

# 陕北榆林地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估

吴林荣<sup>1</sup>, 杜莉丽<sup>1</sup>, 王娟敏<sup>2</sup>, 孙 娴<sup>2</sup>

(1. 陕西省气象局, 陕西 西安 710014; 2. 陕西省气候中心, 陕西 西安 710014)

**摘 要:** 根据气象台站辐射观测资料, 分析了陕北榆林地区太阳总辐射及其分布特征, 并对榆林地区太阳能资源潜力进行了客观评估。结果表明, 榆林地区春、夏、秋 3 季是太阳能利用的最佳季节, 年太阳总辐射最高值区位于长城沿线一带, 较低值区位于定边西南部和子洲南部; 榆林地区所有县(区)均属于太阳能资源丰富区, 其中府谷—神木—榆林—横山—靖边大部—佳县—米脂—吴堡—绥德—子洲北部属于资源很丰富区, 定边—靖边西南和子洲以南地区属于资源丰富区。全区太阳能资源稳定, 储量丰富且具有较高的开发利用潜力。研究结果可为进一步研究区域气候变化, 指导农业生产及合理开发利用太阳能资源提供参考依据。

**关键词:** 太阳总辐射; 日照时数; 太阳能资源; 榆林地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0238-05

中图分类号: P422.11

## Distribution Characteristics and Evaluation of Potential Solar Energy Resources in Yulin Region of Northern Shaanxi Province

WU Lin-rong<sup>1</sup>, DU Li-li<sup>1</sup>, WANG Juan-min<sup>2</sup>, SUN Xian<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an, Shaanxi 710014, China;

2. Shaanxi Provincial Climate Centre, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

**Abstract:** Total solar radiation and its distribution characteristics in Yulin region are analyzed and its potential use value is evaluated based on the meteorological observation. Results show that the best seasons for the use of solar energy were the spring, summer and autumn. The highest value of annual total solar radiation occurs along the Great Wall and the lowest value, in the Southwestern Dingbian County and Southern Zizhou County. All of the counties(district) in the region belong to the solar resource-rich area, of which the subareas of Fugu—Shenmu—Yulin—Hengshan—Jingbian—Jiaxian—Mizhi—Wubu—Suide—Northern Zizhou are in the very rich area and Dingbian—Southwest Jingbian—Southern Zizhou, in the rich area. The solar energy resources of the city are rich and stable and have a high potential for the development and utilization. The results can provide the guidance to agricultural production, research on climate change and further use of solar energy.

**Keywords:** total solar radiation; sunshine duration; solar energy resource; Yulin region

中国太阳能资源十分丰富, 全国陆地每年接受太阳辐射能相当于  $2.4 \times 10^{13}$  t 标准煤, 开发利用前景广阔, 中国已经把太阳能开发利用作为新能源开发的重点。研究表明, 陕北榆林地区是太阳能资源丰富区, 有着广泛地利用前景<sup>[1-5]</sup>。孙娴等<sup>[6]</sup>, 吴林荣等<sup>[7-8]</sup>较系统地研究了陕西山地及水平面的太阳辐射时空分布, 指出陕北北部尤其是长城沿线是太阳能资源开发利用的最佳区域。然而该区域却一直没有辐射观测站, 2007 年 9—10 月陕西省气象局在完成《鄂尔多斯盆地(陕西部分)能源开发利用总体规划》项目的基础上, 在

榆林的靖边和神木县新建了 3 个辐射观测站并进行了 1 a 时间的科学观测, 本文利用这新建 3 个辐射站 2008 年的实测辐射观测值与气候学模式计算值进行对比检验, 并计算出了陕北榆林地区的季、年太阳总辐射, 并对陕北榆林地区的太阳能资源潜力进行了评估, 为榆林地区充分地开发利用太阳能资源提供理论参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区概况

榆林市位于陕西省最北部, 地处陕、甘、宁、蒙、晋

收稿日期: 2012-06-19

修回日期: 2012-10-17

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于降尺度技术的未来气候情景下中国极端降水预测方法研究”(40675043); 中国气象局气候变化专项“西北极端干旱事件个例库及干旱监测指标数据集”(ccsf-09-14)

作者简介: 吴林荣(1975—), 男(汉族), 陕西省汉中市人, 硕士, 高工, 从事气候资源开发及决策气象服务。E-mail: wulinrong@126.com。

