

# 基于 Angstrom-Prescott 模型和空间插值的 山东省月太阳辐射再估算

王仁政<sup>1</sup>, 单正焱<sup>1</sup>, 王建新<sup>1</sup>, 孟赫<sup>2</sup>, 宫响<sup>1\*</sup>

(1. 青岛科技大学 数理学院, 山东 青岛 266061; 2. 青岛环境监测中心站, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 基于 Angstrom-Prescott 模型和空间插值法构建了山东省各地的月太阳辐射估算方法, 并利用山东省 3 个国家站( 济南、莒县和福山) 和菏泽、聊城、淄博及青岛的辐射观测数据验证了估算方法的准确性。首先利用山东省 3 个国家站 1992 年—2015 年的辐射与日照百分率观测数据, 采用最小二乘法拟合得到不同月份 Angstrom-Prescott 模型系数并以 2016 年观测数据验证。其次, 分别使用不同空间插值法对菏泽、聊城、淄博和青岛进行太阳辐射估算并根据结果选择最优空间插值法。最后, 将该方法与其他文献方法进行对比分析。2016 年国家站的月太阳辐射估算结果显示其月平均  $\sigma_{\text{MRE}}$  约为 3.5%,  $\sigma_{\text{RMSE}}$  在  $17 \text{ MJ/m}^2 \sim 24 \text{ MJ/m}^2$ , 因此该 A-P 系数具有较高的准确性。在菏泽、聊城、淄博及青岛 4 站的估算中选定误差最小 ( $\sigma_{\text{MRE}}$  约为 7.22%,  $\sigma_{\text{RMSE}}$  约  $16 \text{ MJ/m}^2 \sim 69 \text{ MJ/m}^2$ ) 的最小曲率法作为最优空间插值法。与其他文献方法对比的结果表明, 基于 Angstrom-Prescott 模型和空间插值法估算月太阳辐射准确度较高, 可应用于其他区域月太阳辐射的估算。

**关键词:** 月太阳总辐射; Angstrom-Prescott 模型; 空间插值; 山东省

中图分类号: TK511 文献标志码: A 文章编号: 1002-4026(2020)03-0093-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Monthly solar radiation re-estimation in Shandong based on

## Angstrom-Prescott model and spatial interpolation

WANG Ren-zheng<sup>1</sup>, SHAN Zheng-duo<sup>1</sup>, WANG Jian-xin<sup>1</sup>, MENG He<sup>2</sup>, GONG Xiang<sup>1\*</sup>

(1. School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China;  
2. Qingdao Environmental Monitoring Center, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Based on the Angstrom-Prescott model and spatial interpolation method, an estimation method of monthly solar radiation in Shandong Province is constructed herein, and the accuracy of the proposed method is verified using the radiation observation data from three national stations (Jinan, Juxian, and Fushan) and those from Heze, Liaocheng, Zibo, and Qingdao. First, based on the observation data of radiation and sunshine percentage between 1992 to 2015 from

收稿日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(41406010)

作者简介: 王仁政(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太阳辐射。E-mail: 2818622577@qq.com

\* 通信作者: 宫响(1977—), 博士, 副教授, 研究方向为太阳能资源估算及神经网络应用。Tel: 13210086655, E-mail: gongxiang@qust.edu.cn

the three national stations, the Angstrom-PreScott model coefficients (A-P coefficients) in different months are obtained using the least square fitting method and verified using the observation data in 2016. Then, the solar radiation in Heze, Liaocheng, Zibo, and Qingdao is estimated using different spatial interpolation methods, and an optimal spatial interpolation method is selected based on these results. Finally, this method is compared with other methods in literature. The estimation results of monthly solar radiation in the national stations in 2016 show that the monthly average  $\sigma_{\text{MRE}}$  is approximately 3.5%, and the monthly average  $\sigma_{\text{RMSE}}$  is approximately  $17 \text{ MJ/m}^2 \sim 24 \text{ MJ/m}^2$ , proving that the A-P coefficient has a high accuracy. From the estimation results of monthly solar radiation in Heze, Liaocheng, Zibo, and Qingdao stations, the minimum curvature method with the least error ( $\sigma_{\text{MRE}}$  is approximately 7.22%,  $\sigma_{\text{RMSE}}$  is approximately  $16 \text{ MJ/m}^2 \sim 69 \text{ MJ/m}^2$ ) is selected as the optimal spatial interpolation method. Compared with other methods in literature, results show that the accuracy of monthly solar radiation estimation based on the proposed method is higher, and it can be extended to other regions.

