

文章编号:1001-8166(2008)11-1185-09

# 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究\*

曾 燕<sup>1,2</sup>, 邱新法<sup>3</sup>, 潘敖大<sup>2</sup>, 刘昌明<sup>4</sup>

(1. 江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 3. 南京信息工程大学遥感学院地理信息系统系, 江苏 南京 210044; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:**起伏地形中太阳总辐射由直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射三部分组成,依据各部分太阳辐射产生机理的不同,分别设计模型以综合考虑天文因素、大气因素、宏观地理因素、局地地形因素(坡向、坡度、地形相互遮蔽)是必须的。基于数字高程模型(DEM)数据和遥感影像,在全面考虑各种因素的基础上,建立了依托常规气象站观测资料的起伏地形下太阳总辐射计算模型,完成了黄河流域1km×1km分辨率太阳总辐射分布式模拟。结果表明:受坡地自身遮蔽和周围山地相互遮蔽的影响,总体平均而言,山地接收的太阳总辐射较平地少;局地地形对太阳辐射的影响程度随季节而变,在太阳高度角较低的季节,局地地形的影响较为显著。

**关 键 词:**黄河流域;总辐射;起伏地形;数字高程模型(DEM);分布式模拟

**中图分类号:**P463.214 **文献标志码:**A

## 1 引 言

太阳辐射是地表最基本、最重要的能源,是植物光合作用、蒸腾作用、土壤蒸发等陆面过程的主要驱动因子<sup>[1]</sup>,在农业、林业、气象、水文、生态等科研领域有广泛的应用,也在能源、建筑等应用领域有直接的应用。太阳辐射能又是绿色可再生能源,与其它常规能源相比,具有取之不尽、用之不竭之特点。在当今全球能源紧缺、生态环境恶化的情况下,世界各国都在积极开发太阳能资源。因此,为切实增强我国可持续发展的资源保障能力,全面细致地开展我国太阳辐射资源的评价工作,了解其空间分布情况,是有效开发利用太阳能资源的重要基础保障和前提,已刻不容缓。

目前,全世界具有多年太阳辐射观测资料的测站是有限的,且设置在水平开阔地段。单靠这些站点的实测辐射资料来分析太阳辐射在全球、全国及各地区的空间分布,显然是很不够的。因此,研制间

接的太阳辐射计算方法一直是国内外地学界的重要任务之一。

大量现有的太阳辐射估算模型是依据常规日射观测站资料建立的,总体上包括经验统计模型和理论模型两大类<sup>[2]</sup>。按经验统计模型中采用的因子不同,主要包括日照百分率模式<sup>[3]</sup>、云量模式<sup>[4,5]</sup>、分量分解模式<sup>[6,7]</sup>等。理论模型大多详细地考虑了大气中的主要成分对太阳辐射的影响,比较有影响的理论模型有:Bird Clear Sky Model<sup>[8]</sup>、Iqbal Model C<sup>[9]</sup>、METSTAT Model<sup>[10]</sup>、ASHRAE Model、Page Model<sup>[11]</sup>等。上述模型研究的核心问题是模拟大气(即天空因素)对太阳辐射的影响,探讨水平面太阳辐射的拟合估算,没有考虑复杂的地形因素对太阳辐射空间分布的影响。

实际地形并非水平,而是相对起伏的。对于起伏不平的地面(坡面),由于太阳光线的入射角不同,其上太阳辐射的到达量有显著的差异。受地形间相互遮蔽、坡向、坡度不同和下垫面类型多样等因

\* 收稿日期:2008-07-24;修回日期:2008-10-11.

\* 基金项目:中国气象局气象新技术推广重点项目“基于DEM的我国太阳能资源评估”(编号:CMATG2006Z10)资助.

作者简介:曾燕(1972-),女,吉林安图人,副研究员,博士,主要从事气候资源研究. E-mail: jlzengyan@sina.com

素的影响,山区太阳辐射场的空间分布变得异常复杂。因此,研究综合考虑天空因素与地形因素影响的太阳辐射计算就显得尤为必要也更有实际意义。随着现代空间信息技术的发展,地球科学的诸多研究和应用领域,迫切需要动态、高时空分辨率、空间网格化的气象数据<sup>[12]</sup>。近年来,部分学者利用地统计学中的空间插值技术和基于地形因子的统计学方法,生成具有一定分辨率的网格化的太阳辐射空间分布数据<sup>[13]</sup>,但统计学方法无法解释山地太阳辐射形成机理,所生成的太阳辐射数据的精度也受诸多因素的限制。

针对山地太阳辐射计算问题,在仅考虑地形自身因素(坡向、坡度)影响、不考虑周围地形相互遮蔽影响的无限长单一坡面的假设下,任意时段坡面上的天文辐射量已经有解析解<sup>[14~17]</sup>;一些具有普适性的坡面太阳辐射计算模式<sup>[18, 19]</sup>得到了广泛应用。这些研究为起伏地形上太阳辐射的计算提供了理论基础。一些学者<sup>[20~26]</sup>利用地形数据计算山地日照和辐射的区域试验,为起伏地形上太阳辐射研究提供了新的思路,但由于受数字高程资料获取、模型效率、精度和研究手段等因素的影响,这些研究尚有待改进和完善。

