

尹静秋,邱新法,何永健,等. 2011. 起伏地形下浙江省散射辐射时空分异规律模拟[J]. 大气科学学报,34(1):93-98.

Yin Jing-qiu, Qiu Xin-fa, He Yong-jian, et al. 2011. A model of the spatial and temporal variation rules of diffuse solar radiation over rugged terrain in Zhejiang Province[J]. Trans Atmos Sci, 34(1):93-98.

起伏地形下浙江省散射辐射时空分异规律模拟

尹静秋¹, 邱新法¹, 何永健¹, 刘会玉²

(1. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044; 2. 南京师范大学 地理科学学院, 江苏 南京 210046)

摘要:结合影响起伏地形下太阳散射辐射的天空因素与地面因素,通过基于数字高程模型(DEM)数据的起伏地形下天文辐射模型和地形开阔度模型,综合考虑地面因素对散射辐射的影响;基于常规地面气象站观测资料建立的水平面散射辐射模型,考虑天空因素对散射辐射的影响;建立了起伏地形下浙江省散射辐射分布式估算模型;逐月计算了浙江省散射辐射(100 m × 100 m)的空间分布。结果表明:散射分量分布与地理地形因子、季风影响、大气透明程度有关,由高纬向低纬逐渐增加;季节分布特点为,夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季;坡度、坡向对散射辐射的分布影响小,但辐射值与开阔度呈正相关,各季辐射最大值分布在开阔度大处,最小值在开阔度最小处,不同季节有所伸缩。计算结果可以为气候变化和环境资源研究提供基础数据。

关键词:太阳散射辐射;DEM;起伏地形;开阔度;浙江省

中图分类号:P422.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2011)01-0093-06

A model of the spatial and temporal variation rules of diffuse solar radiation over rugged terrain in Zhejiang Province

YIN Jing-qiu¹, QIU Xin-fa¹, HE Yong-jian¹, LIU Hui-yu²

(1. School of Remote Sensings, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Sky and terrain factors are elements influencing the Diffuse Solar Radiation (DSR) over rugged terrain. By using DEM data and the extraterrestrial solar radiation model and the terrain openness model, influences of terrain factors on the diffuse solar radiation are comprehensively evaluated. By using the horizontal diffuse solar radiation model simulated by routine meteorological observation data, influences of sky factors on DSR are evaluated. Thus, a model to calculate the diffuse solar radiation over rugged terrains in Zhejiang province was developed and the monthly spatial distribution of DSR was calculated. The results show that: the geographical and topographical factors, the monsoon influence and the atmosphere transparence exert effects on spatial distribution of DSR; the annual DSR presents a decreasing trend form south to north; the order of seasonal DSR is summer > spring > autumn > winter; the maximum (minimum) DSR lie in the open areas (shaded areas) and has little to do with the slope and aspect. It varies in different seasons. The results can provide data for researches of climate change and environmental resources.

Key words: diffuse solar radiation (DSR); DEM; rugged terrains; openness; Zhejiang Province

收稿日期: 2010-06-03; 改回日期: 2010-11-23

基金项目: 科技部公益性行业科研专项(GYHY200806002); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX08B_021Z); 江苏省高校自然科学基金资助项目(08KJB170001); 国家自然科学基金资助项目(40901094; 40701013)

作者简介: 尹静秋(1972—), 女, 江苏连云港人, 博士生, 讲师, 研究方向为气候资源与地理信息系统, autumn01@126.com.

