

复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究

何洪林, 于贵瑞, 牛 栋

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 借鉴国内外已有的太阳辐射计算方法, 考虑地形和大气衰减因子, 通过组件技术实现 GIS 与太阳总辐射计算模型集成, 建立了太阳潜在总辐射计算模型。同时利用我国 107 个气象观测站的多年逐日太阳辐射资料, 假设多年中有 1d 为晴朗无云的天气, 即取多年中的最大太阳总辐射值为该计算日的潜在日总辐射值, 进行模型检验, 证明该方法可行。

关键词: 数字高程模型; 太阳总辐射; 组件技术; 地理信息系统

中图分类号: P422.1; N39; N949 文献标识码: B 文章编号: 1007-758X(2003)01-0078-08

METHOD OF GLOBAL SOLAR RADIATION CALCULATION ON COMPLEX TERRITORIES

HE Hong-lin, YU Gui-rui, NIU Dong

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: With reference to calculation methods of solar radiation within domestic and abroad literature and taking territorial and atmosphere factors into consideration, a new model for potential solar radiation calculation combining COM (Component Object Model) technique and GIS with the calculation model of global solar radiation is established. Therefore, the potential total solar radiation is calculated based on solar radiation data observed from 107 meteorology stations. In the calculation, its hypothesis is that insofar one clear day in more than one year as the biggest value of solar radiation of one day in many years is defined as potential value of daily global solar radiation. Validation result indicates that this model is reasonable and applicable.

Key words: DEM; Global solar radiation; COM technology; GIS

1 引言

地球表层 99.8% 的能量来源于太阳^[1]。太阳辐射是地球表层上的物理、生物和化学过程(如雪融、作物光合、蒸腾、作物生长等)的主要能源, 也是生态系统过程模型、水文模拟模型和生物物理模型研究中的必要参数。随着生态学和地球科学研究尺度的扩展, 太阳辐射的空间分布特征也日趋重要。但太阳辐射的观测由于其设备复杂, 成本费用高, 其观测密度远小于温度、降水等气象要素的观测密度, 采用简单的空间内插或外推技术不可能合理的揭示太阳辐射的空间分布特征。因此, 建立一个合理的太阳辐射空间模型, 并采用合适的技术手段实现, 对于建立区

域或国家尺度的栅格太阳辐射数据库, 进行区域或国家尺度上的宏观生态学研究, 具有重要的理论和实践意义。

到达地表的太阳辐射量主要受 3 个方面的影响: ①太阳几何因素; ②地形因素; ③云量和其他非均质性大气影响因素。其中太阳几何因素决定太阳辐射的纬度效应和季节变化特征, 地形因素控制太阳辐射在不同坡度、坡向以及周围地形影响情况下的变化特征, 云量和其他非均质性大气因素决定太阳辐射受局地气候影响的变化规律。

太阳总辐射是其中一个重要的太阳辐射参数。它包括直接辐射、散射辐射以及由周围地形

收稿日期: 2002-09-20, 修订日期: 2002-11-12

基金项目: 中国科学院“百人计划”生态系统管理的基础生态学过程研究和 CX10G-G01-01 项目资助。

作者简介: 何洪林(1971~), 男, 湖南人, 博士后, 主要从事地理信息系统以及生态信息学研究。

所引起的反射辐射。晴天无云条件下的太阳总辐射是地球表面可能接受到的太阳总辐射的最大值,即潜在太阳总辐射。潜在太阳总辐射的计算就是在充分考虑前两者因素和第三个因素中非均质性大气(即大气衰减)影响的条件下,计算到达地球表层的太阳总辐射量。本研究重点讨论潜在太阳总辐射的计算方法。

地形对太阳辐射的影响,由于考虑地形条件下的太阳辐射计算公式的复杂性,地形参数获取技术以及缺乏合适的计算平台,长期以来,人们往往对其忽略或简化^[2~5]。随着地理信息系统技术的发展,栅格数据模型的出现,人们开始充分考虑地形对太阳辐射的影响,提出了很多算法^[6~15],并通过模型与 GIS 的集成手段研究地形对太阳辐射的影响^[16~22]。

