第36卷第1期 2013年2月

仇月萍,邓文君,李希茜,等. 2013. 起伏地形下河南省太阳散射辐射的分布式模拟[J]. 大气科学学报,36(1):88-95. Qiu Yue-ping, Deng Wen-jun, Li Xi-xi, et al. 2013. Distribution modeling of diffuse solar radiation over rugged terrain in Henan Province [J]. Trans Atmos Sci,36(1):88-95. (in Chinese)

起伏地形下河南省太阳散射辐射的分布式模拟

仇月萍1,2,邓文君1,李希茜1,王蓉1,王磊1

(1. 国家海洋局 南海预报中心, 广东 广州 510310; 2. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要:利用河南省及周边145个气象站1961—2000年常规气象观测资料和河南省1:25万 DEM 数据,充分考虑起伏地形下太阳散射辐射的天空因素与地面因素后,基于分布式开阔度模型和天文辐射模型,实现了起伏地形下河南省太阳散射辐射的分布式模拟。计算了100m×100m分辨率下河南省1—12月气候平均太阳散射辐射及多年平均年散射辐射总量的空间分布。结果表明:在充分考虑经验系数的时空分布特征后,模拟精度有了进一步提高。与郑州站的观测资料对比验证表明,模拟精度较高,年平均绝对误差为3.06 MJ·m⁻²,年平均相对误差为1.67%;局地地形对太阳散射辐射的影响比较明显;通过个例年验证对模型性能和模拟结果进行考察,年平均相对误差不足11%。综上表明模型的时空模拟性能良好。

关键词:河南;散射辐射;分布式模拟;起伏地形

中图分类号: P422.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7097(2013)01-0088-08

Distribution modeling of diffuse solar radiation over rugged terrain in Henan Province

QIU Yue-ping^{1,2}, DENG Wen-jun¹, LI Xi-xi¹, WANG Rong¹, WANG Lei¹

(1. South China Sea Marine Prediction Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China;
 2. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on DEM data of 1:250 000 scale and the data from 145 routine observation meteorological stations in Henan Province from 1961 to 2000, after fully considering the sky and rugged terrain elements, the paper realized the simulation of the spatial distribution of diffuse solar radiation (DSR) over rugged terrain in Henan Province with the extraterrestrial solar model and the terrain openness model. Monthly DSR and annual DSR at the resolution of 100 m × 100 m over the rugged terrains in Henan Province were calculated. The simulated results show that, after fully considering the spatial-temporal characteristic coefficients, the simulated accuracy can be improved. The observation data from Zhengzhou indicate that the accuracy is high. The annual average error is 3. 06 MJ \cdot m⁻² and the annual absolute relative bias error is 1. 67%. The local terrain can affect the DSR obviously. The annual average error of case year test is less than 11%. In summary, this model is good in spatial-temporal simulation. **Key words**: Henan; diffuse solar radiation; distribution modeling; rugged terrains

0 引言

散射辐射是太阳总辐射的重要分量,也是地表

辐射平衡的重要分量之一,对各地的气候形成起着 重要作用(王冰梅和翁笃鸣,1989)。研究散射辐射 的气候计算方法及其分布特征,对于揭示气候成因、

收稿日期:2011-01-22;改回日期:2012-02-14

基金项目:中国气象局气象新技术推广重点项目(CMATG2006Z10);江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050102) 作者简介:仇月萍(1983—),女,江苏无锡人,硕士,研究方向为 GIS 在气象上的应用,qiuqiu0227@ hotmail. com. 开发气候资源都具有十分重要的理论意义和应用价 值(曾燕等,2008;邱新法等,2009)。鉴于其重要 性,散射辐射一直是太阳辐射研究中所探讨的重要 内容之一。

然而散射辐射复杂的产生机理,使得从理论上 精确计算由天穹各散射点到达实际起伏地形下的散 射辐射量一直是比较困难的,虽然大气物理学与气 候学中对于散射辐射的研究已经取得了相当的进展 (翁笃鸣和罗哲贤,1990;翁笃鸣,1997),但仍然存 在许多难点有待解决。