0 引言

太阳辐射在地球上的时间和空间分布,制约着地球上气候系统的运动,是气候形成和演变过程中重要的外参数(翁笃鸣,1997),还伴随着热力和动力过程,与地表水分循环密切相关(Roberto and Renzo,1995)。同时,也是植物光合作用、植物蒸腾作用、土壤蒸发等陆面过程的主要驱动因子,是模拟上述过程的重要输入参数(Barker and Li,1995;Ward,1995)。

浙江西南、西北部地区群山峻岭,中部、东南地区以丘陵和盆地为主,东北地区地势较低,以平原为主。素有“七山一水两分田”之说。浙江位于中、低纬度的沿海过渡地带,属典型的亚热带季风气候区,加之地形起伏较大,同时受西风带和东风带天气系统的双重影响,各种气象灾害如台风、暴雨、干旱等频繁发生。农业生产地域性强,50多年前就开始发展多熟制(邹先定等,2000),复种内容趋于多样化(游修龄,1990),对农业气象服务的要求越来越高(谢国辉,1999)。很多研究表明,在天空有云层覆盖时,散射辐射比例会明显增加,从而导致森林净生态系统碳交换以及光能利用率较天空晴朗时高(Goulden et al.,1997)。因此研究起伏地形下浙江省太阳散射辐射资源时空分布,对充分利用太阳能资源,开发气候资源,具有重要应用和理论价值。

与直接辐射产生的机理不同,要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较困难的(李占清和翁笃鸣,1988)。影响散射辐射的因素有:天文与地理因子如太阳常数、日地相对距离、太阳赤纬、太阳高度角、太阳方位角、太阳时角、测点的经纬度。大气物理因子如大气消光、大气透明度、大气浑浊度等;气象和环境因子,如云(包括云类型、云量)、日照百分率、地表与云的多重反射等;局地地形因子,有海拔高度、坡度、坡向、遮蔽状况(自身遮蔽和周围遮蔽)等。大量的研究表明(Revfeim,1978;Ranzi and Rosso,1995;Antoni,1998),实际地形中,测点获得的散射辐射量与该点受周围地形的遮蔽状况有关。

国内外对散射辐射的计算方法(Liu and Jordan,1960;Iqbal,1979;Bird and Hulstrom,1981;Iqbal,1983;朱志辉,1988;翁笃鸣和罗哲贤,1990;Christian,1993;傅抱璞,1998;Maxwell,1998;ASHRAE,1999;Roderick,1999;曾燕等,2003a,2005),虽然不及总辐射和直接辐射成熟,但已经提

出的方法仍具有重要意义。大致可以分为理论模式和经验模式。理论模式具有坚实的物理基础,但模式的结构非常复杂,且模式的输入参数中包括臭氧厚度、气溶胶含量等很难获得的变量,限制了理论模式的推广;经验模式结构简单,主要有日照百分率模式、成份分解模式、云量模式。使用日照百分率、云量等常规气象观测资料建立的辐射经验估算模式,使得在更多的地区估算辐射量成为可能。随着计算条件和数值模式的发展,用新的计算方法开始做探索。以往的研究,大多都只能局限于倾斜平面,或有限区域起伏地形,通用性不强,曾燕等(2003b,2005)、李梦洁(2008)利用地形数据进行实际起伏地形下的太阳辐射数值模拟进行了更深入理论探索。本文在前人研究的基础上,运用数据集群技术,基于高精度 DEM(1:25万)信息源,通过有效模拟地形多项要素,同时考虑天空因素,利用不同时空尺度散射分量模型(曾燕等,2008),确定了浙江省气候平均情况下月散射系数的空间分布;实现了复杂地形下浙江省太阳散射辐射的分布式模拟,计算了浙江省范围内 100 m × 100 m 分辨率 1—12 月、各季和年气候平均太阳散射辐射的空间分布。

1 资料与研究方法

1.1 资料

所用的气象资料为:1)国家气象局提供的 1:25 万,分辨率为 100 m × 100 m 浙江 DEM 数据;2)浙江省及周边 70 个气象观测站提供的日照百分率;其中散射辐射资料取自浙江省及周边的观测站共 6 个(南京、慈溪(庵东)、杭州、福州、南昌、上海),总辐射取自浙江省及周边的观测站共 9 个(与散射站相同外,加屯溪、建瓯、海门),资料年代为 1961—2000 年,对数据进行严格的质量检测和筛选。