5 省(区)交界,地理坐标为  $107^{\circ}28' - 111^{\circ}15' E$ ,  $36^{\circ}57' - 39^{\circ}34' N$ ,地处毛乌素沙漠和黄土高原过渡地带,风蚀沙化和水土流失严重,东南部黄土丘陵沟壑区是黄河中游水土流失最严重的地区。东临黄河与山西相望,西连宁夏、甘肃,北邻内蒙古鄂尔多斯市,南接延安市。黄河沿东界南下涉境 400 km 多,古长城横贯东西 700 km 多。地势由西部向东倾斜,地貌分为风沙草滩区、黄土丘陵沟壑区、梁状低山丘陵区 3 大类。地貌大体以长城为界,北部为风沙草滩区,占总面积的 42%,南部为黄土丘陵沟壑区占总面积的 58%。平均海拔 1 300 m,气候属暖温带和温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温  $10^{\circ}C$ ,年平均降水量 400 mm 左右,四季分明,日较差大,气象灾害较多,几乎每年都有不同程度的干旱、霜冻、暴雨、大风、冰雹等灾害发生,尤以干旱、冰雹和霜冻危害严重。

### 1.2 资料来源

陕西省有延安、西安、安康 3 个辐射观测站。本文选用延安代表陕北地区计算<sup>[9]</sup>,总辐射资料序列长度为 1990—2008 年。日照时数、日照百分率为榆林 12 个台站 1971—2008 年的月资料。新建的靖边、神木、神木大保当 3 站为 2008 年逐日总辐射资料,资料全部来自于陕西省气象档案馆。

### 1.3 计算方法

太阳辐射的计算采用气候学方法,即:

$$Q = Q_0 f(s, n) \quad (1)$$

式中:  $Q$ ——地表受到的太阳总辐射;  $Q_0$ ——起始数据(或称背景值),  $Q_0$  可以是天文辐射、晴天大气总辐射或理想大气总辐射;  $f(s, n)$ ——以日照百分率和总云量表示的天空遮蔽度函数,这里以天文总辐射作为背景值,则计算公式为:

$$Q = Q_0 (a + bS) \quad (2)$$

式中:  $Q$ ——地表受到的太阳总辐射;  $Q_0$ ——天文辐射;  $S$ ——日照百分率;  $a, b$ ——系数。

根据延安各月辐射和日照百分率,采用最小二乘法<sup>[10-15]</sup>拟合出陕北地区式(2)中各月的经验系数  $a, b$ ,然后计算出各地的地面月平均太阳总辐射,通过累加进而推算出各地季、年太阳总辐射。

### 1.4 太阳能资源评估方法

太阳能资源评估是太阳能资源开发利用的基础,根据太阳能资源评估方法<sup>[16]</sup>,太阳能资源评估包括太阳能资源丰富程度、太阳能资源稳定程度。在此基础上参考文献<sup>[17]</sup>,对太阳能资源的利用价值、太阳能资源储量、太阳能资源可利用量等进行评估。

(1) 太阳能资源丰富程度。以太阳总辐射年总量为指标,等级划分情况如表 1 所示。

表 1 太阳能资源丰富程度等级划分 MJ/( $m^2 \cdot a$ )

太阳总辐射年总量	资源丰富程度
$\geq 6\ 300$	资源最丰富
5 040~6 300	资源很丰富
3 780~5 040	资源丰富
$< 3\ 780$	资源一般

(2) 太阳能资源稳定程度。以各月日照时数大于 6 h 天数的最大值与最小值的比值表示太阳能资源稳定程度,等级划分如表 2 所示:

$$K = \frac{\max(D_1, D_2, \dots, D_{12})}{\min(D_1, D_2, \dots, D_{12})} \quad (3)$$

式中:  $K$ ——太阳能资源稳定程度指标,无量纲;  $D_1, D_2, \dots, D_{12}$ ——1—12 月各月日照时数大于 6 h 的天数( $d$ );  $\max()$ ——求最大值的标准函数;  $\min()$ ——求最小值的标准函数。

表 2 太阳能资源稳定程度等级划分

太阳能资源稳定程度指标	稳定程度
$< 2$	稳定
2~4	较稳定
$> 4$	不稳定

(3) 太阳能资源利用价值。相关文献表明<sup>[1,17]</sup>,太阳能电站对 9—16 时出现日照的时间利用价值较高,因此,确定以各月日照时数大于 6 h 的天数作为太阳能发电可利用指标,反映该区域太阳能资源的利用价值。

(4) 太阳能资源储量和可利用量。太阳能资源储量计算公式:

$$Q = \frac{(\bar{Q}_0 \times S)}{3.6} \quad (4)$$

式中:  $Q$ ——研究区太阳能资源总储量(kWh);  $\bar{Q}_0$ ——研究区年平均太阳总辐射( $MJ/m^2$ );  $S$ ——研究区面积( $m^2$ ); 3.6 为 kWh 与 MJ 的换算率。

