

文章编号: 1008-2786-(2019)2-284-11

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000422

# 基于 DEM 的山地地理可照时数空间分布估算统计模型 ——以重庆为例

李 军<sup>1,2,3</sup>, 赵玉竹<sup>1</sup>, 邓 梅<sup>1</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 重庆市高校 GIS 应用研究重点实验室, 重庆 401331;

3. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

**摘 要:** 为了建立合理、准确且便于估算和应用的山地地理可照时数空间分布模型, 本文以重庆为例, 首先利用分布式模型估算了 30 a 平均年和各月可照时数, 并利用基于气象行业标准得到的理论值进行了验证; 其次, 以栅格单元为统计样本, 建立了基于地形尺度的可照时数估算的统计模型。结果表明: (1) 基于分布式模型的模拟结果具有较高可信度, 除 10 月外, 其他各月和年的相对误差均小于 10%, 且东北和东南部的相对误差较中西部高。(2) 西部方山丘陵区的可照时数高, 中部平行岭谷区次之, 东北和东南部低。冬季可照时数的空间异质性最大, 夏季次之, 春秋季节接近, 均较小。(3) 各月和年可照时数与主要地理和地形因子之间的相关关系均表现为极显著性, 各月复相关系数在 0.7929 ~ 0.8277, 年复相关系数为 0.8522。(4) 重庆可照时数估算统计模型在一定程度上简化了分布式模型的计算步骤和计算量, 便于其应用, 并可为其他地区估算可照时数提供方法参考。

**关键词:** 可照时数; 空间分布; 重庆; 地形因子; 统计模型

**中图分类号:** P208; TP311

**文献标志码:** A

太阳辐射是大气中一切物理过程和现象的动力和能量来源, 区域气候的差异及随季节的变化主要也是太阳辐射在地表的不均匀分布及其随时间变化的结果<sup>[1]</sup>。可照时数 (Possible Sunshine Duration, PSD) 是太阳辐射的重要表征参数之一, 是考虑地形遮蔽而不考虑大气条件影响的日出到日落的可能太阳照射时间。由可照时数、天文辐射等所决定的天气气候, 基本能反映全球或区域气候的大致轮廓。在起伏地形下, 坡地对可照时数的影响非常明显, 由于坡度、坡向等地形因子的影响, 可照时数呈现显著的空间异质性<sup>[1-3]</sup>。此外, 除地形因素的影响外, 可照时数的空间分布还受到太阳几何因素的影响呈现出明显的纬度地带性和季节性特征。由于诸多因素的影响, 计算可照时数的数学表达式较复杂, 且地形参数的获取受到技术限制以及缺乏合适的计算平

台, 因此, 以往对于确定起伏地形下可照时数较困难, 一般多采用解析法或图解法评估, 过程繁琐, 且精度和应用范围相对有限<sup>[4-6]</sup>。直到 20 世纪 70 年代初, 随着数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 发展和数字地形分析功能不断深入应用, 为山地可照时数等太阳辐射参数的空间分布模拟提供了新的技术方法, 也大大提高了山地可照时数等不同气候要素评估的准确性<sup>[7-8]</sup>。

20 世纪 70 年代末, Dozier 等最早在提取相关地形参数的基础上提出了基于 DEM 的太阳辐射空间分布模拟方法<sup>[9]</sup>。之后, 以 Bocquet<sup>[10]</sup>、Dubayah<sup>[11]</sup>、Dozier<sup>[12]</sup>、Hetrick<sup>[13]</sup>、Kumar<sup>[14]</sup>、Pinde Fu and Rich<sup>[15-16]</sup>、Lee<sup>[17]</sup> 等为代表的国外学者们在不同区域进行了基于 DEM 或 GIS 的日照时数空间分布研究。相对而言, 国内的相关研究起步晚一些,

**收稿日期** (Received date): 2018-10-19; **改回日期** (Accepted date): 2019-04-09

**基金项目** (Foundation item): 重庆市前沿与应用基础研究计划一般项目 (cstc2015jcyjA00028); 国家自然科学基金 (41807498)。[Chongqing Frontier and Applied Basic Research Program (cstc2015jcyjA00028); National Natural Science Foundation of China (41807498)]

**作者简介** (Biography): 李军 (1974-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 农业遥感和地理信息系统应用研究。[LI Jun (1974-), male, Ph.D., associate professor, research on agricultural remote sensing, geographic information system and its application] E-mail: junli@cqnu.edu.cn

开始于 20 世纪 90 年代初,初期是基于 GIS 空间数据库分析不同地形因子对太阳辐射的影响,成为后来可照时数等辐射要素空间分布模拟的基础<sup>[18]</sup>。之后基于 DEM 的日照时数理论计算公式得到一些修正<sup>[19]</sup>,并且也尝试了基于国产 GIS 平台的可照时数等辐射要素的空间分布模拟<sup>[20]</sup>。进入 21 世纪以来,在我国不同地形地貌区域开展了基于 GIS 或 DEM 的可照时数等不同辐射要素的空间分布研究。例如,基于 100 m 分辨率 DEM 的北京西山门头沟区的可照时数模拟<sup>[21]</sup>,基于 1 km 分辨率 DEM 的全国尺度可照时间等辐射要素空间分布研究<sup>[22]</sup>,基于改进模型的湖南日照时数和总辐射模拟<sup>[23]</sup>,基于 20 m 分辨率 DEM 的仙居县可照时数空间分布模拟<sup>[24]</sup>,以及基于 100 m DEM 的贵州高原和陕西日照时数的模拟<sup>[25-26]</sup>。起伏地形下日照时数计算模型也在不断得到修正<sup>[27]</sup>,基于高空间分辨率 DEM (ASTER GDEM) 的日照时数计算模型得到应用<sup>[28]</sup>。此外,由于基于不同比例尺或分辨率的 DEM 数据提取的坡度、坡向等微地形因子具有显著差异,DEM 的尺度效应对日照时数等太阳辐射要素空间分布模拟结果影响的研究也陆续出现<sup>[29-31]</sup>。

目前,基于 GIS 或 DEM 的可照时数等太阳辐射要素模型已经趋于成熟,且在不同区域已经得到了广泛应用。但由于此类模型属于分布式模型,对于月、季或年尺度的可照时数仍需将每日从日出到日落的时间进行分段模拟计算,再通过逐日累加得到,时段越小,精度越高,但计算量越大,而且在起伏地形下不同时段内的地形遮蔽程度差异明显,太阳高度角和方位角等也不同,还需要纬度、坡度等参数以及较复杂的理论计算公式,使其应用受到一定的限制,因此,迫切需要建立一个合理、准确且便于估算和应用的日照时数空间分布模型,运用正确的分析研究方法是揭示山区日照等气候要素分布规律和山区气候资源应用的关键。起伏地形下可照时数空间分布模拟结果可服务于山地资源环境评价、山区农业气候区划、山地生态系统过程和格局模拟研究、建筑设计规划和太阳能工程等诸多方面,具有重要的理论和现实意义。

