

曾燕,王珂清,谢志清,等. 2012. 江苏省太阳能资源评估[J]. 大气科学学报,35(6):658-663.

Zeng Yan, Wang Ke-qing, Xie Zhi-qing, et al. 2012. Solar radiation resources estimation in Jiangsu Province[J]. Trans Atmos Sci, 35(6):658-663. (in Chinese)

江苏省太阳能资源评估

曾燕,王珂清,谢志清,苗茜

(江苏省气候中心,江苏 南京 210008)

摘要:采用 1:25 万 DEM 数据和常规气象站观测资料,实现了江苏省 100 m × 100 m 分辨率太阳总辐射量分布式模拟,并分析了江苏省太阳总辐射量的时空分布规律。结果表明:江苏省气候平均太阳总辐射量为 4 749 MJ/m²,呈现由西南向东北递增的特点,连云港市最高(5 063 MJ/m²),无锡市最低(4 514 MJ/m²)。太阳总辐射量在年内变化特点为,5 月最高,12 月最低。结合常规气象站日照时数观测资料,从年日照时数、年日照时数 ≥ 6 h 的天数以及日照时数 ≥ 6 h 的最多天数月份与最少天数月份的天数的比值分析了江苏省太阳能资源的稳定度特征,其总体规律依然是西南至东北走向,即江苏省东北部地区太阳能资源开发利用优势最高。

关键词:江苏省;太阳总辐射;太阳能;资源评估

中图分类号:P422.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-7097(2012)06-0658-06

Solar radiation resources estimation in Jiangsu Province

ZENG Yan, WANG Ke-qing, XIE Zhi-qing, MIAO Qian

(Jiangsu Climate Center, Nanjing 210008, China)

Abstract: Using the data of DEM with scale of 1:250 000 and routine meteorological observations, this paper achieves the distributed simulation of global solar radiation (GSR) of Jiangsu Province. Spatial distribution maps of normals of monthly and annual GSR with the resolution of 100 m × 100 m of Jiangsu Province are generated and their spatio-temporal distribution characteristics are analyzed. The results are as follows: 1) The normals of annual GSR in Jiangsu Province is 4 749 MJ/m²; 2) The annual GSR has a progressive increasing trend from southwest to northeast, i. e. Lianyungang has the highest value of 5 063 MJ/m² and Wuxi the lowest value of 4 514 MJ/m²; 3) GSR in Jiangsu Province reaches the highest in May and the lowest in December. The statistics of sunshine hours observations, i. e. annual sunshine hours, annual days with daily sunshine hours ≥ 6 h and the ratio of the maximum to the minimum of monthly days with daily sunshine hours ≥ 6 h, are used to analyze the stability of solar radiation resource in Jiangsu. Its pattern also has a southwest to northeast change trend, which is to say that the northeast region of Jiangsu has the highest predominance in solar energy utilizing.

Key words: Jiangsu Province; global solar radiation; solar energy; resource estimation

0 引言

太阳能资源是一种取之不尽、用之不竭的绿色能源。我国太阳辐射资源比较丰富,开发利用的前

景非常广阔(王炳忠,1983;王炳忠等,1998)。受气候、地理等环境的影响,我国太阳辐射资源的分布具有明显的地域性(鞠晓慧等,2006;曹雯和申双和,2008;蔡子颖等,2009;尹静秋等,2011)。因此,要合

收稿日期:2012-03-30;改回日期:2012-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41175077);科技部公益性行业科研专项(GYHY200806002);黔科合重大专项(字[2011]6003号)

作者简介:曾燕(1972—),女,吉林安图人,博士,研究员,研究方向气候资源评估、遥感与GIS技术应用,jlzensyan@sina.com.

