分辨率并不是唯一的决定因素。当太阳天顶角较大(太阳高度较低)时,对于较复杂的地形,如在青藏高原中部,即使当分辨率大于 1 km(与所谓的卫星资料的中分辨率相当),忽略地形作用引起的相对辐射误差,仍然相当大。因此,在应用中分辨率卫星资料计算复杂地形上地表能量平衡时,必须考虑地形的作用。

5 讨论

利用数字高程数据、野外观测资料和大气辐射传输模式 6S 计算了复杂地形上地表入射太阳辐射,并与平坦地形上的地表入射辐射计算方法进行了对比,计算了不考虑地形作用产生的地表入射太阳辐射的计算误差,并对这一误差进行归一化。得到如下结论:

(1) 相对辐射误差的标准差 S_e 与太阳天顶角、高度标准差、数字高程的分辨率(或卫星资料的分辨率)有关,数字高程的分辨率并不是唯一的决定因素。

(2) S_e 随太阳天顶角的增加呈指数增长,随高度标准差的增加几乎呈线性增长,随数字高程的分辨率降低而降低。由此可见,太阳天顶角是影响净辐射计算误差的最重要的影响因子,高度标准差、数字高程数据的分辨率的影响次之。

(3) 利用分步拟合的方法,拟合了 S_e 随太阳天顶角、高度标准差、数字高程分辨率的变化。利用拟合方程可以计算不同太阳天顶角、不同地形复杂程度和不同分辨率时,计算复杂地形上地表入射太阳辐射不考虑地形因素可能产生的误差。

(4) 计算表明,利用中分辨率卫星资料计算复杂地形上的地表入射辐射,需考虑地形的影响。

参 考 文 献

- 1 Duguay, C. R., Estimating surface reflectance and albedo from Landsat-5 Thematic Mapper over rugged terrain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, **58**, 551~558.
- 2 Dubayah, R., Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data, *Water Resour. Res.*, 1992, **28**, 2469~2484.
- 3 Gratton, J. D., P. J. Howarth, and D. J. Marceau, Using Landsat-5 Thematic Mapper and digital elevation data to determine the net radiation field of a mountain glacier, *Remote Sens. Environ.*, 1993, **43**, 315~331.
- 4 <http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/README.HTM>
- 5 Steven, M. D., Standard distributions of clear sky radiance, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1977, **103**, 457~465.
- 6 Temps, R. C., and K. L. Coulson, Solar radiation incident upon slope of different orientations, *Solar Energy*, 1977, **19**, 179~184.
- 7 Iqbal, M., *An Introduction to Solar Radiation*, New York: Academic Press, 1983.
- 8 Proy, C., D. Tanreá, and P. Y. Deschamps, Evaluation of topographic effects in remotely sensed data, *Remote Sens. Environ.*, 1989, **30**, 21~32.
- 9 Dozier, J., and J. Frew, Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1990, **GE-28**, 963~969.
- 10 Wang, J., K. White, and G. J. Robinson, Estimating surface net solar radiation by use of Landsat-5 TM and digital elevation models, *Int. J. Remote Sens.*, 2000, **21**, 31~43.

11 Eric F. Vermote, Didier Tan, and Jean Luc Deuze, Maurice Herman, and Jean-Jacques Morcrette. Second simulation of satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**, 675~686.

12 李新、程国栋、陈贤章等, 任意地形条件下太阳辐射模型的改进, 科学通报, 1999, **44** (9), 993~998.

13 Ryuzo Yokoyama, Michio Shirasawa, and Richard J. Pike, Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, **68**, 257~265.

14 Hansen, L. B., N. Kamstrup, and B. Ulf Hansen, Estimation of net short-wave radiation by the use of remote sensing and a digital elevation model—a case study of a high arctic mountainous area, *Int. J. Remote Sens.*, 2002, **23**, 4699~4718.

15 谢贤群, 青藏高原 1979 年 5-8 月的地表反射率, 青藏高原气象科学实验文集 (二), 北京: 科学出版社, 1984, 17~21.

The Effects of Complex Terrain on the Computed Surface Solar Short-Wave Radiation

Wang Kaicun^{1,2)}, Zhou Xiuji³⁾, and Liu Jingmiao³⁾

- 1) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)
- 2) (*Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)
- 3) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract Surface incoming solar radiation over complex terrain is calculated by using topographic data from a gridded digital elevation model, field measurements, and atmospheric radiation transfer model 6S. The error caused by not taking into account terrain complexity is calculated, and relative radiation error is estimated by standardizing the error. The results show that the standard deviation of the relative radiation error increases exponentially with solar zenith angle, and almost linearly with the standard deviation of height, but decreases when the resolution of the digital elevation model (or resolution of satellite remotely sensed data) decreases. Using a step-by-step regression method, the regression equation of the standard deviation of relative radiation error is calculated. The regression equation can describe well the change of standard deviation of relative radiation error with solar zenith angle, standard deviation of height, and resolution of digital elevation model. The result demonstrates that it is necessary to consider terrain complexity when using moderate-resolution of remotely sensed data.

Key words: net short-wave radiation; middle-resolution satellite data; relative radiation standard deviation; terrain complexity