建立起伏地形下可照时数空间分布估算统计模型的理论依据是由于可照时数受地理纬度、季节和地形等诸多因子的影响而呈现显著差异。其中,地形因子又包括海拔高度、坡度、坡向和地形遮蔽度

等,通常可用复杂的理论公式计算得到<sup>[1-2]</sup>。目前,上述影响因子可直接或间接的取自 DEM 数据,特别是高精度、高空间分辨率的 DEM 为准确估算可照时数提供了很好的数据基础,但由于理论推算公式较复杂,因此,考虑以栅格单元为统计样本在理论公式推算结果和诸多相关的地理和地形参数之间建立简单的统计模型,以此得到较准确的模拟结果。其中,统计模型中诸多相关参数率定的依据来自可照时数的理论推导公式<sup>[1-2]</sup>。

基于此,本文以重庆为例,首先通过基于 DEM 的可照时数分布式模型得到了其模拟的空间数据;其次,基于 DEM 提取了纬度、坡度、地形遮蔽度和起伏度等地理和地形参数的空间数据;再者,以栅格单元为统计样本,在这两部分空间数据之间建立多元线性统计模型。由于模型的输入参数仅仅是高空间分辨率的 DEM 数据,且建立模型的过程较简单,模拟结果较易得到,作为重要的基础气候要素空间数据之一,其应用较广,而且此研究方法可应用于其他区域建立相应的统计模型,也可据此定量分析日照时数与不同地理和地形因子之间的关系,具有一定创新性和实用价值。

## 1 研究区及数据的收集和处理

### 1.1 研究区

重庆位于我国的西南部,是长江上游最大的经济中心和西南地区重要的水陆交通枢纽。其地貌由河谷、盆地、丘陵和高山等组成,且以山地和丘陵为主,地势起伏较大,海拔 16 ~ 2778 m (图 1)。总面积为 8.24 万 km<sup>2</sup>,其中山地面积约占总面积的 75.3%。气候类型属亚热带季风性气候,夏季炎热,昼夜温差小,风速小,降水多集中于夏季,相对湿度大,水汽含量丰富,多云雾,年日照百分率为我国最少的地区之一。

### 1.2 数据的收集和处理

#### (1) DEM 数据

来源于 USGS 提供的 ASTER GDEM v2 全球 DEM 数据库,根据研究区边界截取,进行投影转换和重采样等处理,得到 100 m 分辨率的 DEM 数据 (图 2),并将 100 m 作为可照时数模拟的最小栅格单元。

#### (2) 气象站点的地理位置数据

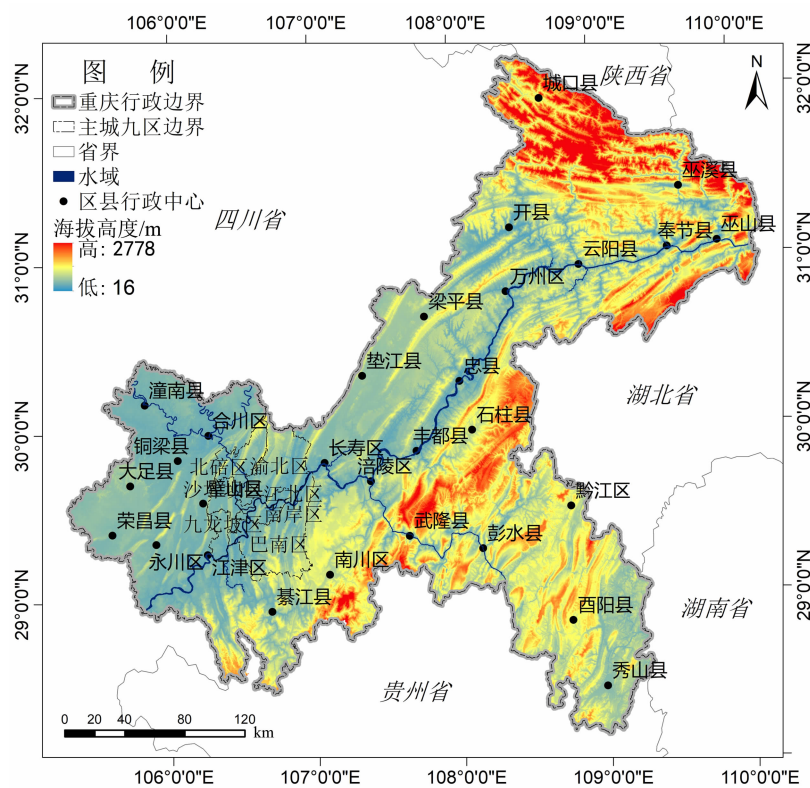


图 1 研究区的地理区位图

Fig. 1 Overview of the study area

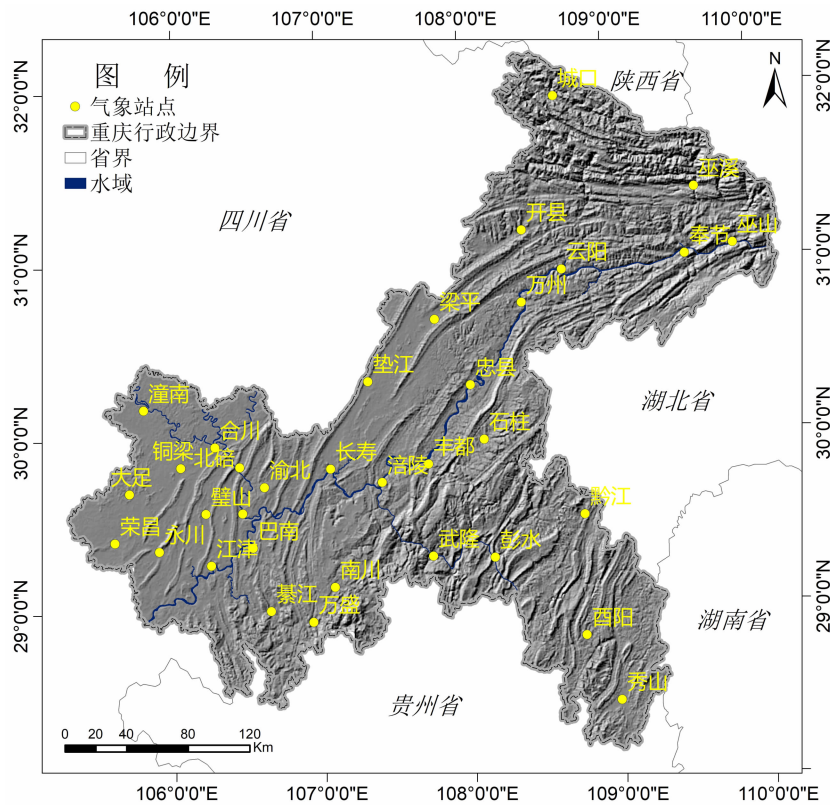


图 2 气象站点的地理位置和研究区的地貌晕渲图

Fig. 2 Geographical location of meteorological stations and the geomorphologic map in study area