近年来研究的水平面散射辐射计算方法主要有 理论模式和经验模式两类。理论模式具有坚实的物 理基础,但模式的结构非常复杂,且模式的输入参数 中包括臭氧厚度、气溶胶含量、大气可降水量等很难 获得的变量,这限制了理论模式的推广应用(李慧 等,2007);经验模式结构简单,主要有日照百分率 模式、成份分解模式、云量模式(翁笃鸣,1964;祝昌 汉,1984)。日照百分率、云量等常规气象观测资料 建立的辐射经验估算模式的使用,使估算更多地区 的辐射量成为可能。与水平地面有所不同,对于实 际起伏地形的散射辐射状况,除受天文、气象、大气 物理等因子影响以外,还要受到山区坡地的坡向、坡 度以及地形起伏所造成的互相遮蔽的影响,因此地 形的作用对散射辐射的影响不可忽略。曾有大量的 地形对散射辐射理论研究(傅抱璞,1983;李占清和 翁笃鸣,1988;李新等,1999),但由于实际地形参数 难以获得,长期以来仅对个别山区、小尺度范围内进 行了一些探索和研究。邱新法等(2009)用全国 1:100 万 DEM 数据,以1 km ×1 km 的分辨率,系统 地探讨了起伏地形下,全国天文辐射、可照时间、直 接辐射、散射辐射的空间分布,提出了一系列的起伏 地形下太阳辐射资源空间扩展的分布式模型。起伏 地形下由于地形因子的存在使得太阳辐射的计算尤 为复杂。国外, Dozier and Outcalt (1979) 发展了利 用数字高程模型模拟太阳辐射的方法,使模拟精度 更高,空间性更强,并目 Dozier and Outcalt(1979)和 Dozier and Frew(1990)开发出能显著减少大数据量 运算时间的快速算法。对于起伏地形(坡地、山区) 的辐射研究,大都由于受地形数据、计算手段、计算 效率等因素的限制,多是针对单一、无限长的坡面 (倾斜面)进行的,如环日模式(Diffie and Beckman,1974)、各向同性模式(Liu and Jordan,1963)、 各向异性模式(Hay,1979)等。在这些模式中,一般 只考虑单一坡面自身的遮蔽作用,对周围地形之间 的相互遮蔽作用往往无法全面计算。地形对散射辐 射的影响依然有待于进一步研究。

GIS 技术的发展和 DEM 数据的推广应用,为快 速生成坡度、坡向等局地地形参数提供了新的手段。 近十多年来,应用 GIS 技术来研究地形对太阳辐射 的影响这方面有了一定的理论基础。曾燕等 (2005a,2005b)对于太阳能资源分布式模拟的一系 列研究,建立了辐射资源的分布式模型,将 GIS 技 术和 DEM 数据充分应用到了研究辐射的空间分布 特征(宏观特征和微观特征)。

河南位于中国中东部、黄河中下游(110°21′~ 116°39′E,31°23′~36°22′N)之间,全省地形呈西高 东低之势,省境之西耸立着太行山和豫西山脉,中部 屹立着巍峨峻峭的中岳嵩山,省境东部为辽阔的黄 淮平原。

鉴于地形对散射辐射影响的复杂性,本文通过 1:25 万 DEM 数据作为地形数据的综合反映,以地 理信息系统为处理平台,全面考虑地形对散射辐射 的影响来实现河南省太阳散射辐射的分布式模拟, 计算了起伏地形下河南省高分辨率的太阳散射辐射 各月空间分布。

1 资料来源及处理

资料主要包括:1)我国1:25万比例尺100 m× 100 m分辨率的 DEM 数据;2)由中国气象局国家 气象中心和河南气象局提供的气象资料、辐射资料 (包括总辐射,散射辐射)。取河南省及其周边共16 个辐射站资料(太原、济南、郑州、西安、宜昌、武汉、 南京、合肥、南阳、安康、固始、准阴、庐山、延安、安 阳、莒县),其中具有散射辐射观测资料的有8个 (太原、济南、郑州、西安、宜昌、武汉、南京、合肥), 具有总辐射观测资料的有16个,月平均日照百分率 资料取河南省及其周边共145个气象站。所用资料 均为1961—2000年,所有要素的时间单位为月。在 应用原始资料前进行了严格的质量控制,并剔除了 其中的无效数据。并将月总量辐射资料转换为月平 均日总量资料(即:在建模时采用月平均日总量辐 射资料)。

