

文章编号: 1007 4619 (2005) 05 0521 10

日照时间的地形影响与空间尺度效应

张 勇, 陈良富, 柳钦火, 李小文

(中国科学院 遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

摘 要: 在广泛总结前人研究的基础上, 提出了一个改进的、基于 DEM 数据的、起伏地形条件下的日照时间计算模型, 在以往计算模型的基础上引入地球曲率修正因子 Q , 提高了模型的计算精度。并在此基础上, 计算了全国 6 个典型地貌类型区, 在春秋分日、夏至日和冬至日, 两个空间分辨率下 (500m 和 1km) 地面日照时间的空间分布。应用数理统计、数学模拟和比较分析的研究方法, 对模型修正前后计算所得的地面日照时间数据进行了对比分析, 并对所得地面日照时间从不同地貌类型和不同空间尺度两个方面进行了地形与空间尺度效应研究。阐明了区域日照时间随地形地貌和空间分辨率变化的规律, 对应用中计算地面日照时间的 DEM 空间分辨率选择具有指导意义。

关键词: 日照时间; DEM; 空间分析; 地形效应; 尺度效应

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

太阳辐射是地球表层物理、生物和化学过程 (如雪融、作物光合、蒸腾、作物生长等) 的主要能源, 也是生态系统过程模型、水文模拟模型和生物物理模型研究的重要参数。地面日照时间的长短直接决定了地表接受太阳辐射能的多少, 所以, 地面日照时间是影响太阳辐射计算的重要参数。

地面“日照时间”一般具有两种含义, 即天文日照时间和地理日照时间^[1]; 前者指在不考虑大气影响和地形遮蔽的最大可能日照时间, 后者指考虑地形遮蔽的影响而不考虑大气影响的可能日照时间。地理日照时间模型已经被广泛用于地表辐射场数值模拟和地表能量平衡研究等领域^[2-9], 而且考虑复杂地形条件下的日照时间模型^[10]也已经比较成熟, 国内学者还对中国 1km 空间尺度的日照时间空间精细分布^[11]做了研究。但这些研究的不足之处主要有: (1) 计算模型没有考虑地球曲率对地面日照时间的影响, 没有明确地球曲率对不同尺度, 以及不同地貌类型的日照时间的影响程度; (2) 计算模型

对空间尺度之间的差异探讨关注较少。目前有国外学者从太阳辐射来源与组成的角度, 将对地表辐射的影响划分为 4 个尺度: 全局尺度 (大气外层空间的辐射度)、中间尺度 (大气对地表辐射的衰减)、地形尺度 (地形起伏造成的地形遮蔽的影响) 和微观尺度 (地表植被的影响), 并利用 20m 和 100m 两个分辨率 DEM 数据分析了各尺度的敏感性^[12]。而缺乏地形尺度中不同空间分辨率影响日照时间方面的研究与探讨, 从而使得无法给出不同空间尺度碳模型和辐射平衡模型中因日照时间的尺度差异带来的不确定性。本文在对日照模型作地球曲率修正的基础上, 利用全国 6 个典型地貌类型区在春秋分日、夏至日和冬至日的日照时间, 探讨与分析不同空间分辨率对地面日照时间的空间尺度效应。

2 计算模型与实验数据

2.1 地球曲率修正的日照时间模型

日照时间模型以研究区的数字高程模型 (DEM) 数据为基础, 模型计算精度主要取决于时间积分步长、遮蔽范围半径和数字高程模型分辨率等

收稿日期: 2004 04 27; 修订日期: 2004 10 20

基金项目: 中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究 (项目编号: 2002CB412506) 和中国科学院知识创新工程项目资助。

作者简介: 张勇, 1977 年 10 月 17 日出生, 陕西镇巴人, 2003 年毕业于西北大学城市与资源学系地理信息系统与遥感专业, 获理学硕士学位, 已发表研究论文 10 余篇, 参编专著和教材 3 部。现为中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室在读博士研究生, 主要从事定量遥感和红外遥感的理论和应用研究。E-mail: zhangqr@lab.irsa.ac.cn; lfcher@irsa.ac.cn

参数;模型计算的主要步骤,以及地球曲率对模型的修正因子,主要包括以下内容。

2.1.1 太阳赤纬

根据国际天文协会的决议,自 1984年起,各国天文年历均采用新的天文常数系统、时间系统和基本参考系统,并采用太阳系天体运动方程组新的数值积分结果,精确列表值的确定方法与结果都有所改变。因此,左大康等^[13]根据 1986年中国天文年历中的列表值对太阳赤纬 δ 进行了傅里叶逼近,给出计算公式:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006894 - 0.399512\cos\theta + 0.072075\sin\theta - \\ & 0.006799\cos2\theta + 0.00089\sin2\theta - \\ & 0.002689\cos3\theta + 0.001516\sin3\theta \end{aligned} \quad (1)$$

式中 θ 称为太阳日角,以弧度单位表示,可用积日 D 来确定。积日 D 是从一年的 1月 1日—12月 31日,假定二月恒为 28天。所以:

$$\theta = 2\pi(D-1)/365.2422 \quad (2)$$

2.1.2 太阳日出和日没时角

研究表明,坡面上的日出(日没)时间不早于水平面上的日出(日没)时间^[14]。因此,在起伏地形条件下考虑地形遮蔽的地面任意一点 P ,根据从 DEM数据中读取的地理纬度 ϕ 和由式(1)和式(2)确定的太阳赤纬 δ 可以利用下式计算出与该点处于同一纬度水平面上一年中任意一天的日出和日没时角:

$$\begin{aligned} \omega_s &= \arccos(-\tan\delta \cdot \tan\phi) \\ \omega_r &= -\omega_s \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中, ω_s 为日没时的太阳时角(弧度), ω_r 为日出时的太阳时角,从真太阳时正午起算,时角以正南方向为 0,顺时针为正,逆时针为负; ϕ 为地理纬度(弧度); δ 为太阳赤纬(弧度),在天赤道以北为正,以南为负。