本文依据山区太阳辐射形成机理,综合考虑天空因素和地形因素对太阳辐射空间分布的影响,将地表非均匀因素分为地形起伏和下垫面性质多样两方面,建立了起伏地形下太阳总辐射计算模型,利用数字高程模型(DEM)数据和地面气象观测资料,结合遥感反演的地表反照率,实现了黄河流域太阳总辐射的分布式模拟,为起伏地形条件下太阳辐射场的计算提供了一种切实可行的方法。

## 2 模型建立及资料处理

### 2.1 起伏地形下太阳总辐射计算模型

与平地不同,起伏地形中,山地接收到的太阳总辐射由直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射三部分组成,即:

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

式中: $Q_{\alpha\beta}$ 为起伏地形下太阳总辐射; $Q_{b\alpha\beta}$ 为起伏地形下太阳直接辐射; $Q_{d\alpha\beta}$ 为起伏地形下太阳散射辐射<sup>①</sup>; $Q_{r\alpha\beta}$ 为起伏地形下周围地形投射过来的太阳反射辐射,本文将其定义为周围地形反射辐射。

起伏地形中,山地接收到的太阳直接辐射量受大气和地形条件两方面因素的影响。仿照坡地太阳直接辐射的计算方法,给出 $Q_{b\alpha\beta}$ 的计算式为:

$$\frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} = \frac{Q_{b\alpha\beta}}{Q_b} \quad (2)$$

式中: $Q_{0\alpha\beta}$ 为起伏地形下天文辐射,指无大气存在时(即不考虑大气影响时)地面能够接收到的太阳辐射量; $Q_0$ 为水平面天文辐射,指无大气存在,且不考虑地形影响情况下地面能够接收到的太阳辐射量。 $Q_b$ 为水平面太阳直接辐射,指不考虑地形影响情况下地面能够接收到的太阳直接辐射量。

整理(2)式,可得:

$$Q_{b\alpha\beta} = \frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} Q_b = R_b Q_b \quad (3)$$

式中: $R_b$ 为起伏地形下天文辐射与水平面天文辐射之比,又称转换因子,表示局地地形对太阳直接辐射的影响<sup>[27]</sup>。

局地地形对太阳散射辐射的影响主要表现在地形对天穹各方向散射辐射的遮蔽作用,可以用转换因子 $R_b$ 和地形开阔度 $V$ 两个参数表达。依据各向异性散射机理,起伏地形下太阳散射辐射 $Q_{d\alpha\beta}$ 的计算模型为<sup>[19]</sup>:

$$Q_{d\alpha\beta} = Q_d \left[ \frac{Q_b}{Q_0} R_b + V \left( 1 - \frac{Q_b}{Q_0} \right) \right] \quad (4)$$

式中: $Q_d$ 为水平面散射辐射,指不考虑地形影响情况下地面能够接收到的太阳散射辐射量。

山地接收的周围地形投射过来的太阳反射辐射量取决于周围山地的反射能力和地形的开阔度,其计算式为:

$$\begin{cases} Q_{r\alpha\beta} = \alpha_s (Q_b + Q_d) (1 - V) \\ \quad = Q \alpha_s (1 - V) & V \leq 1 \\ Q_{r\alpha\beta} = 0 & V > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $Q$ 为水平面太阳总辐射,指不考虑地形影响情况下地面能够接收到的太阳总辐射量; $\alpha_s$ 为周围山地地表反照率。

(1)~(5)式构成了起伏地形下太阳总辐射计算模型,建立起了根据水平面太阳辐射估算起伏地形下太阳总辐射的普适模式。当 $Q_{0\alpha\beta}$ 、 $Q_b$ 、 $Q_d$ 、 $V$ 、 $Q_0$ 、 $\alpha_s$ 已知时,通过(1)~(5)式,即可获得起伏地形下太阳总辐射 $Q_{\alpha\beta}$ 的空间分布。

### 2.2 水平面太阳直接辐射与散射辐射计算模型

为了计算起伏地形下太阳总辐射,必须分别建

① 本文太阳辐射计算综合考虑了天空因素与地形因素对地表太阳辐射的影响,为与传统仅考虑天空因素的太阳辐射计算区分开来,在太阳“总辐射”与“直接辐射”和“散射辐射”名词前加“起伏地形下”以突出其考虑了地形因素的影响。

立水平面太阳直接辐射  $Q_b$ 、散射辐射  $Q_d$  计算模型。气象站一般设置在水平开阔地段,本文利用气象站观测资料建立水平面直接辐射、散射辐射计算模型。水平面太阳总辐射由直接辐射和散射辐射两部分组成,分量分解模型方面的研究表明,直接辐射、散射辐射与太阳总辐射之间存在着密切的关系<sup>[28,29]</sup>。参考前人研究成果,构造如下函数:

$$Q_b = Q(1 - a)(1 - \exp[-bs^c/(1 - s)]) \quad (6)$$

$$Q_d = Q(a + (1 - a)\exp[-bs^c/(1 - s)]) \quad (7)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  为经验系数, $s$  为日照百分率, $Q$  为水平面太阳总辐射。