取自重庆市气象局提供的 34 个气象站点的地理位置(图 2),包括经纬度和海拔。

## 2 可照时数的分布式模拟

### 2.1 可照时数分布式模型及其模拟

借鉴以往诸多学者的研究<sup>[1-5]</sup>,可照时数分布式模型可用公式(1)表示:

$$T'_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^n g_i \Delta T + g_{n+1} (T_0 - n * \Delta T) \quad (1)$$

式中,  $T'_{\alpha\beta}$  为山地可照时数;  $T_0$  为水平面可照时数;  $T_0$

被划分为  $n+1$  段,  $\Delta T$  为时间步长,  $n$  为时段数,  $g_i$  为第  $i$  时段的地形遮蔽因子。

在上述可照时数分布式模型中,输入 DEM 等参数,利用 ArcGIS 的空间分析工具(Spatial Analyst)中地图代数运算功能(Map Algebra)等,得到某日的可照时数,月或年的可照时数累加得到。本文以我国目前气候业务中使用的 1981—2010 年间 30 a 气候平均值为例,模拟了重庆 30 a 平均各月和年平均可照时数空间分布,限于篇幅,仅列出 100 m 分辨率 30 a 平均典型月(1 月、4 月、7 月和 10 月)和年平均可照时数的模拟结果(图 3,图 4)。

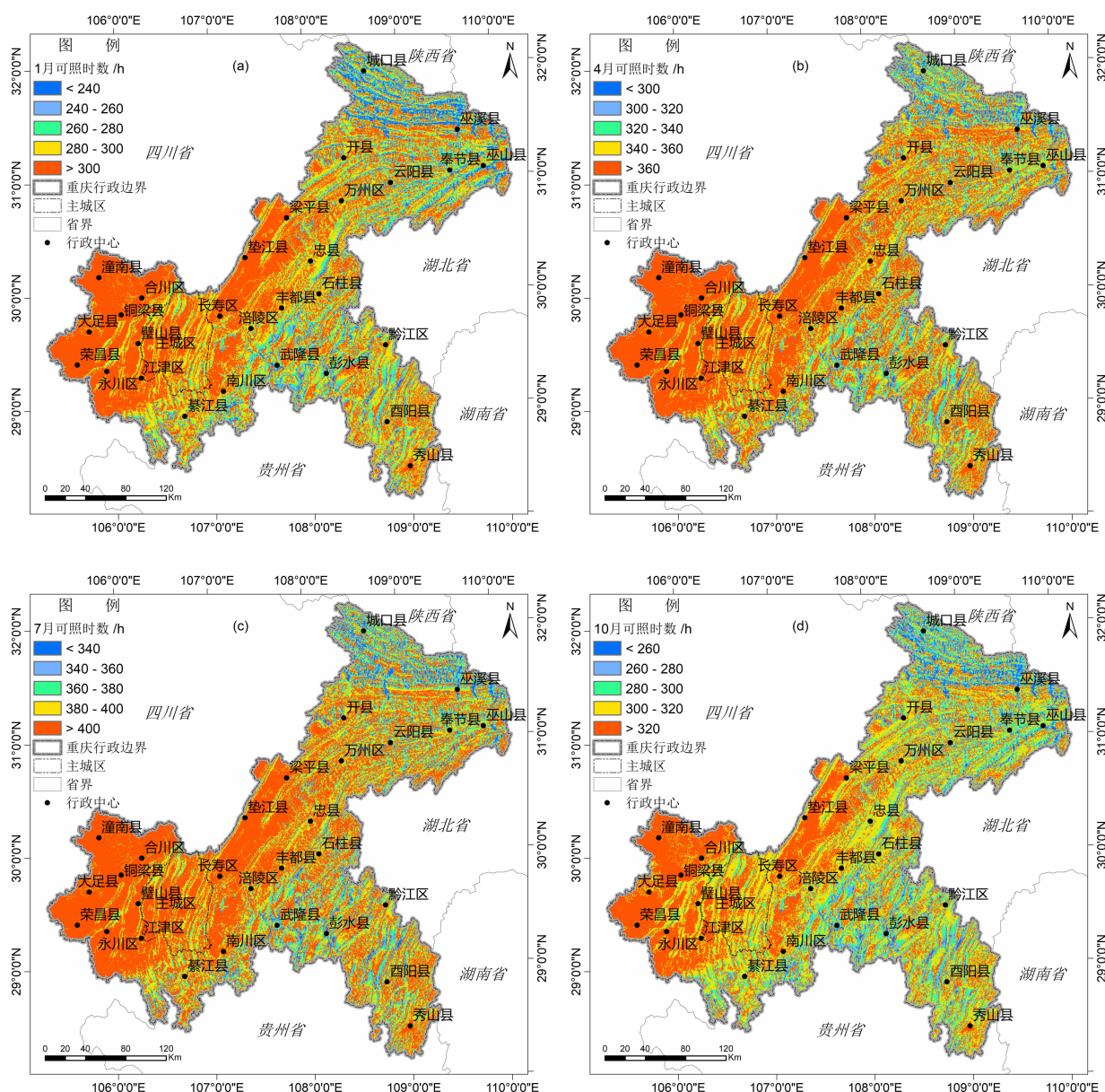


图 3 重庆典型月的可照时数(a)1月;(b)4月;(c)7月;(d)10月

Fig.3 PSD during 1981—2010 in Chongqing, China (a) January; (b) April; (c) July; (d) October



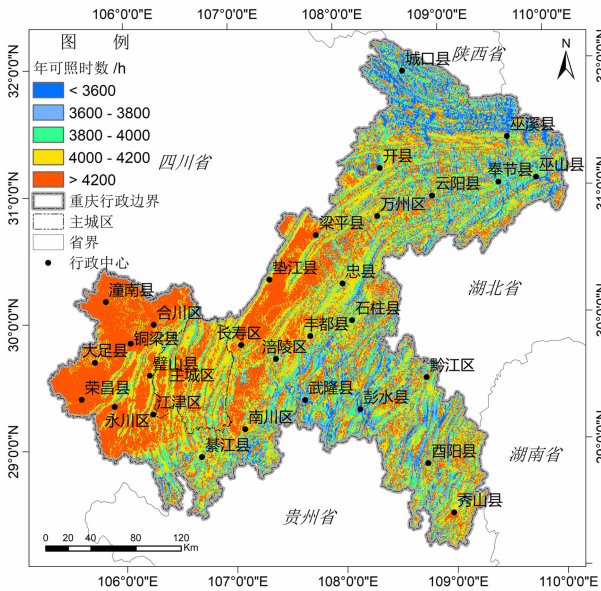


图 4 重庆 30 a 平均年可照时数

Fig. 4 Average annual PSD during 1981—2010 in Chongqing, China

重庆近 30 a 平均年和典型月可照时数受地形的影响在空间分布的差异性非常显著,总体分布格局是东北和东南地区的可照时数普遍较低,中部低山平行岭谷区域次之,而西部方山丘陵区最高(图 3,图 4)。主要原因是由于渝东北和渝东南地区分别有大巴山、巫山、武陵山和大娄山等山脉,海拔相对较高,地形遮蔽作用显著,而中西部主要为低山和丘陵排列的岭谷区域,地形对可照时数的影响相对较小。利用 ArcGIS 对空间数据的统计功能,进一步定量统计 30 a 平均年和典型月可照时数模拟结果(表 1)。