本研究试图在借鉴国内外已有的太阳辐射计算方法的基础上,利用全国的 $1:25 \times 10^4$ 数字高程模型数据(GRID 大小 $1\text{KM} \times 1\text{KM}$)为数据源,以 ARCGIS 为计算平台,采用 ARCOBJECT 开发技术,以全国多年的太阳辐射日观测数据和合理的假设进行模式验证,力求寻找太阳潜在总辐射合理的计算方法,为研究太阳辐射时空分布特征和建立全国尺度的太阳辐射栅格气象数据库奠定基础,为大尺度上的生态学过程研究提供基础信息。

2 模型的建立

2.1 基本参数的确立

计算地球表面任一点的太阳辐射,需要确立一些基本的天文参数。主要包括太阳高度角、太阳方位角、赤纬、日出与日落时间、地球表层大气外界上空的垂直太阳辐射强度等。

2.1.1 太阳高度角(α)与太阳方位角(a_s) 太阳高度角是太阳光线与水平面的夹角。太阳方位角是太阳光线在水平面上的投影与当地子午线的夹角,正北为零度。它们与地理纬度、太阳直射地球时的位置(赤纬)以及时角有关。计算公式分别为^[23]:

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta_s + \cos L \cos \delta_s \cos h_s \quad (1)$$

$$\sin a_s = \cos \delta_s \sin h_s / \cos \alpha \quad (2)$$

万方数据

式中: L 为地理纬度; δ_s 为赤纬; h_s 为时角

2.1.2 赤纬(δ_s)和时角(h_s) 赤纬是在赤道坐标系中,从天赤道起沿太阳的赤经圈到太阳的角距离,太阳在天赤道以北为正,以南为负,变化范围为 $0 \sim \pm 23.44$ 。计算公式为^[24]:

$$\delta_s = 23.45 \sin(360^\circ(284 + N)/365) \quad (3)$$

式中: N 为日序,1月1日为1,12月31日为365。

时角描述太阳在 24h 内的运动情况,以当地真太阳时正午为零度,下午为正,上午为负,每一小时为 15 度。即:

$$h_s = 15 \times (h - 12) \quad (4)$$

2.1.3 日长和日出日落时间(h_{sr}, h_{ss}) 日出和日落时间之间的时间间隔为日长。在日出和日落时刻太阳高度角为 0。即:

$$\sin \alpha = 0 = \sin L \sin \delta_s + \cos L \cos \delta_s \cos h_{sr} \quad (5)$$

$$h_{sr} = \cos^{-1}(-\tan L \tan \delta_s) \quad (6)$$

$$h_{ss} = -h_{sr} \quad (7)$$

2.1.4 大气上界垂直入射的太阳辐射强度 当太阳光线垂直入射在大气上界时,其太阳辐射强度为^[24]

$$I_0 = S_0(1 + 0.0344 \cos(360^\circ N/365)) \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8)$$

该公式考虑了在一年当中因太阳日地距离发生变化而导致大气上界的太阳辐射强度发生变化的情况。其中 S_0 为太阳辐射常数,是地球大气上界,垂直于太阳直射方向单位面积上的太阳辐射通量。该值有不同的取值方法,在我们的模型中,取值为 $1367 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。^[24]

2.2 直接辐射的计算

在晴朗无云的条件下,直接太阳辐射是太阳总辐射的重要组成部分,是太阳高度角、地球上界大气的太阳辐射强度以及大气透明度系数、太阳光线入射角和地形纠正因子的函数。

2.2.1 地形因素对晴朗无云条件下的直接辐射的影响

(1)坡度(β)与坡向(θ_w)对太阳辐射的影响。在地表,存在一定坡度与坡向的倾斜面与水平面的太阳辐射计算方法不同。倾斜面上太阳光线入射角 i 受坡度、坡向、纬度、赤纬和时角的

控制,其计算公式为:

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin \delta_s (\sin L \cos \beta - \cos L \sin \beta \cos a_w) + \\ & \cos \delta_s \cosh_s (\cos L \cos \beta + \sin L \sin \beta \cos a_w) + \\ & \cos \delta_s \sin \beta \sin a_w \sinh_s \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 周围地形遮蔽对太阳辐射的影响。在太阳高度角和方位角一定的情况下,所计算的区域是否处于周围复杂地形的阴影之下,是计算太阳辐射必须考虑的一个重要因素,特别在山区。其基本原理是在一定的太阳方位角范围内,其最大水平地平线角与当时太阳高度角进行比较,如大于太阳高度角,则处于阴影范围内,太阳辐射为零;否则,需要计算太阳辐射值。在地理信息技术未成熟以前,人们通过手工的或复杂的算法计算周围的地形遮蔽影响^[6]。随着 GIS 技术的发展,大多数 GIS 软件中有相关的地形阴影算法,如 ARC/INFO 中的 HILLSHADE 函数等。为计算周围地形对太阳辐射的影响,提供了极大的便利性。

2.2.2 晴天无云条件下的直接辐射大气透明度系数计算 垂直于太阳方向的太阳直接辐射强度与它穿过大气层的路径和大气透明度有关。太阳直接辐射穿过的大气路径用大气量(M)表示。大气量与太阳高度角和当地的地形高度以及大气压有关。计算公式为^[25]:

$$M_h = M_0 * p_h / p_0 \quad (10)$$

M_h 为一定地形高度下的大气量。 M_0 为海平面上的大气量,计算公式为^[25]:

$$M_0 = [1229 + (614 \sin \alpha)^2]^{1/2} - 614 \sin \alpha \quad (11)$$

p_h / p_0 为大气压修正系数,计算公式为^[26]。

$$p_h / p_0 = ((288 - 0.0065 * h) / 288)^{5.256} \quad (12)$$

在晴天无云的条件下,太阳直射辐射除了受到大气量的影响外,在大气中的传输还受到 3 种减弱: ①分子散射; ②臭氧吸收; ③某些气体(如 CO_2 、 O_2 、 N_2)的选择性吸收。所以大气透明度系数不仅与大气量有关,还与当地的大气条件有关。在地形较高的地区和清澈的大气条件下,大气透明度系数可能达到 0.8,在较混浊的万方数据

情况下可以低到 0.4^[27]。Kretith and Kreider (1978)^[25]提出了一个在晴朗无云条件下的计算大气透明度系数的经验方程,这个方程充分考虑了以上的因素,其拟合晴朗无云条件下的大气透明度系数的误差范围在 3% 之内。因此,在我们的模式中,选择它作为大气透明度系数的计算。

$$\tau_b = 0.56 (e^{-0.56 M_h} + e^{-0.095 M_h}) \quad (13)$$

2.2.3 直接辐射的计算 在考虑大气衰减情况下,垂直达到地球表面上的太阳辐射计算公式为^[27]:

$$I_b = I_0 \tau_b \quad (14)$$

到达地球表面任一坡面上的太阳辐射计算为^[27]:

$$I_s = I_b * \cos i \quad (15)$$

2.3 散射辐射和反射辐射的计算

在晴朗无云条件下天空的散射是一个均质散射,在直接辐射和散射辐射之间存在线性关系^[28]。即直接辐射透明系数越高,散射辐射透明系数越小。当直接辐射透明系数在 0.4 ~ 0.8 之间变化时,散射辐射透明系数在 0.153 ~ 0.037 之间变化。

$$\text{即} \quad \tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b \quad (16)$$

由此,得出坡面上散射辐射的计算公式^[27]:

$$I_d = I_0 \tau_d \cos^2 \beta / 2 \sin \alpha \quad (17)$$

反射辐射的计算与地表的坡向和坡度以及地表的反射率有关。假设反射地表是一个朗伯体。得出反射辐射的计算公式为^[27]。

$$I_r = r I_0 \tau_r \sin^2 \beta / 2 \sin \alpha \quad (18)$$

式中: r 为地表植被反射率。本方法中简化,统一取值为 0.2^[27]。 τ_r : 反射透明度系数。是指某一特定光谱在太阳辐射全光谱中的平均反射率,与直接辐射反射率存在以下的相关关系^[27]。

