

文章编号: 1008-2786-(2010)61-096-07

贵州高原复杂地形下太阳总辐射精细空间分布

谷晓平^{1,2}, 袁淑杰^{1,3*}, 史岚⁴, 缪启龙⁴, 康为民¹, 邱新法⁴, 王福增⁵

(1 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵州 贵阳 550002 2 中国气象局成都高原气象研究所, 四川 成都 610072

3 河北省气象与生态环境重点实验室, 河北 石家庄 050021 4 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044

5 河北农业大学信息科学与技术学院 河北 保定 071000)

摘要: 海拔、坡度、坡向以及周围地形遮蔽作用, 造成山区各部位接受到的太阳辐射能有很大差异。在前人研究的基础上, 对以前的模型进行了一些改进, 考虑了坡度、坡向和地形相互遮蔽作用对复杂地形下天文辐射的影响, 基于数字高程模型 (DEM) 数据, 研制了以复杂地形下天文辐射为起始数据的复杂地形下太阳总辐射的分布式模型, 在模型中还考虑了散射辐射的各向异性及坡地反射辐射对复杂地形下太阳总辐射的影响。应用 100 m×100 m 分辨率的 DEM 数据及气象站常规观测气象资料, 计算了贵州高原复杂地形下 100 m×100 m 分辨率的复杂地形下太阳总辐射。结果表明: (1) 局地地形因子如坡度、坡向、地形遮蔽等对太阳总辐射影响显著, 地形对复杂地形下太阳总辐射的影响是不容忽视的。(2) 在缺乏复杂地形下坡面考察资料的情况下, 建立以常规气象站观测资料为主的物理经验统计模型是实现细网格辐射资源计算的可行途径。

关键词: 贵州高原; 太阳总辐射; 复杂地形; 数字高程模型; 分布式模型

中图分类号: P422 P461

文献标识码: A

太阳辐射是地表热量的主要来源, 是大气中一切物理现象、物理过程形成、发展变化以及植物生长发育最基本的能量基础。海拔、坡度、坡向以及周围地形遮蔽的作用, 造成实际复杂地形下各部位接受到的太阳辐射能量有很大的差异。由于成本原因, 气象站点都是有限的, 而且受地理条件、维护条件等因素的限制, 气象站点的布设很不均匀, 实测的太阳辐射资料非常有限, 一般都采用理论推导公式来计算。

对实际复杂地形下太阳辐射的开创性研究是由傅抱璞做出的^[1], 接着翁笃鸣等一些学者相继提出了相关的计算模型^[2,3]。限于当时的条件, 只能借助于地形小网格进行图解, 而且计算繁琐, 计算量大。近年来, 应用 GIS 计算复杂地形下的太阳辐射,

揭示出局地地形对太阳辐射在实际复杂地形重分配过程中的重大影响, 证明了 GIS 是研究实际复杂地形下太阳辐射精细空间分布的有效数据处理平台^[4-6]。国外此类工作首推 Dozier^[7], 他发展了利用数字高程模型模拟太阳辐射的方法。Kumar^[8]等提出运用数字高程模型计算晴空条件下太阳直接辐射和散射辐射, Javier^[9]研究了太阳辐射建模的算法问题。然而, 上述研究多局限于有限区域内或某一个时间段进行, 大范围的复杂地形下太阳辐射月及年的精细空间分布方面的研究还很少。本文在前人研究的基础上, 对以前的模型进行了一些改进, 考虑了坡度、坡向和地形相互遮蔽作用对复杂地形下天文辐射的影响, 基于数字高程模型 (DEM) 数据, 研制了以复杂地形下天文辐射为起始数据的复

收稿日期 (Received date): 2009-03-17; 改回日期 (Accepted): 2009-06-11.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (NSFC40765004); 贵州省自然科学基金 (2005J2086); 贵州省社会发展攻关项目 (SZ [2008] 3019); 贵州气象创新项目 (2008-IP02); 中国气象局成都高原气象开放实验室基金项目 (LPM2009007) 联合资助。 [Financially supported by Chinese National Natural Science Foundation (NSFC40765004) and Programs for Social Development of Guizhou Province (SZ [2008] 3019).]