理地开发利用太阳辐射资源,首先必须了解各地区太阳辐射的详细分布情况(Maxwell,1998)。

江苏省位于中纬度亚洲大陆东岸,东临黄海,处长江、淮河下游,地势平坦,江、河、湖水网交织,属亚热带和暖温带过渡气候带,季风特征明显,自然条件优越,气候资源丰富。全省面积 10.3 万 km²,平原面积约占全省总面积的 68%,所有平原的海拔高度都在 45 m 以下,其中 50% 在 10 m 甚至 5 m 以下。由于全省只有 3 个太阳辐射观测站,仅仅依靠其观测资料描述太阳辐射资源的空间分布是远远不够的,还应结合相应的太阳辐射拟合模型。

地表接收太阳总辐射的多少是天空与地面因素综合作用的结果,除受大气状况、天文因子、地理因子影响外,在实际地形下,还受地形起伏造成的坡度、坡向和地形遮蔽的影响,使得地表太阳总辐射的计算变得非常复杂。李占清和翁笃鸣(1987,1988)为解决地形对辐射的遮蔽影响问题,在日照计算方面做出了开创性的尝试。Dozier and Frew(1990)、李新等(1996,1999)先后尝试利用数字高程模型(DEM)进行了山地太阳辐射计算的理论研究和区域试验。Qiu et al.(2008)、曾燕等(2005a,2005b,2008)依据起伏地形下太阳辐射构成机理,从起伏地形下太阳总辐射 3 个构成成分——直接辐射、散射辐射、周围地形反射辐射入手,基于 DEM 建立了依托常规气象站观测资料的太阳总辐射分布式模型。

本文利用太阳总辐射分布式模型,实现了江苏省 100 m × 100 m 分辨率太阳辐射资源的计算,并对其时空分布规律进行了探讨,该结果可作为基础数据,为江苏省太阳辐射资源的开发利用提供指导。

1 资料与研究方法

1.1 资料

研究所用数据资料主要有常规气象观测资料、基础地理信息资料和遥感资料。各种资料的详细说明如下。

气象资料:1961—2008 年江苏省及其周边 78 个气象站逐日观测资料,含日照百分率、日照时数和太阳辐射量 3 种要素,其中日照百分率和日照时数资料为全部 78 个站(70 个站位于江苏境内),太阳辐射量(总辐射、直接辐射、散射辐射)资料为 11 个站(3 个站位于江苏境内)。

基础地理信息资料:江苏省 1:25 万 DEM 数据,分辨率为 100 m × 100 m。

遥感资料:1981—2000 年逐月 NOAA-AVHRR 通道 1 和 2 观测数据,分辨率为 8 km × 8 km,取自“NOAA/NASA Pathfinder AVHRR Land Data Set”。

1.2 太阳总辐射分布式模型

起伏地形下,地表接收的太阳总辐射 $Q_{\alpha\beta}$ (曾燕等,2008)可表示为

$$Q_{\alpha\beta} = Q_{b\alpha\beta} + Q_{d\alpha\beta} + Q_{r\alpha\beta} \quad (1)$$

式中: $Q_{b\alpha\beta}$ 为起伏地形下太阳直接辐射; $Q_{d\alpha\beta}$ 为起伏地形下太阳散射辐射; $Q_{r\alpha\beta}$ 为起伏地形下周围地形反射辐射。

$$Q_{b\alpha\beta} = \frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} Q_b = R_b Q_b \quad (2)$$

式中: $Q_{0\alpha\beta}$ 为起伏地形下天文辐射,根据起伏地形下天文辐射模型(曾燕等,2005a)计算获得; Q_0 为水平面天文辐射,采用理论公式(左大康等,1991)计算; R_b 为起伏地形下天文辐射与水平面天文辐射之比,又称转换因子,表示局地地形对太阳直接辐射的影响(曾燕等,2005a); Q_b 为水平面直接辐射,为不考虑地形影响时地表接收的太阳直接辐射量。

$$Q_b = Q_0(a_G + b_G \cdot s)(1 - a) \left(1 - \exp \left[\frac{-bs^c}{(1-s)} \right] \right) \quad (3)$$

式中: a_G 、 b_G 、 a 、 b 、 c 分别为经验系数; s 为日照百分率; Q_0 含义同(2)式。

$$Q_{d\alpha\beta} = Q_d \left[\frac{Q_b}{Q_0} R_b + V \left(1 - \frac{Q_b}{Q_0} \right) \right] \quad (4)$$