(6)式和(7)式有明确的物理意义:在全阴天,当  $s=0$  时,无直接辐射,水平面接收的太阳辐射全部由散射辐射组成,即  $Q = Q_d$ ,  $Q_b = 0$ ;在全晴天,当  $s \rightarrow 1$  时,入射到水平面上的太阳总辐射主要由直接辐射组成,直接分量达到极大值,而散射分量达到极小值,即  $Q_b \rightarrow (1 - a) \cdot Q$ ,  $Q_d \rightarrow a \cdot Q$ 。(6)式和(7)式构成了水平面太阳总辐射的闭合模式,即保证了拟合的水平面直接辐射与散射辐射之和等于水平面总辐射。

利用(6)式和(7)式计算水平面直接辐射和散射辐射,须有水平面太阳总辐射观测资料。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,一般常规气象观测站只有日照百分率观测资料,所以,对于一般常规气象观测站,在应用(6)式和(7)式计算直接辐射和散射辐射,还须先建立水平面总辐射  $Q$  计算模式。

大量研究表明,水平面太阳总辐射  $Q$  与日照百分率  $s$  存在密切的关系,一般采用线性估算模式<sup>[30]</sup>:

$$Q = Q_0(a_c + b_c \cdot s) \quad (8)$$

其中, $a_c$ 、 $b_c$  为经验系数。

联列模式(8)和模式(6)、(7),得到模式(9)、(10):

$$Q_b = Q_0(a_c + b_c \cdot s)(1 - a) \quad (9)$$

$$(1 - \exp[-bs^c/(1 - s)])$$

$$Q_d = Q_0(a_c + b_c \cdot s)(a + (1 - a) \exp[-bs^c/(1 - s)]) \quad (10)$$

应用模式(9)、(10),只需利用常规日照百分率观测资料即可估算  $Q_b$  和散射辐射  $Q_d$ 。(6)和(7)式中的经验系数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,(8)式中的经验系数  $a_c$ 、 $b_c$  均用气象站实测资料来拟合确定,具体的系数确定方法、系数取值及(6)~(10)各模式的误差分析指标详见文献[31,32];水平面天文辐射  $Q_0$  采用理论公式计算<sup>[30]</sup>。

## 2.3 资料来源及处理

本文应用的  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  分辨率的 DEM 数据为国家基础地理数据。在计算  $Q_b$  与  $Q_d$  过程中所用的气象资料由中国气象局国家气象信息中心提供(该资料已经过了初步的质量控制),主要有:黄河流域及其周边 164 个气象站 1961—2000 年月平均日照百分率资料;黄河流域及其周边 35 个气象站 1961—2000 年月太阳辐射量资料(包括总辐射、直接辐射和散射辐射),辐射资料均为月总量值。在资料应用之前,对所有资料进行了严格的质量检测和筛选,并将月总量辐射资料转换为月平均日总量资料(即本文在建模时采用月平均日总量辐射资料)。反演地表反照率所用遥感资料为 1981—2000 年逐月 NOAA-AVHRR 通道 1 和 2 观测数据,分辨率为  $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ ,取自“NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land Data Set”。

## 3 黄河流域水平面太阳总辐射、直接辐射、散射辐射空间分布

水平面太阳总辐射(直接辐射、散射辐射),是指不考虑地形影响情况下地面能够接收到的太阳总辐射(直接辐射、散射辐射),根据(8)~(10)式结合黄河流域及其周边 164 个气象站 1961—2000 年月平均日照百分率资料,获得 1961—2000 年 164 个气象站水平面总辐射  $Q$ 、直接辐射  $Q_b$  和散射辐射  $Q_d$  计算结果,之后采用逆距离加权插值法获得黄河流域水平面太阳总辐射、直接辐射和散射辐射空间分布图(图 1~2)。

黄河流域气候平均水平面年总辐射量在  $4\ 600 \sim 6\ 600 \text{ MJ/m}^2$  之间,以  $5\ 400 \text{ MJ/m}^2$  线为界,流域西部、北部地区为高值区;东部、南部为低值区。这与流域内日照百分率的空间分布特征基本一致。

水平面年直接辐射量的空间分布与年总辐射量的分布基本一致,以  $3\ 000 \text{ MJ/m}^2$  线为界,流域西部、北部地区为高值区;东部、南部为低值区。水平面年散射辐射的空间分布则呈自西南向东北逐渐递减的分布趋势,这与云量、大气透明度等大气因子对散射辐射的复杂作用有关。

