

起伏地形下我国可照时间的空间分布*

曾燕¹ 邱新法² 缪启龙² 刘昌明¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 南京气象学院资源环境与城乡规划系, 南京 210044

摘要 完整地描述了基于数字高程模型(DEM)的起伏地形下可照时间计算模型, 并计算了我国全年各月可照时间的空间分布(1 km×1 km 格网). 计算结果表明: 地形对可照时间的影响非常强烈, 尤其是在太阳高度角较低的冬季. 模型只需 DEM 数据作为输入项, 可进行大数据量处理, 适用于遥感图像处理、地理信息系统等数据处理平台. 所提供的可照时间数据与其他地理空间信息的表达方式一致, 可作为基础地理数据供相关研究应用.

关键词 可照时间 起伏地形 时空分布

可照时间广泛应用于农林、气象、水文、遥感、建筑、太阳能工程研究领域^[1]. 然而, 由于受坡度、坡向等地理因子以及周围地形相互遮蔽的影响, 确定实际起伏地形下可照时间是比较困难的^[2]. 迄今为止, 我国各地, 尤其是山区的可照时间是一个重要但未知的地理参数^[3].

“可照时间”一般有两种含义, 即: (1) 天文可照时间(不考虑大气影响和地形遮蔽的最大可能日照时间); (2) 地理可照时间(考虑地形遮蔽而不考虑大气影响的可能日照时间)^[4]. 本文计算的“可照时间”就是指“地理可照时间”.

傅抱璞^[5]关于坡地可照时间的开创性研究, 为计算无周围地形遮蔽情形下坡地可照时间提供了理论方法; 朱志辉^[6]对这一方法的进一步发展, 简化了坡地日出日没临界时角和可照时段的判定方法. 但在起伏地形中, 任一点的可照时间均受太阳视轨道和研究点四周起伏不平的山脊廓线的制约, 无法用理论公式表达, 一般只能采用图解法确定^[7]. Granier^[8], Williams^[9], Dozier^[10,11], Bocquet^[12], 李新^[1]等先后尝试利用数字高程模型(DEM)计算山地可照时间的理论研究和区域试验, 为计算起伏地形下可照时间提供了新的研究思路. 但由于受数字高程资料获取和计算模型效率等因素的影响, 这些研究都只能局限于有限区域内进行. 实际地形下,

我国各地可照时间的空间分布仍未见诸报道.

本文详细地描述了起伏地形下可照时间的计算模型, 并在此基础上计算了我国全年各月可照时间空间分布(1 km×1 km 格网). 模型只需研究区域数字高程模型(DEM)数据作为输入项, 计算精度取决于时间步长、遮蔽范围半径、重采样方法等用户输入参数和 DEM 格网间距, 普遍适用于遥感图像处理、地理信息系统等数据处理平台.

1 计算模型

研究表明, 坡面日出(日没)时间不早于水平面上的日出(日没)时间^[7]. 对于实际起伏地形中的任意一点 P, 根据从 DEM 数据中读取的纬度值, 可利用下式计算与该点同纬度水平面上一年中任一天的日出(日没)时角

$$\omega_0 = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta), \quad (1)$$

式中 $-\omega_0$ 为日出时的太阳时角(弧度); ω_0 为日没时的太阳时角, 从真太阳时正午算起, 向西为正, 向东为负; φ 为纬度(弧度); δ 为太阳赤纬(弧度), 在天赤道以北为正, 以南为负.

根据国际天文协会决议, 从 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

2003-01-10 收稿, 2003-02-24 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G19990436-01、G20000779)资助项目

E-mail: qixinf@sina.com

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 Fourier 分析, 给出计算公式

$$\delta = (0.006894 - 0.399512\cos\tau + 0.072075\sin\tau - 0.006799\cos2\tau + 0.000896\sin2\tau - 0.002689\cos3\tau + 0.001516\sin3\tau), \quad (2)$$

式中 τ 为日角, 以弧度表示, 可用天数 D_n 来定, D_n 从1月1日的1到12月31日的365, 也即

$$\tau = 2\pi(D_n - 1)/365. \quad (3)$$

根据(1)~(3)式, 可确定水平面上的日照时间为 $2\omega_0$ (弧度), 此时间是天文日照时间, 即: 没有考虑大气和周围地形对 P 点造成的日照遮蔽影响. 实际地形中, 一天中任意时刻 P 点日照与否, 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对 P 点造成的遮蔽角(仰角)决定. 当太阳高度角大于地形对 P 点造成的遮蔽角时, P 点可得到日照, 反之, 则被遮蔽, 没有日照. 基于此思想, 实际地形中任一天 P 点的日照时间可按如下方案确定:

(1) 给定时间步长 ΔT (min), 计算相应的太阳时角步长 $\Delta\omega = \frac{2\pi}{24 \times 60} \cdot \Delta T / \text{rad}$.