作者简介 (Biography): 谷晓平 (1968-), 女, 汉, 正研级高工, 从事环境与气候方面的研究。 [Gu Xiaoping (1968-) female the Han nationality senior engineer mainly study on environment and climate] E-mail: guxiaoping68@sina.com

* 通讯作者 (Author for correspondence): 袁淑杰, yuanshujie@yeah.net

杂地形下太阳总辐射的分布式模型, 在模型中还考虑了散射辐射的各向异性及坡地反射辐射对复杂地形下太阳总辐射的影响。应用 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率的 DEM 数据及气象站常规观测气象资料, 计算了贵州高原复杂地形下 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率的太阳总辐射。

1 复杂地形下太阳总辐射计算模型

研究表明^[10], 复杂地形下太阳总辐射可以表示为

$$Q_{\alpha\beta} = Q_{\alpha\beta} + Q_{\alpha\beta} + Q_{\alpha\beta} \quad (1)$$

式中 $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下太阳总辐射, $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下太阳直接辐射, $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下太阳散射辐射, $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下地形反射辐射。

在复杂地形下太阳直接辐射计算中, 假设地形对天文辐射和太阳直接辐射的影响是一致的, 因此任一天内某一网格点复杂地形下得到的太阳直接辐射 $Q_{\alpha\beta}$ 可以表示为^[10-11]

$$Q_{\alpha\beta} = \frac{Q_{\alpha\beta}}{Q_0} \times Q_0 \quad (2)$$

式中 $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下天文辐射 (计算参照参考文献^[12]), Q_0 为水平面天文辐射 (计算参照参考文献^[12-10]), Q_0 为水平面太阳直接辐射。

式 (2) 中, 任一天内某一网格点水平面得到的太阳直接辐射 Q_0 可以表示为^[13]

$$Q_0 = Q(1 - a_s)(1 - \exp[-b_s s / (1 - s)]) \quad (3)$$

式中 Q 为水平面太阳总辐射, a_s 、 b_s 、 c 为经验系数。 s 为日照百分率, 各网格点日照百分率 s 由实测资料使用 **DW** (**Inverse Distance Weight**) 插值法内插得到。

式 (3) 中任一天内某一网格点水平面月总辐射 Q 一般采用线性估算模式^[10]

$$Q = Q_0(a_s + b_s \times s) \quad (4)$$

式中 a_s 、 b_s 是与地形没有直接关系的大气参数, 主要与各地的气候特征有关。拟合得到 a_s 、 b_s 的值, 然后使用 **IDW** 插值内插得到各网格点上的 a_s 、 b_s 值。

在太阳散射辐射各项异性的前提下, 复杂地形中太阳散射辐射 (计算参照参考文献^[14]) 的计算式为^[15]

$$Q_{\alpha\beta} = Q_d[(Q_0/Q_0)R_0 + V(1 - Q_0/Q_0)] \quad (5)$$

式中 Q_d 为水平面太阳散射辐射, V 为地形开阔度, 其他参量意义同前。

任一天内某一网格点水平面得到的太阳散射辐

射 Q_d 可以表示为^[13]

$$Q_d = Q(a_s + (1 - a_s) \times \exp[-b_s s / (1 - s)]) \quad (6)$$

式中 a_s 、 b_s 、 c 为经验系数, 其他参量意义同前。

式 (5) 中, 地形开阔度 V 可以表示为^[16]

$$V = \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \quad (7)$$

式中 α 为坡度。

任一天内某一网格点复杂地形下地形反射辐射

$Q_{\alpha\beta}$ 可以表示为^[10]

$$Q_{\alpha\beta} = Q \times \alpha_s \times (1 - V) \quad (8)$$

式中 α_s 为地表平均反照率, Valiente (1995)^[17] 给出的利用 NOAA-AVHRR 观测数据反演地表反照率的计算公式为:

$$\alpha_s = 0.545\rho_{CH1} + 0.320\rho_{CH2} + 0.035 \quad (9)$$

其中 ρ_{CH1} 、 ρ_{CH2} 为 AVHRR 通道 1 和 2 的观测值。其他参量意义同前。

2 贵州高原太阳总辐射模拟

贵州地处云贵高原, 介于 $103^\circ 36' \sim 109^\circ 35' E$ 、 $24^\circ 37' \sim 29^\circ 13' N$ 平均海拔在 $1\ 100\text{ m}$ 左右, 地貌复杂, 全省 92.5% 的面积为山地和丘陵, 是典型的山区地形。