表 1 重庆近 30 a 平均年和典型月可照时数特征统计值

Tab. 1 Statistics of characteristic value of PSD (average value and standard deviation) January, April, July, and October during 1981—2010 in Chongqing

| 特征统计值 | 30 a 平均可照时数/h |       |       |       |        |
|-------|---------------|-------|-------|-------|--------|
|       | 1 月           | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 年      |
| 平均值   | 289.8         | 354.5 | 394.7 | 306.9 | 4027.5 |
| 标准差   | 28.3          | 23.7  | 25.8  | 23.6  | 288.2  |

由表 1 可见,对于 30 a 平均典型月可照时数模拟结果的平均值而言,按大小排序为:7 月 > 4 月 > 10 月 > 1 月,其中,7 月约为 394.7 h,1 月约为 289.8 h,两者之间相差了 104.9 h,而且春季略大于秋季,总之,重庆可照时数的季节性差异非常明显。此外,标准差按大小排序为:1 月 > 7 月 > 4 月 > 10

月,可见冬季可照时数受地形影响最明显,空间异质性最大,夏季次之,而春秋两季的空间异质性接近,均偏小。

其次,对可照时数的地形分异特征进行分析。基于 100 m 分辨率的 DEM 数据,将海拔每隔 200 m 为一个等级,由于大于 2000 m 的区域较少可归为一类,因此,共分为 11 个海拔等级,分别统计 11 个区域典型月和年可照时数的平均值(表 2)。

表 2 重庆不同海拔高度典型月和年可照时数

Tab. 2 The statistics of sunshine duration variation in regions at different altitudes

| 海拔等级/m      | 平均可照时数/h |       |       |       |        |
|-------------|----------|-------|-------|-------|--------|
|             | 1 月      | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 年      |
| < 200       | 281.0    | 348.3 | 387.7 | 299.7 | 3939.6 |
| 200 ~ 400   | 297.7    | 361.8 | 402.8 | 314.1 | 4118.7 |
| 400 ~ 600   | 290.8    | 355.0 | 395.5 | 307.5 | 4035.9 |
| 600 ~ 800   | 286.2    | 351.1 | 391.0 | 303.5 | 3984.9 |
| 800 ~ 1000  | 284.7    | 350.0 | 389.7 | 302.4 | 3969.8 |
| 1000 ~ 1200 | 284.1    | 349.8 | 389.3 | 302.2 | 3965.6 |
| 1200 ~ 1400 | 284.5    | 350.1 | 389.6 | 302.6 | 3970.0 |
| 1400 ~ 1600 | 284.9    | 350.6 | 390.1 | 303.2 | 3975.6 |
| 1600 ~ 1800 | 285.9    | 351.2 | 390.6 | 304.0 | 3984.6 |
| 1800 ~ 2000 | 290.2    | 354.2 | 393.7 | 307.4 | 4026.0 |
| > 2000      | 297.8    | 360.6 | 400.7 | 313.9 | 4108.9 |

由表 2 可知:无论是典型月还是年可照时数,其地形分异特征非常明显。< 200 m 的可照时数最少,由于这些区域主要是嘉陵江、长江等河流,其两岸常有中高山分布,地形遮蔽非常明显,其次为 1000 ~ 1200 m 的区域,地形起伏度大,遮蔽作用依然较明显,而可照时数的高值区主要在 200 ~ 400 m 和 > 2000 m 的区域,这是由于 200 ~ 400 m 区域主要在渝西的丘陵台地,地形平坦,遮蔽作用弱,而 > 2000 m 的区域是高山,由于高山林立,地形遮蔽也较少,可照时数在 200 ~ 1000 m 区域随海拔升高而减少,而在 1000 m 以上区域随海拔升高而增加。此外,同一海拔等级,典型月可照时数大小排序均为:7 月 > 4 月 > 10 月 > 1 月。

将坡度划分为平坡(0 ~ 5°)、缓坡(5 ~ 15°)、斜坡(15 ~ 25°)、陡坡(25 ~ 35°)和急坡(35 ~ 90°)5 类。将坡向以正北方向为 0°,按顺时针方向,将 0 ~ 360°分为平缓坡(0°)、阳坡(135 ~ 225°)、半阳坡(90 ~ 135°和 225 ~ 270°)、半阴坡(45 ~ 90°和 270 ~ 315°)和阴坡(0 ~ 45°和 315 ~ 360°)5 类。结果见表 3。

表 3 重庆不同坡度和坡向的典型月和年可照时数的分布特征

Tab.3 The statistics of sunshine duration variation in regions at different slopes and aspects

| 坡度<br>类别 | 平均可照时数/h |       |       |       |        | 坡向<br>类别 | 平均可照时数/h |       |       |       |        |
|----------|----------|-------|-------|-------|--------|----------|----------|-------|-------|-------|--------|
|          | 1 月      | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 年      |          | 1 月      | 4 月   | 7 月   | 10 月  | 年      |
| 平坡       | 302.0    | 365.9 | 407.4 | 318.2 | 4170.0 | 平缓坡      | 294.1    | 360.4 | 401.3 | 312.0 | 4092.7 |
| 缓坡       | 296.8    | 360.9 | 401.9 | 313.2 | 4107.9 | 阳坡       | 294.3    | 355.9 | 395.3 | 309.4 | 4054.0 |
| 斜坡       | 288.4    | 352.9 | 393.0 | 305.4 | 4008.4 | 半阳坡      | 291.2    | 353.9 | 393.9 | 306.4 | 4020.2 |
| 陡坡       | 280.8    | 346.3 | 385.5 | 298.8 | 3923.8 | 半阴坡      | 287.9    | 353.3 | 393.8 | 305.5 | 4010.9 |
| 急坡       | 270.0    | 337.4 | 375.5 | 289.9 | 3807.8 | 阴坡       | 285.4    | 350.8 | 390.7 | 302.3 | 4001.6 |

由表 3 可知:无论是典型月还是年可照时数,其随不同坡度和坡向均呈现显著的分异特征。可照时数大小排序均为:平坡>缓坡>斜坡>陡坡>急坡,平缓坡>阳坡>半阳坡>半阴坡>阴坡。而且,平坡和急坡区域之间典型月平均可照时数相差约 30.2 h,年平均可照时数相差约 362.2 h,平缓坡和阴坡的典型月平均可照时数之间相差约 9.7 h,年平均可照时数相差约 91.1 h。