(2) 在 $[-\omega_0, \omega_0]$ 区间内, 以 $\Delta\omega$ 为步长, 将水平面上的日出至日没时间划分为 $n+1$ 个时刻:

$$[-\omega_0, -\omega_0 + \Delta\omega, \dots, -\omega_0 + i\Delta\omega, \dots, -\omega_0 + (n-1)\Delta\omega, \omega_0], n = \text{int}\left(\frac{2\omega_0}{\Delta\omega}\right) + 1, \quad (4)$$

上式中 $\text{int}()$ 为取整函数.

(3) 确定各时刻的太阳高度角 h_i 和太阳方位角 Φ_i . 根据公式(4), 各时刻的太阳时角为

$$\omega_i = -\omega_0 + i\Delta\omega, i = 0, 1, 2, \dots, n-1, \quad \omega_n = \omega_0. \quad (5)$$

根据太阳视轨道方程, 各时刻对应的太阳高度角 h_i 和方位角 Φ_i 可由下式确定:

$$\sin h_i = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\omega_i,$$

$$\cos\Phi_i = \frac{\sin h_i \sin\varphi - \sin\delta}{\cos h_i \cos\varphi}, i = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

其中, 太阳方位角 Φ_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.

(4) 确定各时刻对应的太阳方位 Φ_i 上的遮蔽状况 S_i . 以 P 点为起点, 沿 Φ_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 S_i , 当直线 L_i 方向上各点的高程均对 P 点不造成遮蔽时, 记 $S_i=1$, 表示 P 点日照; 反之, 只要有一点高程使 P 点不可日照, 记 $S_i=0$, 表示 P 点受地形遮蔽. 实际计算中, 地形用数字高程模型 DEM 来表示, 由于 DEM 是由有固定长和宽的格网组成, 在计算机模型中, 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 格网长和宽的最小值作为距离步长 ΔL , 即

$$\Delta L = \min(\text{size}_x, \text{size}_y), \quad (7)$$

式中, size_x 为 DEM 在 x 方向的分辨率; size_y 为 DEM 在 y 方向的分辨率.

在直线 L_i 方向上随着距离按步长 ΔL 的增加, 使 P 点不受遮蔽应满足的最大高程增量 ΔH 为

$$\Delta H = \Delta L \times \tan(h_i). \quad (8)$$

实际计算过程中, 直线 L_i 的长度不必要取无限长, 取一定的遮蔽范围半径 R 即可满足计算要求.

以 P 点为起点, ΔL 为步长, 沿直线 L_i 逐步判断周围地形高程(格网点高程)对太阳光线的遮蔽状况, 若

$$Z(x_P + j \times \Delta L_x, y_P + j \times \Delta L_y) > Z(x_P, y_P) + j \times \Delta H, j = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

则 $S_i=0$, 即在 Φ_i 方位周围地形对 P 点有遮蔽; 否则, $S_i=1$, P 点日照. 其中 $Z(x, y)$ 为 (x, y) 处的高程; $\Delta L_x, \Delta L_y$ 为 x 和 y 方向上的坐标增加步长(见图1), $\Delta L_x = \Delta L \times \sin(\Phi_i)$, $\Delta L_y = \Delta L \times \cos(\Phi_i)$; N 为计算次数, 由遮蔽范围半径 R 和步长 ΔL 决定.