本研究所用气象资料和 DEM 资料由贵州省气象局提供, 主要有: 1960~2000 年贵州省及周边 102 个气象站月平均常规气象要素观测资料以及 NOAA-AVHRR 观测资料, 10 个气象站的太阳辐射量资料。

2.1 研究方法

首先, 利用研究区域内 $1:25$ 万 DEM 数据, 从中提取经度、纬度及坡向、坡度、海拔等地形参数栅格数据, 计算出 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率每个网格点复杂地形下日天文辐射量及水平面的日天文辐射量, 再结合太阳总辐射模型中所需要的参数, 利用 ARCGIS 8.1 的空间数据分析功能和 NOAA-AVHRR 的观测资料, 求出每个网格点日太阳总辐射量。之后累加, 获得其逐月和年太阳总辐射总量, 借助地理信息系统 ARCGIS 8.1 生成 1~12 月和年太阳总辐射 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率的精细空间分布图。然后, 分别按照坡向、坡度和海拔进行统计, 分析坡向、坡度和海拔对太阳总辐射量的影响。

2.2 模型误差分析

对于水平面太阳总辐射, 由模式 (4), 经过分

析,单站全年模式考虑了拟合模型中经验系数的空间变化^[19],用来模拟贵州高原水平面太阳总辐射有很好的效果。模式的统计分析结果表明(模型系数及统计指标见表 1,其中样本数分别为:56586站:329个,56991站:225个,56778站:559个,56985

站:465个,57602站:212个,57649站:120个,57713站:353个,57816站:479个,57957站:473个,59431站:461个,这些样本为所有样本的总和),相关系数 R^2 为 0.86~0.96,平均绝对误差为 4.81 MJ/(m²·d),平均相对误差为 2%。

表 1 10个气象站单站全年模式水平面太阳总辐射拟合经验系数
Table 1 Coefficients in the horizontal global solar radiation simulation models of 10 stations

站名	昭通	威宁	昆明	蒙自	泸州	吉首	遵义	贵阳	南宁	桂林
a_g	0.16	0.15	0.18	0.23	0.11	0.13	0.13	0.15	0.15	0.13
b_g	0.65	0.61	0.53	0.46	0.65	0.55	0.60	0.56	0.57	0.61
R^2	0.91	0.95	0.92	0.86	0.96	0.94	0.94	0.91	0.95	0.95

模式(3)、(6)中的经验系数 a_g 、 b_g 、 c_g 、 a_d 、 b_d 、 c_d 需用实际观测资料来确定。对贵州省范围内,由于具有 Q_o 、 Q_d 观测资料的气象站比较少,在各种统计模式中,用分月模式(以 1、2…、12月各月分别建立模型)模拟水平面太阳直接辐射、水平面太阳散射辐射,模式(3)(模型系数及统计指标见表 2,样本数分别为 1月:204个,2月:176个,3月:204个,4月:178个,5月:201个,6月:200个,7月:200个,8月:162个,9月:201个,10月:198个,11月:200个,12月:169个,这些样本为所有样本的总和。)统计结果为:相关系数 R^2 为 0.66~0.94,平均绝对误差为 2.53 MJ/(m²·d),平均相对误差为 3%。模式(6)(模型系数及统计指标见表 3,样本数

分别为 1月:205个,2月:176个,3月:204个,4月:178个,5月:201个,6月:201个,7月:203个,8月:165个,9月:202个,10月:199个,11月:202个,12月:172个,这些样本为所有样本的总和。)统计结果为:相关系数 R^2 为 0.61~0.94,平均绝对误差为 2.95 MJ/(m²·d),平均相对误差绝对值为 2%。从表 2、表 3中可以看出, R^2 值在夏半年偏小,而冬半年偏大,这可能是由于 10个太阳辐射站所处位置和大气状况不同,夏半年各地天气状况差异较大,冬半年差异较小,因为在进行水平面太阳直接辐射、水平面太阳散射辐射的模拟时把 10个站所有样本按分月模式建立模型进行的模拟,因此导致夏半年 R^2 值偏小。

表 2 分月水平面太阳直接辐射拟合模式经验系数及统计指标
Table 2 Coefficients and statistics of monthly models for the horizontal direct solar radiation simulation

系数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
a	0.28	0.26	0.32	0.34	0.36	0.47	0.38	0.30	0.38	0.40	0.36	0.25
b	1.51	1.01	1.41	0.96	1.02	2.00	0.86	0.66	1.18	1.58	1.52	0.90
c	0.70	0.55	0.70	0.50	0.55	0.90	0.45	0.35	0.60	0.64	0.64	0.50
R^2	0.90	0.94	0.92	0.83	0.71	0.66	0.67	0.66	0.76	0.75	0.85	0.93