式中: V 为地形开阔度,结合 DEM 数据计算获得(Qiu et al.,2008); Q_0 与 R_b 含义同(2)式; Q_d 为水平面散射辐射,是不考虑地形因子影响情况下地表接收的太阳散射辐射量。

$$Q_d = Q_0(a_G + b_G \cdot s) \left(a + (1 - a) \exp \left[\frac{-bs^c}{(1-s)} \right] \right) \quad (5)$$

式中: a_G 、 b_G 、 a 、 b 、 c 、 s 含义同(3)式; Q_0 含义同(2)、(3)式。

水平面直接辐射 Q_b 与散射辐射 Q_d 之和等于水平面总辐射 Q (Iqbal,1983),即:

$$Q = Q_b + Q_d = Q_0(a_G + b_G \cdot s) \quad (6)$$

式中: Q 为水平面太阳总辐射,指不考虑地形影响情况下地面接收到的太阳总辐射量。

$$\begin{cases} Q_{r\alpha\beta} = \alpha_s(Q_b + Q_d)(1 - V) = Q\alpha_s(1 - V), & V \leq 1; \\ Q_{r\alpha\beta} = 0, & V > 1. \end{cases} \quad (7)$$

式中: V 含义同(4)式; α_s 为地表反照率,采用 Valiente 给出的公式计算地表反照率(Valiente et al., 1995):

$$\alpha_s = 0.545\rho_{\text{CH1}} + 0.320\rho_{\text{CH2}} + 0.035。$$
 (8)

式中: ρ_{CH1} 、 ρ_{CH2} 为 NOAA-AVHRR 通道 1 和 2 的观测值。

1.3 模型经验系数的确定

(3)与(5)式中的经验系数 a_G 、 b_G 、 a 、 b 、 c 需用实测资料拟合确定。其中: a_G 、 b_G 由水平面月太阳总辐射量资料结合月平均日照百分率资料来确定; a 、 b 、 c 由水平面月太阳直接辐射/散射辐射量资料结合月平均日照百分率资料来确定。气象站均设置在水平开阔地段,因此其观测的太阳辐射资料即为水平面结果。由于江苏省具有水平面太阳总辐射 Q 观测资料的气象站仅淮安、南京、吕泗 3 个,具有水平面太阳直接 Q_b 观测资料的气象站仅南京 1 个,所以采用与周边莒县、临沂、济宁、合肥、上海、杭州、宝山、慈溪 8 个气象站太阳辐射数据集群的方式来建立拟合模型,充分考虑模型经验系数的时空稳定性,建立“局地分月模型”。即:通过自动搜索程序,将局部区域位置邻近的几个站(3~5 个站)同一个月份的多年太阳辐射观测数据作为一个数据集,依据表 1 江苏省气候平均逐月太阳总辐射模拟结果的相对误差

Table 1 Relative error of simulated normals of monyhlly global solar radiation in Jiangsu

													%
站点	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	平均
淮安	2.20	10.10	7.45	6.04	3.77	2.58	0.71	4.81	4.60	5.73	1.26	2.25	4.29
南京	6.55	3.46	5.85	4.32	1.57	3.43	2.00	7.58	4.43	5.83	5.14	5.75	4.66
吕泗	3.31	10.68	11.60	7.14	4.83	0.58	0.35	3.32	9.76	2.45	2.33	0.16	4.71

2 江苏省太阳总辐射量时空分布特征

2.1 年太阳总辐射量空间分布特征

根据起伏地形下江苏省 1961—2008 年 1—12 月气候平均太阳总辐射量空间分布,合成全省年太阳总辐射量空间分布(图 1),各地级市年太阳总辐射量统计结果见表 2。由图 1 可以看出,江苏省太阳总辐射在宏观空间分布上体现了云量、大气透明度等天空因素的影响,局部纹理特征又体现了坡度、坡向和周围地形相互遮蔽等地面因素对总辐射的影响。全省气候平均年太阳总辐射量为 2 978~5 657 MJ/m²,平均为 4 749 MJ/m²。呈现由西南向东北递增的特点,连云港市最高,为 5 063 MJ/m²,无锡市最低,为 4 514 MJ/m²。根据王炳忠(1983)的太阳能区划指标,即根据全国年太阳总辐射量空间分

