

基于 1 km 栅格的地表太阳辐射模拟

朱莉芬^{1,2}, 田永中³, 岳天祥¹, 范泽孟¹, 马胜男¹, 王英安¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所农业政策研究中心, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 西南师范大学资源环境科学学院, 重庆 400715)

摘要: 以辐射观测值与其影响因子建立非线性回归模型, 以各因子的面域数据模拟全国 1 km 像元上的水平面年太阳辐射的空间分布; 根据数字高程模型 (DEM), 考虑坡面坡度和坡向以及周围地形的影响, 建立坡面与水平面的直接辐射转换系数模型以及坡面的视角系数模型, 分别修正平面年太阳辐射中的直接辐射和散射辐射分量; 汇总修正后的太阳辐射总量中的各分量, 得到坡面实际可获得的辐射总量。成果可用于高精度的农业生产潜力评估、农业区划、农作物布局、退耕还林还草等。

关键词: 太阳辐射; 视角系数; 模拟; 数字高程模型 (DEM)

中图分类号: TK51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6819(2005)05-0016-04

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

Zhu Lifen, Tian Yongzhong, Yue Tianxiang, et al Simulation of solar radiation on ground surfaces based on 1 km grid-cells[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 16- 19 (in Chinese with English abstract)

0 引言

太阳辐射是最重要的农业气候资源之一, 它的多寡直接决定着农业生态系统物质、能量和信息的流动^[1-3]。因此, 准确掌握地表实际太阳辐射是进行农业研究和农业生产的基础和前提。国内外关于辐射模拟的现有研究成果很多^[1-10], 如左大康等人研究了水平地表太阳辐射及典型坡面的日照规律^[4], Corripio 根据数字高程模型 (DEM) 研究了法国南部山区地形对辐射的影响^[5]。然而, 现有研究中最突出的问题在于对影响辐射的微观和宏观因素的结合不够: 大尺度的辐射尽管可以反映其空间格局, 但由于微观因素, 特别是坡面本身特征及周围地形的影响而误差较大^[4]; 小尺度的辐射值往往通过直接的观测而得到, 虽然精度很高, 但无法得到大范围的面上辐射数据。随着社会对高分辨率农业气象数据需求的增长, 实际地表所获得的太阳辐射能变得更为重要, 因此, 本文研究基于 1 km 栅格地表, 综合考虑宏观和微观因子对地表辐射的分异规律, 建立模型模拟地表实际可获得的太阳辐射。

1 研究方法与数据来源

某一地表上所能获得的实际太阳辐射, 首先取决于所处纬度的天文辐射; 其次, 由于大气状况等的影响, 到达水平面的太阳辐射发生“衰减”; 再次, 由于坡度、坡向的存在, 坡面获得的太阳辐射再次发生变化; 此外, 周围地形还可能对坡面形成遮蔽, 从而使各地的太阳辐射状况变得更加复杂。

本文采用以下方法来模拟实际地表的太阳辐射: 1) 利用辐射台站的观测值与其相应的影响因子建立关系模型, 以各因子的面域数据模拟全国 1 km 像元上的水平面年太阳辐射的空间分布; 2) 计算太阳辐射总量中的各分量, 包括直接辐射、散射辐射和反射辐射三部分; 3) 根据数字高程模型 (DEM) 数据, 在考虑坡面本身坡度和坡向的影响以及周围地形的影响下, 计算坡面与水平面的直接辐射转换系数, 并用这个系数修正直接辐射; 4) 计算坡面及周围地形影响下坡面的视角系数, 并形成散射辐射修正系数; 5) 将修正后的辐射总量中的各分量汇总, 即可得到地面实际可获得的辐射总量。

研究中所用的气象数据来源于全国 730 多个气象站的多年观测资料; 辐射数据来源于全国 100 多个辐射站的多年观测资料; DEM 来源于美国地质调查局的全球 30 高程数据集 (GTOPO30)。

2 地表太阳辐射模拟

2.1 水平面上太阳辐射的空间模拟

模拟水平面上太阳辐射的方式主要有两种^[2,4]: 一是根据辐射站点的实测资料, 采用一定的空间插值方法直接进行。该方法虽然简便, 但前提是用于插值的点必须尽量多且均匀分布。目前全国的辐射观测站仅 98 个, 插值后的辐射值不宜用于精确分析。二是根据某种辐射基数值, 利用影响辐射的相关要素建立模型进行模拟。该方法的缺点是在建立模型及使用模型进行模拟时必须使用辐射基数值, 该基数值无论采用天文辐射、理想大气总辐射还是晴天总辐射, 都较为繁琐, 极大地降低了运算效率。为此, 本文直接采用辐射相关因子与辐射观测值建立模型, 其基本关系式如下

$$Q = b_0 + \sum_{i=1}^m (b_{ij}x_i^j + \sum_{k=i+1}^m c_{ik}x_i x_k) \quad (1)$$

