

基于 ViewGIS 3.0 的半干旱黄土丘陵沟壑区 太阳辐射分布规律研究*

骆汉, 赵廷宁, 赵陟峰, 周彬

(水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 基于 ViewGIS 的太阳直接辐射模拟计算功能, 进行了峪口花果山太阳直接辐射时空分布规律的研究, 并对太阳直接辐射模型进行了精度校验和误差分析, 以期为当地的区域规划和生态环境建设提供基础资料和科学依据。主要结论: (1) 太阳辐射总体趋势为一日中日出和日落前后的误差变化较为剧烈, 中间阶段变化平稳。(2) 太阳直接辐射随时间的变化呈现早晚小、中午大的变化规律。(3) 太阳直接辐射随月份的变化也呈单峰型的变化规律, 即7月份太阳直接辐射值最大, 依次向两边递减。(4) 太阳直接辐射随24个节气的变化呈典型的正态分布规律, 即以夏至日太阳直接辐射值为中心依次向两边递减的规律。(5) 不同坡度, 随着坡度增大, 太阳直接辐射日总量逐渐减小; 不同坡向, 太阳直接辐射日总量南坡最大, 东南坡、西南坡次之, 北坡最小。

关键词: 太阳辐射; ViewGIS 3.0; 分布规律

中图分类号: S161.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)03-0206-06

Study on the Distribution Regularity of the Solar Radiation Based on ViewGIS 3.0 in Hilly and Gully Regions on the Loess Plateau

LUO Han, ZHAO Ting-ning, ZHAO Zhifeng, ZHOU Bin

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The research on spatial-temporal distribution regularities of solar direct radiation in Huaguoshan Yukou were conducted, which were based on the solar radiation model of ViewGIS. The purpose of this paper is to provide primal data and scientific evidence for region plan and environment construction. The main conclusions: (1) On the whole solar radiation trend is that during one day errors vary dramatically at the time of sunrise and sunset but at noon errors vary smooth. Cloudy, the errors of contrast of solar direct radiation conversion values and simulating values vary dramatically which showed that error increases with cloudage. So the model doesn't go well in few-cloudy and cloudy days. (2) During one day, the value of solar radiation is low in morning and evening but high at noon. What's more, solar direct radiation variation is of high speed in the process of warming up in the morning and cooling down in the afternoon, while at noon solar direct radiation varies smooth. (3) During a year, solar radiation variation regularity is single peak curve and the max of solar radiation appears respectively in July which is the center of the curve. (4) In 24 solar terms, the max and min of solar radiation appear respectively in the Summer Solstice and the Winter Solstice which follow the regularity of normal distribution with the center of the Summer Solstic. (5) In different slope, along with the gradient increasing, the solar direct radiation is gradually reduced. Between the different orientations, in south slope the total solar direct radiation is the greatest, southeast and southwest less, north least.

Key words: solar radiation; ViewGIS 3.0; distribution regularity

* 收稿日期: 2008-11-17

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划专题“黄土高原丘陵沟壑半干旱区水土保持抗旱造林及径流林业技术试验示范”(2006BAD03A1201)

作者简介: 骆汉(1985-), 男, 山东淄博人, 硕士生, 主要研究方向: 工程绿化。E-mail: gylxjd@163.com

通信作者: 赵廷宁(1962-), 男, 河北阳原人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 工程绿化。E-mail: zhtning@bjfu.edu.cn