$$\tau_r = 0.271 + 0.706 \tau_b \quad (19)$$

2.4 太阳潜在日总辐射的计算

某一时刻的太阳潜在总辐射,就是以上三者之和。即

$$I_t = I_s + I_d + I_r \quad (20)$$

I_t ——太阳潜在总辐射。

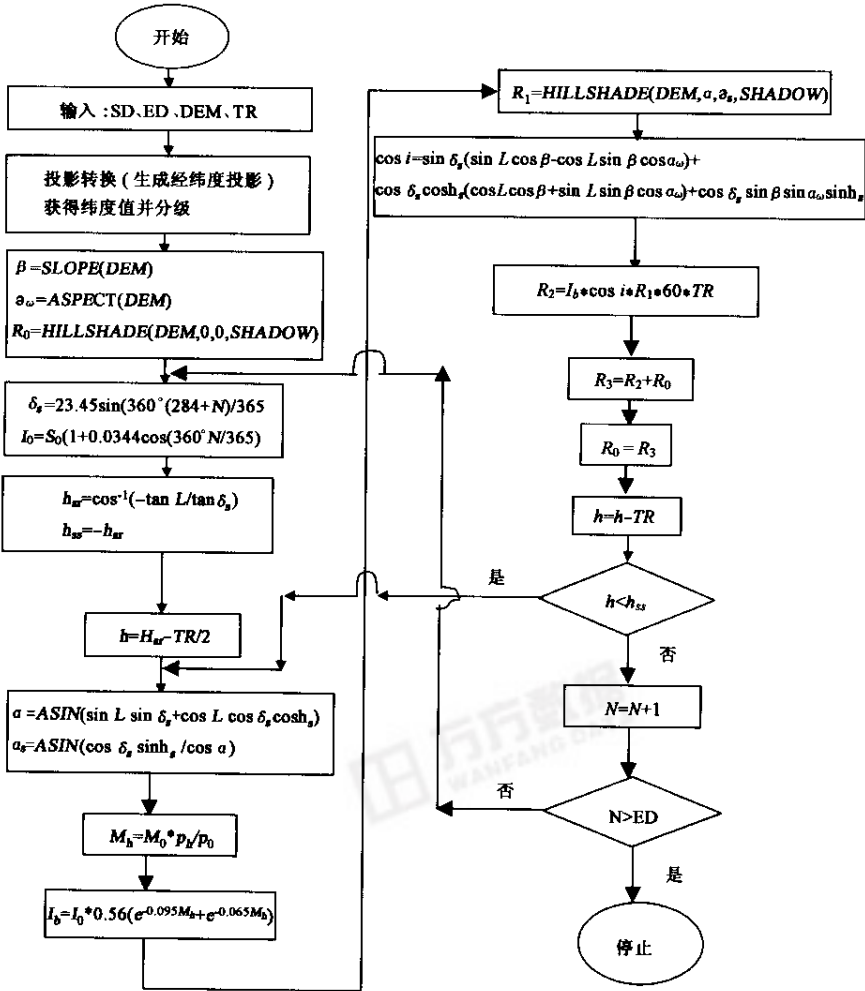
太阳潜在日总辐射的计算,选取一定的时间段(TR),以分钟为单位,根据上面的方法计算该时段中间时刻(TR/2)的太阳潜在总辐射值,作为该时段太阳潜在总辐射的平均值。进而求出在日出到日落时间段的太阳潜在总辐射值,即为太阳潜在日总辐射值。

3 模型的实现

本模型是根据以上公式,采用栅格数据模

型,以 ARCGIS 为平台,利用 GIS 组件技术和高级开发语言 VB 开发而成。其特点是界面友好,操作方便,太阳辐射模型和 GIS 的整体集成,在计算中可以直接读取 GIS 的空间数据,并能充分利用 ARCGIS 已有的强大的地理信息系统功能(如投影转换、GRID 直接生成、坡度坡向以及阴影计算等等)。

3.1 数据模型



参数说明:

SD——开始计算日序; DEM——计算区域的数字高程模型; αs——太阳方位角;
ED——结束计算日序; β——坡度; hst——日落时间; TR——计算时间间隔; αw——坡向;
hss——日出时间; h——计算时刻的时角; α——太阳高度角; R0、R1、R2——开始、中间和最后输出的 GRID

图 1 直接辐射计算流程图

Fig. 1 Flowchart to Calculate Direct Radiation

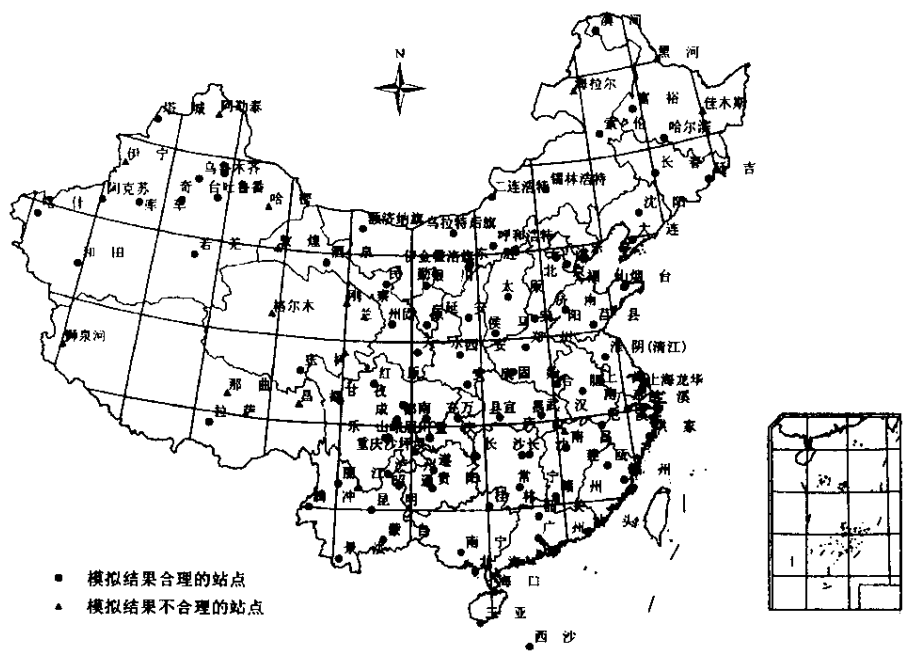


图 2 模拟结果的空间分布图

Fig.2 Map of Spatial Distribute of simulation Result

数据模型采用格网数据结构,所有参数的采样点都取为格网的平均值,引用地理信息系统软件 ARC/INFO 的术语,这种格网是 GRID。GRID 的三维空间特性由格网中心点的三维坐标表示,每一个网格的海拔高度、坡度和坡向由数字高程模型(DEM)求得。地形参数是计算太阳辐射空间分布的数据基础。

3.2 计算流程框图

直接辐射、散射辐射和反射辐射三者的计算流程相似。其中散射辐射和反射辐射模型没有考虑地形遮蔽的影响,相对而言比较简单。因此在本文中,仅给出了直接太阳辐射计算的流程图(图 1)。

3.3 模型开发

随着 GIS 技术的发展,以 GIS 为平台,开发太阳辐射计算模块的方式也日趋灵活。比较成功的有以 ARC/INFO 为平台,采用 AML 语言,开发的 SOLARFLUX 模块^[20];Karm(1997)^[21]以 ARC/INFO 和 GENASYS 为平台,用 AML 语言结合其他高级开发语言开发了计算太阳辐射计算模块;Pinde Fu 和 Paul M.Rich(1999)^[22]以 AR-CVIEW 为计算平台,采用 C + + 和 AVENEU 结 万方数据

合,采用高效算法开发的 Solar Analyst 软件等等。

本文中的模型开发是适应 GIS 组件技术的发展,以 ARCGIS 为开发平台,采用组件 GIS 开发工具 ARCOBJECT 和高级开发语言相结合实现的。其开发方式先进,模型集成方便,为以后模型的扩充提供了极大的便利。