2 起伏地形下太阳散射辐射分布式模型的建立

2.1 起伏地形下散射辐射分布式模型

影响太阳散射辐射的因子众多:1)天文与地理 因子(如太阳高度角等);2)气象因子(如云量等); 3)大气物理因子(如大气消光、大气透明度、大气浑 浊度等);4)地形因子(如海拔高度、坡度、坡向、遮 蔽状况、地表反射率等)。各因子对散射辐射的作 用机理也都不一样,导致散射辐射产生的机理较为 复杂。为此构造实际地形下散射辐射分布式模型 (曾燕等,2008),

 $Q_{d\alpha\beta} = Q_d [(Q_b/Q_0)R_b + V(1 - Q_b/Q_0)]_{\circ}(1)$ 式中: $Q_{d\alpha\beta}$ 为复杂地形下散射辐射月总量,体现了地 面因素对太阳散射辐射空间分布的影响; Q_d 为水平 面散射辐射月总量,体现了天空因素对太阳散射辐 射的影响; Q_0 为水平面上的天文辐射月总量; Q_b 为 水平面太阳直接辐射月总量;V为地形开阔度; $R_b = \frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0}$ 为转换因子,是复杂地形下天文辐射月总量

 $Q_{0\alpha\beta}$ 与水平面天文辐射月总量 Q_0 之比。(1)式将影响太阳散射辐射空间分布的天空因素与地面因素耦合在一起。

2.2 水平面散射辐射分布式模拟

$$Q_{\rm d} = Q \Big[a + (1 - a) \exp\left(\frac{-bs^c}{1 - s}\right) \Big] = Q \cdot f_{\rm do} \qquad (2)$$

其中:Q为水平面太阳总辐射月总量;f。为散射分量

表1 水平面散射辐射 Q_d 拟合模式经验系数

Table 1 Model coefficients for horizontal diffuse solar radiation simulation

因子,

$$f_{\rm d} = a + (1 - a) \exp\left(\frac{-bs^c}{1 - s}\right)_{\circ}$$
 (3)

式中: f_a 定义为各月散射分量,反映散射辐射的多 少;s 为日照百分率;a、b、c 为经验系数,系数如表1 所示。(3)式有明确的物理意义,在全阴天时,s = 0,散射分量为 f_a 趋近于1,即此时太阳辐射几乎全 部由散射组成;全晴天时, $s \rightarrow 1$,太阳辐射主要由直 接辐射组成;散射分量达到极小值, $f_a \rightarrow a$ 。符合水 平面总辐射为直接辐射和散射辐射之和。复杂地形 下的日照百分率由常规气象站的气候平均值通过 IDW(inverse distance weight)插值而得,由于具有 Q_a 观测数据的站点比较少(8 个),采用将所有气象 站 Q_a 数集群的方式来建立模型。

本文在以往研究的统一模型和分月模型(曾燕 等,2005b)的基础上,考虑到了经验系数的时间空 间的变化特征,采用了分站分月模型来拟合经验系 数。表1列出了水平面散射辐射 Q_d 拟合模式经验 系数。