布,将全国划分为 4 个等级区,江苏省位于第三等级区,属于资源一般带。

模型(6)确定该局部 1—12 月经 验系数 a_G 和 b_G ,依据模型(3)或(5)确定 1—12 月经 验系数 a 、 b 和 c ,以误差最小为原则,确定最优数据集,并以此获得各站最优 1—12 月经 验系数 a_G 、 b_G 、 a 、 b 和 c (表略)。

使用 IDW(inverse distance weight)插值法,对 11 站经验系数进行空间内插,像元分辨率设定为 100 m×100 m,获得 1—12 月经 验系数 a_G 、 b_G 、 a 、 b 和 c 的空间分布,并以此读取获得其余 67 个站对应的经验系数。

1.4 模拟结果误差分析

江苏省境内仅有 3 个台站具有总辐射观测资料,即淮安、南京、吕泗。为了验证太阳总辐射分布式模型的模拟精度,现将 3 个台站实测的 1961—2008 年气候平均逐月太阳总辐射量与模拟量进行比较分析。由表 1 可以看出,与观测值比较,淮安站最大相对误差为 10.10%,最小相对误差为 0.71%;南京站最大相对误差为 6.55%,最小相对误差为 1.57%;吕泗站最大相对误差为 11.60%,最小相对误差为 0.16%。除个别月份外,3 站大部分月份相对误差小于 5%,各站平均相对误差均小于 5%。由此证明,太阳总辐射分布式模型的模拟精度较高,具有良好的稳定性和可靠性。

表 2 江苏省气候平均年太阳总辐射量的统计结果

Table 2 Statistics of annual global solar radiation in Jiangsu

	MJ/m ²			
市名	最低值	最高值	平均值	标准差
徐州	3 835	5 339	4 920	91.3
宿迁	4 606	5 117	4 856	66.2
连云港	3 364	5 657	5 063	99.2
淮安	3 726	5 000	4 758	92.4
盐城	4 640	5 010	4 832	54.5
南通	4 019	4 952	4 689	56.0
无锡	2 978	4 965	4 514	120.7
苏州	3 155	4 906	4 584	63.8
常州	3 410	4 888	4 532	62.2
南京	3 097	4 953	4 559	90.1
扬州	3 925	4 914	4 689	75.6
泰州	4 584	4 939	4 736	80.8
镇江	3 184	5 043	4 559	80.6

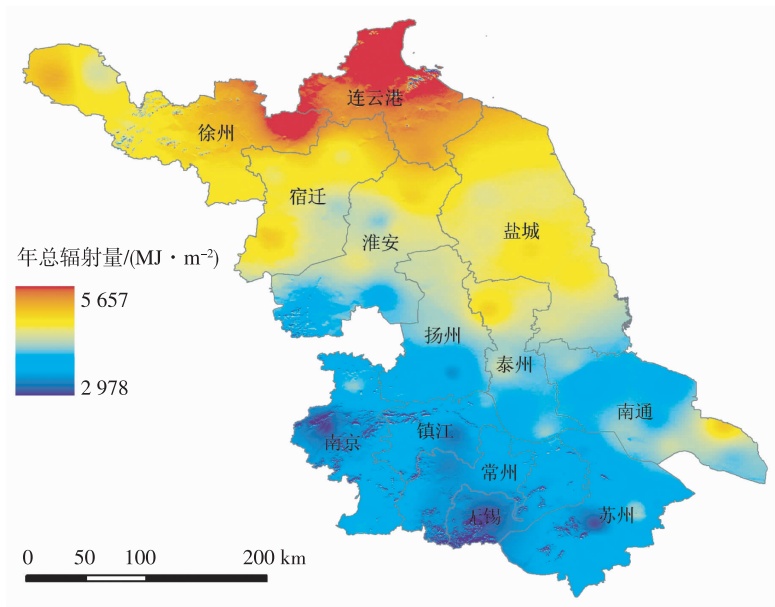


图 1 江苏省气候平均年太阳总辐射量的空间分布(单位: MJ/m²)

Fig. 1 Normals of annual global solar radiation in Jiangsu(units: MJ/m²)