## 4 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射空间分布

利用(3)式计算起伏地形下太阳直接辐射,还

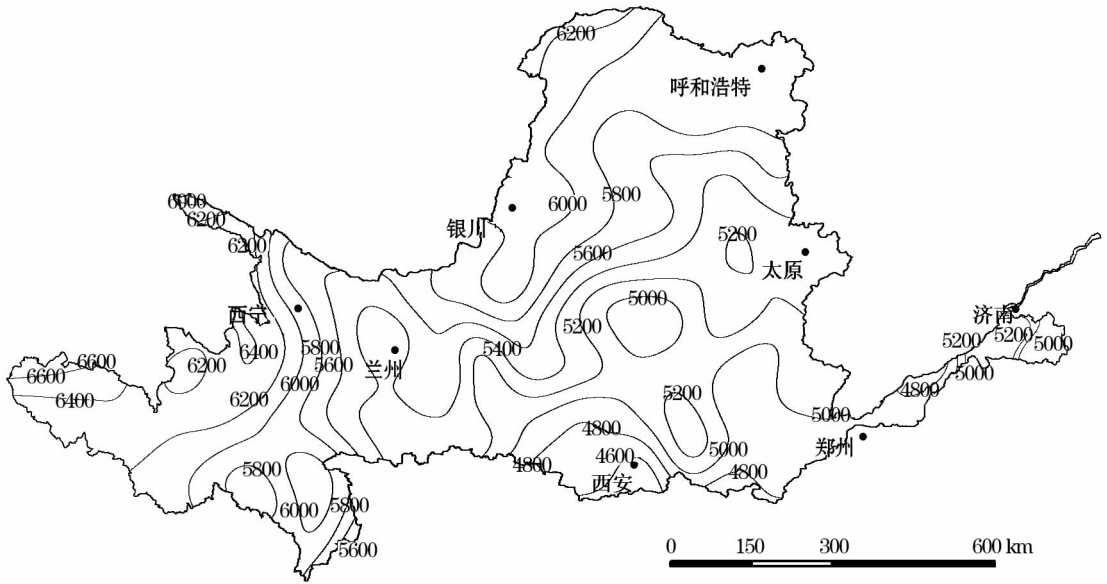


图1 黄河流域1961—2000年气候平均水平面年总辐射量空间分布图(单位: MJ/m<sup>2</sup>)

Fig.1 Spatial distribution of normals of annual horizontal global solar radiation quantity of the Yellow river basin in 1961-2000 (Units: MJ/m<sup>2</sup>)

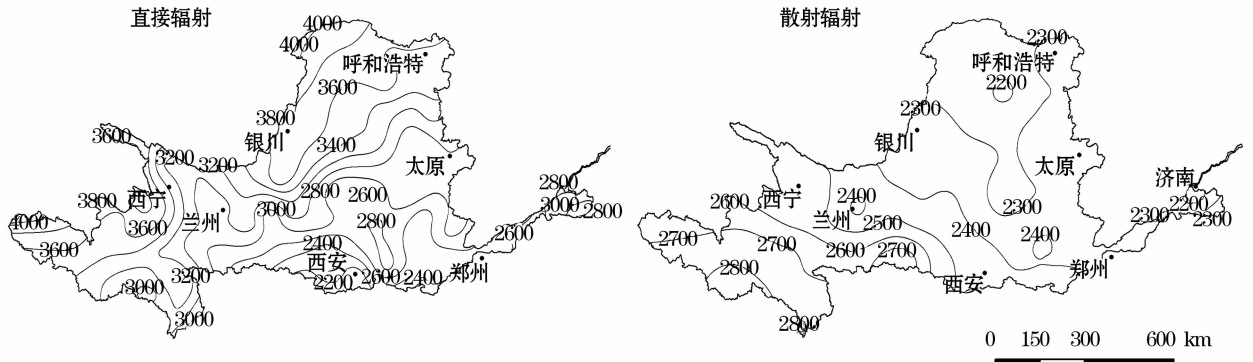


图2 黄河流域1961—2000年气候平均水平面年直接辐射、散射辐射量空间分布图(单位: MJ/m<sup>2</sup>)

Fig.2 Spatial distribution of normals of annual horizontal direct and diffuse solar radiation quantity of the Yellow river basin in 1961-2000 (Units: MJ/m<sup>2</sup>)

须依据 DEM 数据计算起伏地形下天文辐射  $Q_{0cb}$ , 其计算方法在文献[32]中有详细描述。结合水平面太阳直接辐射的计算结果, 可获得起伏地形下黄河流域太阳直接辐射的空间分布。结合水平面太阳直接辐射和散射辐射的计算结果, 利用(4)式可获得起伏地形下太阳散射辐射的空间分布, 其中地形开阔度  $V$  的详细算法参见文献[33]。起伏地形下黄河流域太阳直接辐射与散射辐射的空间分布特征详见文献[31]与[33]。

根据(5)式, 在计算周围地形反射辐射之前, 尚需计算周围山地地表反照率, 本研究采用 Valiente<sup>[34]</sup> 给出的公式计算地表反照率:

$$\alpha_s = 0.545\rho_{CH_1} + 0.320\rho_{CH_2} + 0.035 \quad (11)$$

式中:  $\rho_{CH_1}$ 、 $\rho_{CH_2}$  为 NOAA-AVHRR 通道 1 和 2 的观测值。

利用 1981—2000 年逐月 NOAA-AVHRR 通道 1 和 2 观测数据(分辨率为 8 km × 8 km), 根据(11)式计算获得了黄河流域 20 年逐月平均地表反照率, 在此基础上利用(5)式计算获得了黄河流域周围地形反射辐射空间分布。

图 3 给出的是起伏地形下黄河流域多年平均周围地形反射辐射年总量的空间分布。黄河流域多年平均周围地形反射辐射年总量的流域平均值为 27 MJ/m<sup>2</sup>, 总体而言不足总辐射的 1%, 且只分布在山