2.2 模拟结果的验证

为了对模型结果进行检验,利用《中华人民共和国气象行业标准(QX/T 89—2008)——太阳能资源评估方法》中可照时数的计算方法,其表达式见公式(2)所示,计算得到重庆 34 个气象站点的日可照时数,月或年日照时数通过逐日累加得到。

$$\sin \frac{T_A}{4} = \sqrt{\frac{\sin(45^\circ + \frac{\phi - \delta + \gamma}{2})\sin(45^\circ - \frac{\phi - \delta - \gamma}{2})}{\cos\phi\cos\delta}}$$

(2)

其中, $T_A$  为日可照时数, $\gamma$  为蒙气差,取  $34'$ , $\phi$  为纬度, $\delta$  为太阳赤纬。

将基于上述方法得到各气象站点的可照时数理论值和基于分布式模型得到的各月和年可照时数空间数据提取的气象站点所在栅格的模拟值进行对比验证,结果见表 4 和图 5。

由表 4 和图 5 可看出,利用分布式模型计算得到重庆 30 a 的各月和年可照时数空间分布模拟结果具有较高精度,就相对误差而言,模拟结果均比理论值偏低,各月的平均相对误差在  $-11.2\% \sim -4.0\%$ ,除了 10 月,其他各月均未超过 10%,冬季的相对误差偏高,年平均相对误差为  $-7.1\%$ ;此外,从年可照时数相对误差的空间分布可见,就整体而言,渝东北和东南的相对误差较中西部高,其中,除

了中部的涪陵,相对误差大于 10% 的只在渝东北的巫山、奉节以及渝东南的酉阳、彭水和武隆,其他站点的相对误差均小于 10%。模拟结果普遍偏低的主要原因可能在于利用气象行业标准(QX/T 89—2008)计算的可照时数理论值未考虑地形遮蔽的影响,因为气象观测场选址要求四周一定范围必须空旷平坦,其周围障碍物的阴影应不会投射到日照和辐射观测仪器的受光面上。因此,基于相关气象行业标准计算的可照时数理论值仅能代表气象观测场及其四周的一定范围,代表性非常有限,特别是在地形起伏的山区,这可能也是模拟结果的相对误差在渝东北和渝东南偏高的主要原因,其次可能也和气象观测场周边环境的地形特点有关。

表 4 重庆近 30 a 平均各月和年可照时数  
模拟结果的相对误差

Tab.4 The relative error of estimated monthly and annual PSD during 1981—2010 in Chongqing

| 月/年  | 相对误差/% |
|------|--------|
| 1 月  | -8.2   |
| 2 月  | -8.5   |
| 3 月  | -6.8   |
| 4 月  | -6.0   |
| 5 月  | -5.9   |
| 6 月  | -5.6   |
| 7 月  | -6.0   |
| 8 月  | -6.2   |
| 9 月  | -4.0   |
| 10 月 | -11.2  |
| 11 月 | -8.9   |
| 12 月 | -9.3   |
| 年    | -7.1   |

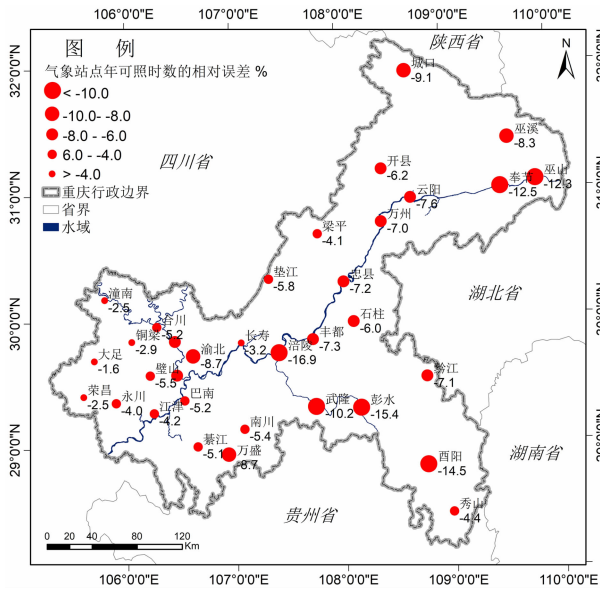


图5 重庆30 a平均年可照时数模拟结果  
相对误差的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of relative error of estimated monthly and annual PSD during 1981—2010 in Chongqing, China

2.3 不同区域可照时数和地形因子差异的比较

为了进一步分析可照时数的空间异质性和地形因子的影响,主要依据地形地貌特点将重庆各区县按东北部、东南部和中西部进行分类合并。其中,东南部包括黔江、石柱、彭水、酉阳、秀山和武隆,东北部包括万州、梁平、城口、丰都、垫江、忠县、开州、云阳、奉节、巫山和巫溪,中西部包括长寿、涪陵、永川、江津、合川、大足、綦江、南川、荣昌、铜梁、璧山、潼南、万盛以及主城九区。利用 ArcGIS 的空间分析功能,分别统计了三类地区主要地理和地形特征因子以及近 30 a 平均各月和年可照时数的平均值和标准差(表 5)。

就平均值而言,无论是可照时数还是主要的地形特征因子,重庆东北部、东南部和中西部之间的差异还是比较显著。其中,东北部和东南部之间的差异相对较小,针对主要地理和地形特征因子而言,东北部的平均纬度相对较高,而且平均海拔、地形起伏

表 5 重庆不同区域的地理和地形特征参数以及近 30 a 平均各月和年可照时数的特征统计值

Tab. 5 The statistics of topographic factors and monthly and annual PSD during 1981—2010 in Chongqing