1.2 研究方法及计算模型

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复杂地形下的散射辐射量是比较困难的。现有的坡地散射辐射计算模式有两类,即各向同性模式(Liu and Jordan,1962)和各向异性模式(Hay,1979;Hay and McKay,1985)。本文采用各向异性模式(曾燕等,2008)

$$Q_{da\beta} = Q_d \left\{ \left[\frac{(Q - Q_d)}{Q_0} \right] R_b + V \left[1 - \left[\frac{(Q - Q_d)}{Q_0} \right] \right] \right\}. \quad (1)$$

其中: $Q_{da\beta}$ 为复杂地形下散射辐射月总量; Q_d 为水平面散射辐射月总量; Q_0 为水平面上的天文辐射月

总量; Q 为水平面太阳总辐射月总量; R_b 为转换因子,是复杂地形下天文辐射月总量与水平面天文辐射月总量之比,即 $Q_{0\alpha\beta}/Q_0$; V 为地形开阔度。 Q_b 、 Q 、 $Q_{0\alpha\beta}$ 、 Q_0 已知时,通过(1)式,可获得复杂地形下散射辐射的空间分布。采用分布式天文辐射模型计算 $Q_{0\alpha\beta}$ 的空间分布(曾燕等,2003a); Q_0 采用理论公式(左大康等,1991); Q 、 Q_b (曾燕等,2005)则根据气象站的观测资料,利用经验模型的方法获得。

2 起伏地形下浙江省散射辐射拟合

$$f_d = a + (1 - a) \exp[-b \times s^c / (1 - s)] \quad (2)$$

$$Q_d = Qf_d = Q_0(a_G + b_G \cdot s)f_d \quad (3)$$

式中: f_d 定义为各月散射分量,反应所占太阳总辐射的比重; s 为日照百分率; a 、 b 、 c 为经验系数。(2)式有明确的物理意义,在全阴天时, $s=0$,散射分量 f_d 趋近于1,即此时太阳辐射几乎全部由散射组成;全晴天时, s 趋向于1,太阳辐射主要由直接辐射组成;散射分量达到极小值, f_d 趋向于 a 。

(2)式中的经验系数 a 、 b 、 c 需要用实测资料来确定。考虑经验系数的时间变化特征,采用的是分月模式(曾燕等,2008)。获得浙江省水平面散射辐射1—12月的 Q_d 空间分布。

以往的研究中,山地开阔度仅考虑了坡面自身的遮蔽作用,但还需要考虑地形之间的相互遮蔽作用。本文利用文献(曾燕等,2008)模型计算。由浙江省地形开阔度的非地带性空间分布特征(图1)可见,其总体呈现北部地区和沿海地区的地形比较平坦,中部金衢盆地遮蔽相对比较少,是 high 值区;而南部地区遮蔽相对较大,是 low 值区;山顶或山脊的地形开阔度较大。

3 起伏地形下浙江省太阳散射辐射空间分布

根据(1)式,各参量代入,获得起伏地形下浙江省各1—12月气候平均太阳散射辐射 $Q_{d\alpha\beta}$ 的空间分布(分辨率 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$),进而可合成各季和年的空间分布。

3.1 散射辐射年分布

年散射辐射分布特征,与开阔度的相一致,局部地区更明显(图1与图2,图3与图4),没有明显的坡度坡向差异,多年平均年太阳散射辐射量为 $2\ 219\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$;山区由于海拔度遮蔽较严重区,常年为低值区,最小值为 $587\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,较小的值出现在起伏剧烈的山地的谷底;年变化范围大部分在 $2\ 180 \sim$

$2\ 650\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,中南部的山间地势开阔处为高值区,沿海的中东部值尤其高。

非地带性明显,起伏地形下浙江年太阳散射辐射量呈从东、南部向西、北部逐渐降低的宏观空间分布特征,这主要是天气气候、云量、大气透明度、地理因子等,即天空因素与地面因素共同作用的结果。局地地形因子对散射辐射的影响不容忽视,在地形起伏较大的地区表现得尤为明显。