月份	太原		济南		西安		郑州					
	a	b	С	а	b	С	а	b	с	a	b	С
1月	0.242 5	0.4898	-0.134 9	0.215 8	0.4414	-0.029 1	0.3195	0.637 8	0.325 0	0.287 6	0.5685	0.1271
2 月	0.247 3	0.527 1	-0.020 3	0.2592	0.5155	-0.082 2	0.3397	0.663 0	0.308 9	0.313 4	0.664 5	0.3202
3 月	0.2437	0.408 4	-0.287 8	0.2664	0.5174	0.204 4	0.414 9	0.8019	0.312 6	0.263 1	0.5149	0.2202
4 月	0.297 6	0.585 8	0.145 3	0.3508	0.6713	0.1858	0.356 2	0.632 3	0.147 6	0.301 5	0.432 5	-0.0670
5 月	0.2702	0.374 1	-0.7709	0.258 1	0.497 0	-0.063 4	0.236 1	0.3876	-0.274 5	0.223 8	0.398 5	-0.188 1
6月	0.253 6	0.5784	-0.064 0	0.265 8	0.6673	0.282 3	0.286 2	0.478 9	-0.284 7	0.276 8	0.5908	0.081 1
7 月	0.268 6	0.733 4	0.142 5	0.282 5	0.8513	0.5306	0. 194 1	0.4587	-0.140 2	0.184 6	0.649 2	0.4711
8月	0.2127	0.612 0	0.155 2	0.245 4	0.5938	0.1624	0.273 8	0.5512	-0.1193	0.2417	0.6079	0.258 2
9月	0.2637	0.7664	0.248 2	0.281 8	0.8103	0.242 1	0.254 1	0.646 2	0.122 6	0.2927	0.7508	0.3157
10 月	0.254 3	0.578 5	-0.065 5	0.276 8	0.6551	-0.002 4	0.2401	0.5575	0.092 9	0.276 8	0.5908	0.081 1
11 月	0.211 2	0.398 8	-0.4109	0.332 4	0.738 4	-0.026 9	0.328 1	0.625 2	0.064 3	0.288 2	0.605 3	-0.026 4
12 月	0.250 5	0.528 1	0.0200	0.260 5	0.4962	-0.1754	0.3164	0.627 9	0.254 1	0.277 6	0.5724	-0.000 5
日八	宜昌		武汉		合肥		南京					
月份	а	b	С	а	b	С	а	b	с	а	b	С
1月	0.346 2	0.971 0	0.485 5	0.321 8	0.689 0	0.2501	0.2906	0.7503	0.303 5	0.2814	0.6927	0.176 5
2 月	0.346 2	0.971 0	0.485 5	0.321 8	0.6891	0.2501	0.398 5	1.7257	0.738 2	0.398 5	1.7257	0.738 2
3 月	0.346 2	0.971 0	0.485 5	0.321 8	0.6891	0.2501	0.3039	0.693 2	0.203 3	0.289 8	0.746 1	0.245 2
4 月	0.3354	0.7879	0.308 4	0.3508	0.7774	0.318 5	0.349 0	0.756 0	0.235 1	0.284 2	0.717 2	0.261 8
5 月	0.301 6	0.662 0	0.1926	0.321 8	0.6890	0.2501	0.364 8	0.8197	0.1933	0.368 4	0.9176	0.237 6
6月	0.324 5	0.8237	0.3123	0.321 8	0.6890	0.2501	0.247 3	0.5636	0.144 3	0.2906	0.7503	0.303 5
7 月	0.2200	0.648 6	0.244 4	0.284 2	0.604 8	0.126 9	0.242 3	0.628 8	0.202 8	0.243 1	0.628 5	0.208 5
8月	0.305 5	0.798 4	0.325 5	0.285 4	0.5695	0.3309	0.2073	0.429 1	-0.000 8	0.212 8	0.472 5	0.079 8
9月	0.311 6	0.8403	0.343 2	0.255 3	0.5705	0.1876	0.076 5	0.435 8	0.137 0	0.259 8	0.745 6	0.3633
10 月	0.311 8	0.841 0	0.3374	0.3037	0.735 5	0.242 9	0.316 1	0.8606	0. 191 2	0.316 0	0.9301	0.2637
11 月	0.3191	0.762 4	0.275 3	0.297 5	0.6893	0.1994	0.3071	0.688 9	-0.006 9	0.300 9	0.926 9	0.2737
12 月	0.344 3	0.943 2	0.447 0	0.284 2	0.604 8	0.1269	0.3596	1.092 9	0.361 0	0.316 8	0.6925	-0.045 0