太阳与地球和人类的关系是密不可分的, 太阳辐射能对地球及人类生产、生活的重要性归结起来主要有以下几点: (1) 太阳辐射能是大气中一切物理现象、物理过程的形式、发展变化以及植物生长发育最基本的能量源泉; (2) 太阳辐射量是决定气温分布的重要因子; (3) 太阳辐射量及日照时间长度直接影响树种的分布; (4) 太阳辐射量及日照时间长度影响森林生物量和生产力; (5) 太阳辐射与农业生产关系十分密切。太阳辐射与热量、水分条件的不同组合, 形成不同的农业气候类型, 影响到农业生物的地域分布、农业结构、农业生产布局和发展; (6) 太阳辐射量日照时间长度影响建筑物的朝向和形状^[1-2]。而且太阳能的含量相对较大, 其利用也合乎当前世界环境保护的要求, 怎样才能合理并充分利用太阳能越来越受人们关注, 研究太阳辐射的基本规律也就是这项研究的基础工作之一。太阳辐射的分布具有一定的空间和时间规律。一个地区所处的地理位置已经决定了太阳辐射的总量^[3]。然而, 由于地面起伏变化造成局部地面接受太阳光的状况存在很大差异, 太阳辐射在地面还存在一个重新分配过程。不同的坡度、坡向所接受的太阳辐射不同, 造成局部小气候特征差异, 从而形成复杂的太阳辐射空间分布^[4]。另外, 同一地理位置一天之内太阳辐射随着太阳高度角的变化而变化^[5]。国内外许多学者在不同区域对太阳辐射的特性作了研究, 在太阳辐射变化分析, 太阳能特征及太阳辐射计算方法等方面都取得了一定成果^[6-11]。本文在前人研究的基础上, 以中国林业科学研究院地理信息系统研究室开发研制的地理信息系统工具软件 View GIS 3.0 为基础平台, 计算了山西省方山县峪口镇的太阳辐射值, 并分析了太阳辐射的时空分布规律以及特征, 为当地生产生活的合理规划布局及造林管理提供了基础依据。

1 研究区概况

试验地位于山西省吕梁山西麓的方山县峪口镇土桥沟流域(北纬 $37^{\circ}36'58''$, 东经 $110^{\circ}02'55''$)。流域内最高海拔 1 446 m, 试区平均海拔 1 200 m 左右。该地区属暖温带大陆性季风气候, 年平均气温为 7.3°C , 年平均 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的活动积温为 $2\,223.5^{\circ}\text{C}$, 干燥度 1.3。冬春寒冷干燥, 秋季凉爽少雨, 夏季降雨集中, 无霜期 140 d, 霜冻期为 9 月下旬至次年 5 月上旬, 日照总时数 2 496 h。多年平均降水量 416 mm, 且年内分配非常不均, 6-9 月份降水占全年的 70% 以上; 多年平均水面蒸发量高达 1 857.7 mm,

最大蒸发出现在 4-6 月, 表现出典型的北方严重春旱的特征。试验区属典型黄土丘陵沟壑地貌, 地表大部分为新生代第四纪马兰黄土所覆盖, 土壤为黄绵土, 由黄土母质直接发育形成, 层次过渡不明显; 土层深厚, 质地均匀, 为中壤土, pH 值为 8.0~8.4。试验地平均土壤容重 120 g/cm^3 , 田间持水量 21.0% 左右。刺槐人工林下主要野生灌木有杠柳 (*Periploca sepium*)、黄刺玫 (*Rosa xanthina*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、大果榆 (*Ulmus macrocarpa*) 等; 草本植物以菊科和禾本科为主, 菊科蒿属居多, 有铁杆蒿 (*Artemisia sacrorum*)、猪毛蒿 (*A. scoparia*)、阿尔泰紫苑 (*Heteropappus altaicus*)、山野豌豆 (*Vicia amoena*) 等。

2 研究方法

2.1 实地测量

本研究实测数据的采集使用 DFY1 型直接辐射表及三角支架测量太阳直接辐射, DFY2 型天空辐射表及三角支架测量散射辐射, 并用 UT2001 型万用表读出测到的辐射电压值。测定共选取 4 个点, 从太阳升起至落下, 每个点每隔半小时定时测量, 每次测得数据三项, 每个项目各读取三次读数, 取平均值。

2.2 基于 View GIS 3.0 的太阳辐射模拟计算

View GIS 3.0 系统模拟在晴朗无风的天气情况下, 利用数字高程模型 (DEM) 建立了一个能够适用于各种坡度、坡向、地形遮蔽度, 不需要局地参数, 适用范围较广的太阳辐射模型^[12]。