4 模型的检验

4.1 假设和数据

由于我国是一个多丘陵山地地区,地形是影响我国太阳辐射空间分布的一个重要因素。本文中我们选取已有的全国 107 个气象观测站的从 1951 ~ 2000 年的逐日太阳总辐射资料作为模型的检验数据。假设在这 40a 中,每个观测站的每个计算日必有一天为晴朗无云的天气,即在 40a 的逐日辐射观测数据中,选取该计算日的最大值,作为该日可能获得的太阳潜在日总辐射值,与我们的模拟结果进行比较,以此来验证模型的准确性与适用性。

4.2 数据处理方法

我们对每个监测站近 40a 的数据整理入库,并进行奇异值处理。同时对已获得的 1a 当中的

每个监测站的最大太阳辐射值采取 7 日移动平均的方法修正数据的观测误差,即以计算日为中心,前后各推移 3 d,然后取这 7 个数值中的前 3 个最大值,最后对其平均,获得该计算日的最大日辐射值。依此绘制该计算站点的实际 1a 的最大太阳辐射量的日变化。

4.3 检验结果

经过 115 个站点的比较分析,分别计算其均方根偏差(RMSE)、平均偏差(MBE)以及平均绝对误差值(MABE)。由于我们对模型的检验是建立在假设的基础之上的,在近 40a 当中,不存在一天为晴朗无云的情况是存在的,即我们的估算值高于假设值认为是正常的。所以在计算绝对误差时,如果 $MBE > 0$ 时,真值取估算值。只有当估算值远远低于假设的实测值是(由于这里研究的为太阳辐射的空间模型,我们认为容许存在 10% 的绝对误差,即低于 10% 实测值也被认为是模拟正确的)。也就是说当 $MBE > 0$ 或者 $ABE \leq 10\%$ 时,我们认为模拟的结果是合理的。我们发现其中 99 个点的模拟曲线在检验曲线之上或与其相吻合($MBE > 0$ 或 $ABE \leq 10\%$) ,还有近 16 个点的值不合理。站点模拟结果空间分布如图 3。按照中国的区划,我们计算了位于华北、东北、西南、华南、华东、西北 6 个区内的测点的均方根偏差、平均偏差和绝对误差值。计算结果如表 1。其中 4 个站点(基本上每间隔纬度 10° 一个站点)的模拟曲线与验证曲线

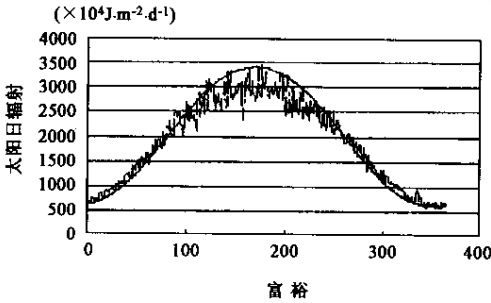


图 3 模拟曲线与验证曲线图(富裕)
(黑龙江 47.480 , 124.290)

Fig.3 Differences of simulation curve
and validation curve in FuYu Station

如图 4 5 6 7。

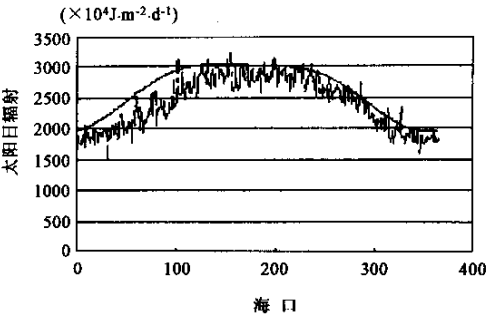


图 4 模拟曲线与验证曲线图(海口)
(海南 20.020 , 110.210)

Fig.4 Differences of simulation curve
and validation curve in ChangSha Station

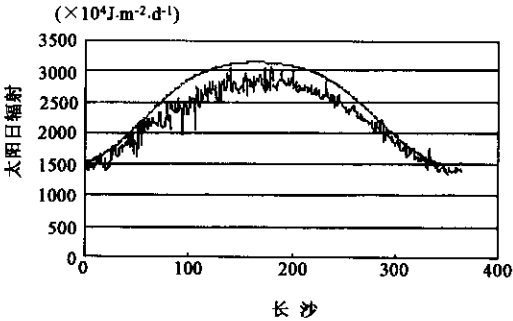


图 5 模拟曲线与验证曲线图(长沙)
(湖南 N 28.120 , E113.050)

