

起伏地形下我国太阳散射辐射分布式模拟

刘生¹, 邱新法², 王潇宇²

(南京信息工程大学 1. 计算机与软件学院; 2 遥感学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 基于 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率的数字高程模型 (DEM) 数据, 考虑了地形因子对太阳散射辐射的影响, 改进了开阔度的计算模型, 确定了我国气候平均情况下月散射系数的空间分布, 实现了实际起伏地形下我国太阳散射辐射的分布式模拟, 计算了我国范围内 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率 1—12 月气候平均太阳散射辐射的空间分布。结果表明: 局地地形对太阳散射辐射空间分布的影响比较明显; 模拟结果可靠, 可进行大数据量处理, 适用于遥感图像处理、地理信息系统等数据处理平台。

关键词: 起伏地形; 太阳散射辐射; DEM; 分布式模拟

中图分类号: P422.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2007)03-0371-06

Distributed Modeling of Diffuse Solar Radiation over Rugged Terrains of China

LU Sheng¹, QU Xin-fa², WANG Xiaoyu²

(1 School of Computer Software; 2 School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract Using the DEM (digital elevation model) data as input and giving an all-sided consideration on terrain factors influencing diffuse solar radiation (DSR), with topography openness model improved on, establishing monthly diffuse coefficient model, a distributed model for calculating DSR over rugged terrains is developed, and monthly DSR with the resolution of $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ for the rugged terrains of China is generated. Results suggest that (1) the topographical factors have relatively obvious effect on the spatial distribution of DSR; (2) the proposed model is proved to be able to treat volumes of data and is applicable to satellite image processing platform or GIS.

Key words rugged terrains; diffuse solar radiation; DEM; distributed modeling

0 引言

散射辐射是太阳辐射研究中的一个基本而重要的分量, 它在地表辐射平衡及其能量交换中扮演着重要的角色, 因此散射辐射的计算对于研究太阳辐射、陆面过程以及描述地表辐射平衡与能量交换过程具有十分重要的理论意义和应用价值。

近年来, 散射辐射的计算方法得到了很大的发展。对于水平面散射辐射的计算及其基本特征问题已有大量的研究和比较可靠的计算方法^[1-2], 主要有经验模型^[3]和理论模型^[4]等计算形式。对于起伏地形(坡地、山区)的辐射研究, 大都由于受地形数据、计算手段等因素的限制, 多是针对单一、无限长

的坡面(倾斜面)进行的^[5-6], 而在实际起伏地形中, 测点获得的散射辐射量除了要受到天文地理因子、气象因子、大气物理因子等的影响之外, 还与测点的地形因子(如坡向、坡度以及周围地形之间的相互遮蔽等)有关, 使得起伏地形下太阳散射辐射场的计算变得非常复杂。因此, 了解和研究起伏地形下散射辐射场的特征和计算方法是辐射研究的难点。分布式模型由于可以清楚地考虑下垫面各向异性的复杂结构, 为起伏地形下太阳散射辐射空间分布的研究提供了新的研究方法, 有很多专家学者在这方面做了大量研究工作^[7-8]。李占清等^[9-10]曾采用从地形图中直接读取 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网格点高程的方法, 描绘了 $3\text{ km} \times 3.5\text{ km}$ 范围内山区太阳总辐射

的分布,为解决地形对辐射的遮蔽影响问题做出了开创性的尝试。李新等^[11]尝试利用数字高程模型 (DEM) 计算山地辐射的理论研究和局部区域试验。而在起伏地形下,对我国全国范围内太阳散射辐射的空间分布的研究并不多见。