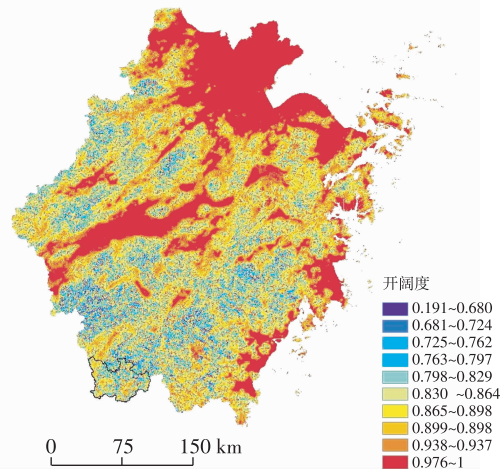


图1 浙江地形开阔度空间分布

Fig. 1 Distribution of terrain openness in Zhejiang Province

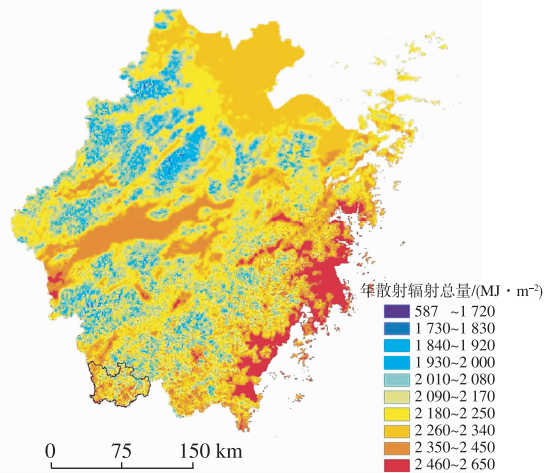


图2 浙江省气候平均年散射辐射总量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of normals of annual DSR over rugged terrain in Zhejiang Province

3.2 月散射辐射空间分布

影响散射辐射因素很多,表1为起伏地形下浙江省各月太阳散射辐射量的统计特征,表明浙江省散射辐射量有显著的年变化特征,7、8月散射辐射量最大;1、12月最小,但最小值不是0,高值区、低值

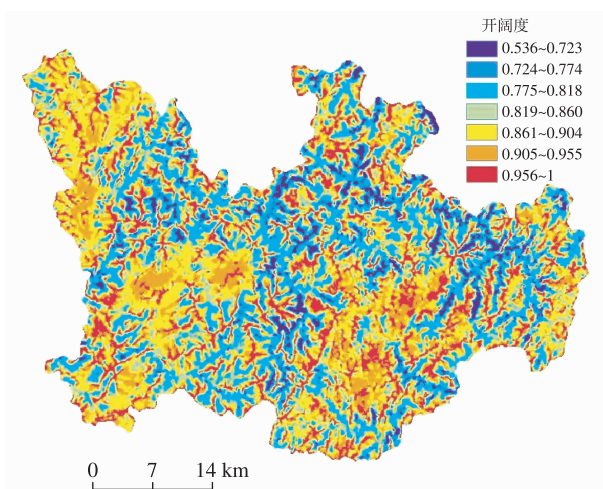


图 3 庆元地形开阔度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of terrains openness of Qingyuan

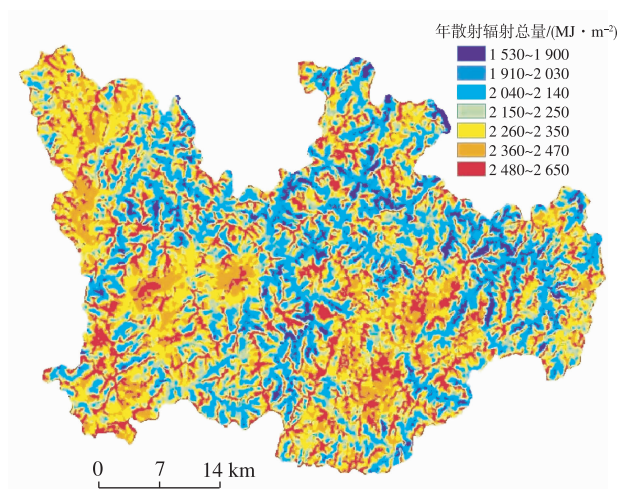


图 4 庆元气候平均年散射辐射总量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of normals of annual DSR over rugged terrain of Qingyuan