式中 x_i, x_k —— 第 i 个, 第 k 个基本因子; m —— 基本

收稿日期: 2004-07-21 修订日期: 2004-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371094)

作者简介: 朱莉芬 (1973-), 女, 博士生, 主要从事农业信息与农业政策研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所农业政策研究中心, 100101。Email: zhulif_ccap@igsrr.ac.cn

因子总数; b_{0k}, b_{ijk}, c_{ik} ——待定系数。模型中除了基本因子外,还包括它们的非线性组合(每一因子的 2 至 5 次项和一次交叉乘积,在此称为辅助因子)^[21]。

在因子选择时,根据数据的易得性和有效性,选取了以下 3 类共 6 个太阳辐射因子: 1) 反映天空遮蔽特征的年日照时数($x_1, 0 \sim 1 \text{ h}$)、日照百分率($x_2, \%$)和年平均云量($x_3, \%$); 2) 反映空气中水汽含量的年均绝对湿度($x_4, 100 \text{ Pa}$); 3) 地理因子: 海拔高度($x_5, 0 \sim 1 \text{ m}$)和纬度($x_6, \text{度}$)。

采用逐步回归方法,得到下式

$$Q = 170292 + 20\ 73189x_1 - 0\ 19171x_1x_6 + 0\ 07212x_5x_6 \quad (2)$$

式(2)的复相关系数为 0.9630,具有很高的显著性。从图 1 可以看出,预测值与实测值非常接近,其相对误差的平均值为 3.37%,标准差为 4.31%,都低于采用辐射基数值的计算模式。用它模拟全国 1 km 栅格的辐射时,运算效率比基数模式提高 27~289 倍。

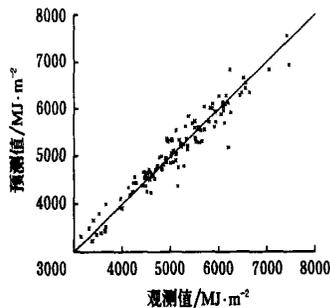


图 1 水平面太阳辐射模拟误差分布
Fig 1 Error distribution of solar radiation simulation on horizontal projection plane

2.2 太阳辐射各分量的计算

地表所获得的太阳辐射 Q 一般由太阳直接辐射 S 、天空散射辐射 D 和周围地表所产生的反射辐射 R 三部分构成。根据左大康等人的研究,辐射年总量与直接辐射年总量之间存在非常密切的关系,他们根据全国各辐射台站多年累积资料,得到式(3)^[21]

$$Q = 2\ 388 + 0\ 9864S \quad (3)$$

式中 Q 和 S 的单位均为 $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-2}$,其相关系数达 0.948,剩余标准差为 $0.3 \text{ GJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。根据式(3),可得

$$S = 1.01379Q - 2\ 42092 \quad (4)$$

R 的大小取决于周围地表特性和覆盖状况,在一般地区, R 值占 Q 的比例很小,常可忽略不计,只有当它的周围地表为冰雪覆盖时,才应该计入^[2,6]。另外,由于地面特性和覆盖状况复杂多样,处理起来并不简单,翁笃鸣、左大康等都分别提出了相应的计算式^[2,8],但其计算过程相当繁琐,而且精度并不高,因此,在计算时一般将其省略。本研究对此也忽略不计,则,散射辐射 D 为

$$D = Q - S = 2\ 42092 - 0\ 01379Q \quad (5)$$

2.3 辐射转换系数模型及直接辐射修正

辐射转换系数 $Coef_Q$ 是指在坡面本身坡度、坡向以及周围地形的遮蔽影响下坡面所获得的天文辐射与当

地水平面上所获得的天文辐射的比值,可用下式表示

$$Coef_Q = Q_s / Q_L \quad (6)$$

式中 Q_s ——坡面天文辐射, $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-2}$; Q_L ——水平面天文辐射, $\text{GJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由于该系数只与坡面本身及周围地形有关,不受大气等因素的影响,因此可以用来修正地面直接辐射。