该模型计算太阳直接辐射日总量(或平均量)时, 输入所要日期和时间间隔, 而不需要其它气象参数, 系统自动计算太阳直接辐射日总量(或平均量), 并生成、显示 DEM 图层, 显示太阳辐射分布结果, 在 DEM 图层中可以看到确定时间的太阳辐射日总量(或平均量)。对于直接辐射强度, 输入确定的时间后系统自动计算太阳直接辐射强度, 并显示出来。

2.3 模拟值与实测值精度检验

精度检验是把模型计算出的太阳辐射强度值即模拟值与换算值进行误差比较分析。观测值为同一时刻每个项目仪器三次读数的平均值; 实测值即电压值通过公式计算出来的太阳辐射强度值。误差的计算方法是(直接辐射模型模拟值-换算值)/换算值所得。通过误差的比较分析模拟值与实测值, 可知该模型的应用精度是否满足此次实验的需要, 即晴日的直接辐射模拟值与实测值之间的误差应不超过 10%^[13], 且可以得到误差的变化规律或趋势。

2.4 太阳辐射模拟数据的计算

将方山峪口的纸质地形图扫描数字化,利用 R2V 软件将该图矢量化,并将该图配准且将矢量化后的等高线赋值生成等高线图层,另存成 shp 文件,用 ViewGIS 3.0 软件打开另存为 ViewGIS 的专有文件格式 lay 文件,此时其特征值就是它的高程值,通过对等值线栅格化和高程值的内插,划分规则网格,生成 DEM(数字高程模型)图层(比例尺为 1:50 000)。通过整理、分析研究当地 1985-2007 年共 23 a 的降雨、气温及日照时数得出 2004 年为当地水热因子的典型年份。然后用 ViewGIS 3.0 分别计算该年春分、雨水等 24 个节气日太阳辐射总量,以及该年各月太阳辐射总量和年辐射总量。

3 结果与分析

3.1 精度检验

根据气象学上对晴日的定义,选择了三个典型晴日(A, B, D 三点)进行观测及一个多云日(C 点)进行对比分析。误差的计算方法是(直接辐射模型模拟值- 换算值)/ 换算值所得。通过分析直接辐射模型模拟值与换算值之间的误差可以看出,所有晴日的直接辐射模型模拟值与换算值的平均误差为 4.47%,仅有少数时刻的误差超过 10%,对比谢阳生等人^[12]在宁夏作的模型检验结果,在方山峪口该模型的应用精度可以满足需要。

为了对比明显,图 1 中所用数据为误差的绝对值。从图中可以看出,虽然一天当中误差的变化没有很明显的规律,但仍可看出一些大体的趋势。清晨太阳初升起时(7:00-8:00)太阳高度角和直接辐射强度都较小的情况下误差较大,随后进入一段平稳的变化期(8:30-17:00),太阳即将落山时(17:30-19:00)误差较大。A 点 12:30 时的较大误差是由于当时天空中少数的浮云的遮挡所致。总体趋势为一日中日出和日落前后的误差变化较为剧烈,中间阶段变化平稳。

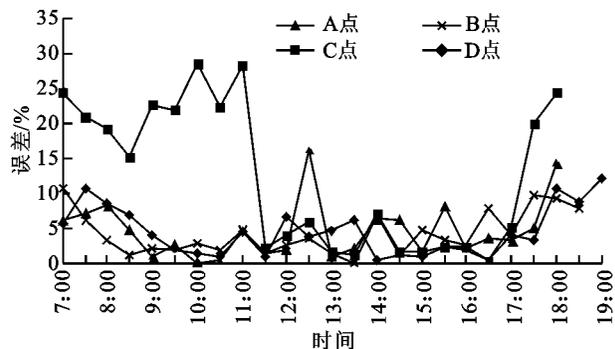


图 1 直接辐射模型模拟值与换算值之间的误差分析

而在 C 点,由于上午及傍晚多云的天气,导致误差明显偏大,这也证明此太阳辐射模型适用于典型的晴日,而对于多云或阴天的天气误差过大,不能很好地模拟实际情况,不宜使用。