2.1.3 太阳时角步长和离散数目

根据计算步骤 1和 2,可计算获得水平面上 P 点的太阳天文可照时间,为 $2\omega_s$ (弧度),即没有考虑大气和周围地形对 P 点造成的日照遮蔽的影响。在实际地形条件下,一天中任意时刻 P 点可照与否,主要由该时刻的太阳高度角和方位角,以及太阳方位角方向上的地形起伏对 P 点造成的遮蔽角所决定。如果太阳高度角大于地形对 P 点造成的遮蔽角时, P 点可以获得日照,反之,则被遮蔽,没有日照。

基于此思路,在用户给定时间积分步长 ΔT 的基础上,通过下式可以确定时角步长 $\Delta\omega$ 和从日出到日没太阳时角的离散数目 n :

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{24 \times 26} \Delta T \quad (4)$$

$$n = \text{int}\left[\frac{2\omega}{\Delta\omega}\right] + 1 \quad (5)$$

2.1.4 每时刻的太阳方位

由式(4)和式(5)计算确定的太阳时角步长 $\Delta\omega$ 和时角的离散数目 n ,通过下式可以计算获得太阳的每个时刻时角 ω_i 所对应的太阳高度角 h_i 和太阳方位角 A_i :

$$\omega_i = \omega_r + i \times \Delta\omega \quad (6)$$

$$h_i = \arcsin(\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega_i) \quad (7)$$

$$A_i = \arccos\left[\frac{\sinh_i\sin\phi - \sin\delta}{\cosh_i\cos\phi}\right] \quad (8)$$

其中 $i=1, 2, 3, \dots, n$, 太阳方位角 A_i 从观测者子午圈开始顺时针方向度量,正南为零,向西为正,向东为负。

2.1.5 地形遮蔽因子及地球曲率修正因子

地形遮蔽的计算采用光线追踪算法,搜索光线入射路径上遮蔽范围半径内的所有格网点,若某格网点高程与计算格网点高程之间所形成的高度角(即:地形遮蔽角)大于该入射路径上的太阳高度角,则这是一条被遮蔽路径,记 $d_i=0$;否则, $d_i=1$ 。或者直接通过周围格网点高程与目标点高程比较,确定地形遮蔽因子。以地面任意一点 P 点为起点,沿 A_i 方位作直线 L_i ,根据太阳高度角 h_i 和直线 L_i 方向上各点的高程即可确定该时刻周围地形对 P 点的遮蔽状况 d_i 。实际计算中,地面的高程信息都来源于 DEM数据,由于国家基础地理信息数据库标准的 DEM数据都是采用规则的正方形格网,因此,为了提高计算机模型的运行效率,自 P 点开始沿直线 L_i 按照距离步长 ΔL 依次判断相应格网点对 P 点的遮蔽状况。取 DEM数据的空间分辨率值作为距离步长 ΔL ,则自 P 点开始沿直线 L_i 按照距离步长每增加一个 ΔL ,对应的水平(东西)方向的坐标增量为 ΔL_x 和垂直(南北)方向的坐标增量为 ΔL_y 分别为:

$$\Delta L_x = \Delta L \times \sin(A_i) \quad (9)$$

$$\Delta L_y = \Delta L \times \cos(A_i)$$

沿直线 L_i 方向,随着距离步长 ΔL 的增加,在太阳光线入射方向的高程增量 ΔH 为:

$$\Delta H = \Delta L \times \tan(h_i) \quad (10)$$

在实际计算过程中,直线 L_i 的长度是由用户设定,取一定的遮蔽范围半径 R 即可满足计算要求。在遮蔽范围半径 R 内,判断 A_i 方位上地形对 P 点所

造成的遮蔽状况 d_i 时的计算次数为:

$$N = \text{int} \left(\frac{R}{\Delta L} \right) \tag{11}$$

式 (5) 和式 (11) 中的 $\text{int}()$ 均为取整函数。

以 P 点为起点, ΔL 为步长, 沿直线 L_i 逐步计算周围格网点高程对太阳光线的遮蔽状况, 若:

$$Z(x_p + j \times \Delta L_x, y_p + j \times \Delta L_y) > Z(x_p, y_p) + j \times \Delta H \tag{12}$$

$j=1, 2, 3, \dots, N$

则 $d_i=0$, 即在 A_i 方位周围地形对 P 点有遮蔽; 否则, $d_i=1$, 即在 A_i 方位周围地形对 P 点无遮蔽, P 点可照。其中, $Z(x, y)$ 为 (x, y) 处的高程。

在这一关键步骤中, 本研究对计算模型进行了修正, 考虑了地球曲率对地面高程的影响, 在模型中加入了地球曲率修正因子 Q:

$$Q = \sqrt{eR^2 + (j \times \Delta L)^2} - eR \tag{13}$$

式 (13) 中 eR 表示地球半径平均值, $j=1, 2, 3, \dots, N$, ΔL 为距离步长, 其取值等于 DEM 数据的空间分辨率。则修正后的沿直线 L_i 逐步计算周围格网点高程对太阳光线遮蔽状况的判断公式为:

$$Z(x_p + j \times \Delta L_x, y_p + j \times \Delta L_y) - Q > Z(x_p, y_p) + j \times \Delta H \tag{14}$$

式中 Q 即为式 (13) 中所定义的地球曲率修正因子。若式 (14) 成立, 则 $d_i=0$; 否则 $d_i=1$ 。

2.1.6 地形遮蔽系数

分别计算不同时刻的地形遮蔽因子 d_i , 判断每一微分时段内是否可照, 地形遮蔽系数 g_i 的取值依据以下法则:

$$g_i = \begin{cases} 1 & d_i = d_{i-1} = 1 \\ 0 & d_i = d_{i-1} = 0 \\ 0.5 & d_{i-1} = 1 \text{ 且 } d_i = 0 \text{ 或者 } d_{i-1} = 0 \text{ 且 } d_i = 1 \end{cases} \tag{15}$$

式 (15) 表示在 (ω_{i-1}, ω_i) 时段内, 地面 P 点的日照

状况完全取决于两端点时刻的日照状况。即: 若两时刻可照 (或遮蔽), 则整段可照 (或遮蔽); 若一时刻可照, 另一时刻遮蔽, 则整段有一半时间可照 (或遮蔽)。

2.1.7 可照时数

实际起伏地形中任意一点 P 在任一天中的太阳可照时数 T (小时) 可以表示为:

$$T = \frac{24}{2\pi} \left[\sum_{i=1}^{n-1} g_i \Delta \omega + g_n \text{mod} \left(\frac{2\omega_r}{\Delta \omega} \right) \right] \tag{16}$$