本文在以往研究工作的基础上,全面考虑了地形因子对散射辐射的影响,利用所建立的起伏地形下太阳散射辐射分布式模型,以 1 km × 1 km 分辨率的 DEM 数据作为地形的综合反映,改进了地形遮蔽度的计算模型,实现了起伏地形下我国范围内太阳散射辐射的分布式模拟,并完成了 1 km × 1 km 分辨率我国 1—12 月散射辐射的精细空间分布制图,探讨了局部地形对我国散射辐射空间分布影响的基本规律,为利用常规气象观测资料定量模拟起伏地形太阳散射辐射提供了一种切实可行的方法。

1 资料来源及数据处理

本文所使用的资料主要包括: (1) 我国 1:100 万比例尺 1 km × 1 km 分辨率的 DEM 数据; (2) 由中国气象局国家气象中心提供的气象资料 (该资料已经过初步的质量控制), 所有要素的时间单位为月,其中的月太阳辐射资料年代为 1957—2001 年,台站总数为 143 个,包含总辐射资料 41 173 条记录,直接辐射资料 26 917 条记录,散射辐射资料 26 918 条记录。经过严格的质量检测及与天文辐射对比分析,剔除了其中的无效记录;通过与日照百分率等常规气象资料的匹配,舍去无常规气象资料的数据,最终得到的有效记录为:总辐射资料 37 304 条,直接辐射资料 23 995 条,散射辐射资料 23 996 条。

2 散射辐射计算模型

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起伏地形下的散射辐射量是比较困难的^[11]。现有的坡地散射辐射计算模型有两类,即各向同性模式^[12]和各向异性模式^[13-14]。

2.1 各向同性模式

在假设天穹各散射点在各方向上的散射强度呈均匀分布的前提下,到达起伏地形下的散射辐射完全取决于测点的开阔度 V,起伏地形下散射辐射月总量 $Q_{dif\alpha\beta}$ 的计算式为

$$Q_{dif\alpha\beta} = Q_{dir}V。 \tag{1}$$

式中: $Q_{dif\alpha\beta}$ 为起伏地形下散射辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$); Q_{dir} 为水平面散射辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$), 其

计算式为

$$Q_{dir} = Q_{0k_{dir}} = Q_0 \frac{Q_{dif}}{Q_0} = Q_0 \frac{Q - Q_{dir}}{Q_0} = Q_0 \left(\frac{Q}{Q_0} - \frac{Q_{dir}}{Q_0} \right) = Q_0 (k_{tot} - k_{dir})。 \tag{2}$$

式中: Q_0 为水平面上的天文辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$); k_{dir} 为散射系数,为水平面散射辐射月总量与水平面天文辐射月总量之比; Q 为水平面上太阳总辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$); Q_{dir} 为水平面上太阳直接辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$); k_{tot} 为晴空指数,为水平面太阳总辐射月总量与水平面天文辐射月总量之比; k_{dir} 为直接透射率,为水平面直接辐射月总量与水平面天文辐射月总量之比。

2.2 各向异性模式

在散射辐射各向异性的前提下,起伏地形中散射辐射的计算式为

$$Q_{dif\alpha\beta} = Q_{dir} \left\{ \frac{[(Q - Q_{dir}) Q_0] R_{dir} + V [1 - [(Q - Q_{dir}) Q_0]]}{V [1 - [(Q - Q_{dir}) Q_0]]} \right\} = Q_{dir} [(Q_{dir} Q_0) R_{dir} + V (1 - Q_{dir} Q_0)] = Q_{dir} [k_{dir} R_{dir} + V (1 - k_{dir})]。 \tag{3}$$

式中: R_{dir} 为起伏地形下天文辐射月总量与水平面天文辐射月总量之比 $\frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0}$, $Q_{0\alpha\beta}$ 为起伏地形下天文辐射月总量 ($MJ \cdot m^{-2}$), 其计算模型详见文献 [15]; 其他各项含义同上。

不同的学者曾对这两个模式做过试验和比较,得出的结论也不尽相同^[16-18]。本文根据邱新法^[19]对各向同性和各向异性模式的比较结果,采用各向异性模式计算起伏地形下散射辐射的空间分布。