2.3 水平面总辐射的分布式模拟

由于具有水平面太阳总辐射 Q 观测资料的气象站数量有限(仅 16 个),大多数气象站只有日照百分率、云量等常规观测资料,应用公式(2)来拟合太阳散射辐射还必须先获得水平面总辐射量。若直接采用该观测资料通过内插获得全省 100 m×100 m分辨率的太阳总辐射量 Q 的空间分布显然是非常粗糙的。采用如下模型计算水平面太阳总辐射量 Q:

$$Q = Q_0 (a_G + b_G \cdot s)_{\circ} \tag{4}$$

式中: Q_0 为水平面天文辐射量; $a_G \ b_G$ 为经验系数;s为日照百分率。

参考曾燕等(2005a)的方法,根据9个气象站 太阳总辐射和日照百分率资料拟合获得各站水平面 太阳辐射拟合的经验系数 *a*_G、*b*_G,采用 IDW 插值法 将这16个站水平面太阳总辐射拟合的经验系数进 行空间内插,生成河南省水平面太阳总辐射拟合经 验系数 *a*_G、*b*_G 空间分布。

通过(2)式拟合水平面散射辐射,模拟精度对 比分析如表2所示,表2列出了不同数据集群方案 下, Q_d 估算结果及统计分析指标。统计分析指标包 括:平均绝对误差 MABE (mean absolute bias error);平均相对误差绝对值 MARBE (mean absolute relative bias error)。

表 2 水平面散射辐射 Q_d 估算模式统计分析

 Table 2
 Statistics of different models for the horizontal diffuse solar radiation simulation (Different models are established based on different datasets as input)

模式名称	模式数量	$MABE/(MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	MARBE/%
统一模式	1	0. 63	9.81
分月模式(平均)	12	0. 61	9.45
分站分月模式	96	0. 53	8.42

2.4 地形开阔度分布式模型

实际起伏地形中,山地接收来自天空质点的散射辐射与周围山地的遮蔽作用有关。参考曾燕等(2008)的方法,以河南100m×100m分辨率的DEM数据作为地形的综合反映,计算河南省起伏地形下的开阔度分布,由图1可以明显看出:在100m×100m的分辨率下,河南地形开阔度的非地带性空间分布特征非常明显。地形越平坦,开阔度值越大,说明地形的遮蔽作用越小。河南地势西高东低,东部是豫东大平原,山地和丘陵主要分布在

西部和南部,西北部是太行山丘陵,豫西山地丘陵是 秦岭山系东段,呈扇形向东北、东、东南伸展,受地形 起伏程度的影响,总体呈现西部地区地形开阔度低 于东部地区,太行山地区地形开阔度低于北部边缘 山区的分布规律。地形高度起伏较大的山区,地形 环境复杂,受到山区地形本身和周围地形遮蔽的影 响,地形开阔度数值为0.721~0.917;平原、盆地或 高原地区受地形遮蔽的影响很小,地形开阔度值为 0.918~1.000。开阔度的分度脉络基本上和地形分 布相一致。

3 起伏地形下河南太阳散射辐射的分 布式模拟

3.1 起伏地形下河南太阳散射辐射的空间分布

根据 DEM 数据,参考曾燕(2005b)的方法算得 天文辐射的空间分布。由 145 个气象站 1961— 2000 年逐月日照百分率观测资料,统计获得各站 1—12 月日照百分率的气候平均值,并采用 IDW 插 值法将这 145 个站 1—12 月日照百分率进行空间内 插,生成河南省 1—12 月日照百分率空间分布。结 合(1)—(4)式和地形开阔度的分布式模拟结果,即 可获得 1—12 月起伏地形下河南省太阳散射辐射量 的空间分布。