式 (16) 中, $\text{mod}()$ 为求余函数, 用来表示一天时间 (从日出时角到日没时角时段) 除以时间步长后的余数值, 单位为弧度。

2.2 实验数据

为了探讨地球曲率对日照时间的影响, 以及日照时间的空间尺度效应, 在全国范围内选取了 6 个研究样区 (主要包括全国部分生态网络观测站和特殊的地形地貌区域): 横断山区、青藏高原、江西丘陵、东北样区、华北平原和黄土高原, 每个样区面积为 $300\text{km} \times 300\text{km}$, DEM 数据为两个空间分辨率: 500m 和 1km。DEM 数据来源于国家基础地理信息数据库全国 1:100 万数字高程模型库。1km 空间分辨率尺度的样区地貌晕渲图如图 1。

3 日照时间的地形效应与地球曲率订正

3.1 日照时间的地球曲率影响

选取华北平原、东北混合样区和横断山区 3 个样区, 具体分析地球曲率因子对计算地表日照时间的影响。分别应用修正后和未修正的日照时间计算模型, 计算各样区 1km 空间分辨率下的地面日照时间 (如表 1)。

表 1 日照时间计算模型修正前后计算结果统计特征值

Table 1 Statistics of two different models' calculation results

春秋分日	DEM 平均坡度值 / (°)	未修正模型计算的日照时数 / h			修正后模型计算的日照时数 / h		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
华北平原	0.43	10.17	12.14	11.99	10.17	12.14	11.84
东北样区	0.76	4.17	12.14	11.30	4.17	12.14	11.28
横断山区	11.18	0.83	12.14	9.96	0.83	12.14	9.97

从表 1 中可以看出华北平原、东北样区和横断山区 3 个样区日照时数, 在模型进行地球曲率修订前后的日照时间平均差值分别为 0.15、0.02 和

0.01 小时。从地貌类型来看, 3 个样区的地面平均坡度依次为 0.43°、0.76° 和 11.18°, 随着平均坡度增加, 地形地貌从完整逐步向破碎的过渡。由此可

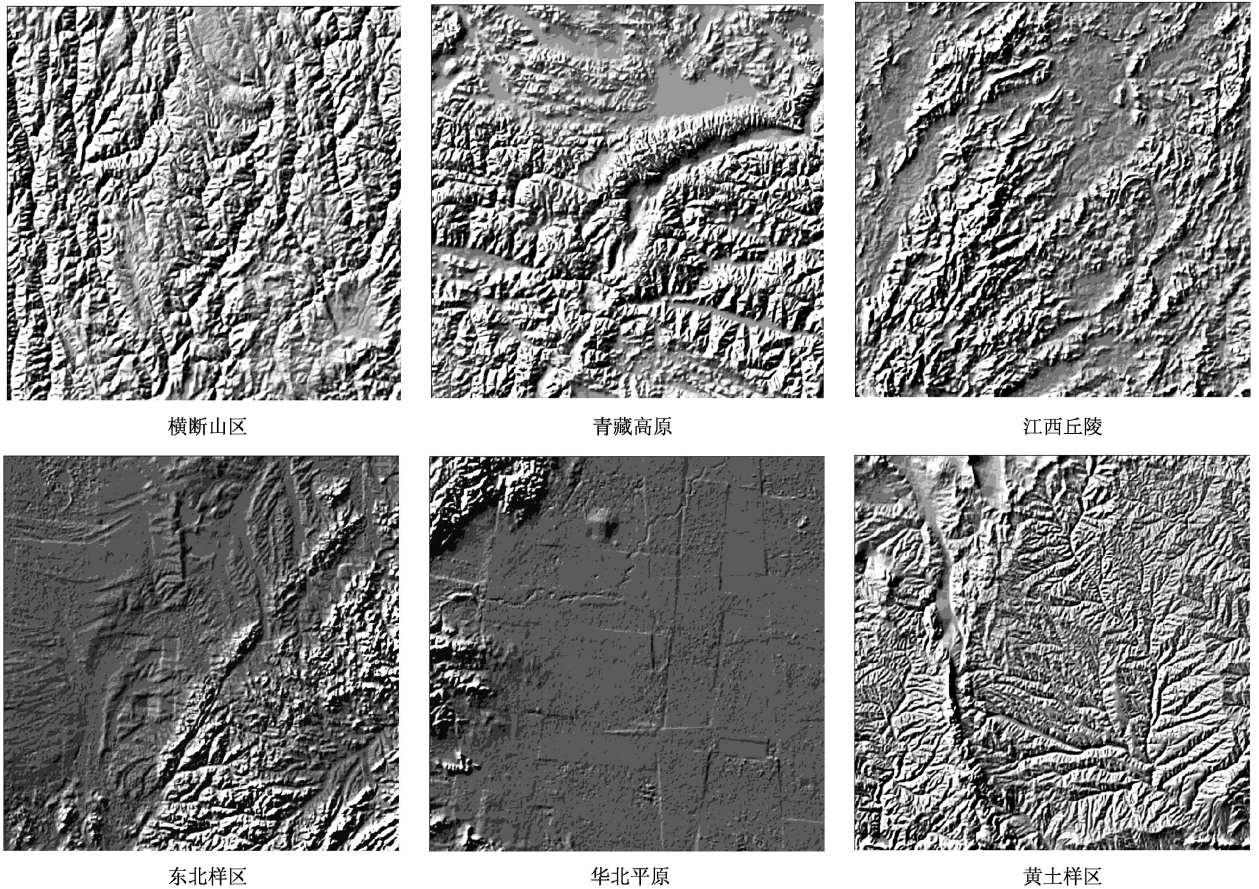


图 1 样区地貌晕渲图

Fig 1 The geomorphologic map of each sample area

知在地势平坦的平原地区由于数字高程中栅格元之间的地形遮蔽效应较小,地球曲率对日照时间的影响相对偏大;而对地势本身高低起伏很大的横断山区,地球曲率对日照时间的影响就是次要因素。所以,平原地区的日照模型中应该进行地球曲率修正,山区地势高低起伏较大的山区可以忽略曲率的影响。