| 要素             | 东北部     |        | 东南部     |        | 中西部     |        |
|----------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                | 平均值     | 标准差    | 平均值     | 标准差    | 平均值     | 标准差    |
| 纬度/ $^{\circ}$ | 30.9656 | 0.5619 | 29.2557 | 0.5025 | 29.5108 | 0.4212 |
| 高程/m           | 873.3   | 514.5  | 859.4   | 343.5  | 475.4   | 275.5  |
| 地形起伏度/m        | 299.9   | 179.9  | 260.9   | 131.3  | 133.1   | 111.5  |
| 坡度/ $^{\circ}$ | 18.53   | 10.99  | 17.38   | 9.57   | 9.40    | 8.01   |
| 地形阴影值          | 167.6   | 47.6   | 169.2   | 45.1   | 176.4   | 28.4   |
| 地表粗糙度          | 0.3233  | 0.1918 | 0.3034  | 0.1670 | 0.1640  | 0.1413 |
| 平面曲率           | 0.01252 | 0.3269 | 0.01463 | 0.3101 | 0.0094  | 0.1972 |
| 剖面曲率           | 0.01249 | 0.3398 | 0.01470 | 0.3467 | 0.0094  | 0.2154 |
| 1 月可照时数/h      | 282.8   | 34.2   | 286.0   | 25.2   | 300.5   | 17.5   |
| 2 月可照时数/h      | 274.3   | 25.8   | 275.4   | 21.0   | 288.6   | 15.1   |
| 3 月可照时数/h      | 332.3   | 26.5   | 331.7   | 23.9   | 347.1   | 17.1   |
| 4 月可照时数/h      | 349.6   | 26.0   | 348.7   | 23.7   | 364.2   | 16.7   |
| 5 月可照时数/h      | 383.5   | 28.0   | 383.3   | 25.3   | 400.3   | 18.1   |
| 6 月可照时数/h      | 382.8   | 27.4   | 383.1   | 24.3   | 399.1   | 16.7   |
| 7 月可照时数/h      | 388.8   | 28.3   | 388.8   | 25.5   | 405.8   | 18.0   |
| 8 月可照时数/h      | 369.4   | 27.0   | 368.8   | 24.6   | 384.9   | 17.4   |
| 9 月可照时数/h      | 342.0   | 26.7   | 341.1   | 24.2   | 356.8   | 17.3   |
| 10 月可照时数/h     | 301.6   | 26.5   | 302.1   | 22.5   | 316.5   | 16.4   |
| 11 月可照时数/h     | 277.2   | 32.0   | 279.9   | 23.9   | 293.9   | 16.8   |
| 12 月可照时数/h     | 273.5   | 38.1   | 277.6   | 27.5   | 292.7   | 19.1   |
| 年可照时数/h        | 3957.7  | 321.2  | 3966.4  | 278.4  | 4150.4  | 199.3  |

度、坡度和地表粗糙度也较高,地形遮蔽的影响也更加明显,而东南部的平均平面曲率和剖面曲率则相对较高,中西部的地形较平坦,平均海拔仅为 475.4 m,在三个地区中,各个地形特征因子的平均值均最小,而且其标准差也最小。另一方面,针对各月可照时数而言,中西部的平均值均大于东北部和东南部,而标准差均小于东北部和东南部,东北部和东南部的平均值之间差异较小。其中,秋季的 10 月和 11 月以及冬季,东南部略大于东北部,而除了 7 月外的其他月,东南部略小于东北部,7 月东南部和东北部几乎相当。东南部的标准差均小于东北部。对年可照时数而言,中西部平均值依然最大,标准差最小,东南部的平均值略大于东北部,而标准差小于东北部。此外,无论哪一个区域,12 月可照时数的标准差均最大,而 2 月的标准差均最小。

3 可照时数模拟的统计模型

在基于 DEM 的可照时数分布式模型中有纬度、海拔、坡度、地形遮蔽度以及太阳高度角、方位角等

诸多参数,模型相对较复杂,且需要进行分布式计算才能得到日可照时数,而对于月或年尺度的可照时数则需要逐日累加才能得到,计算时间较长,且计算量较大,特别是在起伏地形且研究区范围较大时应用高分辨率 DEM 计算时更是如此,进而影响其应用,因此,迫切需要一种快速且准确的方法模拟可照时数的空间分布。

为了实现上述目的,利用 ArcGIS 的数字地形分析,分别基于 DEM 得到纬度、地形起伏度、坡度、地形阴影、地表粗糙度、平面曲率和剖面曲率的空间数据。其中,地形起伏度的邻域范围借鉴针对西南地区的相关研究<sup>[32]</sup>采用 16×16 网格大小。地形阴影采用 ArcGIS 的 *Hillshade* 函数计算。地表粗糙度为特定区域内地表面积与投影面积的比值。剖面曲率和平面曲率分别表示地形表面在垂直和水平方向上扭曲变化程度的度量因子。为了定量分析上述因子和可照时数之间的关系,以栅格为统计单元,在各月或年可照时数与上述地理和地形特征因子之间建立多元线性逐步回归方程,样本为 8 259 775 个像元,结果见表 6。

表 6 重庆年及各月可照时数与地形特征参数之间的回归关系  
Tab. 6 Regression relation of monthly and annual PSD dependent on topographic factors in Chongqing

| 月/年  | 多元线性逐步回归方程   | 复相关系数  |
|------|--|--------|
| 1 月  | $Y_1 = 0.007X_1 - 0.992X_2 + 0.451X_3 - 0.124X_4 - 2.084X_5 + 1.103X_6 + 0.269X_7 + 319.003$                         | 0.8070 |
| 2 月  | $Y_2 = 0.005X_1 - 0.201X_2 + 0.098X_3 - 0.098X_4 - 1.716X_5 + 1.042X_6 + 0.117X_7 + 0.604X_8 + 233.471$              | 0.8253 |
| 3 月  | $Y_3 = 0.004X_1 + 0.502X_2 - 0.304X_3 - 0.095X_4 - 1.837X_5 + 1.218X_6 + 0.024X_7 + 1.278X_8 + 211.717$              | 0.8156 |
| 4 月  | $Y_4 = 0.004X_1 + 0.535X_2 - 0.334X_3 - 0.091X_4 - 1.807X_5 + 1.193X_6 - 0.014X_7 + 1.254X_8 + 232.889$              | 0.8112 |
| 5 月  | $Y_5 = 0.004X_1 - 0.358X_3 - 0.099X_4 - 1.975X_5 + 1.267X_6 - 0.042X_7 + 1.384X_8 + 274.537$                         | 0.8205 |
| 6 月  | $Y_6 = 0.004X_1 - 0.130X_2 - 0.270X_3 - 0.096X_4 - 1.902X_5 + 1.206X_6 - 0.071X_7 + 1.206X_8 + 297.208$              | 0.8277 |
| 7 月  | $Y_7 = 0.004X_1 - 0.331X_3 - 0.100X_4 - 1.988X_5 + 1.272X_6 - 0.053X_7 + 1.339X_8 + 285.427$                         | 0.8231 |
| 8 月  | $Y_8 = 0.004X_1 + 0.401X_2 - 0.340X_3 - 0.094X_4 - 1.887X_5 + 1.233X_6 - 0.022X_7 + 1.282X_8 + 255.650$              | 0.8142 |
| 9 月  | $Y_9 = 0.004X_1 + 0.596X_2 - 0.342X_3 - 0.131X_4 - 1.850X_5 + 1.231X_6 + 0.009X_7 + 1.317X_8 + 215.926$              | 0.8114 |
| 10 月 | $Y_{10} = 0.005X_1 - 0.061X_3 - 0.100X_4 - 1.808X_5 + 1.143X_6 + 0.086X_7 + 0.925X_8 + 226.315$                      | 0.8256 |
| 11 月 | $Y_{11} = 0.006X_1 - 0.829X_2 + 0.407X_3 - 0.118X_4 - 1.988X_5 + 1.075X_6 + 0.237X_7 + 0.072X_8 + 302.462$           | 0.8121 |
| 12 月 | $Y_{12} = 0.007X_1 - 1.416X_2 + 0.507X_3 - 0.131X_4 - 2.251X_5 + 1.133X_6 + 0.339X_7 - 0.214X_8 + 340.018$           | 0.7929 |
| 年    | $Y_{\text{年}} = 0.058X_1 - 1.476X_2 - 0.860X_3 - 1.241X_4 - 23.093X_5 + 14.115X_6 + 0.879X_7 + 10.408X_8 + 3196.936$ | 0.8522 |