Key words: total monthly solar radiation; Angstrom-PreScott model; spatial interpolation; Shandong Province

鉴于不可再生能源的存储量限制和环境污染等问题,世界各国越来越重视太阳能资源的开发。而只有在获得太阳能资源分布特征的前提下才能更好地实现对太阳能资源的高效科学利用<sup>[1-2]</sup>。但在全球范围内,对太阳辐射进行常规观测的台站密度不大,无法满足分布规律研究和实际应用的需要。因此,如何对某一地域的太阳辐射进行准确的评估成为了重中之重。

1919年, Kimball<sup>[3]</sup>提出了关于太阳总辐射与日照百分率之间存在良好相关性的分析。1924年, Angstrom<sup>[4]</sup>首次给出了太阳辐射的气候学计算公式。1940年, Prescott<sup>[5]</sup>利用天文总辐射代替 Angstrom提出的晴天太阳总辐射作为起始数据,简化了太阳总辐射的计算。修改后的公式被称为 Angstrom-PreScott公式,表达式为:

$$Q = Q_0(a + bS/S_0) \quad (1)$$

式中,  $Q$  为太阳总辐射,  $Q_0$  为天文太阳总辐射,  $S/S_0$  为日照百分率,  $a$ 、 $b$  为 A-P 系数。1963年左大康等<sup>[6]</sup>将 Angstrom-PreScott公式引入国内。翁笃鸣<sup>[7]</sup>在总结前人太阳辐射计算工作的基础上提出,在我国以天文总辐射为计算初始量最为合理。孙治安等<sup>[8]</sup>详细研究了该公式的4种不同起始数据的情况后得出了类似结论。之后这一模型在我国各地区太阳辐射估算中得到了广泛应用<sup>[9-11]</sup>。

山东省太阳能资源较为丰富,年总辐射在  $4\ 542.61 \text{ MJ/m}^2 \sim 5\ 527.32 \text{ MJ/m}^2$  之间,处于 II 类区(很丰富区)和 III 类区(较丰富区)<sup>[12]</sup>。已有部分学者对山东省太阳能资源进行了评估。崔日鲜<sup>[13]</sup>利用同一组 A-P 系数  $a$  与  $b$ (分别为 0.164 和 0.535),估算山东境内 17 个站点的太阳总辐射。该方法没有考虑不同月份和站点之间 A-P 系数不同的可能性。林瑞英<sup>[14]</sup>利用月日照百分率和云量建立了山东 12 个月的辐射估算关系式。王建源等<sup>[15]</sup>在分别求出 3 个国家站 12 个月的 A-P 系数后,对鲁北地区各县市利用济南站的 A-P 系数计算,半岛各县市利用福山站的计算,而在鲁南各县市利用莒县站的计算的原则,完成对山东省的太阳辐射的评估。已有研究表明, A-P 系数受经纬度、海拔高度等因素影响<sup>[16-18]</sup>,因此在计算山东省各个城市的 A-P 系数时采用固定数值或者临近数据代替,可能会降低估算结果准确度。

本文基于 Angstrom-PreScott 模型和空间插值法构建了山东省太阳辐射的估算方法:以最小二乘法求得已有观测站位的 Angstrom-PreScott 公式,然后在此之上以空间插值法求得无观测地区的 Angstrom-PreScott 公式。在这个过程中,以中国海洋大学自主设置的菏泽、聊城和淄博 3 个观测站,以及青岛市环境监测中心提供的青岛站的观测数据与各空间插值法对应的估算结果对比分析,选定空间插值法,并进一步优化该方法。最后,通过比较本文方法与其他文献方法来验证本方法的准确性。

## 1 数据和方 法

### 1.1 数据

山东省目前仅有 3 个日射国家观测站,分别为福山、济南和莒县(表 1)。本文使用的数据主要分为两

类:太阳辐射观测数据和日照百分率观测数据。福山、济南和莒县太阳辐射观测数据和日照百分率数据,以及菏泽、聊城、青岛和淄博的日照百分率数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);菏泽、聊城和淄博太阳辐射观测数据来自中国海洋大学观测站。青岛的太阳辐射观测数据来自青岛市环境监测中心。具体站位信息见表1。