3.2 不同地形地貌对日照时间的影响

不同地貌类型,由于它们的相对高差和地面破碎程度不同,造成地形遮蔽效应不同,就必然造成日照时间长度的变化。在所选样区中选出横断山区、江西丘陵、青藏高原、华北平原和东北样区,它们分别代表了山地、丘陵、高原、平原和混合等典型的地貌类型,分别计算各样区 500m 分辨率条件下,春秋分日的太阳可照时数(图 2),并对数据进行地形效应分析。

分别统计各个样区的地面平均坡度、相对高差和平均日照时间(表 2)。从成因学角度讲平均坡度和相对高差都从不同侧面反映一定的地貌类型,分

表 2 样区地面平均坡度、相对高差和春秋分日平均日照时间
Table 2 The mean slopes, relative elevation differences and the average sunlit times on the vernal and autumnal equinoxes

春秋分日	横断山区	青藏高原	江西丘陵	东北样区	华北平原
平均坡度 / $^{\circ}$	11.18	6.38	3.26	0.77	0.43
相对高差 /km	5.087	3.206	1.876	1.014	0.607
平均日照 /h	8.67	10.35	10.95	11.19	11.84

由于选样面积较大,造成华北平原样区的左侧覆盖了少部分太行山区地貌(图 1),造成相对高差(样区内高程最大值与最小值之差)较大。

析这两者与对应区域的平均日照时间之间的关系,就可以很好揭示不同地貌类型对地面日照时间所造成的地形效应。

从图 3 可以看出,随样区地貌类型从起伏变化明显的山区逐步过渡到地势平坦的平原地区,各样区的平均坡度和相对高差都呈现下降趋势,而地面日照时间却正好变长,说明 DEM 栅格之间高程差异所造成的地形遮蔽效应逐步减小。

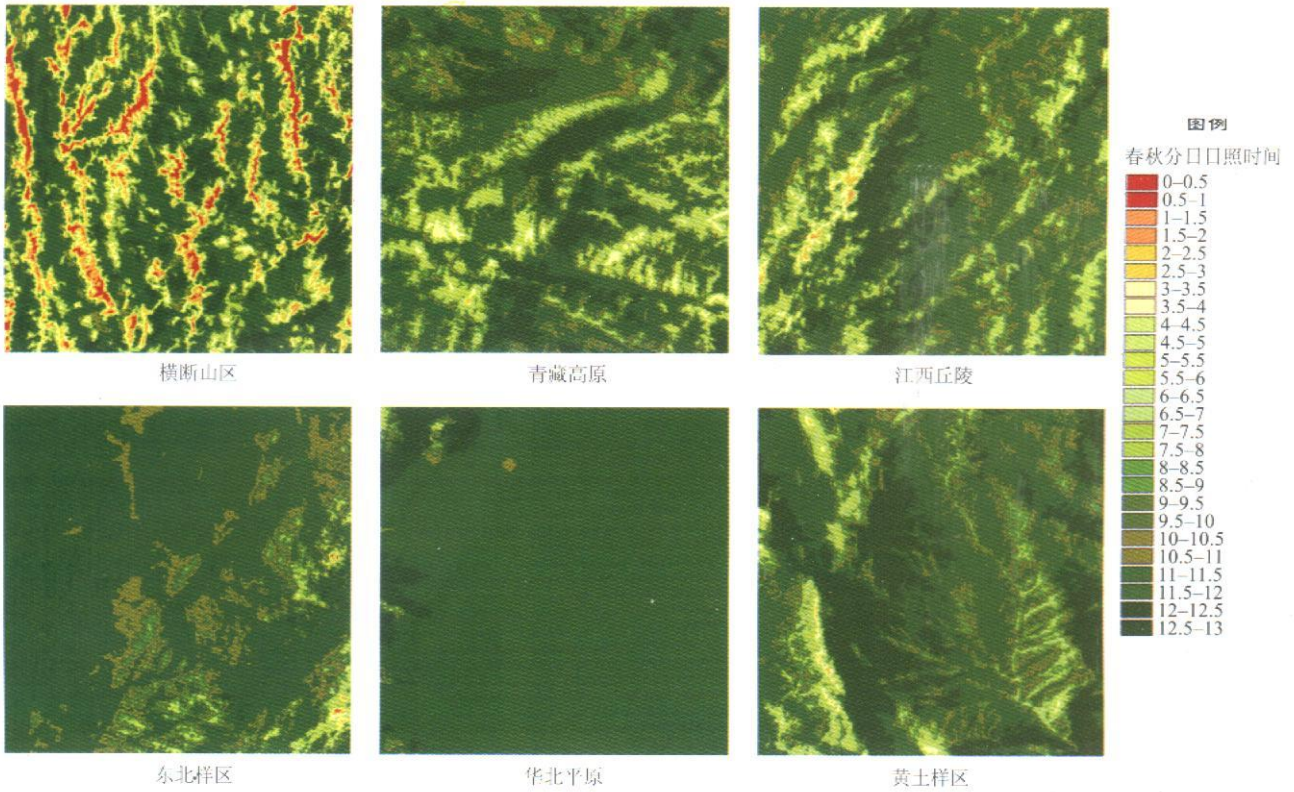


图 2 各样区春秋分日日照时间分布图 (500m 空间分辨率)

Fig 2 The distribution of the sunlit time in each sample area on the vernal and autumnal equinoxes (500m spatial resolution)

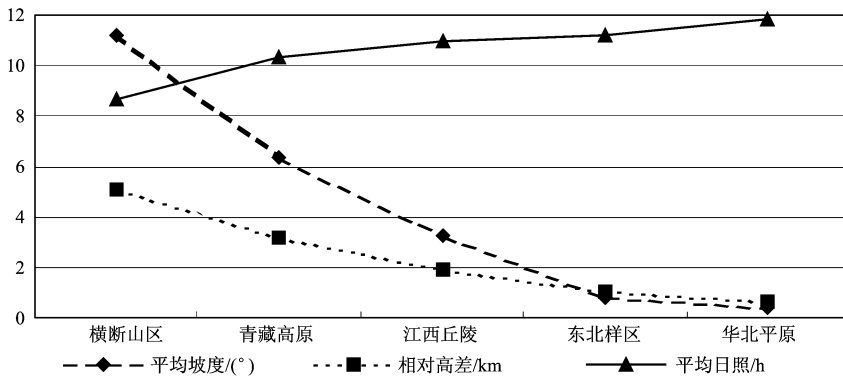


图 3 样区地面平均坡度、相对高差和春秋分日平均日照时间曲线图

Fig 3 The curves of mean slopes relative elevation differences and the average sunlit times on the vernal and autumnal equinoxes