表 3 分月水平面太阳散射辐射拟合模式经验系数及统计指标
Table 3 Coefficients and statistics of monthly models for the horizontal diffuse solar radiation simulation

系数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
a	0.28	0.26	0.32	0.34	0.36	0.48	0.39	0.32	0.38	0.40	0.35	0.25
b	1.46	1.06	1.41	0.96	1.02	2.09	0.90	0.72	1.20	1.64	1.50	0.93
c	0.69	0.57	0.70	0.50	0.56	0.91	0.45	0.37	0.59	0.66	0.64	0.51
R^2	0.90	0.94	0.92	0.83	0.71	0.65	0.61	0.63	0.74	0.75	0.85	0.92

3 贵州高原太阳总辐射精细空间分布

3.1 太阳总辐射的空间分布

图 1(a)、(b)、(c)分别为贵州高原 1960~2000 年多年平均复杂地形下年、1月和 7 月太阳总辐射精细空间分布图。由图中可以看出, 贵州高原复杂地形下太阳总辐射年总量平均为 $814.6 \sim 5\,438.1 \text{ MJ/m}^2$, 在大娄山区, 云雾较多, 日照百分率偏低, 年太阳总辐射偏低, 西部的威宁、毕节、盘县、兴义地区海拔较高, 日照百分率较高, 年太阳总辐射也较高。大娄山、雷公山地区, 高山、盆地、河谷相间, 地形多变, 到达地面的太阳总辐射局地差异明显。坡度、坡向、地形遮蔽对多年平均复杂地形下太阳总辐射年

总量的影响较大, 复杂地形下年太阳总辐射的空间分布具有明显的地域分布特征, 纬向分布特征不明显。阳坡、海拔较高的地方太阳总辐射较大, 阴坡、海拔较低的地方太阳总辐射较小。图 2给出了贵州高原年总辐射量气候学计算分布图^[18], 两者宏观分布趋势基本一致。大娄山地区 $3\,000.0 \sim 3\,500.0 \text{ MJ/m}^2$, 贵阳 $3\,700.0 \text{ MJ/m}^2$ 左右, 威宁地区 $4\,000.0 \text{ MJ/m}^2$ 以上, 这也进一步验证了模拟结果的精度。但图 1(a)比图 2包含了更丰富的信息, 明显地反映了地形的影响。

贵州高原复杂地形下 1月太阳总辐射平均为 $32.9 \sim 394.1 \text{ MJ/m}^2$, 习水、桐梓、都濡、正安等北部山区, 1月处于滇黔静止锋锋后, 一般阴雨绵绵, 云量较高, 日照百分率明显偏低, 光能资源较差^[18], 太