3.2 太阳直接辐射分布规律

3.2.1 太阳直接辐射强度的日变化规律 图 2 描述了太阳直接辐射的日变化,从图中可以看出,太阳直接辐射随时间的变化呈明显的倒“U”型变化规律,也就是早晚小、中午大的变化规律,这是由于太阳高度角从早上开始逐渐增大,太阳垂直穿过大气层厚度减小,所以太阳垂直面上的光线强度也随之增强的缘故。太阳直接辐射量在一天当中的最大值出现在正午前后,大约在 11:30-12:30,变化值在不同季节有所不同。另外,图 2 中的直接辐射变化曲线还表明,直接辐射量在上午升温过程中的速度和下午的降温速度比较快,而在正午前后变化则比较缓慢。这是由于在太阳高度角低的早晚时刻,由于大气质量改变迅速,所以垂直光线面上的辐射通量变化最快,当正午前后时,大气质量相对稳定,直接辐射量的变化也就相对较小,对应时段的曲线变化也就相对比较平缓了,这种变化规律在图上可以很明显表示出来。太阳直接辐射量在最大值出现前后的变化比较平缓,由于实验观测间隔为半小时,不能确切得出实际最大值出现的时刻,但可以看出在 11:30-12:30 的变化都比较小,太阳直接辐射最大值就出现于此时间段内。

3.2.2 太阳直接辐射 24 节气动态变化规律 通过太阳直接辐射模型计算统计了方山峪口在典型年 2004 年春分、雨水等 24 个节气的日太阳直接辐射量,图 3 描述了太阳直接辐射的 24 个节气的动态变化规律,从图中可以直观看出,太阳直接辐射随 24 个节气的变化呈典型的正态分布规律,即以夏至日太阳直接辐射值为中心依次向两边递减的规律。由于该太阳直接辐射模型的构建采用了计算大气透射率和光学质量的经验公式,这类公式必须要求晴朗的天气条件,而且模型不考虑大气参数如云量、空气中的水溶胶等对辐射传播的影响,所以在纬度不变基于 GIS 的太阳直接辐射模型应用研究的情况下,太阳高度角的变化成为其最主要的影响因素,一年中太阳高度以夏至日最高,冬至日最低,所以太阳直接辐射夏至日达到最大值为 29.39 MJ/m^2 ,小寒日最小为 5.67 MJ/m^2 。从图中还可以看出,在冬夏两季中太阳直接辐射量随节气的变化幅度较平缓,变化幅度在 1 MJ/m^2 左右;春秋两季太阳直接辐射量随节气的变化较快,变化幅度在 2 MJ/m^2 左右。

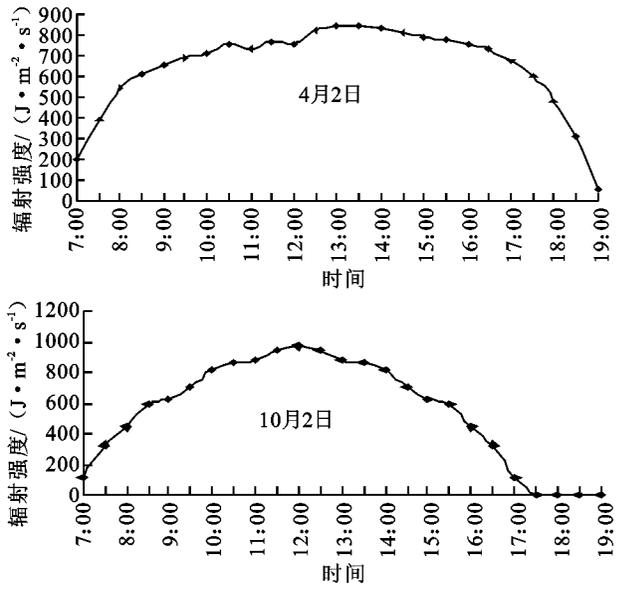
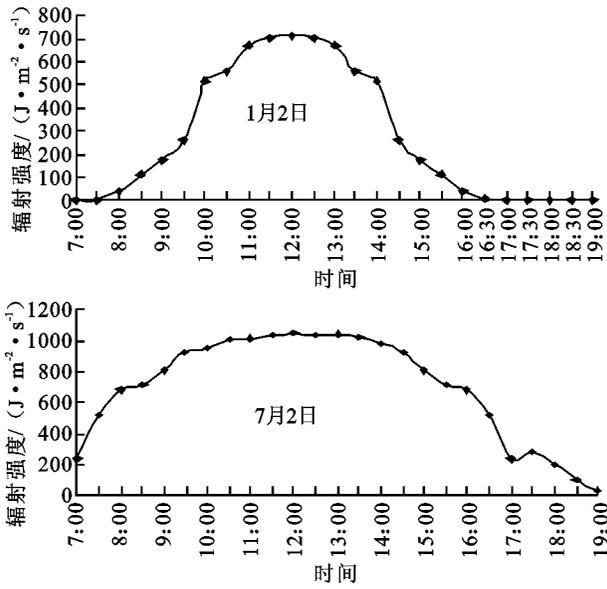