3.3 年内不同时段中地形对日照时间影响

分别计算横断山区、江西丘陵、青藏高原、华北平原和东北混合样区的 500m 空间分辨率条件下的夏至日和冬至日的地面太阳可照时间 (图 4、图 5), 分别统计每个样区的平均日照时间 (表 3), 分析年内不同时段的地形效应。图 6 是根据表 3 中数据所作的年内不同时段各个样区平均日照时间变化曲线图。从图中可以看出, 横断山区、青藏高原和华北平

原 3 个样区的年时段变化曲线基本平行, 只是在日照时间长短上存在差别, 产生这种现象的主要原因是地形地貌的高低起伏状况发生了变化, 造成日照时间长度的不同。因此, 在年内不同时段中日照时间的地形效应表现出相同的规律。而江西丘陵和东北样区的变化曲线斜率明显不同于其他 3 个样区的变化曲线, 而且该两样区的地形破碎程度正好介于青藏高原和华北平原样区之间 (见表 2 各样区平均坡度数据所示)。经过分析, 可以将这 5 个样区按

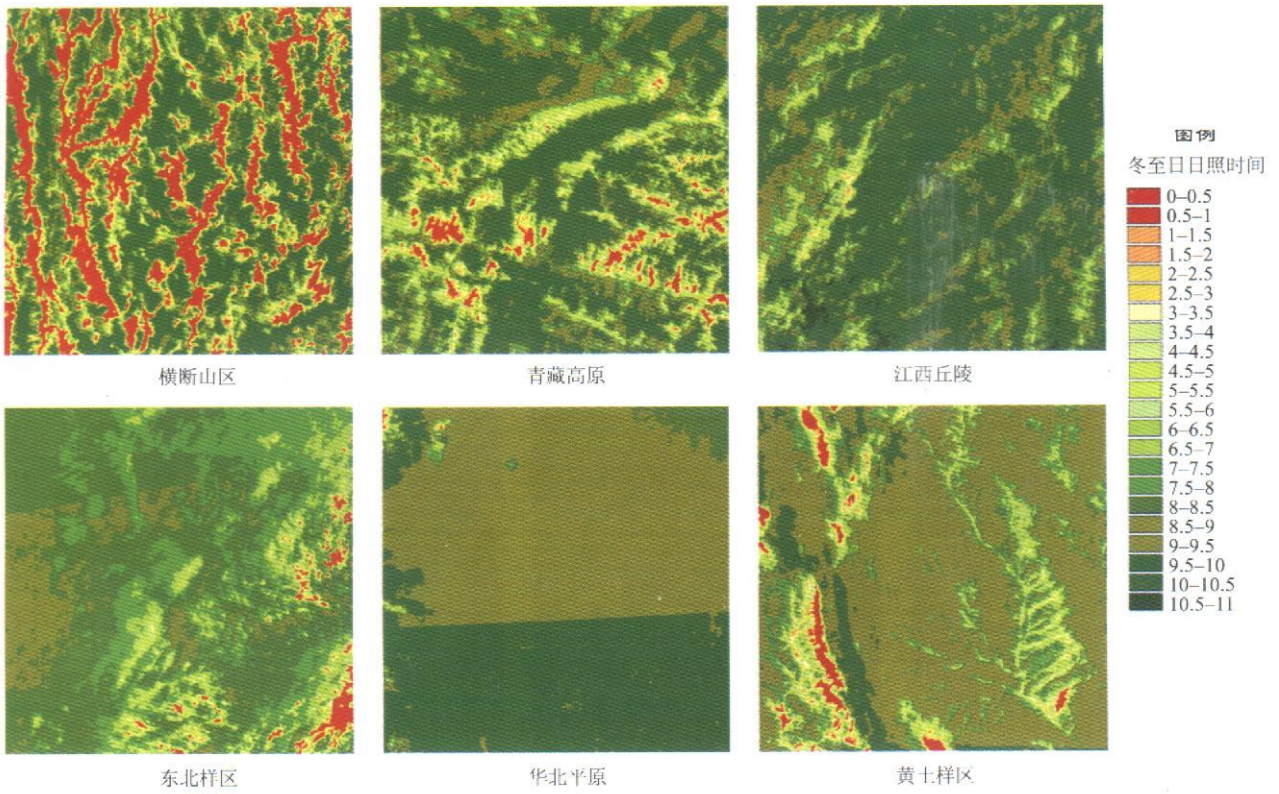


图 4 各样区冬至日照时间分布图(500m 空间分辨率)

Fig. 4 The distribution of the sunlit time in each sample area on the midwinter day(500m spatial resolution)