3 月散射系数的估算模式

无论使用各向同性模式,还是使用各向异性模式,计算起伏地形下的散射辐射,都应该首先估算水平面上的散射辐射 Q_{dir0} 。由 (2) 式,可以得出散射系数与晴空指数 k_{tot} 和直接透射率 k_{dir} 之间的关系式

$$k_{dif} = k_{tot} - k_{dir}。 \tag{4}$$

3.1 月晴空指数的估算模式

本文采用文献 [20] 中的方法确定了晴空指数 k_{tot} 与日照百分率 S 的函数关系为

$$k_{tot} = \frac{Q}{Q_0} = a + bS。 \tag{5}$$

式中: S 为日照百分率; a、b 为经验系数,其他各项含义同上。

对晴空指数的各种估算模式进行误差统计分

析, 在综合考虑模式中经验系数空间变化和时间变化的情形下, 确定使用单站分月模式建立晴空指数的估算模式。由于晴空指数是与地形没有直接关系的大气参数, 直接采用内插法获取全国晴空指数的空间分布。

3.2 月直接透射率的估算模式

与晴空指数类似, 采用文献 [21-22] 中的方法确定直接透射率 k_{dir} 与日照百分率 S 的函数形式为

$$k_{dir} = \frac{Q_{dir}}{Q_0} = cS + dS^2. \quad (6)$$

式中: c, d 为经验系数, 其他各项含义同上。

同样使用单站分月模式建立直接透射率的估算模式, 并采用内插法获取全国直接透射率的空间分布。

根据 (4) ~ (6) 式, 即可得出散射系数的空间分布。

4 山地开阔度的计算模型

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。在以往的研究中, 山地任一坡面的开阔度 V 按下式计算:

$$V = (1 + \cos\alpha) / 2. \quad (7)$$

式中: α 为坡面的坡度。上式仅仅考虑了坡面自身的遮蔽作用, 代表单一无限长的倾斜面的自身遮蔽作用, 而实际起伏地形中, 山地的开阔度需要考虑地形之间的相互遮蔽作用。

可以证明, 单方位山地开阔度为

$$V_i = 1 - \sin\alpha_i. \quad (8)$$

因为

$$S_{球冠} = 2\pi R^2 (1 - \sin\alpha), \quad (9)$$

$$S_{半球} = 2\pi R^2, \quad (10)$$

所以

$$\frac{S_{球冠}}{S_{半球}} = 1 - \sin\alpha. \quad (11)$$

起伏地形中, 山地的开阔度取决于周围地形的相互遮蔽, 需要在 2π 方位内进行数值积分。对于起伏地形中任一山地, 建立如下山地开阔度分布式模型算法:

(1) 确定方位角积分次数

给定方位角积分步长 $\Delta\phi$ (度), 沿 2π 圆周需要进行的积分次数为

$$n = \text{int} \left[\frac{360}{\Delta\phi} \right]. \quad (12)$$

式中: $\text{int}()$ 为取整函数。

(2) 计算各积分线方位角

以正南向为起始积分线, 对应起始方位角 $\phi_0 = 0$ 按顺时针方向积分, 各积分线方位角为

$$\phi_i = \phi_0 + i \cdot \Delta\phi, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1. \quad (13)$$

(3) 计算各积分线山地开阔度 V_i

以山地中任意一点 P 为起点, 沿 ϕ_i 方位作直线 L_i , 直线 L_i 方向上周围地形对 P 点的开阔度 V_i 取决于 P 点对沿线各点的最大仰角。实际计算中, 地形用数字高程模型 DEM 来表示, 由于 DEM 是由有固定长和宽的格网组成, 在计算模型中, 自 P 点开始沿直线 L_i 按照距离步长 ΔL 依次判断 P 点对相应格网点的仰角状况, 即可确定 ϕ_i 方位上周围地形对 P 点的开阔度 V_{i0} 。