1) 水平面天文辐射模拟

水平面天文辐射年总量可以通过日天文辐射总量的计算公式,采用逐日求和的精确累计法,也可以采用特征赤纬法和 Taylor 近似法两种简化算法^[21]。在本研究中要计算全国每个 1 km 像元的水平面天文辐射,即使使用简化算法,计算量也非常大。由于各地水平面的年度天文辐射总量只与当地的纬度有关,因此,可以利用前述方法计算出的年天文辐射总量,与纬度建立如下三次曲线关系模型,用它来模拟各个像元的年天文辐射总量

$$Q_0 = 13041 + 15\ 173\varphi - 2\ 4612\varphi^2 + 0\ 0109\varphi^3 \quad (7)$$

式中 Q_0 ——年天文辐射总量, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; φ ——纬度, DD。式(7)的相关系数为 1,平均误差为 0.0006%,最大误差也仅为 0.08%。

2) 受周围地形遮蔽影响下的坡面天文辐射

坡面是否处于阴影之下是随时变化的,采用积分公式来计算日直接辐射量显然行不通,一种可行的办法是采用微分的方式^[8]。因此,我们将从坡面日出到日没的整个时间微分成若干个相对变化不大的时段,采用该时段的阴影系数(可照与否)、坡面平均辐照度、时段长度三者来计算本时段的天文辐射,通过累积,就可以得到每天、每月、全年及任意时间段的天文辐射量。下式为坡面在周围地形影响下的日天文辐射量计算公式

$$Q_s = \sum_{i=1}^n I_i f_i \Delta T + I_{n+1} f_{n+1} \left(\frac{2\omega \times 24 \times 60}{2\pi} - n\Delta T \right) \quad (8)$$

式中 I_i ——第 i 个时段内坡面的天文辐照度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; f_i —— i 时段内太阳方向上地形对该坡面的遮蔽系数, $f_i = 0, 1$ (受地形遮蔽时取 0,否则取值为 1); ΔT ——时段长度; n ——整时段的个数。式(8)的后一部分计算日落前的一个非整时段的天文辐射。

I_i 的计算式可见文献[1],合理的 ΔT 值应当根据结果精度与运算效率来权衡,根据 Corripio 在研究法国 Bance 山太阳辐射时的经验,本文 $\Delta T = 15 \text{ min}$ 。 f_i 的取值,Corripio 采用矢量代数的方式来确定,曾燕等采用比较高程增量的方式^[5,8],本文采用逆向搜索的方式,在太阳方向上由近及远依次比较各点的视角与太阳高度角之间的大小关系即可,当太阳高度角 h_i 小于两点的视角 h_j 时,该点被遮蔽, $f_i = 0$,并停止搜索;反之,不被遮蔽, $f_i = 1$,继续搜索,直至搜索半径。对于搜索半径,曾燕等认为“取一定的长度即可”,Corripio 搜索到图幅边界^[5,8],对于本研究,前者过于模糊,后者不可行。理论上可以证明,对地球表面而言,339 km 是最大的可视距离,因此,339 km 以外的点完全可以不予考虑。分析全

国 1 km DEM, 以 10 km 为搜索半径时, 只在西部个别地区有较大的误差, 因此本文在此以 10 km 为搜索半径。

2.4 视角系数建模及散射辐射修正

1) 视角系数

视角系数是指在地面某一点上, 未被周围地物阻隔的天球投影占天球半球的比例。它反映了由于周围地物对某地的天空遮蔽情况, 对于地形复杂、散射辐射占有较大比重的地区, 它是一个不可忽视的因素。目前对视角系数建模仅有的一些研究中^[8-10], 一个共同的问题是: 未考虑地球曲率的影响, 仅适用于小范围的地区, 其实现的算法不完善, 模型过分简化而严重降低精度。以下是本文将建立基于球面的视角系数。