表1 观测站位信息表

Table 1 Observation station location information

观测站	经度	纬度	海拔/m	时间
福山	121°15'E	37°30'N	53.9	1992年1月—2016年12月
济南	116°59'E	36°41'N	170.3	1992年1月—2016年12月
莒县	118°50'E	35°35'N	107.4	1992年1月—2016年12月
菏泽	115°26'E	35°15'N	49.7	2016年2月—2017年12月
聊城	116°00'E	36°24'N	46.0	2016年2月—2017年12月
淄博	117°50'E	36°31'N	203.0	2016年2月—2017年12月
青岛	120°20'E	36°04'N	76.0	2016年1月—2016年12月

## 1.2 计算方法

太阳辐射的计算方法采用 Angstrom-PreScott 公式,见式1,其中 A-P 系数可以由观测的太阳辐射数据确定。而求解 A-P 系数采用最小二乘法拟合,系数的计算公式如下:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (S'_{li} - \overline{S'_1})(y_i - \overline{y})}{\sum_{i=1}^N (S'_{li} - \overline{S'_1})^2}, \quad (2)$$

$$a = \overline{y} - b \overline{S'_1}, \quad (3)$$

式中, $S'_{li}$ 为观测站点的逐年月日照百分率; $\overline{S'_1}$ 为观测点月日照百分率的平均值; $y_i = \frac{Q'_i}{Q_0}$ 为观测站点逐年月辐射总量与月天文辐射总量的比值,即为太阳总辐射透过率; $\overline{y}$ 为 $y_i$ 的平均值; $N$ 为选取观测资料的年数, $N=24$ 。

## 1.3 误差公式

本文中进行了多次数据评估,主要采用了两种方法:均方根误差( $\sigma_{RMSE}$ )、平均相对误差( $\sigma_{MRE}$ )。其计算公式如下:

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{m_i} - x_{o_i})^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{m_i} - x_{o_i}|}{x_{o_i}}, \quad (5)$$

式中, $x_{m_i}$ 为通过气候学方法估算的月辐射值; $x_{o_i}$ 为实际观测的月辐射值; $n$ 为所评估辐射数据的月数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 辐射观测站 A-P 系数

福山、济南和莒县站12个月的A-P系数( $a$ 、 $b$ 值)如表2所示。济南站冬季(11月、12月、1月)系数 $a$ 较小,其中1月略大为0.15,夏季(5~7月) $a$ 值最大,春秋季节 $a$ 值相差不大;系数 $b$ 在4、5月份最大,1月份最小,其他月份变化不明显。莒县和福山站系数 $a$ 和 $b$ 的变化规律类似,10~12月系数 $a$ 较小,夏季较大,但莒县站系数 $a$ 的最大值出现在4月(0.38),6月次之,为0.35。莒县和福山两站点的系数 $b$ 最大值出现在5月份,最小值均出现在12月和1月。

表2 福山、济南和莒县站点系数表

Table 2 Coefficients of Fushan ,Jinan , and Juxian

站点	系数	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
福山	$a$	0.16	0.15	0.19	0.26	0.25	0.29	0.26	0.22	0.18	0.13	0.10	0.12
	$b$	0.25	0.42	0.50	0.53	0.62	0.57	0.57	0.57	0.53	0.48	0.37	0.25
济南	$a$	0.15	0.19	0.25	0.27	0.32	0.42	0.38	0.30	0.30	0.16	0.09	0.09
	$b$	0.26	0.30	0.37	0.49	0.51	0.36	0.39	0.44	0.33	0.43	0.41	0.33
莒县	$a$	0.18	0.20	0.20	0.38	0.26	0.35	0.30	0.23	0.22	0.18	0.13	0.15
	$b$	0.22	0.32	0.50	0.35	0.64	0.53	0.58	0.63	0.51	0.44	0.36	0.21

A-P 系数  $a$  值越大,表明太阳辐射透过性越好,受云层、气溶胶等的削减作用越弱;而  $b$  值越大,表明辐射透过率随日照百分率的变化越快,太阳辐射受日照百分率影响较大。由此可知,济南、莒县和福山 3 地区太阳总辐射冬季透过性较差,这可能与冬季供暖导致大气污染较其他季节偏重有关;夏季太阳总辐射透过率最大,受日照百分率影响最大。此外,由表 2 还可以看出,不同地区  $a$ 、 $b$  值存在显著差异,因此应用 A-P 模型估算无辐射观测地区的太阳总辐射,需要确定该区域的 A-P 系数,以提高其估算准确性。