$$V_i = 1 - \sin\alpha_i. \quad (14)$$

式中: α_i 为直线 L_i 方向上周围山地对 P 点的遮蔽角。

实际计算过程中, 直线 L_i 的长度不必要取无限长, 取一定的遮蔽范围半径 R 即可满足计算要求。

(4) 计算山地开阔度 V

沿 2π 圆周对各积分线山地开阔度 V_i 求平均, 即为山地开阔度 V 。

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} V_{i0}. \quad (15)$$

以我国 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率的 DEM 数据作为地形的综合反映, 按照上述 (15) 式计算我国地形开阔度的空间分布 (图 1)。由图 1 可见, 地形越平坦, 开阔度数值越高, 说明地形遮蔽越少; 地形遮蔽度的分布与地形起伏的分布一致, 在天山山脉、昆仑山脉、横断山脉等大地形区域, 地形之间的遮蔽作用尤其明显。

5 起伏地形下散射辐射的空间分布

按照 (3) 式分别计算了实际起伏地形下全国 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率 1—12 月及年气候平均散射辐射。图 2~4 分别为起伏地形下全国 1 月、7 月和年气候平均散射辐射的精细空间分布。

从散射辐射的空间分布图中可以看出:

(1) 与直接辐射^[22]相比, 散射辐射的分布比较均匀, 即变化幅度较小, 这在散射辐射的空间变化、地形配置等方面都有不同程度的表现。