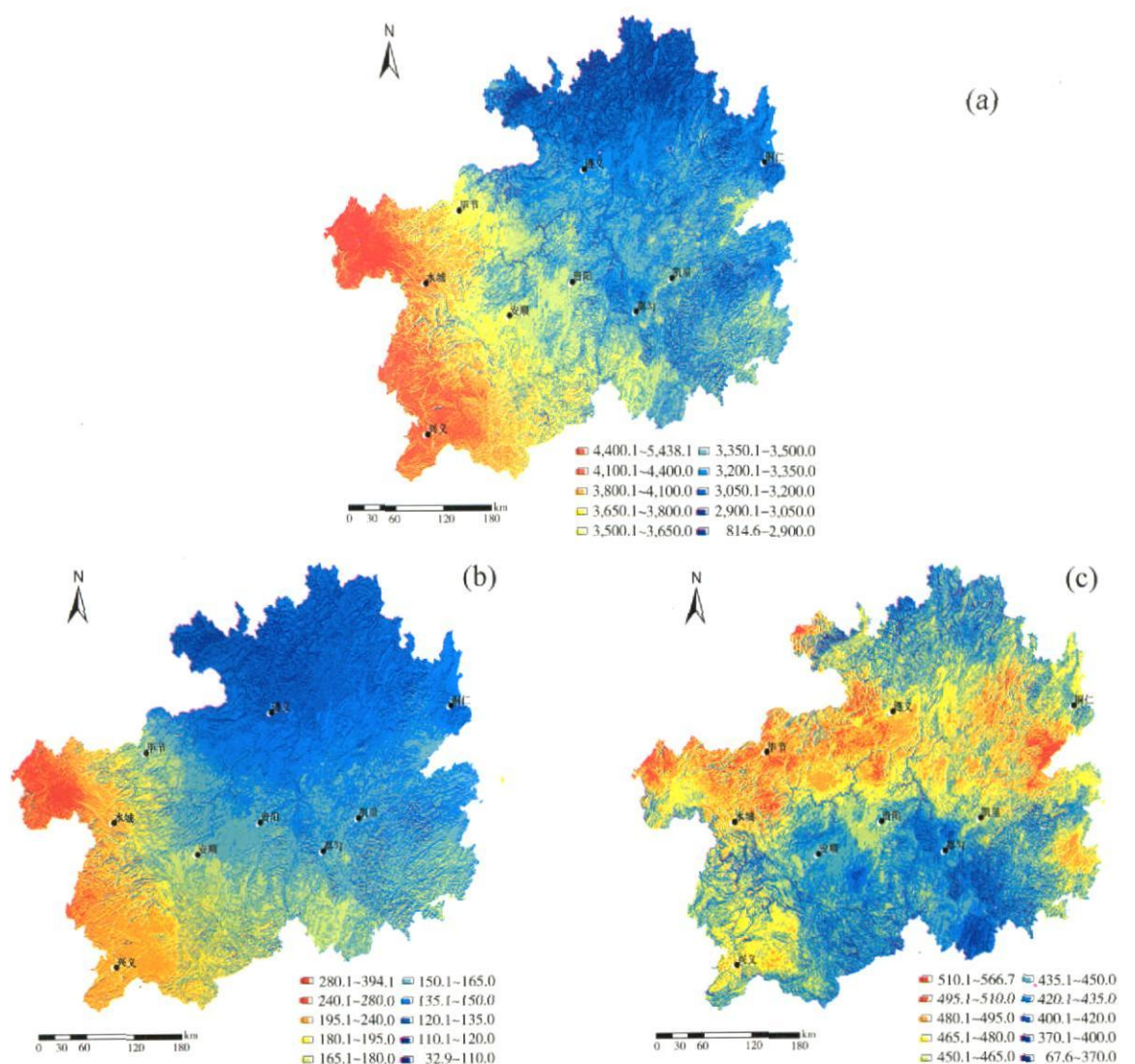


图 1 贵州高原 1960~2000 年多年平均复杂地形下太阳总辐射空间分布 (单位: MJ/m^2) (a) 年 (b) 1 月 (c) 7 月

Fig 1 Spatial distribution of normals of global solar radiation quantity over rugged terrains in the Guizhou plateau in 1960~2000(unit: MJ/m^2) (a) year (b) January (c) July

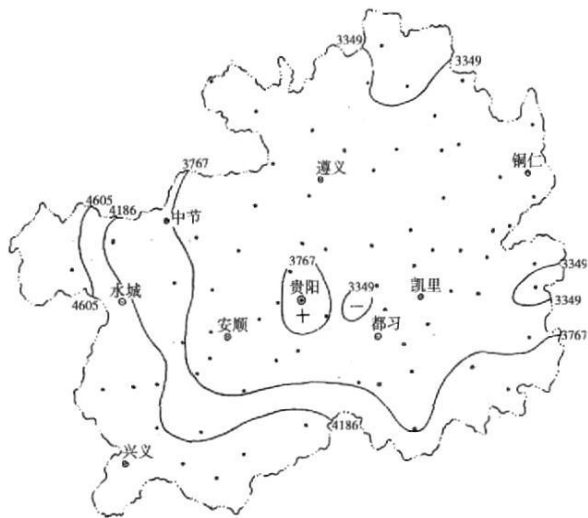


图 2 贵州高原年总辐射量的空间分布 (单位: MJ/m²)
Fig 2 Spatial distribution of nomals of global solar radiation quantity in the Guizhou plateau (unit MJ/m²)

阳总辐射偏低,是整个贵州高原的最低值区,为 32.9~110.0 MJ/m²;西北部的威宁一带,1月一般处于滇黔静止锋锋前,天气晴好,日照百分率偏大,太阳总辐射偏高,为 230.1~394.1 MJ/m²。坡度、坡向、地形遮蔽对太阳总辐射的影响显著,太阳总辐射大值分布在南坡或高山,小值分布在北坡或深谷。