区,部分补偿了由于山地地形遮挡作用对直接辐射、散射辐射的消减。

## 5 起伏地形下黄河流域太阳总辐射空间分布

根据(1)式将起伏地形下直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射三部分相加,即可获得起伏地形下太阳总辐射。图 4 给出了起伏地形下黄河流域多年平均年总辐射量的空间分布。起伏地形下黄河流域多年平均年总辐射量的流域平均值为 5 578 MJ/m<sup>2</sup>,兰州站以上的青海高原区为最高,年总辐射量为 5 600 ~ 6 500 MJ/m<sup>2</sup>;河套平原、鄂尔多斯高原为次高值区,年总辐射量在 5 600 ~ 6 200 MJ/m<sup>2</sup>;东部地区最小,年总辐射量不足 5 000 MJ/m<sup>2</sup>,整体上黄河流域年总辐射呈西部高、东部低的空间分布特点。

由起伏地形下月太阳总辐射量空间分布图可以看出,在太阳高度角比较低的冬半年,地形对太阳总辐射的影响比较明显,云量等大气因素的影响则比较弱;而在太阳高度角较高的夏半年,地形影响相对要小得多,太阳总辐射的空间变化主要受云量等大气因素的影响。

为了验证图 4 结果的模拟精度,将黄河流域内 16 个具有太阳总辐射观测资料的气象站的多年平均年总辐射量与图 4 模拟结果进行对比分析(表 1)。由表 1 可见,与实测值相比,16 个台站多年平均年总辐射量模拟结果的平均绝对误差为 136.49 MJ/m<sup>2</sup>,平均相对误差绝对值为 2.46%,单站最大相对误差绝对值为 12.07%,其中有 14 个台站的相对误差绝对值小于 5%。

起伏地形下太阳总辐射模拟结果与实测值之间

表 1 多年平均年总辐射总量模拟精度对比分析表

Table 1 Assessment of annual global solar radiation simulation precision

台站号	台站名	实测值	模拟值	绝对误差 (MJ/m <sup>2</sup> )	相对误差绝对值 (%)
52866	西宁	5 861.36	5 807.76	53.60	0.91
52889	兰州	5 305.39	5 207.27	98.12	1.85
53336	乌拉特中旗海流图	6 093.13	6 209.57	116.45	1.91
53463	呼和浩特	6 243.27	5 899.81	343.45	5.50
53464	土默特左旗	5 268.21	5 903.89	635.67	12.07
53543	东胜	5 874.97	5 824.17	50.79	0.86
53545	伊金霍洛旗阿腾席连	5 694.41	5 652.89	41.51	0.73
53614	银川	6 038.65	5 997.95	40.71	0.67
53772	太原	5 331.23	5 312.20	19.03	0.36
53817	固原	5 504.98	5 394.75	110.23	2.00
53845	延安	4 933.97	4 713.83	220.14	4.46
53963	侯马	5 066.28	4 928.81	137.47	2.71
56043	果洛藏族自治州	6 446.51	6 243.21	203.30	3.15
56173	红原	5 922.36	5 866.19	56.18	0.95
57006	天水	5 288.08	5 262.69	25.39	0.48
57036	西安	4 491.54	4 459.70	31.83	0.71
平均	-	-	-	136.49	2.46

的误差主要来源于水平面太阳总辐射模拟误差、DEM 数据精度误差、气象站点位置误差等方面。由于气象站一般设在水平开阔地段,其观测资料为水平面观测结果。如果各气象站对应网格的地形特征与气象站实际地形特征相同,即:坡向、坡度为零,则气象站对应网格的太阳总辐射模拟值误差仅由水平面太阳总辐射模拟误差构成。造成气象站对应网格的地理地形参数与实际情况有差异的原因有以下两方面:

(1) DEM 数据在表达地形上的不确定性。

DEM 是对真实地形高程的综合数字化表达,代表了网格点所在面域的平均高程,与真实地形高程必然存在一定差距,由 DEM 数据派生的坡度、坡向等地形参数也必然与真实地形参数存在一定差距。不同比例尺的 DEM 数据对真实地形的表达精度和详细程度是不同的,因此利用不同比例尺 DEM 数据模拟的气象要素对真实地表气象要素分布的表达精度和详细程度也是不同的。

(2) 气象站位置参数误差。目前,各气象站的经、纬度位置参数只精确到分,位置参数的精度误差

为 1~2 km,是造成气象站对应网格的地理地形参数与各气象站实际地理地形参数存在差距的另一原因,气象站位置参数误差影响了准确读取气象站对应网格的数据。

## 6 地形对黄河流域太阳总辐射的影响

为了验证起伏地形下总辐射的计算结果,分析起伏地形对总辐射的影响,用起伏地形下黄河流域多年平均年总辐射量(图4,该计算全面考虑了天空因素与地形因素的影响)与多年平均水平面年总辐射量(图1,该计算仅考虑了天空因素的影响)的差值,代

表地形因素对年总辐射量的综合影响,生成图5。

由图5可见,在地形平坦的地区,地形的影响可忽略,说明利用式(1)~(5)计算的起伏地形条件下总辐射量在地形平坦地区与水平面总辐射计算结果基本一致;但在地形起伏较大的山区,如黄河流域的上游地区,地形对总辐射的影响是显著的,在 1 km × 1 km 分辨率地形数据情况下,可占总辐射年总量的 20%~30%,其正值区主要分布在向阳坡(偏南坡),负值区主要分布在背阴坡(偏北坡),且背阴坡较平地的减少值比向阳坡较平地的增加值大,使得整体上山区总辐射较平地要小。