(2) 局地地形对散射辐射作用比较明显, 尤其是在天山山脉、昆仑山脉、横断山脉等大地形区域, 地形起伏程度高, 地形之间的遮蔽作用明显, 测点接收的散射辐射少。

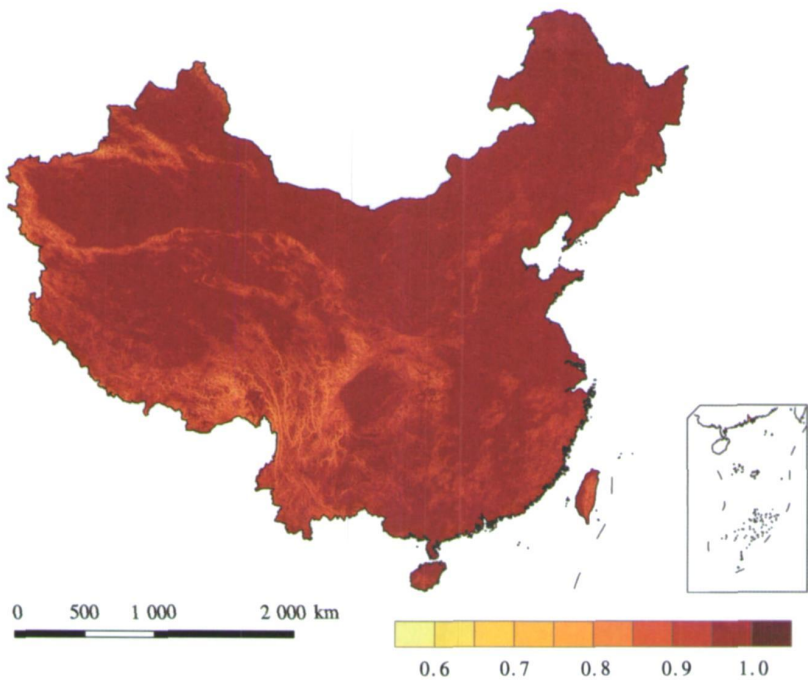


图 1 全国地形开阔度空间分布

Fig 1 Spatial distribution of the terrain openness of China

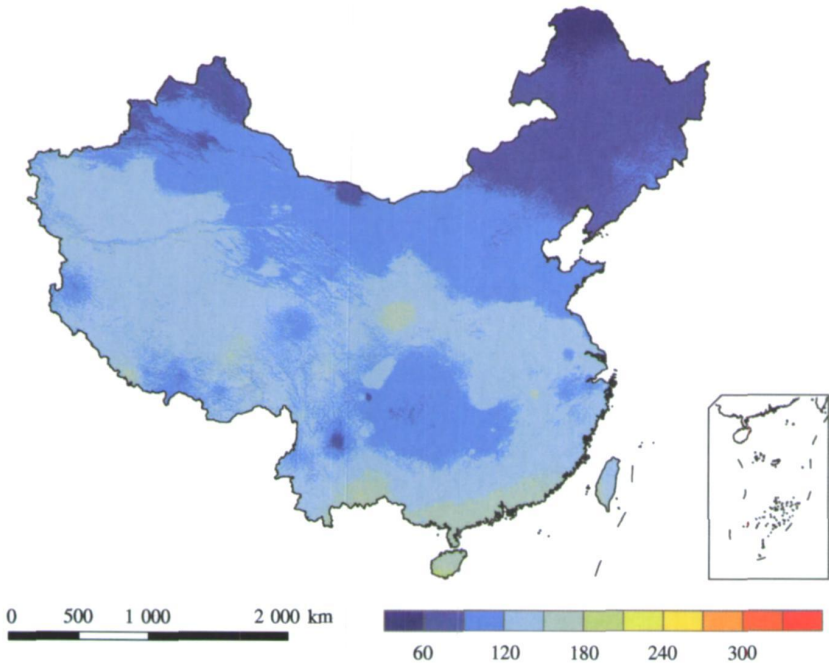


图 2 全国 1 月气候平均散射辐射空间分布 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig 2 Spatial distribution of mean diffuse solar radiation over rugged terrains of China in January (units $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

(3)夏季散射辐射较大, 冬季散射辐射较小, 这与天文辐射的时间变化趋势一致。

(4)冬季散射辐射随纬度变化的特征很明显, 这也与天文辐射在不同季节的空间分布特征一致。

总体上讲, 年气候平均散射辐射的分布特点则

是低纬大于高纬, 干旱区大于湿润区。南疆沙漠地区是全国稳定的高值中心, 这与该地区空气干燥、大气混浊以及云状以中高云、积状云居多有关。由此高中心向柴达木盆地、向东沿河西走廊至黄土高原一带形成一东西向高值带。华南和台湾的散射辐射