利用上述所得的济南、莒县和福山的 A-P 系数,利用式(1)分别计算 3 地区 2016 年的月太阳总辐射,并与实际观测值进行对比,结果见图 1。除福山站 2016 年 6 月份的峰值估算偏低,其他站位的估算值与观测值均吻合得较好,特别是莒县站各月估算值与观测值的趋势完全一致。3 站的具体误差见表 3。

表3 福山、济南和莒县 3 站误差表

Table 3 Error table of Fushan ,Jinan , and Juxian stations

站点	$\sigma_{MRE}$	$\sigma_{RMSE}/(MJ \cdot m^{-2})$
福山	3.61%	24.12
济南	3.36%	18.01
莒县	3.35%	17.06

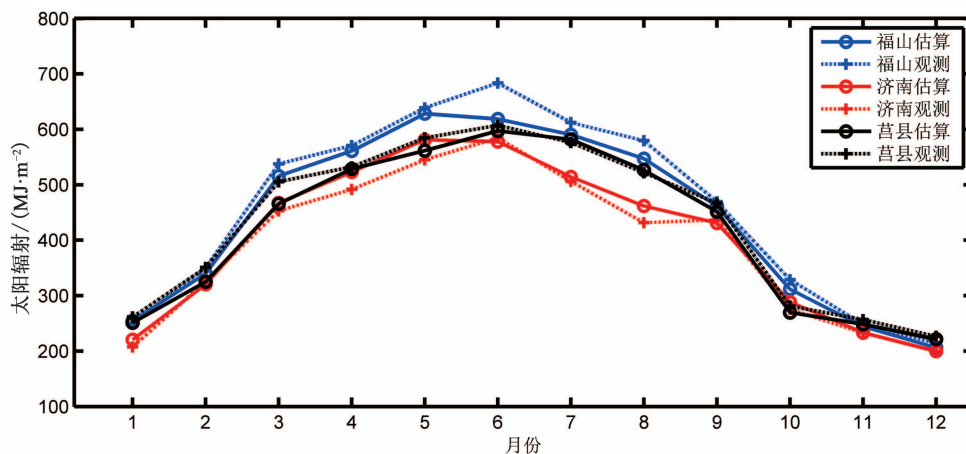


图1 福山、济南和莒县 2016 年月辐射估算值比较

Fig.1 Comparison of the estimated monthly radiation values in Fushan ,Jinan , and Juxian 2016

## 2.2 无辐射观测地区 A-P 系数

本文分别利用 3 种插值方法(最小曲率插值法、克里金插值法和反距离加权插值法),以济南、莒县和福山的系数为数据点进行空间插值,得到菏泽、聊城、淄博和青岛的 A-P 系数。然后应用式(1)结合日照百分率,估算 2016 年、2017 年菏泽、聊城、淄博和 2016 年青岛的月太阳总辐射,并与观测值比较,误差见表 4。

表 4 空间插值方法误差比较

Table 4 Error table of the spatial interpolation method

站点	误差	最小曲率法	克里金法	反距离加权法
菏泽	$\sigma_{MRE}$	4.28%	4.53%	4.37%
	$\sigma_{RMSE} / (MJ \cdot m^{-2})$	21.40	22.74	22.17
聊城	$\sigma_{MRE}$	14.40%	14.53%	14.78%
	$\sigma_{RMSE} / (MJ \cdot m^{-2})$	69.96	70.68	71.33
淄博	$\sigma_{MRE}$	7.14%	6.67%	7.29%
	$\sigma_{RMSE} / (MJ \cdot m^{-2})$	37.52	35.1	36.85
青岛	$\sigma_{MRE}$	3.07%	3.82%	4.34%
	$\sigma_{RMSE} / (MJ \cdot m^{-2})$	16.05	19.65	21.63

由表 4 可知, 菏泽、聊城和青岛 3 站误差中最小的均为最小曲率法的结果, 而最小曲率法在淄博站也仅次于克里金法结果, 综合考虑选定最小曲率法为最优空间插值法。基于最小曲率空间插值法的太阳辐射估算方法平均  $\sigma_{MRE}$  为 7.22%  $\sigma_{RMSE}$  为 36.23 MJ/m<sup>2</sup>。

图 2 给出了菏泽、聊城、淄博和青岛各月份估算值与观测值的对比图。聊城站 2016 年和 2017 年的观测值明显小于观测值, 但变化趋势基本一致, 这可能是因为聊城站的日照时数偏小。