Fig.5 Differences of simulation curve
and validation curve in HaiKou Station

表 1 模拟结果的分区统计值

Table 1 Statistic of simulation result on different Region

	RMSE ($\times 10^4 \text{J} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	MBE ($\times 10^4 \text{J} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	MABE (%)
华北区	199	12	7.40
东北区	272	- 35	8.27
西北区	222	- 96	9.48
华南区	327	243	11.68
华东区	299	126	10.48
西南区(不含西藏)	220	220	13.42
西藏	428	- 328	13.62
全国平均	277	63	10.15

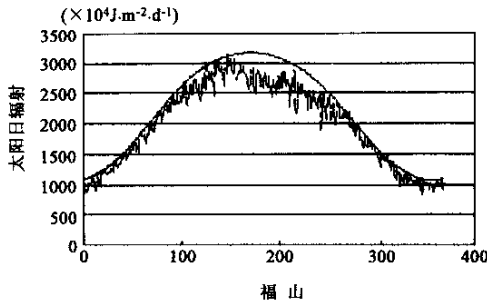


图 6 模拟曲线与验证曲线图(福山)
(山东 N37.30°, E121.15°)

Fig.6 Differences of simulation curve
and validation curve in Fushan Station

注 在图 4、5、6、7 中,光滑曲线为模拟曲线,起伏较大的曲线为验证曲线。

5 结语

(1)本研究借鉴国内外太阳辐射计算的
经验公式,在充分考虑地形和大气衰减的情况下,
通过先进的 GIS 组件技术,将太阳辐射模型与
GIS 集成,建立了一种计算区域尺度上的太阳潜
在日辐射空间模型。

(2)本研究利用多年的日辐射观测资料,以
多年中有一天是晴朗无云的假设为前提,以中国
大陆地区为研究区域,对模型进行验证。总体来
说,该模型适合计算中国地区的潜在太阳总辐
射,为以后的工作(如分析坡度、坡向对太阳辐射
的影响、实际辐射的计算、太阳辐射的空间分布
特征等等)奠定了基础。

(3)虽然该模型对研究宏观尺度上的太阳辐
射是合理的,但也存在一定的误差。主要来源于
两个方面。①模型本身的误差。由于模型是综
合在大量经验公式的基础上(如散射辐射的简
化、大气透明度系数的经验获取等等),应用于横
跨近 40 个纬度、气候类型多样的中国地区,必然
存在一定的误差。从表 1 我们能够看到,华北、
东北、西北三地区的 MBE 值和绝对误差值均较
小,比较理想。在华南、华东与西南区中的 MBE
值大于零,说明整体趋势偏高,西藏地区的预测
值明显偏低。这与我国气候的东西差异和南北
差异有着必然的联系。因此在将来的研究中,可
万方数据

以根据我国的区域特征对模型进行修正。②数
字高程模型的误差。DEM 是整个模型最重要的
数据源。DEM 的质量(如 DEM 的精度、分辨率
的大小等等)决定了最终模拟计算结果的好坏。

参考文献 (References):