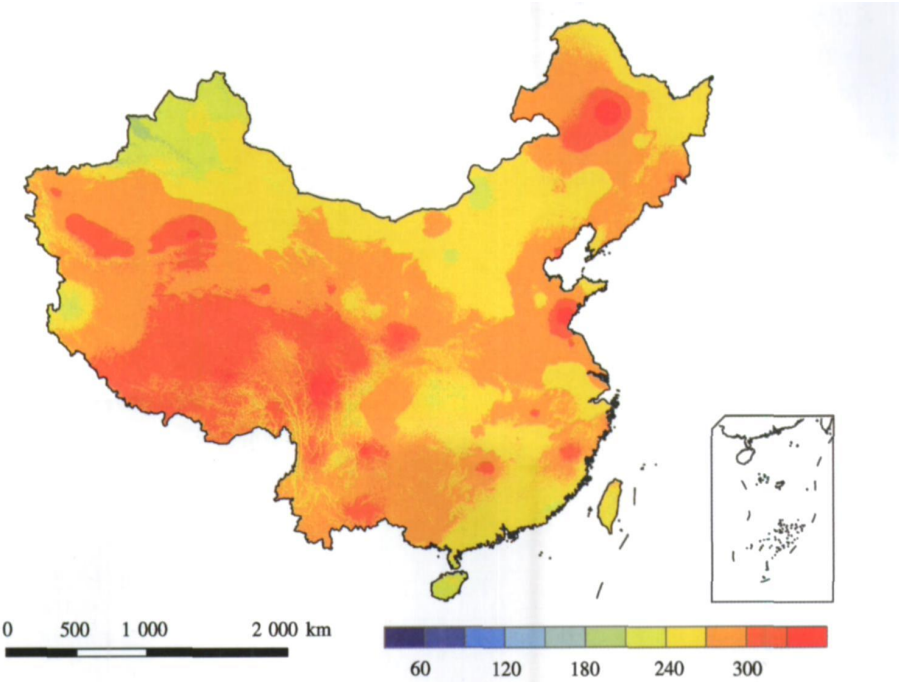


图 3 全国 7 月气候平均散射辐射空间分布 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig 3 Spatial distribution of mean diffuse solar radiation over rugged terrains of China in July(units $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

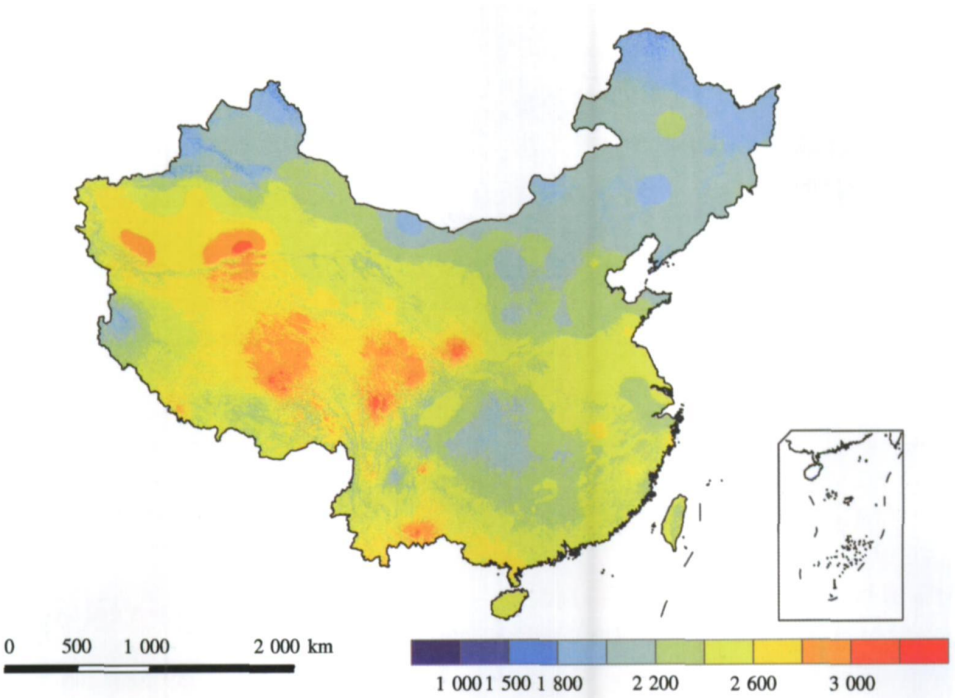


图 4 全国气候平均年散射辐射的空间分布 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig 4 Spatial distribution of annual mean diffuse solar radiation over rugged terrains of China(units $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

则因纬度较低而较强。川黔山地、浙闽丘陵地区及黄河下游地区年平均散射辐射较小, 其成因与上述地区气候湿润、低云和雾较多有关。在 50°N 以北地区, 则因纬度高, 使散射辐射量偏低。局地地形之间的相互遮蔽作用始终影响着散射辐射的精细空间

分布。

为了检验数值模拟结果, 使用现有的全国 76 个日射站点散射辐射的月平均观测资料与模拟结果进行了误差统计与分析 (表 1)。

表 1 起伏地形下我国各月太阳散射辐射
的平均相对误差分析

Table 1 Mean relative bias errors of monthly
mean diffuse solar radiation over rugged terrains of China

月份	平均相对误差 /%	月份	平均相对误差 /%
1	6.29	7	4.24
2	5.73	8	6.10
3	4.78	9	6.18
4	4.82	10	4.70
5	4.51	11	8.15
6	4.34	12	9.28