图 2 1月2日-10月2日太阳直接辐射日变化规律

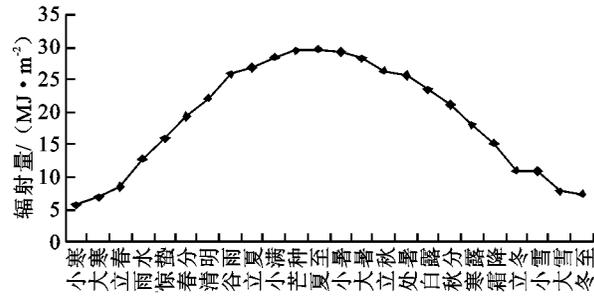


图 3 直接辐射 24 节气变化规律

3.2.3 太阳直接辐射的月变化规律 图 4 描述了太阳直接辐射的月际即年内的动态变化规律, 从图中可以看出太阳直接辐射随月份的变化也呈单峰型的变化规律。即 7 月份太阳直接辐射值最大, 依次向两边递减。其中 7 月份最大值达到 882.68 MJ/m², 12 月份最小为 283.33 MJ/m²。7-12 月, 太阳直接辐射值逐月降低, 其中以 8-11 月间降低最明显。12 月至次年 1 月, 太阳直接辐射值变化不大。影响到达地面太阳直接辐射强弱变化的因素有很多, 决定太阳直接辐射逐月变化规律的主要因素是太阳的运行规律, 即到达大气层顶的太阳辐射随太阳位置而变化, 其月直接辐射量基本为定值。