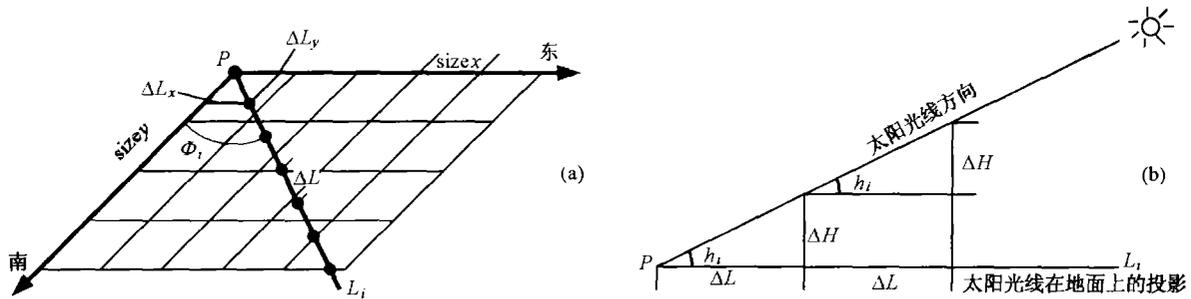


图1 模型参数示意图

由于不能保证 $x_P + j \times \Delta L_x$ 和 $y_P + j \times \Delta L_y$ 为整数, 所以 $Z(x_P + j \times \Delta L_x, y_P + j \times \Delta L_y)$ 必须使用重采样方法取得. 本计算机模型提供的重采样方法包括: 最邻近像元法、双线性插值法、双三次卷积法3种, 可由用户自行选择, 具体计算方法可参阅文献[14]. 其中, 最邻近像元法计算效率高, 但精度较差; 双三次卷积法精度最高, 但计算效率低.

以上述 $n + 1$ 个时刻的每相邻两时刻作为一个时间段, 则共有 n 个时段, 设 g_i 为每个时段的遮蔽系数, 取 $g_i = \frac{1}{2}(S_{i-1} + S_i)$.

(5) 计算可照时间 实际起伏地形中任一点 P 在任一天的可照时间 $T(h)$ 可表示为

$$T = \frac{24}{2\pi} \left(\sum_{i=1}^{n-1} g_i \Delta\omega + g_n \text{mod} \left(\frac{2\omega_0}{\Delta\omega} \right) \right), \quad (10)$$

式中 $\text{mod}()$ 为求余函数, 取两数相除后的余数, 用来表示一天时间(从 $-\omega_0$ 到 ω_0 时段)除以时间步长 $\Delta\omega$ 后的余数值(单位为弧度);

2 计算结果及分析

本文使用的 DEM 数据格网大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 计算了我国 1~12 月的可照时间. 计算过程中, 遮蔽范围半径 R 取 50 km , 时间步长 ΔT 取 10 min , DEM 重采样方法为双线性插值法. 经实验, 上述模型参数完全可满足 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ DEM 格网的起伏地形下可照时间计算精度的要求.

图版 I (A) 给出了 1 月我国可照时间的空间分布, 图中各格网点的数值代表了该格网点所代表的 1 km^2 区域的平均可照时间. 图中可照时间的纬向分布特征十分明显, 1 月太阳位于南半球, 所以表现出可照时间由南向北递减的趋势; 由于 1 月太阳高

度角较低, 与其他季节相比, 1 月各地可照时间普遍偏小, 且地形之间的相互遮蔽影响严重, 可照时间的差异较大, 尤其是在地形高程起伏变化大的山区, 个别格网点的可照时间几乎为零; 受山区地形本身和周围地形遮蔽的影响, 山区可照时间与同纬度平地相比明显减少, 从而表现出可照时间的非地带性分布特征. 在 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的格网间距下, 天山山脉、昆仑山脉、大兴安岭、秦岭、横断山脉等大地形对可照时间的影响表现得十分明显. 1 月全国平均可照时间为 287 h/月 , 可照时间最长为 342 h/月 , 最短为 1 h/月 .

图版 I (B) 给出了 7 月我国可照时间的空间分布图. 7 月份太阳位于北半球, 表现出可照时间由南向北递增的趋势; 与 1 月份类似, 由于山区地形的相互遮挡, 山地可照时间仍比平地普遍偏少, 同样表现出可照时间的非地带性分布特征, 但由于 7 月份太阳高度角较高, 所以地形对可照时间的影响不如 1 月份强烈, 7 月全国平均可照时间为 429 h/月 , 可照时间最长为 502 h/月 , 最短为 223 h/月 .