由于太阳高度的增大,贵州高原复杂地形下 7 月太阳总辐射已较 1 月明显增加,平均为 67.6~566.7 MJ/m²,7 月太阳位于北半球,太阳高度角较高,地形对太阳总辐射的影响相对要小,但由于 7 月水平面太阳总辐射的强度相对较大,因此,局地地形的影响仍然显著。

3.2 太阳总辐射随参数的变化

表 4 为 26.7°N 坡度为 3°,海拔为 1 800 m 不同坡向复杂地形下太阳总辐射的年变化情况。由表可见,1~12 月及年总量太阳总辐射偏南坡最高,偏北坡偏低。这与实际情况基本相符,不同坡向之间的差异 1 月最大,7 月最小;年较差偏北坡较大,偏南坡较小 (坡向从正北开始,顺时针方向度量,即:正北为 0°,正东为 90°,正南为 180°,正西为 270°)。

表 5 为 26.1°N 坡向为 135°,海拔为 900 m 不同坡度复杂地形下太阳总辐射的年变化情况。由表可见,1~12 月及年总量太阳总辐射随坡度的增加开始时逐渐增大,到达一定坡度后又开始减小,辐射最大值的坡度被称为最热坡,本研究中这个值介于 20°~30°。太阳总辐射随坡度的变化比较复杂,这只是其中的一种情况,不同地区的实际情况还要具体分析。

表 4 太阳总辐射 (MJ/m²)随坡向的变化

Table 4 The change of global solar radiation (MJ/m²) with aspect

坡向 (°)	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年总量
0	198.8	225.0	352.8	413.8	415.4	377.5	496.3	484.2	351.3	262.6	222.7	196.9	3 997.4
90	200.7	227.5	356.1	416.4	416.7	377.7	496.3	483.2	351.3	264.2	224.8	199.0	4 013.8
180	210.9	238.5	371.3	429.9	426.7	382.6	498.8	487.7	356.0	269.3	231.9	207.1	4 110.6
270	197.5	223.5	350.0	411.2	413.6	376.6	495.8	482.7	350.1	262.3	222.1	196.2	3 981.5

表 5 太阳总辐射 (MJ/m²)随坡度的变化

Table 5 The change of global solar radiation (MJ/m²) with slope

坡度 (°)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年总量
0	132.0	147.7	225.2	301.8	338.4	346.5	475.9	472.0	322.5	228.2	167.8	135.5	3 293.4
5	128.5	145.8	228.8	306.4	344.2	343.5	475.5	474.2	325.5	223.7	165.4	132.1	3 293.5
10	132.7	148.0	226.1	304.0	339.4	347.9	477.3	472.3	320.4	228.5	167.6	135.7	3 299.9
15	137.0	155.2	225.9	300.2	342.0	364.3	494.7	486.1	348.9	246.7	177.6	142.1	3 420.5
20	133.3	148.3	224.6	298.3	339.8	349.5	476.2	473.6	327.0	231.3	170.2	138.2	3 310.4
30	138.0	155.6	245.9	327.6	360.0	358.4	510.9	492.4	328.7	227.7	171.7	140.1	3 456.9
40	132.2	146.8	220.2	291.2	334.3	345.3	469.6	467.8	326.0	230.4	169.5	137.7	3 270.9
50	128.5	145.8	228.4	305.6	342.5	342.1	474.1	472.9	324.9	223.7	165.3	132.0	3 285.7
60	130.1	146.4	227.0	304.4	339.5	343.2	476.1	470.9	319.4	223.7	165.2	133.1	3 278.8
70	128.3	143.9	221.8	298.8	332.5	337.8	469.4	464.4	313.3	220.8	162.4	130.7	3 224.0
80	134.3	150.6	238.0	312.8	340.5	340.2	487.5	470.3	313.2	218.4	166.4	135.2	3 307.4

表 6 为 27.3°N, 坡度为 1°, 北坡, 复杂地形下不同海拔太阳总辐射的年变化情况。由表可见, 1~12 月及年总量太阳总辐射随海拔的增加而增大。

4 讨论

1. 本文在前人研究的基础上, 对以前的模型进行了一些改进, 考虑了坡度、坡向和地形相互遮蔽对复杂地形下天文辐射的影响, 基于数字高程模型 (DEM) 数据, 研制了以复杂地形下天文辐射为起始数据的复杂地形下太阳总辐射分布式模型, 在模型中还考虑了散射辐射的各向异性及坡地反射辐射对复杂地形下太阳总辐射的影响。
2. 由于坡度、坡向及地形遮蔽等局地地形因子