太阳能资源可利用量计算公式:

$$Q_1 = Q \times 100\% (\text{陆地面积}) \times 20\% (\text{转换效率}) \quad (5)$$

式中:  $Q_1$ ——研究区太阳能资源可利用量(kWh)。

## 2 结果与分析

### 2.1 模式精度检验

将延安市历年日辐射总量换算成历年各月总辐

射,并根据各月的总辐射和日照百分率进行拟合,计算出各月的经验系数,并对方程的相关系数作  $F$  检

验(如表 3 所示)。可以看出相关系数全部都在 0.6 以上, $F$  值均通过  $F_{0.01}$  检验,回归方程总体显著。

表 3 陕北月太阳辐射计算公式中各月经验系数和统计检验

项目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
$a$	0.009	0.167	0.121	0.225	0.114	0.214	0.202	0.162	0.153	0.177	0.113	0.085
$b$	0.700	0.505	0.581	0.429	0.633	0.459	0.477	0.511	0.533	0.469	0.575	0.580
$R$	0.819	0.816	0.932	0.887	0.827	0.714	0.642	0.751	0.804	0.782	0.924	0.628
$F$	42.100	89.130	112.500	100.900	78.610	53.380	44.900	84.630	65.870	110.500	136.700	39.500

注: $a, b$  为最小二乘法拟合的经验系数; $R$  为相关系数; $F$  为置信度 0.01 的  $F$  检验值。

为了详细评估陕北榆林地区太阳能资源的丰富程度和开发潜力,陕西省气象局于 2007 年 9 月在神木县锦界镇和大保当镇(110°01'E,38°39'N)建立了 4 要素辐射站,2007 年 10 月在神木县气象局(110°26'E,38°49'N)和靖边县气象局(108°48'E,37°37'N)建立了两要素辐射站,整理 2008 年大保当、神木、靖边 3 个辐射站的实测总辐射资料,同时在计算模型中提取 3 个站对应的模型计算值检验模型精度。

表 4 给出了实测值与计算值之间的相对误差,图

1 给出了神木、靖边 2008 年太阳总辐射实际观测值和模拟值的对比曲线,从表 4 和图 1 中可以看出,模式对陕北榆林地区的太阳总辐射的拟合很好,各月相对误差基本都控制在 10% 以内。大保当平均相对误差为 -3.8%,其中 3 月相对误差最小仅 0.2%,神木站平均相对误差为 -5.4%,其中 5 月相对误差最小仅 0.8%,靖边平均相对误差为 -4.9%,其中 5 月误差最小仅为 0.2%,表明建立的太阳辐射计算模型较为精确。

表 4 大保当、神木、靖边 2008 年月太阳辐射计算值与实测值之间的相对误差

%

站名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
大保当	-5.3	1.6	0.2	-5.8	-6.4	-2.0	-5.4	-2.0	-3.2	-9.4	-7.9	0.6
神木	-5.5	-6.7	-5.5	-1.4	0.8	-2.0	-3.1	-7.8	-5.9	-11.5	-7.7	-8.8
靖边	-6.6	-7.2	-6.9	-1.6	0.2	-0.8	-1.4	-5.3	-3.7	-9.6	-6.8	-9.0

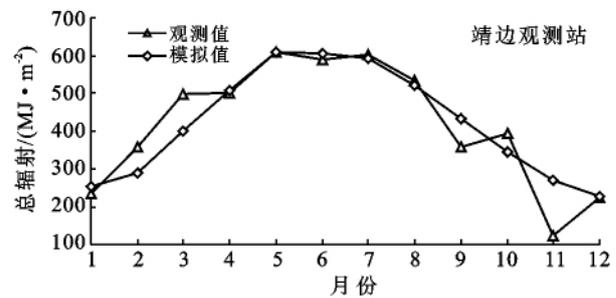
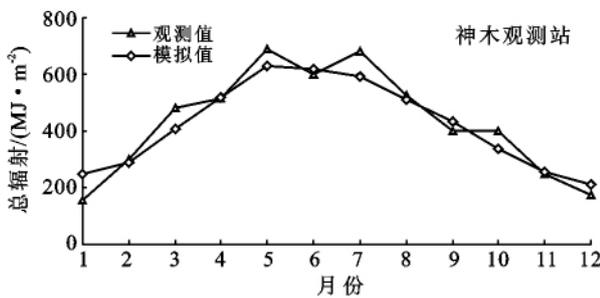