区随季节变化不明显,说明散射辐射不但受气候因素影响,还受地形因子影响,主要综合表现在受地形开阔度影响,随开阔度增大,散射辐射量增大,而且开阔度空间分布的脊和谷分别和各月散射辐射脊和谷一致(图 3、图 4)。山区由于遮蔽较严重为低值区,各月的高值区基本稳定在浙江的金衢盆地、东部沿海地区,这些区域对应的开阔度大,经济发达,工业化程度高,空气能见度较低。

表 1 起伏地形下浙江省气候平均散射辐射量统计特征

Table 1	Statistics of average monthly diffuse solar radiation quantity over rugged terrains in Zhejiang Province												MJ · m ⁻²
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
最小值	23	27	50	58	60	61	72	76	64	44	23	21	579
最大值	162	164	215	250	271	280	289	291	249	211	176	164	2 722
平均值	120	128	174	210	232	239	248	248	207	166	130	117	2 219

以 1、4、7、10 月代表四季,图 5 给出了起伏地形下浙江省各月太阳散射辐射的空间分布情况,表现为受太阳直射点北移南撤的影响,天空大气因素表现不明显,1 月和 10 月的分布表现为纬度低处散射辐射值高,纬度高处相反,7 月因为太阳直射点偏北,所以,南北差异小。但各月受地形影响明显,受坡度坡向影响表现不明显,与开阔度分布一致。四季的分布大小为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。

为了检验模拟结果的精度,将浙江省内具有太阳散射辐射资料的站气候平均逐月散射量与模拟结果进行对比分析,与实测值相比,杭州和慈溪多年平均散射辐射总量模拟结果的平均绝对误差分别为 6.57、11.01 MJ · m⁻²,平均相对误差绝对值为 3.5% 和 6%,慈溪站月最大相对误差绝对值为 13.6%,但超过 7% 的月份有 4 个月,杭州只有 1 个月超过 7%,9 个月小于 5%。误差来源主要有 DEM 数据精度影响提取高程、坡度和坡向的准确性;气象台站位置参数误差。

4 结论

影响太阳散射辐射时空分布的因素较多,本研究分为天空因素(主要指大气)与地面因素(主要指地形起伏)两大类。利用气象站观测资料建立的水平面太阳散射辐射 Q_d 拟合模型,模拟大气对散射辐射的影响;再以起伏地形下天文辐射 $Q_{0\alpha\beta}$ 和地形开阔度 V 模拟地形因子(坡度、坡向、地形遮蔽)的影响,利用 DEM 数据和常规气象观测资料实现山区太阳散射辐射定量模拟。得出以下结论:

1) 天文辐射、太阳高度角等天文因子和大气状况对散射辐射的影响明显,各地散射辐射的季节变化与天文因子的变化趋势一致。工业比较发达的地区,散射值也相对较大。

2) 浙江省散射辐射分布的时间分布和空间分布异规律,冬季最小,夏季最大,空间分布基本与开阔度分布密切相关,开阔度空间分布的脊和谷分别和各月散射辐射脊和谷一致。

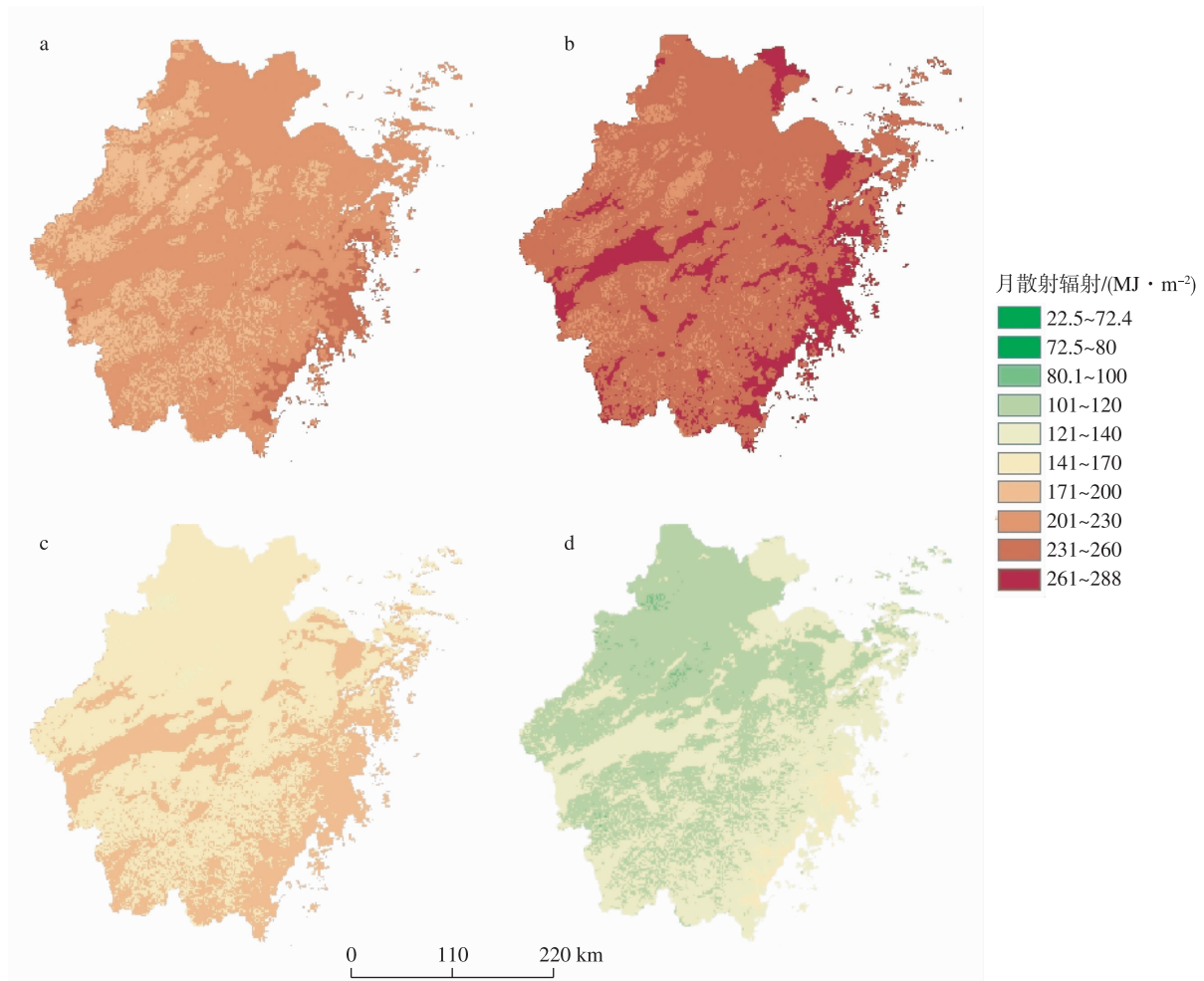


图 5 起伏地形下浙江省气候平均月太阳散射辐射总量空间分布 a. 春季;b. 夏季;c. 秋季;d. 冬季

Fig. 5 Spatial distribution of average monthly DSR quantity over rugged terrains in Zhejiang Province a. spring ; b. summer ; c. autumn ; d. winter

3) 利用浙江及其周边地区的气象资料和 DEM 数据,本文给出了 100 m × 100 m 分辨率的起伏地形下浙江省太阳散射辐射年总量的多年平均空间分布数据,经与实测资料对比,杭州和慈溪平均相对误差绝对值仅为 3.5% 和 6%,可做为基础数据使用。

参考文献

傅抱璞. 1998. 不同地形下辐射收支各分量的差异与变化[J]. 大气科学, 22(3):178-190.

李梦洁, 郑建飞, 曾燕, 等. 2008. 浙江省高分辨率太阳直接辐射图的计算与绘制[J]. 地球科学进展, 23(3):299-305.