的影响, 使得贵州高原复杂地形下太阳总辐射空间差异明显, 复杂地形下年太阳总辐射的空间分布具有明显的地域分布特征, 纬向分布特征不明显。地形对复杂地形下太阳总辐射的影响是不容忽视的。

3. 尽管该方法与传统方法相比, 进一步反映了局地地形因子对复杂地形下太阳总辐射的影响。但该模拟还有一些不足, 在统计模型因子的选取上还有待进一步改进; 进一步扩充遥感资料的应用, 可能对模拟结果的改进会有一定的作用。
4. 在缺乏山地坡面考察资料的情况下, 借助 GIS 遥感等现代空间信息技术, 以分布式气象模型为核心, 借助以常规气象站观测资料为主的物理经验统计模型是现阶段实现复杂地形下细网格太阳辐射资源计算的可行途径之一。

表 6 太阳总辐射 (MJ/m²) 随海拔的变化
Table 6 The change of global solar radiation (MJ/m²) with height above sea level

海拔 (m)	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年总量
500	155.1	160.3	221.5	284.6	328.7	349.0	465.3	453.5	350.7	262.8	202.1	170.1	3 403.9
700	155.0	166.6	243.0	306.2	348.6	357.2	464.0	452.2	351.9	263.2	204.1	168.5	3 480.6
900	153.6	164.6	240.1	304.8	345.1	352.2	460.5	450.2	346.5	258.9	200.9	166.3	3 443.8
1 100	155.8	174.3	264.9	329.3	359.0	348.8	450.1	446.0	340.4	252.9	197.8	166.8	3 486.0
1 300	157.1	178.6	274.9	340.1	378.0	355.4	456.5	456.0	336.9	255.1	198.8	170.2	3 557.6
1 500	160.7	182.5	284.4	349.6	371.6	350.8	454.4	449.7	330.5	248.9	198.2	168.6	3 549.9
1 700	180.2	206.2	324.7	389.2	397.6	366.8	471.3	464.5	337.9	258.1	211.6	184.7	3 792.7
1 900	204.3	232.8	364.1	426.8	425.2	384.3	485.3	475.1	348.8	273.5	229.6	206.7	4 056.6

参考文献 (References)

[1] Fu Baopu. Discuss on the global solar radiation over sloping fields [J]. J Nanjing Univ (Natural Science Edition) 1958 2: 47~82 [傅抱璞. 论坡地上的太阳辐射总量 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 1958 2: 47~82]

[2] WengDuming. Radialization Climate in China [M]. Beijing Meteorological Press 1997: 250~278 [翁笃鸣. 中国辐射气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1997: 250~278]

[3] LiZhanqing WengDuming. A calculation model of global radiation over mountain [J]. Acta Meteorologica Sinica 1988 46 (4): 461~468 [李占清, 翁笃鸣. 丘陵山地总辐射的计算模式 [J]. 气象学报, 1988 46 (4): 461~468]

[4] Hetrick W A, Rich P M, Barnes F J et al. GIS based solar radiation flux models [A]. In: Proceedings of the ASPRS/ACSM Annual Convention [C]. Bethesda MD 1993 (3): 132~143

[5] Li Xia, Cheng Guodong, Chen Xianzhang et al. The amelioration of solar radiation model in discretional condition [J]. Chinese Science Bulletin 1999 44 (9): 993~998 [李新, 程国栋, 陈贤章, 等. 任意条件下太阳辐射模型的改进 [J]. 科学通报, 1999 44 (9): 993~998]

[6] Zhu Lifan, Tian Yongzhong, Yue Tianxiang et al. The simulation of solar radiation on ground surface based on 1 km grid-cells [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2005 21 (5): 16~19 [朱莉芬, 田永中, 岳天祥, 等. 基于 1 km 栅格的地表太阳辐射模拟 [J]. 农业工程学报, 2005 21 (5): 16~19]

[7] Dozier J. Outcalt S I. An approach to energy balance simulation over rugged terrain [J]. Geographic Anal 1979 11: 65~85