2.2 太阳总辐射量月、季变化特征

图 2 给出了江苏省太阳总辐射量 1—12 月的变化情况。可以看出,总辐射量以 5—8 月为高值,又以 5 月为最高(532 MJ/m²)。1 月、12 月为低值,且以 12 月为最低(238 MJ/m²)。5—8 月太阳高度角较高,全省总辐射量普遍较高,地形因子的影响作用减弱,气候因子占主导地位,其中 6 月总辐射量较 5 月、7 月和 8 月略偏低,体现了江淮梅雨的影响,梅雨期间日照时数下降,地表接收到的太阳总辐射量也下降。

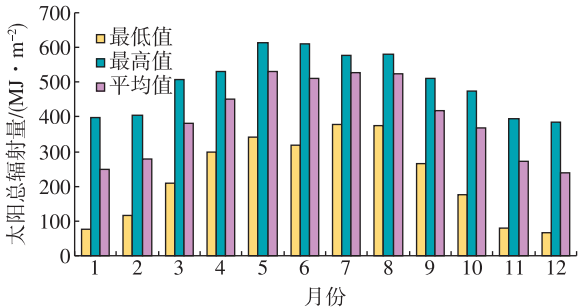


图 2 江苏省气候平均太阳总辐射量的逐月变化(单位: MJ/m²)

Fig. 2 Monthly change of normals of global solar radiation in Jiangsu(units: MJ/m²)

以 3—5 月代表春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,1、2 月和翌年 12 月为冬季,分析总辐射量的季节变化特征(图略)。江苏省春、夏、秋、冬气候平均总辐射量分别为 1 366、1 559、1 059 和 765 MJ/m²,即:夏季>春季>秋季>冬季。在全省总辐

射量的空间差异上,以春季为最大,秋季最小。

3 江苏省日照与太阳能资源稳定性特征

太阳总辐射量的空间分布反映的是一种太阳能资源的年总量情况,在太阳能资源利用时除了应具体考虑其资源总量外,还必须了解其年内分配的稳定情况,它往往会直接影响资源的可利用性以及利用效率,采用日照时数资料进行分析。

将江苏省及其周边 78 个站 1961—2008 年逐日日照时数资料进行统计分析,获得各站日照时数的相关统计指标,并对其进行空间内插,获得全省空间分布图。

图 3 为江苏省气候平均年日照时数的空间分布。可以看出,其空间分布格局与太阳总辐射量情况大体一致,也呈现由西南向东北递增的特点。高值区淮北东北部超过 2 300 h,低值区太湖周围为 1 900 h 左右。全省年日照时数为 1 840 ~ 2 560 h,平均为 2 128 h。

图 4 给出了江苏省气候平均年日照时数≥6 h 的天数。可以看出,其分布与年日照时数类似,东北部最高(超过 220 d),西南部最低(低于 190 d)。全省年日照时数≥6 h 天数为 175 ~ 247 d,平均为 206 d。