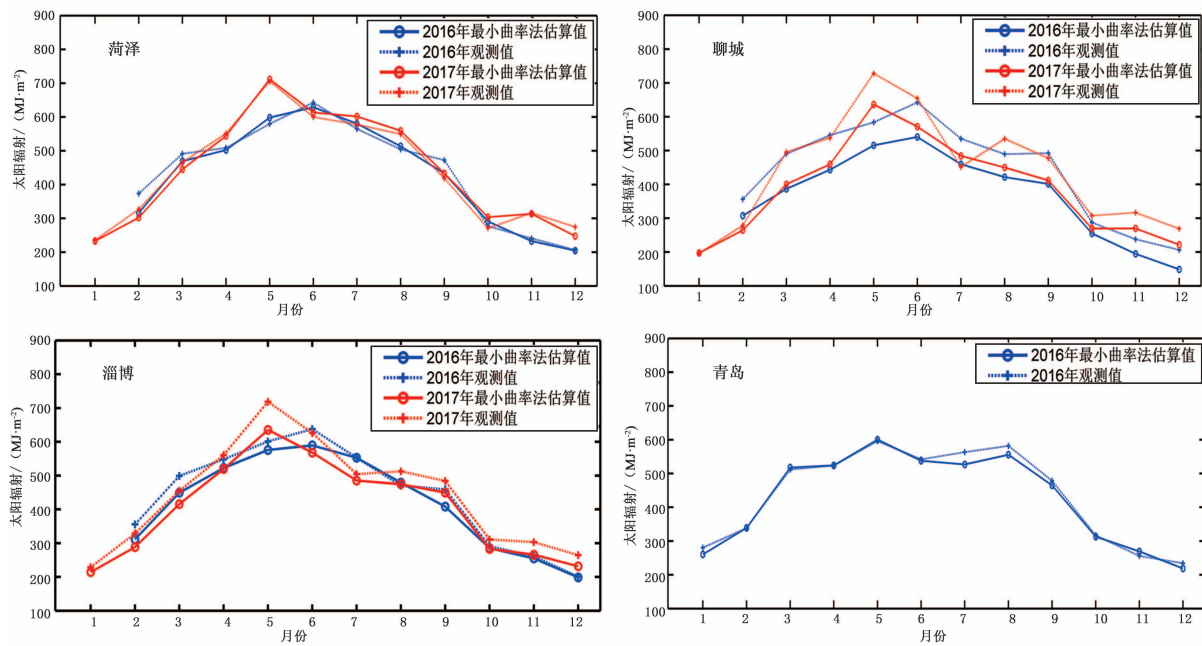


图 2 观测站的 2016 年 2017 年月太阳总辐射比较

Fig.2 Comparison of the total solar radiation of the observation stations 2016 and 2017

### 2.3 其他文献方法比较

无辐射观测站位的太阳总辐射估算问题, 一直以来备受关注, 也是评估区域太阳能资源分布的重点和难点。如, 王建源等<sup>[15]</sup>采用邻近法(即在进行无辐射观测地区太阳辐射估算时, 根据经纬度邻近的原则采用已知站位的 A-P 系数代替该地区的 A-P 系数的方法), 利用济南、福山、莒县 3 站的经验系数, 估算了 3 站邻近地区的月平均太阳总辐射。为比较两种方法所得结果的差异, 本文使用福山、济南和莒县站的经验系数以邻近法估算 2016 年 2 月到 2018 年 1 月的菏泽(邻近莒县)、聊城(邻近济南)和淄博站(邻近济南)和 2016 年青岛站(邻近福山)的辐射值并与本文方法进行比较, 结果见表 5。

表5 邻近法与本文方法结果比较

Table 5 Comparison of the adjacent method and proposed method

	本文方法		邻近法	
	$\sigma_{MRE}$	$\sigma_{RMSE}/(MJ \cdot m^{-2})$	$\sigma_{MRE}$	$\sigma_{RMSE}/(MJ \cdot m^{-2})$
菏泽	4.28%	21.40	4.18%	22.19
聊城	14.40%	69.96	14.83%	72.06
淄博	7.14%	37.52	8.37%	41.99
青岛	3.07%	16.05	6.07%	30.44

由表5可知,就本文方法而言,采用空间插值法得到的经验系数估算月太阳总辐射,总体准确度比王建源等<sup>[15]</sup>采用的邻近法高,估算结果好于邻近法结果。本文方法中只有菏泽站的估算准确度略低于邻近法,误差相对上升0.1%;其他各站都为本文方法更优:聊城站误差下降0.43%,淄博站误差下降1.23%,青岛站误差下降3%。这表明虽然采用邻近观测站位估算无观测地区辐射的方法存在一定的合理性,但本文方法具有更高的准确度。