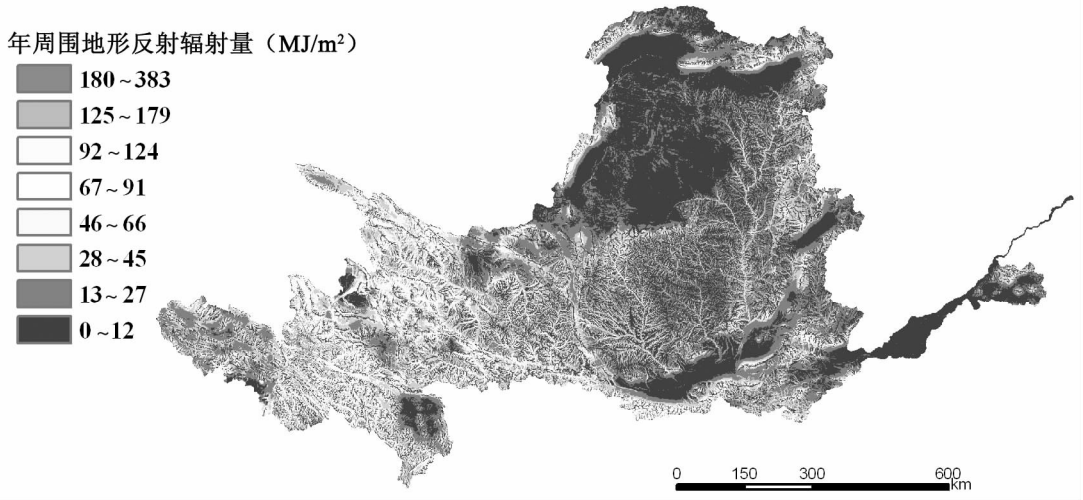


图3 起伏地形下黄河流域 1961—2000 年气候平均年周围地形反射辐射量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of normals of annual terrain reflected solar radiation quantity over rugged terrains of the Yellow river basin in 1961-2000

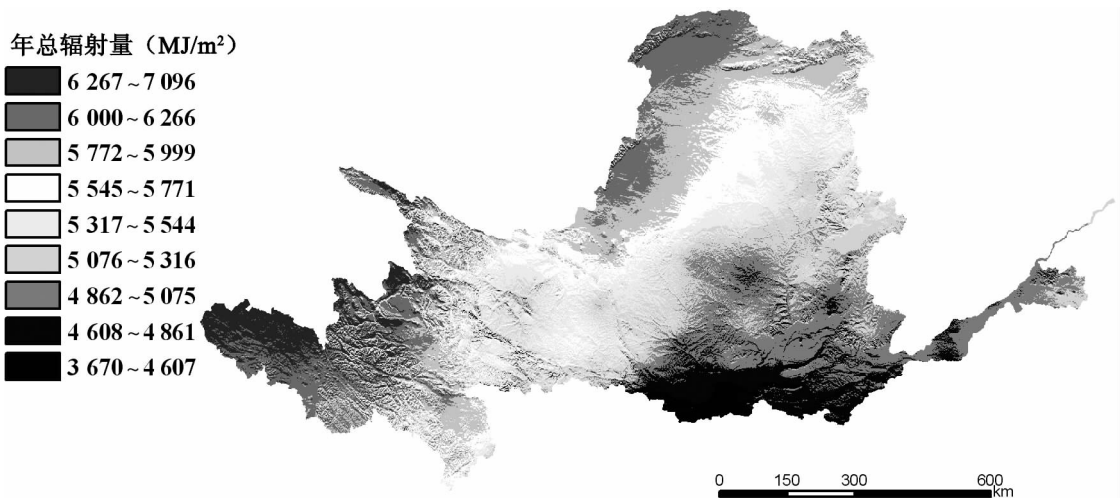


图4 起伏地形下黄河流域 1961—2000 年气候平均年总辐射量空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of normals of annual global solar radiation quantity over rugged terrains of the Yellow river basin in 1961-2000