用日照时数≥6 h 的最多天数月份与最少天数月份的天数的比值来描述太阳能资源全年分布的变幅和太阳能资源稳定度;其值越小,天气气候条件越

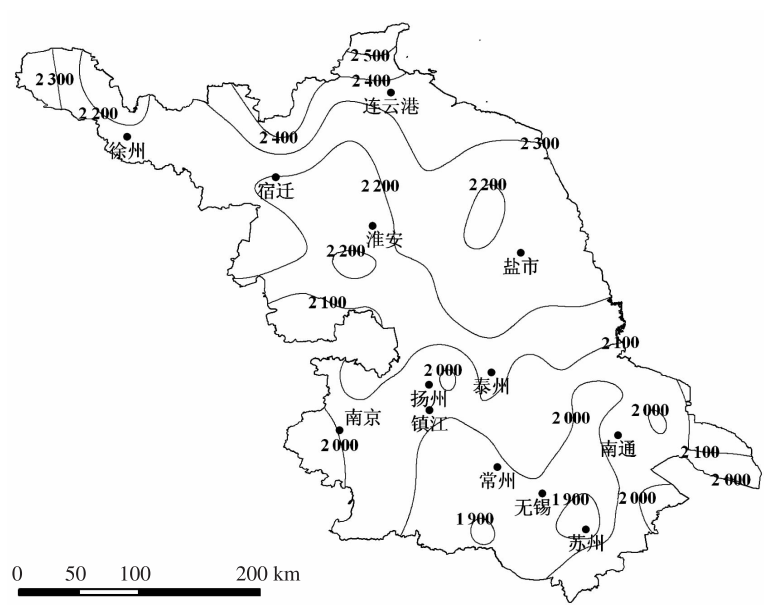


图 3 江苏省气候平均年日照时数(单位:h)
Fig. 3 Normals of annual sunshine hours in Jiangsu(units:h)

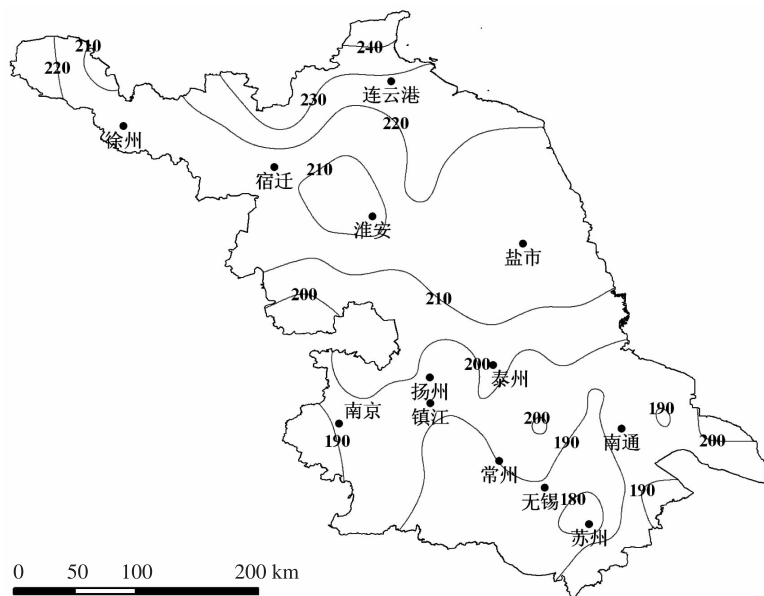


图 4 江苏省气候平均年日照时数≥6 h 的天数(单位:d)
Fig. 4 Normals of annual days with daily sunshine hours≥6 h in Jiangsu(units:d)

稳定,越有利于太阳能资源利用(王炳忠,1983)。由图 5 可以看出,该指标空间分布依然是西南至东北走向,即东北部最小(1.3 左右),西南部最高(1.5 ~ 1.7);全省该指标为 1.20 ~ 1.88,平均为 1.43。

4 结论

以太阳总辐射分布式模型为基础,基于 DEM 及常规气象观测资料,实现了江苏省 100 m×100 m 分辨率太阳总辐射量分布式模拟。根据太阳总辐射量模拟结果和常规气象站日照时数统计结果,获得

江苏省气候平均太阳能资源的主要特征如下:

1)年太阳总辐射量为 2 978 ~ 5 657 MJ/m²,平均为 4 749 MJ/m²。呈现由西南向东北递增的特点,连云港市最高,为 5 063 MJ/m²,无锡市最低,为 4 514 MJ/m²。在逐月变化上,最高值出现在 5 月,最低值出现在 12 月。在季节变化上,夏季最高,春季次之,冬季最小。