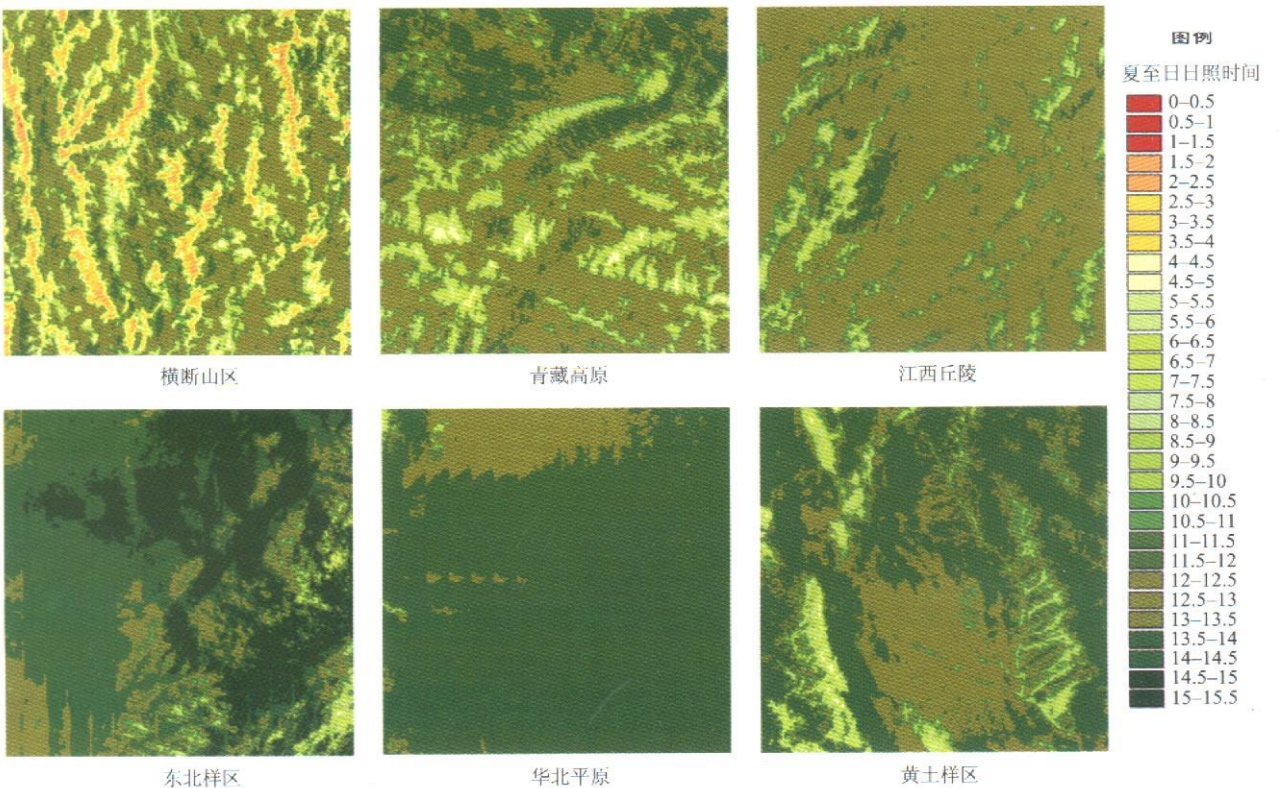


图 5 各样区夏至日照时间分布图(500m 空间分辨率)

Fig. 5 The distribution of the sunlit time in each sample area on the Summer Solstice(500m spatial resolution)

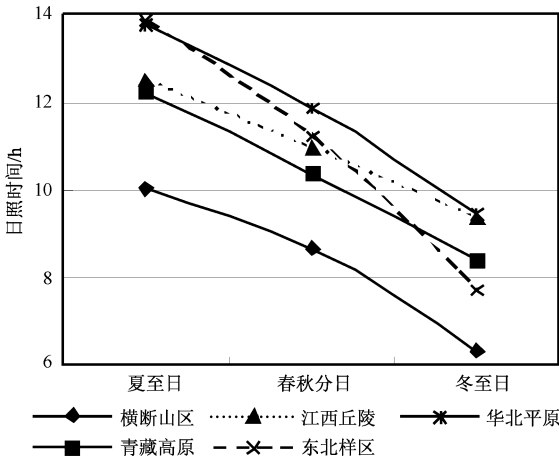


图 6 不同年时段样区平均日照时间曲线图
 Fig 6 The curves of average sunlit times in different annual periods

表 3 不同年时段样区平均日照时间

Table 3 The average sunlit times in different annual periods /h

	横断山区	青藏高原	江西丘陵	东北样区	华北平原
夏至日平均日照 /h	10.04	12.20	12.47	13.88	13.75
春秋分日平均日照 /h	8.67	10.35	10.95	11.19	11.84
冬至日平均日照 /h	6.33	8.38	9.36	7.67	9.45

照地理纬度的差异分为 3 组:高纬度的东北样区,中纬度的横断山区、青藏高原和华北平原样区,以及低纬度的江西丘陵样区。在低纬度地区由于太阳高度角的冬夏季变化相对较小,所以日照时间长短的冬夏季变化也较小,而在高纬度地区正好相反。纬度差异造成了日照时间年时段变化曲线的斜率不同,而地形效应主要表现为曲线的截距变化。因此,纬度效应在不同年时段的平均日照时间上表现的很明显。

4 日照时间的空间尺度效应

4.1 DEM 数据的空间尺度关系

在分析地面日照时间的空间尺度效应之前,首先分析 DEM 数据本身的特点。DEM 对地形的表达采用了栅格离散点模拟的形式,栅格分辨率的大小,在很大程度上影响了地形描述的精度,也是空间尺度效应和不确定性产生的重要根源之一。DEM 的分辨率主要指 DEM 栅格在水平方向上边长的大小。一般来讲,较为精细的栅格分辨率能够更好地拟合真实地表面,误差相对较小;而较为粗略的栅格分辨率对地表的概括程度更高,因而误差相对较大(如图 7 所示,图中粗黑线部分是重采样后的 25m 分辨

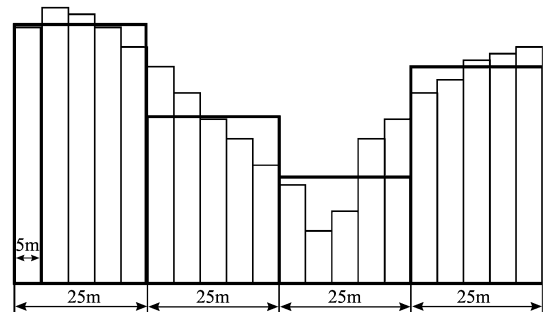


图 7 DEM 数据栅格分辨率的重采样对地形描述精度的影响

Fig 7 DEM resolution's resampling effectiveness on the accuracy of the terrain representation

率 DEM 的栅格高程),这种趋势在地形相对较为破碎的地区尤为明显。由 DEM 数据空间尺度变化引起对地形地貌描述变化的效应,给起伏地形条件下的地面日照时间带来不确定性。因为起伏地形条件下的日照时间主要考虑相邻栅格之间的高程差异造成的地形遮蔽影响;当然,这种影响和 DEM 基础数据所描述的地形地貌的破碎程度有关,地面越破碎,这种平滑效应越明显。基于这种思路,分别从不同空间分辨率和不同地貌类型两个角度分析地面日照时间的空间尺度效应。