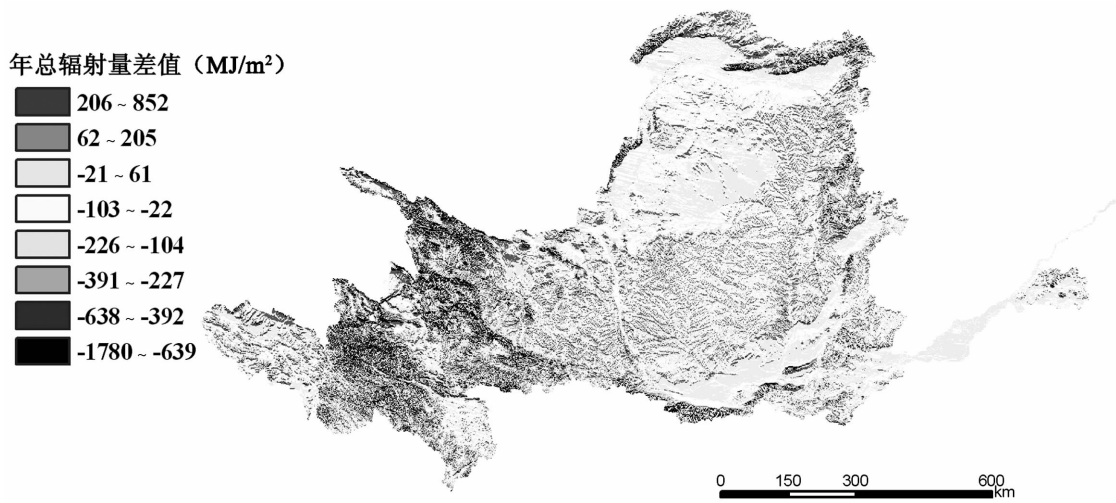


图 5 起伏地形下黄河流域 1961—2000 气候平均年总辐射量与水平面年总辐射量差值

Fig. 5 Distribution of difference between annual global solar radiation normals of 1961-2000 over rugged terrain and that of horizontal plane of the Yellow River Basin

## 7 结 语

起伏地形下太阳总辐射由直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射三部分组成,依据各部分辐射产生的机理不同,分别设计模型全面考虑天文、大气、宏观地理与局地地形等因子综合作用的结果是必须的。基于 DEM 和遥感影像,依托地面常规气象观测资料,本文建立了起伏地形下太阳总辐射分布式模型,模拟了黄河流域  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  分辨率太阳总辐射的空间分布。通过本项研究,得出以下几点结论:

(1) 根据太阳辐射机理建立的太阳总辐射分布式模型模拟的起伏地形下黄河流域总辐射结果,与利用传统方法根据日射站资料计算的水平面太阳总辐射相比,在地形平坦地区,两者结果非常一致,在这些地区地形因素对太阳辐射的影响可忽略不计,与事实相符,说明本文建立的太阳总辐射分布式模型是可靠的。

(2) 在山区,地形因素对太阳辐射的影响是显著的。在黄河流域,向阳坡(偏南坡)接收的太阳总辐射较平地大,背阴坡(偏北坡)接收的太阳总辐射较平地小,且总体而言,背阴坡较平地的减少值比向阳坡较平地的增加值大,说明山区坡地自身的遮蔽作用和周围山地相互间的遮蔽作用使得整体上山区总辐射较平地要小。

(3) 地形对太阳总辐射的影响程度随季节而变。在太阳高度角比较低的冬半年,地形对太阳总辐射的影响比较明显;在太阳高度角较高的夏半年,

地形影响相对要小得多,太阳总辐射的空间变化主要受云量等大气因素的影响。

## 参考文献 (References):

- [1] Roberto R, Renzo R. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 166: 461-478.
- [2] Wong L T, Chow W K. Solar radiation model [J]. *Applied Energy*, 2001, 69: 191-224.
- [3] Newland F J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China [J]. *Solar Energy*, 1989, 43(4): 227-235.
- [4] Kasten F, Czeplak G. Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud [J]. *Solar Energy*, 1980, 24: 177-189.
- [5] Davies J A, McKay D C. Evaluation of selected models for estimating solar radiation on horizontal surfaces [J]. *Solar Energy*, 1989, 43(3): 153-168.
- [6] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Solar Energy*, 1960, 4: 1-19.
- [7] Lam J C, Li D H W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(6): 527-555.
- [8] Bird R E, Hulstrom R L. A simplified clear-sky model for the direct and diffuse insolation on horizontal surfaces [R]. Technical Report No. SERI/TR-642-761, Golden, Colorado, CO: Solar Energy Research Institute, 1981.
- [9] Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation [M]. Toronto: Academic Press, 1983.
- [10] Maxwell E L. METSTAT-the solar radiation model used in the production of the NSRDB [J]. *Solar Energy*, 1998, 62(4): 263-