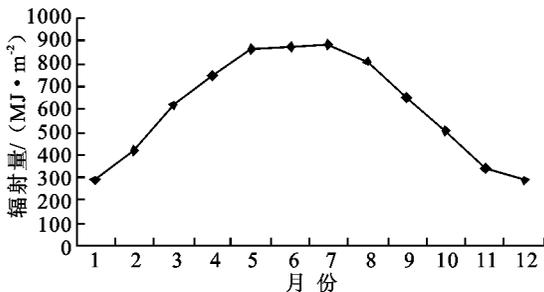


图 4 直接辐射的月际变化规律

3.2.4 太阳直接辐射随坡度的变化规律 地形是

影响太阳辐射分布的一个重要因素。不同的坡度、坡向, 都可以引起地形的相互遮蔽, 水平面上所接受太阳直接辐射也就发生了变化。此次研究在只考虑坡度和坡向这两个地形因子的影响下, 利用 View-GIS 3.0 系统软件, 在峪口 2008 年 4 月 2 日的太阳之间辐射日总量图层中, 随即选取不同坡度分级(0~10°, 11°~20°, 21°~30°, 31°~40°, 40°以上)和不同坡向(东、南、西、北、东南、东北、西南、西北)的点若干, 对比各个点一日之内在单位面积上的太阳直接辐射量(日均量)只考虑坡度因素而不考虑坡向的影响来分析太阳直接辐射量的分布, 坡度在 0~10°时, 太阳辐射日均量的平均值为 2 215.982 J/cm²; 坡度 11°~20°时, 太阳辐射日均量的平均值为 2 180.979 J/cm²; 坡度 21°~30°时, 太阳辐射日均量的平均值为 2 174.894 J/cm²; 坡度 31°~40°时, 太阳辐射日均量的平均值为 1 973.788 J/cm²; 坡度在 40°以上时, 太阳辐射日均量的平均值为 1 853.780 J/cm²。用各平均值做不同坡度下的太阳直接辐射曲线图(图 5)。从图中可以直观看出, 随着坡度的增大, 太阳直接辐射日均量呈递减趋势, 坡度从 0~10°到 40°以上太阳辐射日均量的平均值共减小了 362.202 J/cm², 降低了 16.34%。而坡度在 30°处为一个明显的拐点, 降低了 9.25% (从 21°~30°到 31°~40°之间减小了 201.106 J/cm²), 坡度大于 30°后太阳辐射日均量的平均值减小速率明显加快。

3.2.5 太阳直接辐射随坡向的变化规律 只考虑坡向因素而不考虑坡度对太阳直接辐射的影响, 可以看出在任何坡度条件下, 太阳直接辐射值都是南坡最大, 太阳直接辐射日均量的平均值为 2 215.286

J/cm^2 , 东南坡、西南坡次之, 东南坡太阳直接辐射日均量的平均值为 $2179.673 J/cm^2$, 西南坡太阳直接辐射日均量的平均值为 $2121.247 J/cm^2$; 北坡最小, 太阳直接辐射日均量的平均值为 $1960.537 J/cm^2$, 北坡比南坡减小了 $254.749 J/cm^2$, 降低了 11.5% 。并且, 东坡和西坡太阳直接辐射值要大于东北坡和西北坡的太阳直接辐射值, 东坡和西坡太阳直接辐射日均量的平均值为 $2090.403 J/cm^2$ 和 $2051.213 J/cm^2$, 而东北坡和西北坡太阳直接辐射日均量的平均值为 $2024.538 J/cm^2$ 和 $1996.181 J/cm^2$ 。为了更加直观的反映结果, 做不同坡向的太阳直接辐射日均量的曲线图, 如图 6。

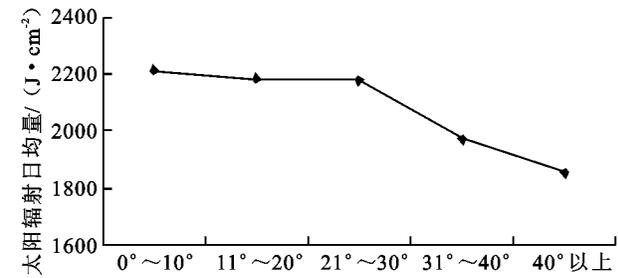


图 5 不同坡度太阳辐射曲线图

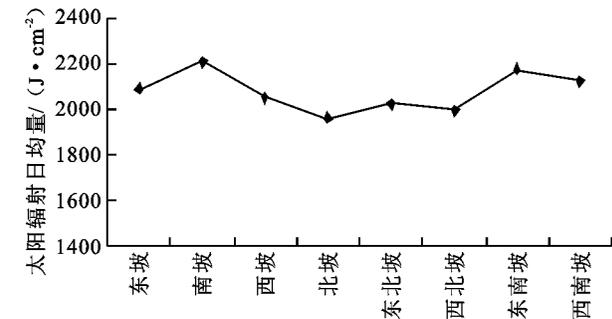


图 6 不同坡向太阳辐射曲线图

坡向对太阳辐射的影响, 主要是由于在不同的坡向, 太阳光线的入射角不同, 使得北坡、东北坡和西北坡向的地面所受太阳光照的时间要短于其它坡向。这样, 在一天之内, 北坡、东北坡和西北坡向地面累积接受的太阳直接辐射日总量小于其它坡向。