[8] Lalit Kumar, Andrew K. Skidmore and Edmund Knowles. Modeling Topographic Variation in Solar Radiation in a GIS Environment [J]. Geographical Information Science 1997 11 (5): 475~497

[9] Corripio J G. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and so lar radiation modeling in mountainous terrain [J]. Geographical Information Science 2003 17: 1~23

[10] Zuo Dakang, Zhou Yunhua, Xiang Yueqin et al. On Surface Radiation [M]. Beijing: Science Press 1991 [左大康, 周允华, 项月琴. 地球表层辐射研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1991]

[11] Yuan Shujie. Study on Heat Resource in Guizhou Province Based

- on GIS [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007 [袁淑杰. 基于GIS的贵州省热量资源研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007]
- [12] Yuan Shujie, Gu Xiaoping, Miao Qilong, et al. Distributed Models of Astronomical Solar Radiation over Rugged Terrains Based on GIS [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 577~583 [袁淑杰, 谷小平, 缪启龙, 等. 基于GIS的复杂地形下天文辐射分布式模型[J]. *山地学报*, 2007, 25(5): 577~583]
- [13] Louche A, Norton G, Poggi P, et al. Correlations for direct normal and global horizontal irradiation on a French Mediterranean site [J]. *Solar Energy*, 1991, 46(4): 261~266
- [14] Gu Xiaoping, Yuan Shujie, Shi Lan, et al. Study on Distributed Simulation of Diffuse Solar Radiation over Complex Terrains Based on DEM [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(1): 143~150 [谷小平, 袁淑杰, 史岚, 等. 基于DEM的复杂地形下太阳散射辐射分布式模拟[J]. *高原气象*, 2009, 28(1): 143~150]
- [15] Hay J E, McKay D C. Estimating solar radiance on inclined surfaces: a review and assessment of methodologies [J]. *Int J Solar Energy*, 1985, 3: 203~240
- [16] Liu B Y., Jordan R C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator [J]. *Trans ASHRAE*, 1962, 67: 526~541
- [17] Valiente J A, Nunez M, Lopez-Baeza E, et al. Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels [J]. *Int J Remote Sens*, 1995, 16(6): 1147~1166
- [18] “Agroclimatic Regionalization in Guizhou Province” Compiling Group. *Agricultural Divisions Series in Guizhou Province (Province-level volumes) Agroclimatic Regionalization in Guizhou Province* [M]. Guiyang: Guizhou People Press, 1989 [《贵州省农业气候区划》编写组. 贵州省农业区划丛书(省级卷)贵州省农业气候区划[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1989]

The Elaborate Spatial Distribution of Global Solar Radiation over Complex Terrains in Guizhou Plateau

GU Xiaoping^{1, 2}, YUAN Shujie^{3, 1}, SHI Lan⁴, MIAO Qilong⁴, KANG Weimin¹,
QIU Xinfa⁴, WANG Fuzeng⁵

(1. Guizhou Key Lab of Mountainous Climate and Resources, Guiyang 550002, China; 2. Institute of Plateau Meteorology, CMA, Chengdu 610072, China;
3. Hebei Laboratory for Meteorology and Eco-Environment, Shijiazhuang 050021, China;
4. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
5. College of Information Science and Technology, Agriculture University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract: Due to the effect of local terrain factors such as height above sea level, slope, aspect and terrain inter-shielding, the solar radiation energy accepted over every part of mountainous regions has very great difference. The previous models have been improved in this paper on the basis of past studies. The influence of slope, aspect and terrain inter-shielding on astronomical solar radiation over complex terrains (CT) is considered. A distributed model, which is based on astronomical solar radiation over CT for calculating global solar radiation (GSR) quantities over CT, is developed. The diffuse radiation's anisotropism and the effect of reflection of sloping field on global solar radiation are calculated in this model. Using this model, the elaborate distribution of GSR with resolution of 100 m \times 100 m by a DEM and meteorological observations data in the Guizhou Plateau are generated. The results are as follows: (1) The influence of the slope, aspect and terrain inter-shielding on GSR's spatial distribution over CT is great in Guizhou Plateau, and the effect of landform on GSR over CT should be considered. (2) In default of practical observation data in side of the mountain, to build a physical empirical statistics model mainly by observation data at conventional meteorological station, it is a feasible approach to radiation resource calculation of refined net.

Key words: Guizhou Plateau; Global solar radiation; complex terrains; digital elevation model; distributed simulation