注:  $Y_1 \sim Y_{12}$ : 1~12 月地理可照时数,  $X_1$ : 海拔高度,  $X_2$ : 纬度,  $X_3$ : 坡度,  $X_4$ : 地形起伏度,  $X_5$ : 剖面曲率,  $X_6$ : 水平曲率,  $X_7$ : 地形阴影,  $X_8$ : 地表粗糙度。



由表6可知,重庆各月可照时数与主要的地理和地形特征因子之间的复相关系数在0.7929~0.8277变化,年可照时数的复相关系数为0.8522,经过信度1%的 $F$ 检验,均表现为极显著相关性,夏季的相关程度相对较高,其中,6月最高,复相关系数为0.8277,冬季较低,其中,12月最低,复相关系数为0.7929;在上述地理和地形特征参数中,始终表现为正相关的因子为海拔高度和水平曲率,始终表现为负相关的因子为地形起伏度和剖面曲率。此外,地形阴影在4~8月表现为负相关,在其他月均表现为正相关,纬度没有明显规律。对于年可照时数,其随海拔高度、水平曲率、地形阴影和地表粗糙度的增加而增加,但是随纬度、坡度、地形起伏度和剖面曲率的增加而减少。

## 4 结论

(1)基于分布式模型得到的重庆30 a平均年和各月可照时数具有较高精度,除了10月的相对误差(11.2%)略偏高外,其他各月均相对误差均小于10%,年均相对误差为-7.1%,约占82.4%的气象站点的相对误差小于10%,其中渝东北和渝东南较中西部高。

(2)可照时数的区域分异特征明显。东北和东南部低,中部平行岭谷区域次之,西部方山丘陵区高。各月平均值排序:7月>4月>10月>1月,且7月和1月相差约105 h,1月的空间异质性最大,7月次之,4月和10月均较小。可照时数的地形分异特征非常显著。<200 m的区域最少,其次为1000~1200 m区域,200~400 m和>2000 m为高值区,200~1000 m可照时数随海拔的升高而减少,而在>1000 m随海拔的升高而增加。不同坡度的可照时数排序:平坡>缓坡>斜坡>陡坡>急坡,平坡和急坡之间月均相差约30.2 h;不同坡向的可照时数排序:平缓坡>阳坡>半阳坡>半阴坡>阴坡。平缓坡和阴坡之间月均相差约9.7 h。

(3)以栅格单元为样本,在主要地理和地形特征因子和可照时数之间建立了多元线性回归方程,各月复相关系数在0.7929~0.8277变化,年复相关系数为0.8522,均为极显著相关。其中,表现为正相关的因子为海拔高度和水平曲率,表现为负相关的因子为地形起伏度和剖面曲率,此外,地形阴影在4~8月表现为负相关,在其他月均表现为正相关,

纬度没有明显规律。

(4)本文提出的估算重庆30 a平均年和各月可照时数空间分布的统计模型,在一定程度上简化了以往分布式模型的计算步骤和计算量,提高了计算效率,减小了计算难度,便于其应用,并可为其他地形复杂地区计算可照时数的空间分布提供参考。

## 参考文献(References)

- [1] 傅抱璞. 山地气候[M]. 科学出版社,1983,19-37. [FU Baopu. Mountain Climate [M]. Beijing: Science Press,1983,19-37]
- [2] 翁笃鸣,罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京:气象出版社,1990:1-10. [WENG Duming, LUO Zhexian. Topographical Climate in Mountainous Areas [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990: 1-10]
- [3] 傅抱璞,虞静明,卢其尧. 山地气候资源与开发利用[M]. 南京:南京大学出版社,1996:165-179. [FU Baopu, YU Jingming, LU Qiyao. Climate Sources, development and utilization in mountainous areas [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1996: 165-179]
- [4] 傅抱璞. 关于山地气候资料的推算问题[C]//山地气候文集. 北京:气象出版社,1984:23-34. [FU Baopu. The calculation of climatic elements in mountainous areas [C]//Collected Papers on Mountain Climate. Beijing: China Meteorological Press, 1984: 23-34]
- [5] 李占清,翁笃鸣. 一个计算山地可照时间的计算机模式[J]. 科学通报,1987,(17):1333-1335. [LI Zhanqing, WENG Duming. A computer model to determine topographic parameters [J]. Acta Geographica Sinica, 1987, (17): 1333-1335]
- [6] 朱志辉. 等可照时间与等日照方位[J]. 中国科学(B辑),1987,(12):1340-1347. [ZHU Zhihui. Equal insolation duration and equal sunshine azimuth [J]. Science in China Series B, 1987, (12):1340-1347]
- [7] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉大学出版社,2001:1-10. [LI Zhilin, ZHU Qing. Digital Elevation Model [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2001:1-10]
- [8] 汤国安,刘学军,闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2005,366-370. [TANG Guoan, LIU Xuejun, LV Guonian. Principles and Methods of Digital Elevation Model and Analysis [M]. Beijing: Science Press,2005, 366-370]
- [9] DOZIER J. OUTCALT S I. An approach to energy balance simulation over rugged terrain [J]. Geographic Analysis, 1979, 11 (1):65-85.
- [10] BOCQUET G. Method of study and cartography of the potential sunny periods in mountainous areas [J]. Journal of Climatology, 1984, 1(4):587-596.
- [11] DUBAYAH R, DOZIER J, DAVIS W F. Topographic distribution of clear sky radiation over the Konza Prairie, Kansas [J]. Water Resources Research, 1990, 26(4):679-690.