地球表面上任意两点, 在球面距离为 D 时, 其球面视角 θ 可表示为

$$tg \theta = ctg \theta_0 - \frac{R + H_0}{(R + H_i) \sin \theta_0} \quad (9)$$

式中 θ_0 ——球面距离为 D 时的球心角, DD ; R ——地球半径, m ; H_0, H_i ——分别为原点和视点的高度, m 。

将方位角细分为 n 份, 分别搜索各个方位的最大视角 θ , 则视角系数 v 可表示为

$$v = \frac{1}{n} \times \prod_{i=1}^n \cos^2 \theta \quad (10)$$

2) 散射辐射模式与散射辐射修正

坡面所能接收到的散射辐射, 主要受两个因素的影响: 一是坡面能见到多大部分天空及哪部分天空; 二是天空各部分的散射辐射强度。坡面的视域可以分为两个部分, 即坡前和坡后各 π 立体角范围内的天穹部分。对坡前部分则比较简单, 采用前述的视角系数计算方法即可; 对坡后部分, 还得考虑坡后方向上的其它像元与坡面像元的视角是否大于该方位的坡度角, 若大于, 则采用该方向上的最大视角, 若小于, 则采用坡度角, 即取两者中的最大值。因此, 坡面的视角系数可表示为

$$v = \frac{1}{m} \times \prod_{i=1}^m \cos^2 \theta_{前i} + \frac{1}{n} \times \prod_{j=1}^n \cos^2 \theta \quad (11)$$

式中 $\theta = Max(\theta_{后j}, \alpha_j)$; m, n ——分别为坡前和坡后的方位数; $\alpha_j, \theta_{前i}, \theta_{后j}$ ——分别为坡度、坡前及坡后视角。

天空中散射辐射的分布相当复杂。左大康等人将天空散射辐射归为以下 5 种模式: 环日模式、各向同性模式、晴空各向异性模式、全天候各向异性模式、Hay 模式^[2]。各种模式都有一些不足, 基于以下 3 点, 本文采用各向同性模式: (1) 天空散射辐射分布不均所引起的辐射差异远小于坡面及周围地形引起的辐射差异; (2) 直接辐射观测时已包括了来自于太阳周围一个很窄 (10°) 的环形天空的辐射, 因此可以不考虑环日辐射的影响; (3) 各向同性是目前使用最多的一种散射辐射计算模式。采用各向同性散射辐射模式后, 就可以直接利用视角系数修正水平面的散射辐射。

3 结果与分析

根据辐射转换系数与视角系数, 可以得到修正后的实际太阳辐射

$$Q = S \cdot Coef_{\theta} + D \cdot v \quad (12)$$

图 2 是根据式 (12) 计算的全国 1 km 栅格坡面的年太阳辐射, 从图中可以看到, 全国太阳辐射分布的总体特征与前人的研究成果基本相似, 但由于考虑了微地貌, 特别是周围地形的遮蔽影响, 其细部特征差异特别明显。图 3 反映了修正后的坡面与水平面的辐射差异。修正率 (总辐射在修正前后的绝对差值占修正前总辐射值的百分比) 最大的地区主要集中在中国地势的第二阶梯到第三阶梯的过渡带上, 特别是四川盆地以西的青藏高原东南部及横断山区、昆仑山、阿尔金山及祁连山地区、天山地区。从大兴安岭到巫山的第一和第二级阶梯过渡带上, 辐射修正也较为明显, 但修正幅度远较前面几个地区小。此外, 长白山地区、台湾山脉及闽南地区也较为突出。在全国范围内, 修正率大于 5%、10%、20% 的面积分别有 121.32、43.79、12.26 万 km^2 , 最大修正率达 67%。

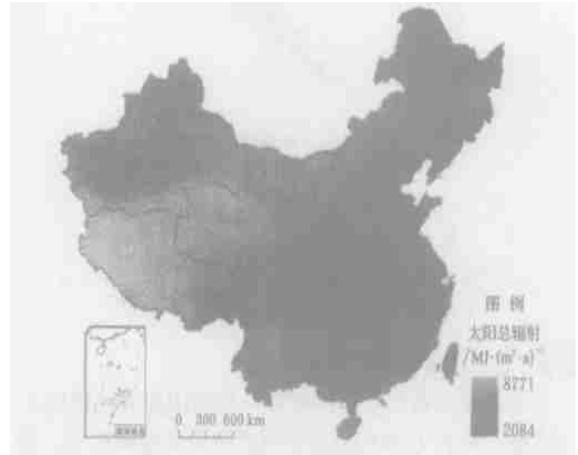


图 2 修正后的中国 1 km 栅格坡面年太阳辐射
Fig 2 Modified annual solar radiation on slopes of 1 km square grid-cells