李占清, 翁笃鸣. 1988. 坡面散射辐射的分布特征及其计算模式[J]. 气象学报, 46(3):349-356.

翁笃鸣. 1997. 中国辐射气候研究[M]. 北京: 气象出版社.

翁笃鸣, 罗哲贤. 1990. 山区地形气候[M]. 北京: 气象出版社.

谢国辉. 1999. 地理信息系统及其在农业气象服务中的应用[J]. 中国农业气象, 20(4):6-9.

游修龄. 1990. 浙江省粮食生产上新台阶对策[M]. 上海: 上海科学

技术出版社:71-72.

曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 2003a. 基于 DEM 的黄河流域天文辐射空间分布[J]. 地理学报, 58(6):810-816.

曾燕, 邱新法, 缪启龙, 等. 2003b. 起伏地形下我国日照时间的空间分布[J]. 自然科学进展, 13(5):545-549.

曾燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 2005. 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, 60(4):680-688.

曾燕, 邱新法, 何永健, 等. 2008. 起伏地形下黄河流域太阳散射辐射分布式模拟[J]. 地球物理学报, 51(4):991-998.

朱志辉. 1988. 非水平面天文辐射的全球分布[J]. 中国科学 B 辑(10):1100-1110.

邹先定, 周洁红, 苏胜强, 等. 2000. 浙江农业发展的宏观分析和战略研究[J]. 农业现代化研究, 21(1):9-13.

左大康, 周允华, 项月琴, 等. 1991. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社.

Antoni O. 1998. Modeling daily topographic solar radiation without site-specific hourly radiation data [J]. Ecological Modeling, 113: 31-40.

ASHRAE. 1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) handbook: HVAC applications

- [M]. Atlanta(GA);ASHRAE.
- Barker H W, Li Z. 1995. Improved simulation of clear-sky shortwave radiative transfer in the CCC GCM [J]. *J Climate*, 8; 2213-2223.
- Bird R E, Hulstrom R L. 1981. A simplified clear sky model for the direct and diffuse insolation on horizontal surfaces [R]. US-SERI Technical Report TR-642-761. Colorado; National Renewable Energy Laboratory.
- Christian G. 1993. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data [J]. *Solar Energy*, 51(22); 121-138.
- Goulden M L, Daube B C, Fan S M, et al. 1997. Physiological responses of a black spruce forest to weather [J]. *J Geophys Res*, 102; 28987-28996.
- Hay J E. 1979. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces [J]. *Solar Energy*, 23(4); 301-307.
- Hay J E, McKay D C. 1985. Estimating solar radiance on inclined surfaces: A review and assessment of methodologies [J]. *Solar Energy*, 3; 203-240.
- Iqbal M. 1979. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine [J]. *Solar Energy*, 23(2); 169-173.
- Iqbal M. 1983. An introduction to solar radiation [M]. Toronto; Academic Press.
- Liu B Y H, Jordan R C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation [J]. *Solar Energy*, 4; 1-19.
- Liu B Y H, Jordan R C. 1962. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator [J]. *Trans ASHRAE*, 67; 526-541.
- Maxwell E L. 1998. METSTAT-the solar radiation model used in the production of the NSRDB [J]. *Solar Energy*, 62(4); 263-279.
- Ranzi R, Rosso R. 1995. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin [J]. *Journal of Hydrology*, 166; 461-478.
- Revfeim K J A. 1978. A simple procedure for estimating global daily radiation on any surface [J]. *Appl Meteor*, 17; 1126-1131.
- Roberto R, Renzo R. 1995. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin [J]. *Journal of Hydrology*, 166; 461-478.
- Roderick M L. 1999. Estimating the diffuse component from daily and monthly measurements of global radiation [J]. *Agric For Meteorol*, 95; 169-185.
- Ward D M. 1995. Comparison of the surface solar radiation budget derived from satellite data with that simulated by the NCAR GCM2 [J]. *J Climate*, 8; 2824-2842.

(责任编辑:刘菲)