地形对可照时间的遮蔽影响非常显著, 图版 I (C) 给出了天山地区 7 月可照时间的空间分布特征. 受不同坡向、坡度等局地地形因子的影响, 从图中可以看出山区可照时间的空间差异明显, 从山脊上可照时间出现极大值和山谷中可照时间出现极小值的空间分布配置中, 起伏地形之间的相互遮蔽作用得以充分展现.

3 结语

可照时间的多少, 直接影响到地表可获得太阳辐射能量的多少, 进而影响到其他气象要素和地表通量的空间分布. 本文基于数字高程模型(DEM)和地理信息系统技术, 给出了起伏地形下可照时间计算模型, 主要结论为:

(1) 地形对日照的遮蔽影响非常显著, 尤其是在太阳高度角较低的冬季. 受不同坡向、坡度等局地地形因子的影响, 山区日照时间的空间差异明显;

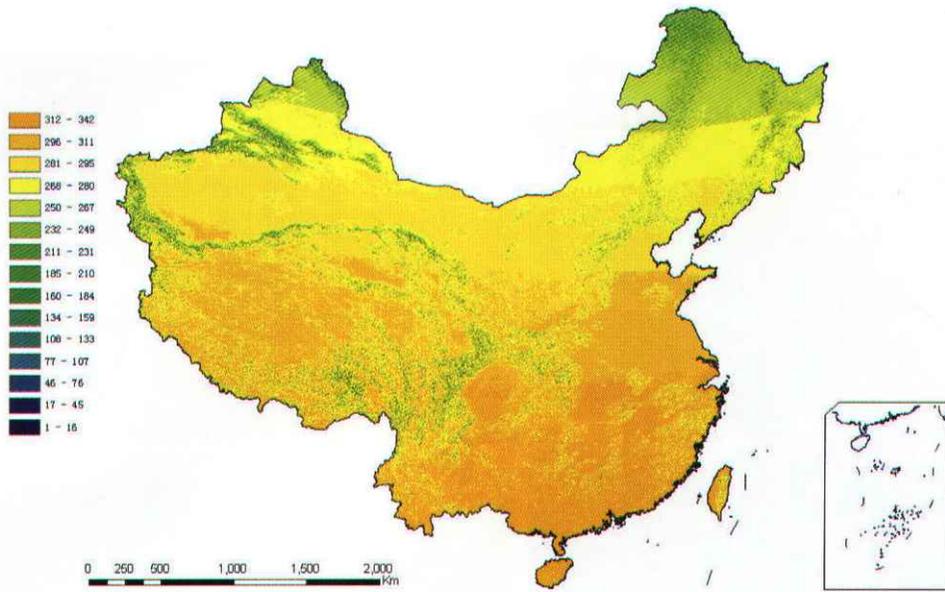
(2) 遥感、地理信息系统和全球定位系统等现代空间信息技术的发展, 为日照时间、太阳辐射、温度、湿度、降水等地球表面时空多变要素的定量空间扩展研究提供了新的思路, 同时, 也对相关领域的研究提出了新的课题, 其中的很多问题, 如高效、可靠、方便的模型算法研究, 不同分辨率的DEM数据对计算结果的可能影响等, 都值得进一步深入探讨;

(3) 本模型可进行大数据量处理, 适用于遥感图像处理、地理信息系统等数据处理平台, 所提供的日照时间数据可作为基础地理数据供相关研究应用.