### 3 结论

本文运用最小二乘法求得3个日射国家站的A-P系数,在国家站A-P系数的基础上通过空间插值法得出无观测站位地区的A-P系数,由此求得山东全省所有站位A-P系数。在此过程中,利用2016年国家站数据验证所求国家站系数的准确性;利用菏泽、聊城、淄博和青岛站的太阳辐射观测数据对空间插值的方法进行了选定,并使用相同数据对选定插值得到的A-P系数进行了验证与纠正。最终本文提出了在Angstrom-Prescott公式基础上结合最小曲率插值法的山东省内各地区月太阳总辐射的估算方法,并通过与邻近法进行对比证明了该方法的可行性。

### 参考文献:

- [1]HELWA N H, BAHGAT A B G, SHAFEE M R E, et al. Computation of the solar energy captured by different solar tracking systems [J]. Energy Sources, 2000, 22(1): 35-44. DOI: 10.1080/00908310050014199.
- [2]HAMMER A, HEINEMANN D, HOYER C, et al. Solar energy assessment using remote sensing technologies [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 423-432. DOI: 10.1016/s0034-4257(03)00083-x.
- [3]KIMBALL H H. Variations in the total and luminous solar radiation with geographical position in the United States [J]. Monthly Weather Review, 1919, 47(11): 769-793. DOI: 10.1175/1520-0493(1919)472.0.CO;2.
- [4]ANGSTROM A. Solar and terrestrial radiation [J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1924, 50: 121-126. DOI: 10.1175/1520-0493(1924)522.0.CO;2.
- [5]PRESCOTT J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation [J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64: 114-125.
- [6]左大康,王懿贤,陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963(1): 78-96.
- [7]翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报, 1964(3): 304-315.
- [8]孙治安,施俊荣,翁笃鸣. 中国太阳总辐射气候计算方法的进一步研究[J]. 南京气象学院学报, 1992(2): 21-29. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1992.02.003.
- [9]张焕平,汪青春,张占峰. 青海玉树地区太阳能资源特征及开发利用建议[J]. 青海科技, 2011(6): 10-15. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9393.2011.06.004.
- [10]桑建人,刘玉兰,郑玲. 宁夏太阳能资源的气候学计算及时空分布特征[J]. 宁夏工程技术, 2007(2): 108-112. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7244.2007.02.003.

- [11]朱飙,李春华,方锋. 甘肃省太阳能资源评估[J]. 干旱气象, 2010, 28(2): 217-221. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7639.2010.02.018.
- [12]董旭光. 山东省太阳能资源评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [13]崔日鲜. 山东省太阳总辐射的时空变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1780-1791. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.10.013.
- [14]林瑞英. 山东省太阳总辐射月总量的计算[J]. 气象, 1982, 8(7): 20-21. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.1982.7.012.
- [15]王建源,冯建设,袁爱民. 山东省太阳辐射的计算及其分布[J]. 气象科技, 2006, 34(1): 98-101. DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2006.01.019.
- [16]IZIOMON M G, MAYER H. Assessment of some global solar radiation parameterizations [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64(15): 1631-1643. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00131-1.
- [17]鞠晓慧,屠其璞,李庆祥. 我国太阳总辐射气候学计算方法的再讨论[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(4): 516-521. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.011.
- [18]LIU X Y, MEI X R, LI Y Z, et al. Calibration of the Ångström-PreScott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3): 697-710. DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.10.027.

(上接第81页)

- [35]ZHANG J, WANG A F, KONG L B, et al. Controlled synthesis of zero-dimensional phase-pure Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> perovskites crystals with high photoluminescence quantum yield [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797: 1151-1156. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.05.194.
- [36]MØLLER C K. Crystal structure and photoconductivity of Cæsium plumbahalides [J]. Nature, 1958, 182(4647): 1436. DOI: 10.1038/1821436a0.
- [37]NIKL M, MIHOKOVA E, NITSCH K, et al. Photoluminescence of Cs<sub>4</sub>PbBr<sub>6</sub> crystals and thin films [J]. Chemical Physics Letters, 1999, 306(5/6): 280-284. DOI: 10.1016/s0009-2614(99)00477-7.
- [38]YIN J, YANG H Z, SONG K P, et al. Point defects and green emission in zero-dimensional perovskites [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2018, 9(18): 5490-5495. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.8b02477.