- 279.
- [11] Page J K. Proposed quality control procedures for the Meteorological Office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK[R]. Report FCIB-SE,1997.
- [12] Yu Guirui, He Hongli, Liu Xin'an, *et al.* Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China (I)[J]. *Journal of Natural Resources*,2004, 19(4): 537-543. [于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究(I)——气象/气候信息的空间化技术途径[J]. 自然资源学报, 2004, 19(4): 537-544.]
- [13] He Hongli, Yu Guirui, Liu Xin'an, *et al.* Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China (II)[J]. *Journal of Natural Resources*,2004, 19(5):679-686. [何洪林, 于贵瑞, 刘新安, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究(II)——太阳辐射要素[J]. 自然资源学报, 2004, 19(5): 679-686.]
- [14] Fu Baopu. Effects of sloping fields on sunshine and solar radiation[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 1958, (2): 23-46. [傅抱璞. 坡地对日照和太阳辐射的影响[J]. 南京大学学报:自然科学版, 1958, (2): 23-46.]
- [15] Fu Baopu. Mountain Climate [M]. Beijing: Science Press, 1983: 61-72. [傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 61-72.]
- [16] Zhu Zhihui. The global distribution of astronomical solar radiation on nonhorizontal surfaces[J]. *Science in China (Series B)*,1988, (10): 1 100-1 110. [朱志辉. 非水平面天文辐射的全球分布[J]. 中国科学:B辑,1988, (10): 1 100-1 110.]
- [17] Sun Hanqun, Fu Baopu. The elliptical intergral model of computing the extraterrestrial solar radiation on the slope[J]. *Acta Geographica Sinica*,1996, 51(6): 559-566. [孙汉群, 傅抱璞. 坡面天文辐射总量的椭圆积分模式[J]. 地理学报, 1996, 51(6): 559-566.]
- [18] Liu B Y, Jordan R C. Daily insulation on surfaces tilted towards the equator[J]. *Transactions of the American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*, 1962, 67: 526-541.
- [19] Hay J E, McKay D C. Estimating solar radiance on inclined surfaces; A review and assessment of methodologies[J]. *International Journal of Solar Energy*,1985, 3: 203-240.
- [20] Dozier J, Qutcalt S I. An approach to energy balance simulation over rugged terrain[J]. *Geographical Analysis*,1979, (11): 65-85.
- [21] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*,1990, 28(5): 963-969.
- [22] Bocquet G. Method of study and cartography of the potential sunny periods in mountainous areas [J]. *Journal of Climatology*, 1984, 1(4): 587-596.
- [23] Stefanovic P. Insolation from digital elevation models for mountain habitat evaluation[J]. *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences Journal*,1985, (3): 177-186.
- [24] Ranzi R, Rosso R. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin [J]. *Journal of Hydrology*,1995, 166: 461-478.
- [25] 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):1 345-1 350.
- [26] Li Zhanqing, Weng Duming. A computer model for calculating the duration of sunshine in mountainous areas [J]. *Chinese Science Bulletin*,1988, 33: 1 624-1 627.
- [27] Zuo Dakang, Zhou Yunhua, Xiang Yueqin, *et al.* On Surface Radiations[M]. Beijing: Science Press, 1991: 69-72. [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, 1991:69-72.]
- [28] Louche A, Notton 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.
- [29] Vignola F, McDaniels D K. Beam-global correlations in the Northwest Pacific[J]. *Solar Energy*,1986, 36(5): 409-418.
- [30] Weng Duming. Studies on Radiation Climate of China[M]. Beijing: Meteorology Press, 1997: 32-60. [翁笃鸣. 中国辐射气候研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 32-60.]
- [31] Zeng Yan, Qiu Xinfa, Liu Changming, *et al.* Distributed modeling of direct solar radiation of rugged terrain over the Yellow river basin[J]. *Acta Geographica Sinica*,2005, 48(5): 1 028-1 033. [曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射分布式模拟[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 680-688.]
- [32] Zeng Yan, Qiu Xinfa, Liu Shaomin. Distributed modeling of extraterrestrial solar radiation over rugged terrain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2005, 48(5):1 028-1 033. [曾燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1 028-1 033.]
- [33] Zeng Yan, Qiu Xinfa, Liu Changming. Distributed modeling of diffuse solar radiation over rugged terrain of the Yellow river basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*,2008, 51(4): 991-998. [曾燕, 邱新法, 刘昌明. 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, 2008, 51(4): 991-998.]
- [34] 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]. *International Journal of Remote Sensing*,1995,16(6): 1 147-1 166.



## Distributed Modeling of Global Solar Radiation over Rugged Terrain of the Yellow River Basin

ZENG Yan<sup>1, 2</sup>, QIU Xinfu<sup>3</sup>, PAN Aoda<sup>2</sup>, LIU Changming<sup>4</sup>

(1. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 3. Department of GIS, School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In rugged terrain, the global solar radiation (GSR) reaching on the surface is composed of three parts, *i. e.* direct solar radiation, diffuse solar radiation and terrain reflected solar radiation. The theories of these three kinds of solar radiation are different. Respective models are established which necessarily take integrated consideration of astronomical and geographic factors, local topographic factors (*i. e.* slope, aspect and terrain inter-shielding effect) and atmospheric physics factors are needed. Based on DEM (Digital Elevation Model) data and remote sensing data, a distributed model for calculating GSR over rugged terrain is developed, with routine meteorological observations as input. This model takes all consideration of factors influencing GSR. Using the established model, normals of annual GSR quantity with resolution of 1 km × 1 km for the Yellow river basin was generated. Results suggest that influenced by local topographic factors, *i. e.* azimuth, slope and terrain inter-shielding effect, annual GSR quantity over mountainous areas is smaller than that over plains generally. The influences of local topographic factors on GSR are changing with seasons and are more obvious in seasons that have a lower solar elevation angle.

**Key words:** Yellow river basin; Gglobal solar radiation; Rugged terrain; Digital Elevation Model (DEM); Distributed modelling.

---

### 关于调整《地球科学进展》2009 年度发行价格的公告

由于物价上涨等诸多方面的因素,刊物的成本不断增加,为保证刊物的正常出版发行,经研究并请示有关管理部门的同意,决定从 2009 年度起调整《地球科学进展》的发行价格,由原来的 35 元/期(年价 420 元);调整为 50 元/期(年价 600 元),特此公告,敬请广大读者谅解。

《地球科学进展》编辑部  
2008 年 11 月