经过上述以 2008 年 4 月 2 日为例, 对峪口花果山不同坡度、不同坡向太阳直接辐射分布的分析讨论, 可以得出峪口花果山不同地形条件下的太阳直接辐射日分布规律:

(1) 不同坡度, 随着坡度增大, 太阳直接辐射日总量逐渐减小。坡度从 $0 \sim 10^\circ$ 到 40° 以上太阳辐射日均量的平均值共减小了 $362.202 J/cm^2$, 降低了 16.34% 。而坡度在 30° 处为一个明显的拐点, 降低了 9.25% (从 $21^\circ \sim 30^\circ$ 到 $31^\circ \sim 40^\circ$ 减小了 $201.106 J/cm^2$), 坡度大于 30° 后太阳辐射日均量的平均值减小速率明显加快。

(2) 不同坡向, 太阳直接辐射日总量南坡 ($2215.286 J/cm^2$) > 东南坡 ($2179.673 J/cm^2$) > 西南坡 ($2121.247 J/cm^2$) > 东坡 ($2090.403 J/cm^2$) > 西坡 ($2051.213 J/cm^2$) > 东北坡 ($2024.538 J/cm^2$) > 西北坡 ($1996.181 J/cm^2$) > 北坡 ($1960.537 J/cm^2$)。南坡最大, 东南坡、西南坡次之, 北坡最小, 北坡比南坡减小了 $254.749 J/cm^2$, 降低了 11.5% ; 且东坡、西坡太阳直接辐射量大于东北坡、西北坡太阳直接辐射量。

4 讨论

此次研究基于 View GIS 上的太阳直接辐射模型上计算了峪口花果山的太阳直接辐射值, 同时结合实地调查与长期太阳直接辐射观测对模型的精度进行了检验, 并分析了太阳辐射的时空分布规律。总的来看, 取得了一些成果, 但是, 太阳辐射是一个复杂的自然地理、天文、气象的综合过程, 对太阳辐射与地理信息系统 (GIS) 相结合的研究, 还需要考虑更多的气象学、地理学因素, 由于客观条件限制, 许多环节和步骤还需进一步完善, 建议以后的工作和研究中应着重注意误差问题以及其它几个问题:

(1) 太阳辐射模型需进一步完善, 本研究采用的模型是只适用于晴空条件下的太阳直接辐射模型, 因此本文只计算研究了晴空条件下太阳直接辐射的分布规律。而对于在少云、多云条件下太阳直接辐射和任意气象条件下的散射辐射则没有涉及, 以后可以向这个方向努力。(2) 考虑所有地形因素而不是只考虑一个因素的前提下, 如何来综合分析太阳辐射的分布规律。(3) 只实地观测了某一季节特定日期的数值, 应完善各个季节的实测数据, 进行实测值与模拟值的比较, 综合全面分析。

5 结论

此次研究以峪口花果山典型代表研究区域, 在中国林业科学研究院地理信息系统研究室开发研制的基于 View GIS 上, 利用 DEM (数字高程模型) 建立的一个能够适用于各种坡度、坡向、地形遮蔽度, 不需要局地参数, 适用范围较广的太阳直接辐射模型为基础, 计算了该地区的太阳直接辐射值, 同时结合实地调查与长期太阳直接辐射观测对模型的精度进行了检验, 并分析了太阳辐射的时空分布规律以及特征, 研究的主要成果及结论有:

(1) 通过分析直接辐射模型计算值与实测换算值之间的误差可以看出, 所有晴日的直接辐射模型模拟值与换算值的平均误差为 4.47% , 仅有少数时

刻的误差超过 10%, 对比谢阳生等人在宁夏作的模型检验结果, 在方山峪口该模型的应用精度可以满足需要。总体趋势为一日中日出和日落前后的误差变化较为剧烈, 中间阶段变化平稳。多云时直接辐射模型模拟值与换算值相比明显误差偏大, 云量越多误差越大, 故模型在少云和多云的天气状况下不能很好地模拟实际情况。