2)年日照时数空间分布格局与太阳总辐射量情况大体一致,也呈现由西南向东北递增的特点。高值区淮北东北部超过 2 300 h,低值区太湖周围为

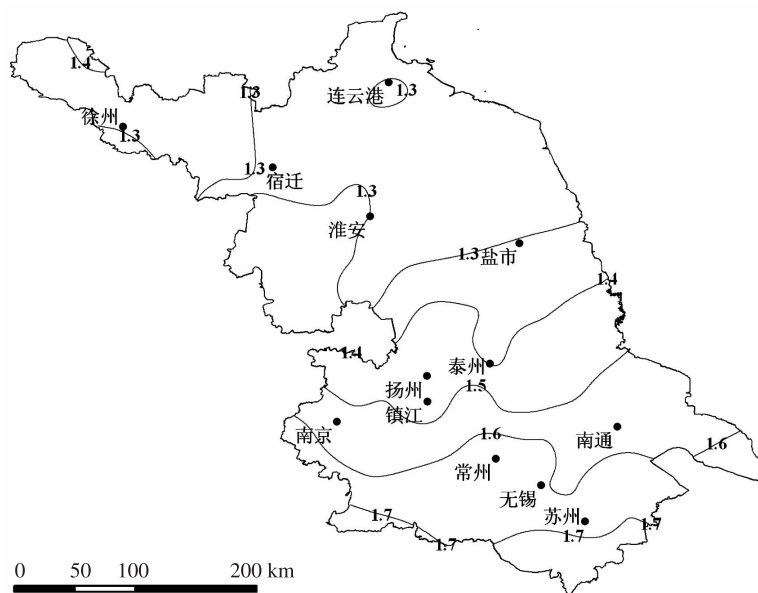


图5 江苏省气候平均日照时数 ≥ 6 h的最多天数月份与最少天数月份的天数的比值

Fig.5 Normals of the ratio of the maximum to the minimum of monthly days with daily sunshine hours ≥ 6 h in Jiangsu

1 900 h左右。全省年日照时数为1 840~2 560 h,平均为2 128 h。

3)年日照时数 ≥ 6 h的天数分布与年日照时数类似,东北部最高,超过220 d,西南部最低,低于190 d。全省年日照时数 ≥ 6 h天数为175~247 d,平均为206 d。

4)日照时数 ≥ 6 h的最多天数月份与最少天数月份的天数比值的空间分布,依然是西南至东北走向,东北部最小,为1.3左右,西南部最高,为1.5~1.7。全省该指标为1.20~1.88,平均为1.43。总体而言,江苏的太阳能资源可利用稳定度在东北部最好。

参考文献:

蔡子颖,郑有飞,刘建军,等. 2009. 长江三角洲地面太阳辐射变化和相关因素分析[J]. 气象科学,29(4):447-453.

曹雯,申双和. 2008. 我国太阳日总辐射计算方法的研究[J]. 南京气象学院学报,31(4):587-591.

鞠晓慧,屠其璞,李庆祥. 2006. 我国太阳总辐射月总量资料的均一性检验及订正[J]. 南京气象学院学报,29(3):336-341.

李新,陈贤章,增群柱. 1996. 利用数字高程模型计算复杂地形下的短波辐射平衡[J]. 冰川冻土,18(增刊):344-353.

李新,程国栋,陈贤章,等. 1999. 任意地形条件下太阳辐射模型的改进[J]. 科学通报,44(9):993-998.

李占清,翁笃鸣. 1987. 一个计算山地日照时间的计算机模式[J]. 科学通报,32(17):1333-1335.

李占清,翁笃鸣. 1988. 丘陵山地总辐射的计算模式[J]. 气象学报,46(4):461-468.

王炳忠. 1983. 中国太阳能资源利用区划[J]. 太阳能学报,4(3):221-228.

王炳忠,邹怀松,殷志强. 1998. 我国太阳能辐射资源[J]. 太阳能(4):19.

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.

曾燕,邱新法,刘绍民. 2005a. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报,48(5):1028-1033.

曾燕,邱新法,刘昌明,等. 2005b. 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,潘放,等. 2008. 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究[J]. 地球科学进展,23(11):1185-1193.

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:66-80.

Dozier J, Frew J. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,28(5):963-969.

Iqbal M. 1983. An introduction to solar radiation[M]. Toronto: Academic Press:20-30.

Maxwell E L. 1998. METSTAT—the solar radiation model used in the production of the NSRDB[J]. Solar Energy,62(4):263-279.

Qiu X F, Zeng Y, He Y J, et al. 2008. Distributed modeling of diffuse solar radiation over rugged terrain of the Yellow River Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics,51(4):700-708.

Valiente J A, Nunez M, Lopez-Baeza E, et al. 1995. Narrow-band to broad-band conversion for meteosat-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and -2 channels[J]. Int J Remote Sens,16(6):1147-1166.