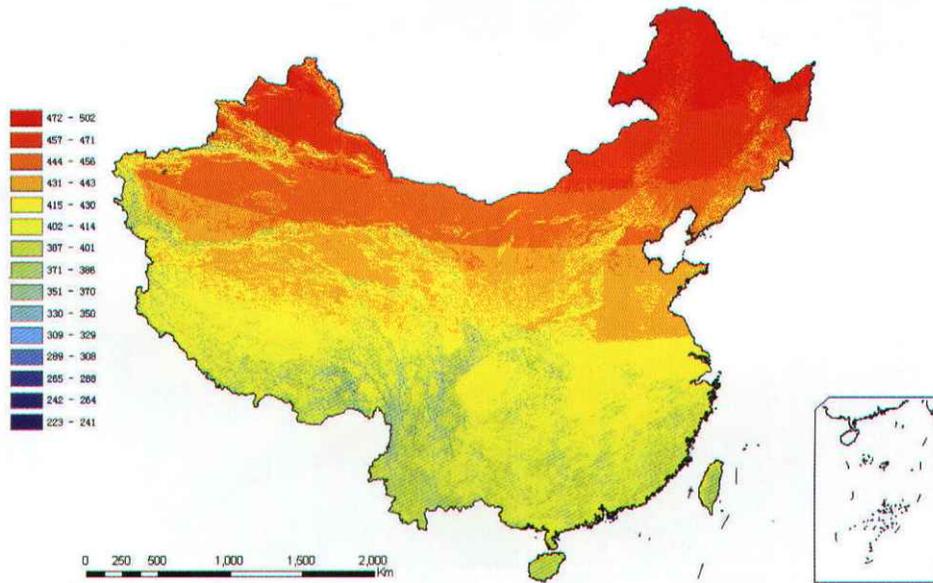
致谢 计算和数据处理工作在南京气象学院地理空间信息系统实验中心完成, 特表诚挚的谢意.

参 考 文 献

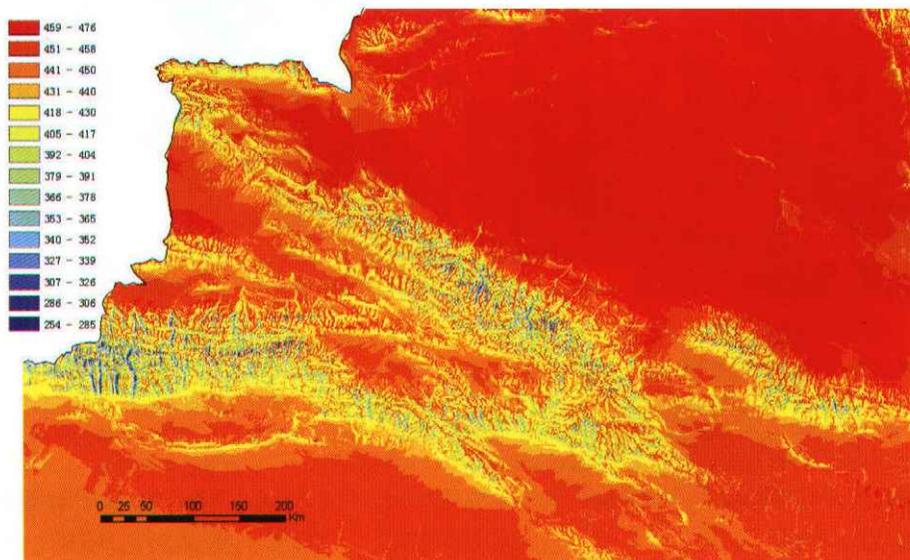
- 1 李 新, 等. 任意地形条件下太阳辐射模型的改进. 科学通报, 1999, 44(9): 993
- 2 翁笃鸣. 中国辐射气候研究. 北京: 气象出版社, 1997. 6
- 3 李占清, 等. 一个计算山地日照时间的计算机模式. 科学通报, 1987, (17): 1333
- 4 左大康, 主编. 现代地理学词典. 北京: 商务印书馆出版, 1990. 146
- 5 傅抱璞. 坡地对日照和太阳辐射的影响. 南京大学学报(自然科学), 1958, (2): 23
- 6 朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布. 中国科学(B辑), 1988, (10): 1100
- 7 翁笃鸣, 等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981. 116~123
- 8 Granier B J, et al. A method of calculating the direct shortwave radiation income of slopes. Journal of Applied Meteorology, 1968, 7: 796
- 9 Williams L D, et al. Application of computed global radiation for areas of high relief. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11: 526
- 10 Dozier J, et al. An approach to energy balance simulation over rugged terrain. Geograph Anal, 1979, 11: 65
- 11 Dozier J, et al. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 963
- 12 Bocquet G, Method of study and cartography of the potential sunny periods in mountainous areas. Journal of Climatology, 1984, 1(4): 587
- 13 左大康, 等. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991. 68
- 14 张永生. 遥感图像信息系统. 北京: 科学出版社, 2000. 51~54



(A) 我国1月可照时数空间分布图 (单位: h/月)



(B) 我国7月可照时数空间分布图 (单位: h/月)



(C) 天山山地7月可照时间的空间分布特征 (单位: h/月)