- [12] 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.
- [13] HETRICK W A, RICH P M, BARNES F J, et al. GIS-based solar radiation flux models [J]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, GIS Photogrammetry and Modelling, 1993, **3**:132–143.
- [14] KUMAR L, SKIDMORE A K, KNOWLES E. Modeling topographic variation in solar radiation in a GIS environment [J]. International Journal of Geographic Information Science, 1997, **11**(5):475–497.
- [15] PINDE FU, RICH P M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales [C/OL]. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA [1999–10–8]. <http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.
- [16] PINDE FU, RICH P M. A geometric solar radiation model with application in agriculture and forestry [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2002, **37**:25–35.
- [17] LEE K H. Constructing a non-linear relationship between the incoming solar radiation and bright sunshine duration [J]. International Journal of Climatology, 2010, **30**(12):1884–1892.
- [18] 黄雪樵. 地理信息系统支持下的坡面太阳辐射计算 [J]. 地理研究, 1992, **11**(3): 80–84. [HUANG Xueqiao. GIS-based computer of solar radiation on slope surface [J]. Geographical Research, 1992, **11**(3):80–84]
- [19] 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. [LI Xin, CHENG Guodong, CHEN Xianzhang, et al. Modification of solar radiation model over rugged terrain [J]. Chinese Science Bulletin,1999,**44**(9):993–998]
- [20] 谢阳生. 基于 GIS 的太阳辐射模型及其实现 [D]. 北京:中国林业科学研究院,2001,1–7. [XIE Yangsheng. Modelling Topographic Variation in Solar Radiation in a GIS Environment [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2001,1–7]
- [21] 陈华,孙丹峰,段增强,等. 基于 DEM 的山地日照时数模拟时空特点及应用——以北京西山门头沟区为例[J]. 山地学报, 2002,**20**(5):559–563. [CHEN Hua, SUN Danfeng, DUAN Zengqiang, et al. Sunshine hours model and spa-temporal variation analysis based on DEM [J]. Journal of Mountain Science, 2002, **20**(5):559–563]
- [22] 曾燕,邱新法,缪启龙,等. 起伏地形下我国可照时间的空间分布[J]. 自然科学进展,2003,**13**(5):545–548. [ZENG Yan, QIU Xinfu, MIAO Qilong, et al. Distribution of possible sunshine durations over rugged terrains of China [J]. Progress in Natural Science, 2003, **13**(5):545–548]
- [23] 黄晚华,帅细强,汪扩军. 考虑地形条件下山区日照和辐射的 GIS 模型研究[J]. 中国农业气象,2006,**27**(2): 89–93. [HUANG Wanhua, SHUAI Xiqiang, WANG Kuojun. A study on GIS-based model of sunlight and radiation in view of terrain in mountain areas[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2006,**27**(2):89–93]
- [24] 李军,黄敬峰. 基于 DEM 的山地可照时间的空间分布[J]. 浙江大学学报(理学版),2007,**34**(3):346–350. [LI Jun, HUANG Jingfeng. Spatial distribution of duration of possible sunshine based on DEM in mountain area[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition),2007,**34**(3):346–350]
- [25] 袁淑杰,缪启龙,邱新法,等. 贵州高原起伏地形下日照时间的时空分布[J]. 应用气象学报,2008,**19**(2):233–237. [YUAN Shujie, MIAO Qilong, QIU Xinfu, et al. The spatial and temporal distribution of insolation duration over rugged terrains in the Guizhou plateau[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008,**19**(2):233–237]
- [26] 孙炯,王娟敏,姜创业,等. 陕西省山地日照时间的空间分布特征[J]. 自然资源学报,2010,**25**(4):625–635. [SUN Xian, WANG Juanmin, JIANG Chuangye, et al. The spatial distribution of sunshine duration of mountain Terrain [J]. Journal of Natural Resources,2010,**25**(4): 625–635]
- [27] 潘用地. 起伏地形下日照时间计算模型的修正[J]. 资源科学,2010,**32**(8):1493–1498. [PAN Yongdi. Corrections for sunshine duration models under rugged terrain conditions [J]. Resources Science, 2010, **32**(8):1493–1498]
- [28] 张超,吴良林,杨妮,等. 基于 GIS 的喀斯特山区日照时数时空分布研究——以广西巴马瑶族自治县为例[J]. 自然资源学报,2014,**29**(11):1968–1978. [ZHANG Chao, WU Lianglin, YANG Ni, et al. Study on temporal and spatial distribution of sunshine duration based on GIS in karst mountain area—taking Guangxi Bama county for example [J]. Journal of Natural Resources, 2014, **29**(11):1968–1978]
- [29] DANIEL W M, BRENDAN G M, BRIAN L Z. Calibration and sensitivity analysis of a spatially distributed solar radiation model [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, **13**(1):49–65.
- [30] 张勇,陈良富,柳钦火,等. 日照时间的地形影响与空间尺度效应[J]. 遥感学报, 2005, **9**(5):521–530. [ZHANG Yong, CHEN Liangfu, LIU Qinhuo, et al. Topographic and spatial-scaling effects on the sunlit time of the different terrains [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, **9**(5): 521–530]
- [31] 姜创业,孙炯,王娟敏,等. 山地天文辐射的地形影响与空间尺度效应研究 [J]. 高原气象,2010, **29**(5):1230–1237. [JIANG Chuangye, SUN Xian, WANG Juanmin, et al. Influences of various local topographic factors on astronomical radiation of mountain and its spatial scale effect in mountainous region [J]. Plateau Meteorology, 2010, **29**(5):1230–1237]
- [32] 钟静,卢涛. 中国西南地区地形起伏度的最佳分析尺度确定 [J]. 水土保持通报,2018,**38**(1):175–181. [ZHONG Jing, LU Tao. Optimal statistical unit for relief amplitude in southwestern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(1):175–181]

# The Statistical Model for Estimating Spatial Distribution of Possible Sunshine Duration Based on DEM in Mountain Area: A Case Study in Chongqing, China

LI Jun<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yuzhu<sup>1</sup>, DENG Mei<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of GIS Application of Chongqing, Chongqing 401331, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** Possible sunshine duration (PSD) is one of important parameters for the study of ecosystem process models and hydrological models. It is defined as its astronomical and geographic factors with no atmospheric influence and only hill shadow is taken into account on its spatial distribution. Therefore, it varies from locality to locality in rugged lands due to height, aspect, slope and the obstruction created by the landforms in immediate surroundings. Establishing an accurate and easy-to-use PSD spatial distribution model is of great theoretical and practical significance to the solar energy resource assessment and radiation balance study. In this paper, firstly, we estimated average monthly and annual PSD during 1981—2010 in Chongqing using a distributed model based on DEM. Then the result was verified by the theoretical value based on an assessment method (QX/T 89—2008) for solar energy resource. Next, the spatial distribution character of PSD with topographic factors was analyzed. Moreover, a statistical model for estimating spatial distribution of PSD were constructed based on statistics of pixels. The result showed: (1) the numerical simulation results based on the distributed model were creditable and the relative error for other monthly except October and annual PSD was less than 10%. The relative error of PSD in the northeast and southeast of Chongqing was higher than that in the middle and western of Chongqing. (2) PSD in the western hills of Chongqing was highest, next was in the central parallel ridge valley area of Chongqing, and the lowest value was in the northeast and southeast of Chongqing. The maximum spatial heterogeneity of PSD in winter was the largest, next was in summer, and the smaller value was in spring and autumn. (3) The relationship between PSD and the major geographical and topographic factors was highly significant. The correlation coefficient of the monthly model varied from 0.7929 to 0.8277 and the value of the annual model was 0.8522. (4) To some extent, the statistical model we constructed simplified the calculation steps and computation of the distribution model, and was easy to be applied in some relevant studies. Moreover, it also can provide a method reference for other areas to estimate PSD.

**Key words:** Possible sunshine duration; spatial distribution; Chongqing; topographic factors; statistical model