4.2 不同空间分辨率日照时间的尺度效应分析

选取黄土高原样区,分别利用该样区 500m, 1km, 1.5km 和 2km 四个不同空间分辨率的 DEM 数据,计算地面日照时间,并对计算结果进行分析,如表 4。

表 4 黄土高原样区不同分辨率计算结果统计特征值表
 Table 4 Statistics of the Loess Plateau sample area with different spatial resolutions

分辨率空间尺度 /m	最小值 /h	最大值 /h	平均值 /h
500	0.50	12.14	10.93
1000	4.83	12.14	11.40
1500	6.50	12.14	11.66
2000	8.17	12.14	11.84

从表 4 中的统计数据可以看出随着原始数字高程模型空间分辨率的不断降低(即 DEM 栅格元尺寸增大),地面日照时间有逐渐变长趋势。从图 8 中可知,随分辨率的增大,区域日照时间最小值迅速增大,造成区域平均日照时间变长,并反映了地形遮蔽效应随栅格尺寸变大而迅速减弱的变化趋势。这

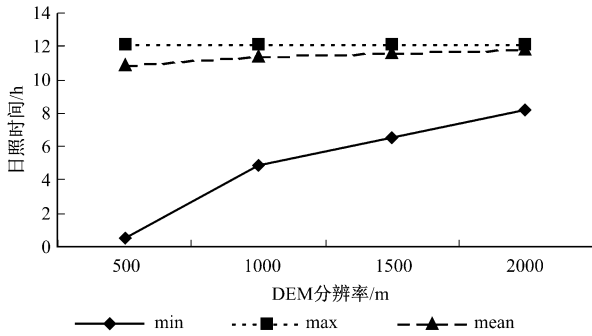


图 8 黄土高原样区不同分辨率计算结果统计曲线图

Fig 8 Curves of statistics in different spatial resolutions of the Loess Plateau area

与上述的 DEM 数据本身的尺度效应非常吻合,正是这种 DEM 数据本身对分辨率的敏感性,导致了计算所得日照时间的空间尺度效应。因此,在日照时间实际应用计算中,应考虑原始 DEM 数据本身的分辨率特性,尽可能根据应用需求对精度的要求,选择相应分辨率的 DEM 数据作为数据源,以便获得同一精度量级的地面日照时间。

4.3 不同地貌类型的日照时间空间尺度效应对比分析

从地貌类型差异的角度,分析在不同地貌类型区计算所得地面日照时间的空间尺度关系。在所选样区中挑出具有代表性的典型地貌类型区进行研究,即:华北平原样区、东北混合过渡样区、江西丘陵样区和横断山地样区,分别计算 500m 和 1km 两个分辨率春分、秋分日的地面日照时间(计算结果见图 2)。各样区的地面日照时间统计特征值如表 5 所示。

表 5 不同空间尺度样区日照时间统计特征值

Table 5 Statistics of the sunlit times in different spatial resolutions and terrains

样区名称	华北平原		东北样区		江西丘陵		横断山区	
	500	1000	500	1000	500	1000	500	1000
日照时间均值/h	11.79	11.84	11.19	11.28	10.45	10.95	8.67	9.97

对表 5 中各个样区日照时间的平均值分别求差,即用 1km 分辨率数据减去 500m 数据,便得到各个样区不同空间分辨率下太阳日照时间的差值:华北平原 0.05h,东北样区 0.09h,江西丘陵 0.50h 和横断山区 1.30h。从结果可知,各样区地面日照时间平均值的差均为正值,这表明随着 DEM 数据分辨

率的降低,各样区的日照时间都有不同程度的变长。从各样区的地面平均坡度的变化不难看出,从华北平原、东北混合样区、江西丘陵到横断山区,地面平均坡度分别是 0.43° , 0.77° , 3.26° 和 11.18° ,地面的起伏逐渐增大,破碎程度也越来越剧烈(图 1),由此引起的地面日照时间空间尺度差异也逐渐增大,依次分别为 0.05h, 0.09h, 0.50h 和 1.30h。地面平均坡度可以很好反映破碎程度,而地面平均坡度又与日照时间存在密切的关系;可以推知:地面平均坡度越大,地面的高低起伏越大,地形越破碎,不同空间尺度间的日照时间差异也越大。因此,地面越破碎的地区,比如山地丘陵地区,不同空间尺度下的地面日照时间会表现出很强的尺度效应;反之,平原地区的地面日照时间的空间尺度效应较小。基于以上分析,在应用中应针对研究样区的不同地形地貌条件,采取不同的策略选择 DEM 分辨率。即当地形地貌是比较破碎的山地和丘陵地区,应考虑 DEM 分辨率对日照时间所造成较大的尺度效应,应选择尽可能高的 DEM 分辨率数据;而在地势较平坦和完整的平原地区,则可以更多地考虑程序的计算时间消耗和相关辅助资料的要求,选择合适的 DEM 分辨率计算地面日照时间,从而达到计算精度和 CUP 时间的最优化组合。

5 结 论

(1) 本文考虑了地球曲率对地面日照时间计算的影响,在日照时间计算模型中引入了地球曲率修正因子,提高了模型的计算精度。并在此基础上对模型改进前后的日照时间计算结果进行比较分析,发现地球曲率对日照时间的影响程度与计算区域的地形地貌存在很强的相关性,曲率误差主要表现在地势平坦的平原地区,在山区相对较弱。

(2) 通过对几个典型地貌类型区的地面平均坡度和日照时间平均值的相关性分析,发现随着地貌类型从起伏变化明显的山区逐步过渡到平坦的平原地区,地面日照时间逐渐变长。地面日照时间随着计算区域地貌类型的变化表现出明显的地形效应。并且高纬度地区的冬、夏季日平均日照时间变化大于低纬度区域。因此,在年内不同时段中各典型地貌类型区的平均日照时间表现出明显的纬度效应。

(3) DEM 数据自身的空间尺度效应,决定了地面日照时间的空间尺度效应:随着 DEM 分辨率的降低,地面日照时间逐渐变长。这种趋势在地势高低

起伏较大的山地丘陵地区表现的更为明显。因此,在应用中应针对研究样区的不同地形条件,选择不同分辨率的 DEM。当地形是比较破碎的山地丘陵地区,应主要考虑 DEM 分辨率对日照时间所造成的尺度效应,选择尽可能高的 DEM 分辨率;而在地势较平坦和完整的平原地区,由于尺度效应较弱,则可以更多地考虑程序的计算时间消耗和相关辅助资料对空间分辨率的要求,选择合适的 DEM 分辨率计算地面日照时间,从而达到计算精度、模型 CUP 时间和辅助资料的最优化组合。