起伏地形下的散射辐射与直接辐射相比分布较 均匀,即变化幅度较小。从图2可见起伏地形下的 河南散射辐射量从豫中逐渐向四周递减的宏观空间 分布特征,这是天气气候、云量、大气透明度、地理因 子等共同作用的结果。而局地地形因子的影响也不 容忽视,嵩山附近由于地形影响,开阔度小从而形成 了散射辐射中高值区中的一个低值区。除了嵩山低 值区外,有三个低值区,分布于西北的太行山山区、 豫西的秦岭山地和南部的桐柏—大别山山区。豫西 山地丘陵是秦岭山系东段,向东北、东、东南呈扇形 伸展的地形导致开阔度较小,山川之间相互遮蔽,从 而散射出现较低值。这些地形起伏较大的山区对散 射辐射的局地地形影响表现尤为明显。河南省年散 射辐射总量的突出特点是从太行山前丘陵向伏牛山 东麓丘陵折向西南到伏牛山南侧山地、南阳盆地西 南部,形成了一条东北西南向的年散射辐射量的低 值带。总的来说,河南省多年气候平均散射辐射的 年总量为2504 MJ·m⁻²,在太行山和豫西山区的 零星地区散射辐射年总量在2000 MJ·m⁻²以下。

上述年总辐射量的分布形势与夏季西太平洋副 热带高压(简称副高)的分布以及地形有密切关系。



图 1 河南省地形开阔度的分布

Fig. 1 Distribution of terrain openness in Henan Province

从表3可见,夏季河南月散射辐射值较大,冬季较 小,春季和秋季介于冬夏之间。夏季特别是6月中 旬到8月中旬副高脊线北跳以后,外围588 dagpm 等值线伸至河南省,呈东北西南向,其平均位置与年 总辐射量低值带大体一致。由于副高西北边缘,常 有西南气流带来充沛的暖湿空气与随西风带东移的 低槽带来的冷空气相遇,加上伏牛山、太行山的抬升 作用,使山地的迎风面和山前丘陵平原地带的云量 增多,特别是低云量增多,日照减少,总辐射受到削 弱,因而形成低值带,而豫东平原和豫西山地,或由 于副高控制或由于副高西北边缘到达的机会较少, 因而云量较少,日照相对较多,形成年总辐射量高值 带(区)。

3.2 太阳散射辐射的局地分布规律

从地理因素和局地地形因素分析,影响月平均 太阳散射辐射空间分布的要素有经度、纬度、坡度、 坡向、遮蔽度等。为了分析地形因素对散射辐射空 间分布的影响,对河南100m×100m分辨率下1月、

表 3 起伏地形下河南省气候平均月散射辐射模拟特征量 统计

 Table 3
 Statistics of average monthly diffuse solar radiation simulated quantity over rugged terrains in Henan

	Province			MJ • m ²
月份	最小值	最大值	平均值	标准差
1月	35	168	129	7.9
2 月	45	178	144	9.3
3 月	67	242	210	14.0
4 月	75	280	249	15.9
5 月	105	295	269	15.0
6月	106	291	272	13.5
7 月	105	286	269	13.5
8月	95	273	256	13.0
9月	60	218	202	10.9
10 月	49	191	167	9.4
11 月	35	156	125	8.0
12 月	30	151	113	7.0





Fig. 2 Spatial distribution of average annual diffuse solar radiation total amount over rugged terrains of Henan Province (units: $MJ \cdot m^{-2}$)

4月、7月、10月气候平均太阳散射辐射模拟结果进 行统计分析。本文逐网格的月平均太阳散射辐射按 纬度、海拔高度、坡度、坡向四个要素进行分组统计, 限定其他三个要素在相同的取值范围,分析太阳散 射辐射随单一要素的分布规律。图 3a 反映的是 33°N、1 200 m 海拔高度、15°坡地上1、4、7、10 月散 射辐射随坡向的变化规律,其中,横坐标为坡向,90° 为东坡,180°为南坡,270°为西坡,0°或360°为北坡; 纵坐标为月散射辐射距平,指某一坡向上像元平均 散射辐射与所有坡向上所有像元平均散射辐射之 差;图上每个点的散射辐射距平是同一坡向上多个 像元散射辐射距平的平均值;因实际地形中180°的 南坡和0°或360°的北坡甚少,在分析散射辐射空间 分析中坡向 157.5°~ 202.5°的坡为偏南坡, 337.5°~22.5°的坡为偏北坡。由图 3a 可见:1 月、4 月、10月偏南坡的散射辐射略高于偏北坡,7月各坡 向上的散射辐射基本相当;局地地形对1月太阳散射 辐射的影响最大,南北坡散射辐射差达30 MJ·m⁻²; 其次是 10 月散射辐射差在 20 MJ·m⁻²。所有月 份,东坡和西坡的散射辐射与各坡向平均散射辐射 相当,冬季南北坡的散射辐射差远大于夏季。