由表 1 可知: 各月平均相对误差值均不超过 10%, 其中 7 月的计算精度最高, 平均相对误差仅 4.24%。各月平均相对误差的平均值为 5.76%, 年散射辐射的平均相对误差仅为 3.77%。经过误差检验分析证明, 本文所建立的起伏地形下太阳散射辐射分布式模型计算结果可靠, 计算精度高, 可以很好的满足实际应用需要。

6 结论

散射辐射是地表太阳总辐射的一个重要分量。本文讨论了起伏地形下太阳散射辐射的计算方法, 改进了地形开阔度的计算模型, 并利用日射站实际观测资料和常规气象站观测资料, 确定了我国气候平均月散射系数的空间分布, 分别计算了起伏地形下 1 km × 1 km 分辨率我国 1—12 月及年气候平均太阳散射辐射的空间分布。通过研究, 得出以下结论:

- (1) 各地散射辐射的季节变化与天文辐射基本保持一致。
- (2) 地形越开阔, 测点接收的散射辐射就越多, 反之就越少。
- (3) 散射辐射机理需要做深入研究, 特别是云量、云的类型对散射辐射的影响规律及其在时间和空间上的差异值得深入探讨。
- (4) 模拟结果可靠, 可进行大数据量处理, 适用于遥感图像处理、地理信息系统等数据处理平台。

参考文献:

[1] 翁笃鸣. 中国辐射气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1997.
[2] Iqbal M. Correlation of average diffuse and beam radiation with

hours of bright sunshine [J]. Solar Energy, 1979, 23 (2): 169–173.
[3] Liu B Y H, Jordan R C. The interrelationship and characteristic distribution of direct diffuse and total solar radiation [J]. Solar Energy, 1960 4 (3): 1–19.
[4] Iqbal M. An introduction to solar radiation [M]. Toronto: Academic Press, 1983
[5] Klucher T M. Evaluation of Models to predict insolation on tilted surfaces [J]. Solar Energy, 1979, 23 (2): 111–114
[6] 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.
[7] Tian Y Q. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 109 (1): 67–74.
[8] Antonic O. Modeling daily topographic solar radiation without site-specific hourly radiation data [J]. Ecological Modeling, 1998, 113: 31–40
[9] 李占清, 翁笃鸣. 丘陵山区地面辐射场的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 1990 13 (2): 184–192
[10] 李占清, 翁笃鸣. 起伏地形中的散射辐射及其计算模式 [J]. 南京气象学院学报, 1987, 10 (2): 139–151
[11] 李新, 程国栋, 陈贤章, 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.
[12] Liu B Y H, Jordan R C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator [J]. Trans ASHRAE, 1962, 67: 526–541
[13] Hay J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. Solar Energy, 1979, 23 (4): 301–307
[14] 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.
[15] 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.
[16] Ma C C Y, Iqbal M. Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surface [J]. Solar Energy, 1983, 31 (3): 313–317
[17] Gopinathan K K. Solar radiation on inclined surfaces [J]. Solar Energy, 1990 45 (1): 19–25
[18] Nijmeh S, Mambo R. Testing of two models for computing global solar radiation on tilted surfaces [J]. Renewable Energy, 2000, 20 (1): 75–81.
[19] 邱新法. 起伏地形下太阳分布式模型研究 [D]. 南京: 南京大学地理信息科学系, 2003 70–71
[20] 杨美敏, 曾燕, 邱新法, 等. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究 [J]. 应用气象学报, 2005, 16 (4): 243–248.
[21] 王潇宇, 邱新法, 曾燕, 等. 起伏地形下我国太阳直接辐射空间制图 [J]. 现代测绘, 2004, 27 (5): 15–17, 20.
[22] 王潇宇, 邱新法, 曾燕. 起伏地形下我国太阳直接辐射的分布式模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28 (3): 296–301.