[1] Dickinson , W. C. , and Cheremisinoff , P. N. , Solar Energy
Technology Handbook (London : Butterworths) . 1980.
[2] Brock , T. D. , Calculating solar radiation for ecological studies.
Ecol. Modell. 1981. 14 , 1 ~ 19.
[3] Bonan , G. A. , A computer model of the solar radiation , soil
moisture , and soil thermal regimes in boreal forests. Ecol. Mod-
ell. 1989. 45 , 275 ~ 306.
[4] Vardavas , I. M. , A simple model for rapidly computing terres-
trial flux , solar flux , and global mean surface temperature.
Ecol. Modell. 1987. 35 , 189 ~ 221.
[5] Nikolov , N. T. , Zeller , K. F. , A solar radiation algorithm for
ecosystem dynamic models. Ecol. Modell. 1992. 61 , 149 ~
168.
[6] Swift , L. W. , Algorithm for solar radiation on mountain
slopes. Water Resources Research , 1976 , 12 , 108 ~ 112.
[7] Dozier J , Outcalt S I. An approach to energy balances Simula-
tion over rugged Terrian. Geographic Anal , 1979 , 11 65 ~ 85.
[8] Running . S. W. , Hungerford , R d. . Spatial Extrapolation of
meterological data for ecosystem modeling application In : Pro-
ceedings of 16th conference on agriculture and forest meteorolo-
gy. Boston , MA : American Meteorology Society : 1983 , 192 ~
195.
[9] 傅抱璞. 山地气候 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1983. FU Bao-
pu Mountain Climate [M]. Beijing : Science Publishing House ,
1983.
[10] 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 , 1986. FU Bao-pu , Yu Jing-
ming , et al. Climate Resource of mountain and exploitation utili-
ty [M]. Nanjing : Nanjing University Publishing House , 1986.
[11] 朱志辉 . 等日照时间与等日照方位 [J]. 中国科学 , B 辑 ,
1987 (12) : 1340 ~ 1347. ZHU Zhi-hui. Equal sunlight time
and equal sunlight azimuth [J]. Since in China B , 1987 (12) :
1340 ~ 1347.
[12] 朱志辉 . 墙面太阳辐射的理论计算与模式估计——以上
海为例 [J]. 地理学报 , 1987 A2 (1) 28 ~ 41. ZHU Zhi-hui
Theory Calculation and model estimation of metope Solar Radia-
tion [J]. Acta Geography , 1987 A2 (1) 28 ~ 41.
[13] 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. LI Zhan-qing , WENG Da-
ming. Mode of global solar radiation in hill and moutain [J].

Acta Meteorologica Sinica 1988 46(4):461~468.

- [14] Oleg Antinoc Modelling daily topographic solar radiation without site-specific hourly radiation data. *Ecological Modelling* 1998 , (113) 31 ~ 40.
- [15] 李新,程国栋,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 Guo-dong, et al. Improvement of Solar Radiation Model on arbitrary territories[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999 44(9):993~998.
- [16] Hetrick, W. A. , P. M. Rich, and F. J. Barnes, and S. B. Weiss. . GIS-based solar radiation flux models. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, Vol 3: GIS Photogrammetry and Modeling*. 1993a 132~143.
- [17] Hetrick, W. A. , P. M. Rich, and S. B. Weiss. Modeling insolation on complex surfaces. *Thirteen Annual ESRI User Conference*, 1993b. 2 447~458.
- [18] Dubayah, R. A Solar radiation topoclimatology for the Rio Grande River Basin. *Journal of Vegetation Science* 1994.
- [19] Rich, P. M. , R. Dubayah, W. A. Hetrick, and S. C. Saving. Using Viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 1994. 524~529.
- [20] Dubayah, R. and P. M. Rich. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographic Information Systems* 1995.9 405~413.
- [21] Kumar, L. , A. K. Skidmore and E. Knowles. Modeling topographic variation in solar radiation in a GIS environment, *International Journal of Geographic Information Science*, 1997. 11 : 475~497.
- [22] Fu, P. and P. M. Rich. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th Annual ESRI User-Conference*, San Diego, USA, <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>. 1999.
- [23] 高国栋. 气候学教程[M]. 北京:气象出版社,1996. GAO Guo-dong, *Climatology Tutorial*[M]. Beijing: Climate Publishing House, 1996.
- [24] Duffie, J. A. , and Beckman, W. A. , *Solar Engineering of Thermal Processes* (New York: John Wiley & Sons). 1991.
- [25] Kreith, F. , and Kreider, J. F. , *Principles of Solar Engineering* (New York: McGraw-Hill). 1978.
- [26] LIST, R. J. Smithsonian Meteorological Tables. 6th rev version *Smith inst press shington*. 1984.
- [27] Gates, D. M. , *Biophysical Ecology* (New York: Springer-Verlag), 1980.
- [28] Liu, B. Y. , and Jordan, R. C. , The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, 1960 4, 1~19.