图 3b 为 33°N、1 200 m 海拔高度上不同坡度的 坡地上月散射辐射随坡向的变化规律。可以看出, 1 月偏南坡与偏北坡的散射辐射差异随坡度的增加 而增加;在偏南坡表现为正距平,偏北坡则为负距平。

3.3 模拟结果误差分析

表4列出了河南省唯一有散射观测资料的郑州站 1961—2000年的40 a 气候平均值与模拟值的对比情况。为了减少地理地形参数偏差带来的误差,采用邻近相似像元法(邱新法等,2009)提取气象站对应栅格点模拟值。从表4可以看出,郑州站模拟散射辐射月平均绝对误差均在0.1~11.4 MJ·m⁻²之间,平均相对误差在0.07%~7.05%之间,年平均绝对误差为3.06 MJ·m⁻²,年平均相对误差为1.67%,有7个月平均相对误差在1%以内。经误差检验,本文建立的起伏地形下太阳散射辐射分布



图 3 33°N、1 200m 海拔高度上不同月份 15°坡(a) 和不同坡度 1 月(b) 河南月散射辐射受地形的影响 Fig. 3 Monthly diffuse radiation influenced by terrain at 33°N, the 1 200 m altitude on (a) different months of 15° slope and (b) different slope in January

表 4 郑州站散射辐射量精度对比分析

 Table 4
 Comparison of diffuse solar radiation simulation precision in Zhengzhou

	实测值/ (MJ・m ⁻²)	模拟值/ (MJ・m ⁻²)	绝对误差/ (MJ・m ⁻²)	相对误差/%
1月	135.71	135. 81	0.10	0.07
2 月	159.42	160. 42	1.00	0.62
3 月	233. 47	232. 94	0. 53	0.23
4 月	274.31	279.56	5.25	1.91
5 月	294. 29	294. 74	0.44	0.15
6月	279.53	280. 25	0.72	0.26
7 月	284.88	282. 84	2.04	0.72
8月	258.39	259. 20	0.81	0.31
9月	200.15	209.96	9.81	4.90
10 月	162.14	173.57	11.43	7.05
11 月	124. 52	126.56	2.04	1.64
12 月	117.24	114. 71	2.53	2.15
年平均			3.06	1.67

式模型模拟结果可靠、精度高,可以作为计算总辐射 等其他研究的准备数据。

3.4 个例年验证

为验证模型在时间维上的模拟性能,采用河南 及其周边118个气象站2001年常规气象观测资料, 模拟2001年河南省起伏地形下各月散射辐射。采 用邻近相似象元法提取郑州气象站对应栅格点模拟 值,结合郑州站的实际观测资料,统计各项误差。表 5列出了郑州站误差统计分析指标。可以看出,冬 季模拟精度高于夏季,年平均相对误差不足11%, 表明模拟具有良好的时间维模拟性能。

4 结论和讨论

本文在分开考虑影响山区太阳散射辐射的分布 的天空因素和地面起伏地形因素的基础上,对这两 种因素的影响分开处理,以利用气象站观测资料建 立的水平面太阳散射辐射 Q_d 拟合模型,模拟大气

表 5 2001 年郑州站散射辐射量精度对比分析

Table 5 Comparison of diffuse solar radiation simulation precision in Zhengzhou in 2001