(2) 太阳直接辐射随时间的变化呈明显的倒“U”型变化规律, 也就是早晚小、中午大的变化规律, 太阳直接辐射量在一天当中的最大值出现在正午前后, 大约在 11:30–12:30, 变化值在不同季节有所不同。另外, 直接辐射量在上午升温过程中的速度和下午的降温速度比较快, 而在正午前后变化则比较缓慢。

(3) 太阳直接辐射随 24 个节气的变化呈典型的正态分布规律, 即以夏至日太阳直接辐射值为中心依次向两边递减的规律。太阳直接辐射夏至日达到最大值为 29.39 MJ/m^2 , 小寒日最小为 5.67 MJ/m^2 。在冬夏两季中太阳直接辐射量随节气的变化幅度较平缓, 变化幅度在 1 MJ/m^2 左右; 春秋两季太阳直接辐射量随节气的变化较快, 变化幅度在 2 MJ/m^2 左右。

(4) 太阳直接辐射随月份的变化也呈单峰型的变化规律。即 7 月份太阳直接辐射值最大, 依次向两边递减。其中 7 月份最大值达到 882.68 MJ/m^2 , 12 月份最小为 283.33 MJ/m^2 。7–12 月, 太阳直接辐射值逐月降低, 其中以 8–11 月间降低最明显。12 月至次年 1 月, 太阳直接辐射值变化不大。

(5) 在仅考虑坡度(坡向)因素而不考虑其他影响因素的前提下, 分析不同坡度(坡向)的太阳辐射分布规律。不同坡度, 随着坡度增大, 太阳直接辐射日总量逐渐减小。坡度从 0° 到 40° 以上太阳辐射日均量的平均值共减小了 362.202 J/cm^2 , 降低了 16.34%。而坡度在 30° 处为一个明显的拐点(从 $21^\circ \sim 30^\circ$ 到 $31^\circ \sim 40^\circ$ 减小了 201.106 J/cm^2), 坡度大于 30° 后太阳辐射日均量的平均值减小速率明显

加快。不同坡向, 太阳直接辐射日总量南坡最大 (2215.286 J/cm^2); 东南坡、西南坡次之, 北坡最小 (1960.537 J/cm^2), 比南坡减小了 254.749 J/cm^2 , 降低了 11.5%; 且东、西坡太阳直接辐射量大于东北坡、西北坡太阳直接辐射量。

参考文献:

- [1] 赛义夫 A A M (沙特阿拉伯). 太阳能工程[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [2] 冷长庚. 太阳能及其利用[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [3] 张雪芬, 陈东, 付祥健, 等. 河南省近 40 年太阳辐射变化规律及其成因探讨[J]. 气象, 1999, 25(3): 24–25.
- [4] 李占清, 翁笃鸣. 坡面散射辐射的分布特征及计算模式[J]. 气象学报, 1988, 46(3): 349–356.
- [5] 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): 679–687.
- [6] 李铁, 周永吉, 门敏慧. 黑龙江省近 40 年太阳辐射变化分析[J]. 黑龙江气象, 1999(3): 31–33.
- [7] 锡福, 唐红玉, 汪青春. 西宁地区太阳辐射能特征分析[J]. 青海科技, 2000, 7(4): 27–32.
- [8] 刘新安, 范辽生, 王艳华, 等. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征[J]. 资源科学, 2002, 24(1): 82–87.
- [9] Dubayah R. Estimating Net Solar Radiation Using Land Sat Thematic Mapper and Digital Elevation Data[J]. Water Resources Research, 1992, 28(9): 2469–2484.
- [10] Dubayah R, Donzier J, Dacis F W. Topographic Distribution of Clear Sky Radiation over the Konza Prairie, Kansas[J]. Water Resources Research, 1990, 26(4): 679–690.
- [11] Dubayah R, Rich P M. Topographic Solar Radiation Models for GIS[J]. INTJ Geographical Information Systems, 1995, 9(4): 405–419.
- [12] 谢阳生, 唐小明, 黄水生. 基于 GIS 太阳直接辐射模型的研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(1): 8–12.
- [13] 程复. 基于 GIS 的接坝山地太阳直接辐射模型应用研究: 以河北丰宁小坝子乡为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.