(4) 本文在日照时间的地形与空间尺度效应分析时,采用了区域对比方法,分析了不同地貌类型区域地面日照时间的地形效应和不同分辨率的空间尺度效应。但主要是定性描述日照时间长短随地形变化的规律的事例,没有给出日照时间和地形地貌之间的定量模型。因此,后续的研究工作需要选取更大面积的 DEM 数据进行分析,以期找出一种普适的数学模型,从而定量的揭示日照时间与地形地貌之间的关系。

(5) 虽然该模型对计算区域性的地面日照时间已经具有很高的精度,但误差是必然存在的。误差主要源自两个方面:①计算模型本身的误差。由于计算模型是基于许多近似和经验公式的基础上,应用于计算横跨了近 40 个纬度、地貌类型多样的中国大面积区域。②数字高程模型的误差。DEM 是整个计算模型最重要的数据源。虽然本文中从 DEM 分辨率对模型计算结果的空间尺度效应角度进行了深入的研究,但是 DEM 的高程采样误差和地形描述误差^[15,16]对模型计算结果的影响在本研究中没有涉及。

致 谢:南京师范大学汤国安教授提供 DEM 数据,在此表示感谢!

参 考 文 献 (References)

- [1] Zuo D K. A Modern Dictionary of Geography [M]. Beijing: The Commercial Press, 1990. [左大康. 现代地理学词典 [M]. 北京:商务印书馆, 1990.]
- [2] Li Z Q, Weng D M. Numerical Simulation of the Surface Radiation Field in a Hilly Country [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1990, 13 (2): 184—193. [李占清, 翁笃鸣. 丘陵山区地面辐射场的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 1990, 13 (2): 184—193.]
- [3] Li X, Chen X Z, Zeng Q Z. A Model to Calculate the Net Solar Radiation Over Complex Terrain Based on Digital Terrain Model [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18 (Special Issue): 344—353. [李新, 陈贤章, 曾群柱. 利用数字地形模型计算复杂地形下的短波辐射平衡 [J]. 冰川冻土, 1996, 18 (增刊): 344—353.]
- [4] Li X, Cheng G D, Chen X Z, et al. Modification of Solar Radiation Model Over Rugged Terrain [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44 (15): 1345—1350. [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 [J]. 科学通报, 1999, 44 (9): 993—998.]
- [5] Dozier J, Frew J. Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation Modeling from Digital Elevation Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28 (5): 963—969.
- [6] Roberto Ranzi, Renzo Rosso. Distributed Estimation of Incoming Direct Solar Radiation over a Drainage Basin [J]. Journal of Hydrology, 1995, 166: 461—478.
- [7] Li W H, Weeks R, Gillespie A R. Multiple Scattering in the Remote Sensing of Natural Surfaces [J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19 (9): 1725—1740.
- [8] Wang J, White K, Robinson G J. Estimating Surface Net Solar Radiation by Use of Landsat 5 TM and Digital Elevation Models [J]. Int. J. Remote Sensing, 2000, 21 (1): 31—43.
- [9] Javier G. Corripio. Vectorial Algebra Algorithms for Calculating Terrain Parameters from DEMs and Solar Radiation Modeling in Mountainous Terrain [J]. Int. J. Geographical Information Science, 2003, 17 (1): 1—23.
- [10] Lalit Kumar, Andrew K. Skidmore, Edmund Knowles. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment [J]. Int. J. Geographical Information Science, 1997, 11 (5): 475—497.
- [11] Zeng Y, Qiu X F, Miao Q L, et al. Estimation of Possible Sunshine Duration on Rugged Terrains Based on DEM [J]. Progress in Natural Science, 2003, 13 (5): 545—548. [曾燕, 邱新法, 缪启龙等. 起伏地形下我国日照时间的空间分布 [J]. 自然科学进展, 2003, 13 (5): 545—548.]
- [12] Daniel W. Mckenney, Brendan G. Mackey, Brian L. Zavitz. Calibration and Sensitivity Analysis of a Spatially distributed Solar Radiation Model [J]. Int. J. Geographical Information Science, 1999, 13 (1): 49—65.
- [13] Zuo D K, Zhou Y H, Xiang Y Q. Research of the Earth Surface Radiation [M]. Beijing: Science Press, 1991. [左大康, 周允华, 项月琴等. 地球表层辐射研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [14] Weng D M, Chen W L, Shen J C, et al. Microclimate and Farmland Microclimate [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1981. [翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成等. 小气候和农田小气候 [M]. 北京: 农业出版社, 1981.]
- [15] Tang G A. A Research on the Accuracy of DEMs [M]. Science Press, 2000.
- [16] Tang G A. The Spatial Structure of DEMs' Terrain Representation Errors [J]. Journal of Northwest University (natural science edition), 2000, 20 (4): 349—352. [汤国安. DEM 地形描述误差空间结构分析 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2000, 20 (4): 349—352.]

Topographic and Spatial scaling Effects on the Sunlit Time of the Different Terrains

ZHANG Yong, CHEN Liang fu, LIU Q in huo, LI X iao wen

(State key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS,
Demonstration Center for Spaceborne Remote Sensing, National Space Administration, Beijing 100101, China)

Abstract A sunlit time computation model based on the DEM data in rough terrain is developed in this paper. In order to improve the accuracy of the calculation, an earth curvature adjusting factor Q is carried out in the model based on the former researchers. In this study, 6 typical terrain areas within China were selected and their spatial distributions of sunlit time on the vernal and autumnal equinoxes, the Summer Solstice and midwinter day in two different resolutions (500m and 1km) were calculated using the developed model. The sunlit times calculated by the revised models were compared with the previous models. And the topographic and spatial scaling effects on the sunlit time were analyzed through two aspects: the different terrain types and different spatial scales of the original DEM data. The changing rules of sunlit time according to the geomorphology and spatial scale were found out, which are very significant in applications.

Key words sunlit time; topography; DEM; spatial scaling; spatial analysis