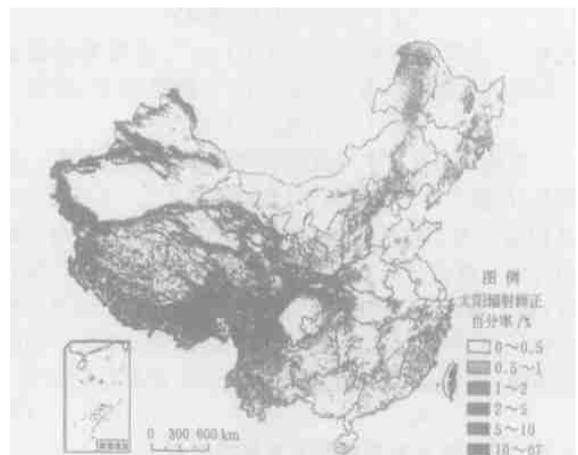


图 3 坡面年太阳辐射修正百分率

Fig 3 Percentage of modified annual solar radiation on slopes

4 结论与讨论

本文提出的模拟方法基于辐射观测值, 考虑了大尺度上的气象及天文等因子的影响, 更为重要的是, 它还考虑了小尺度上的地形参数, 特别是地形遮蔽的作用, 所得到的栅格太阳辐射更接近实际情况。然而, 由于目前缺乏年度的实地 1 km 地表辐射观测数据, 因此本文的年度坡面辐射模拟结果还无法得到有效的验证。尽管这样, 但本文的研究思路和方法是严谨的, 基础数据是可性的, 因此模拟结果是可靠的。本研究在西北、西南地区的 12 个典型区上进行了 10 d 的辐射值观测, 观测值与采用本文方法所得的该 10 d 的模拟结果相比, 平均误差仅为 2.14%。从这一点也可以看出, 本文模拟结果可以用于实际。

正是由于本文所模拟的太阳辐射综合考虑了影响辐射的宏观和微观因素, 因此在方法与结果的应用上, 除了可以在宏观方面用于农业生态区划等研究外, 还可以用于一些需要较高空间分辨率的农业研究与农业生产, 如高精度的全国农业生产潜力评估; 退耕还林还草工程中林草品种的选择, 同一地区不同局部地貌下的农作物布局与规划; 植被净第一性生产力(NPP)研究等。此外, 由于太阳辐射可以引起水、热、土壤、植被的分异, 因此本文的研究成果还可广泛用于其它农业自然资源的相关研究与应用。

[参 考 文 献]

- [1] 侯光良, 李继由, 张谊光. 中国农业气候资源[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993
- [2] 左大康, 周允华, 朱志辉, 等. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [3] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. New York: Academic Press, 2002
- [4] 何洪林, 于贵瑞, 牛 栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 78- 85
- [5] Corripio J G. Vectorial algebra algorithms for calculating terrain parameters from DEMs and solar radiation modeling in mountainous terrain[J]. Geographical Information Science, 2003, 17: 1- 23
- [6] Stine W B, Harrigan R W. Solar Energy Fundamentals & Design[M]. John Wiley & Sons, 1985.
- [7] 翁笃鸣, 孙治安, 史 兵. 中国坡地总辐射的计算和分析[J]. 气象科学, 1990, 10(4): 348- 357.
- [8] 曾 燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 基于DEM 的黄河流域天文辐射空间分布[J]. 地理学报, 2003, 58(6): 810- 816
- [9] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modelling from digital terrain data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1990, 28: 963- 969
- [10] 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

Simulation of solar radiation on ground surfaces based on 1 km grid-cells

Zhu Lifen^{1,2}, Tian Yongzhong³, Yue Tianxiang¹, Fan Zemeng¹, Ma Shengnan¹, Wang Ying'an¹

(1. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Institute of Resource and Environment Science, South West Normal University, Chongqing 400715, China)

Abstract Multivariate nonlinear regression model was established to simulate the solar radiation on level surface of 1 km grid-cells in China. The validation shows the prediction accuracy is 96.63 percent. Based on digital elevation model (DEM), the direct radiation ratios of slope to level and the sky view factors of slope were calculated respectively to modify direct and diffuse solar radiation which aimed to get the actual solar radiation on 1 km ground surfaces. The results indicated that great difference of solar radiation between slope and level surfaces existed in hill and mountainous regions, and the maximum difference might reach 67 percent in China. The simulated radiation could be used in extensive fields of agricultural practices and researches, such as assessment of agricultural potential productivity, agricultural zoning, distribution of crops, and returning farmland into forest and grassland.

Key words: solar radiation; sky view factor; simulation; digital elevation model (DEM)