	实测值/ (MJ・m ⁻²)	模拟值/ (MJ・m ⁻²)	绝对误差/ (MJ・m ⁻²)	相对误差/%
1月	114. 87	115. 11	0.24	0. 21
2 月	136.01	151.23	15.22	11. 19
3 月	245.06	227.69	17.37	7.09
4 月	272.07	273.72	1.65	0. 61
5 月	326.67	294. 85	31.82	9.74
6月	350.46	279.97	70.49	20. 11
7 月	323.84	279.51	44.33	13.69
8月	359.40	262.55	96.85	26.95
9月	239.68	208.36	31.32	13.07
10 月	188.90	167.08	21.82	11.55
11 月	148.65	127.35	21.30	14. 33
12 月	103.16	106.44	3.28	3. 17
年平均			29.64	10. 98

对散射辐射的影响;以起伏地形下天文辐射 Q_{0αβ}和 地形开阔度 V 模拟地形因子(坡度、坡向、地形遮 蔽)的影响,最后通过起伏地形下太阳散射辐射分 布式计算模型,将天空因素与地面因素有机耦合在 一起,实现了起伏地形下太阳散射辐射的分布式 模拟。

本文建立的起伏地形下散射辐射模型准确的模 拟了河南省高分辨1-12月的散射辐射空间分布。 通过研究得到以下结论:

 1)在充分考虑了经验系数的时空分布特征后, 模拟精度有了进一步的提高。与郑州站观测的资料 对比验证表明,模拟精度较高,年平均绝对误差为
 3.06 MJ·m⁻²,年平均相对误差为1.67%。

2)河南省多年气候平均散射辐射的年总量为 2 504 MJ·m⁻²,在太行山和豫西山区的零星地区 散射辐射年总量在 2 000 MJ·m⁻²以下。河南省夏 季月散射辐射值最大,冬季最小,春季和秋季介于冬 夏之间。

3) 地形对散射辐射的影响明显且随季节变化, 所有月份,东坡和西坡的散射辐射与各坡向平均散 射辐射相当,冬季南北坡的散射辐射差远大于夏季。 1月偏南坡与偏北坡的散射辐射差异随坡度的增加 而增加;在偏南坡表现为正距平,偏北坡则为负 距平。

4)通过个例年验证对模型性能和模拟结果进 行考察,年平均相对误差不足11%。

参考文献:

傅抱璞.1983.山地气候[M].北京:气象出版社.

- 李慧, 仝川, 陈加兵. 2007. 福建省区域太阳总辐射模拟估算研究 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2(4):1-7.
- 李新,程国栋,陈贤章,等.1999.任意地形条件下太阳辐射模型的改进[J].科学通报,44(9):993-998.
- 李占清,翁笃鸣.1988.坡面散射辐射的分布特征及其计算模式[J]. 气象学报,46(3):349-356.

邱新法,仇月萍,曾燕.2009.重庆山地月平均气温空间分布模拟研究 [J].地球科学进展,24(6):621-628.

- 王冰梅,翁笃鸣.1989.我国散射辐射的气候计算及其分布[J].南京 气象学院学报,12(4):430-438.
- 翁笃鸣. 1964. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报,34(3): 304-314.
- 翁笃鸣.1997.中国辐射气候研究[M].北京:气象出版社.
- 翁笃鸣,罗哲贤.1990.山区地形气候[M].北京:气象出版社.
- 曾燕,邱新法,刘昌明,等. 2005a. 起伏地形下黄河流城太阳直接辐射 分布式模拟[J]. 地理学报,60(4):680-688.
- 曾燕,邱新法,刘绍民.2005b. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报,48(5):1028-1033.
- 曾燕,邱新法,何永健,等.2008. 起伏地形下黄河流域太阳散射辐射 分布式模拟研究[J]. 地球物理学报,51(4):991-998.
- 祝昌汉.1984.我国散射辐射的计算方法及其分布[J].太阳能学报, 3:242-249.
- Difffie J A, Beckman W A. 1974. Solar energy thermal processes [M]. New York: John Wiley & Sons.
- Dozier J, Outcalt S I. 1979. An approach to energy balance simulation over rugged terrain [J]. Geographic Anal, 11:65-85.
- Dozier J, Frew J. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 28(5):963-969.
- Hay J E. 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. Solar Energy, 23(4):301-307.
- Liu B Y H, Jordan R C. 1963. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors [J]. Solar Energy, 7(2):53-74.

(责任编辑:张福颖)