图 1 神木、靖边各月太阳总辐射测值与模拟值对比

### 2.2 榆林地区太阳能资源分布特征

根据最小二乘法的拟合结果,将陕北榆林地区 12 个台站的对应天文辐射、日照百分率分别代入拟合方程,计算出榆林地区的各月太阳总辐射,进而推算出季、年太阳总辐射,并将计算结果在 Surfer 8.0 软件中采用克里格插值法完成全区范围的太阳总辐射空间插值。

图 2 为榆林地区各季节太阳总辐射分布状况,从图 2 中可看出,榆林地区夏季太阳辐射最大,冬季最小,春、秋两季介于其间。春季太阳总辐射在 1 515~

1 586 MJ/m<sup>2</sup>,夏季在 1 712~1 782 MJ/m<sup>2</sup>,秋季在 1 007~1 061 MJ/m<sup>2</sup>,冬季在 724~777 MJ/m<sup>2</sup> 之间。同时,春、夏、秋 3 季太阳辐射较高的区域分布区域较广,是太阳能利用的最佳季节。

榆林地区年太阳总辐射的空间分布如图 3 所示,可以看出榆林地区年太阳总辐射量介于 4 970~5 163 MJ/m<sup>2</sup>,最高值区在长城沿线一带,府谷、神木、榆林、佳县、靖边、横山、绥德、吴堡、米脂、清涧均在 5 000 MJ/m<sup>2</sup> 以上,最大为横山 5 162.3 MJ/m<sup>2</sup>,低值区主要位于定边西南部和子洲南部。

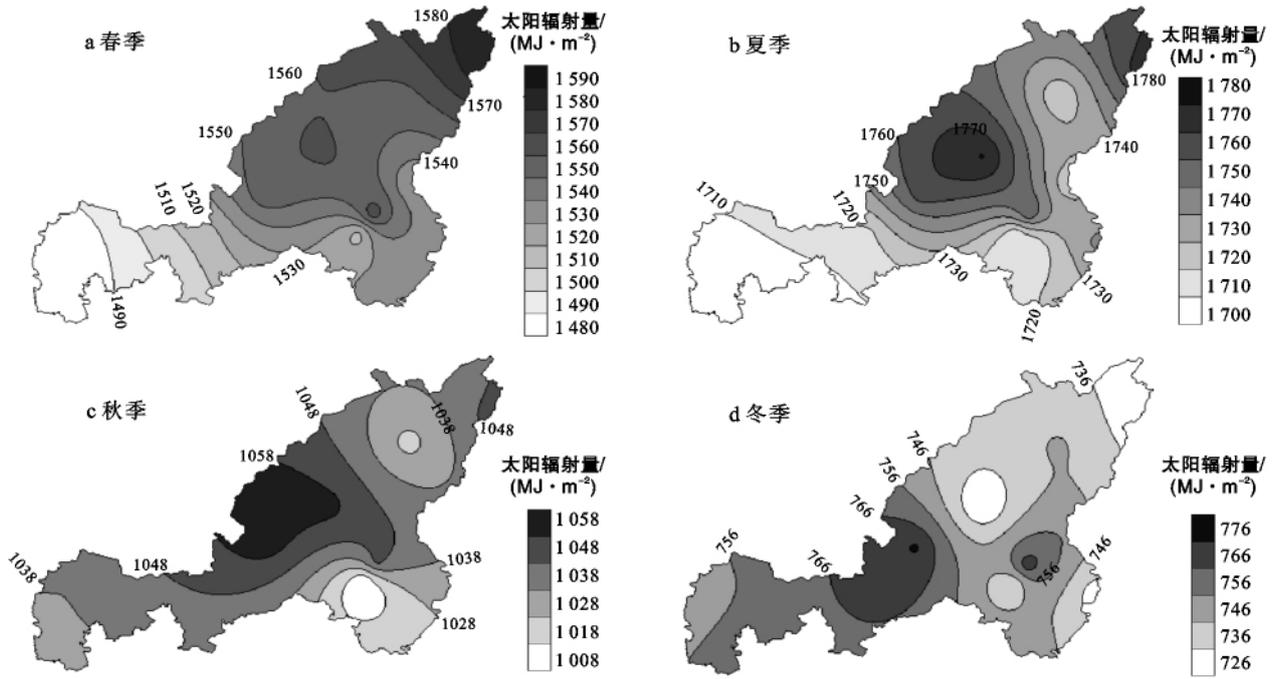


图 2 榆林地区 4 季太阳总辐射分布

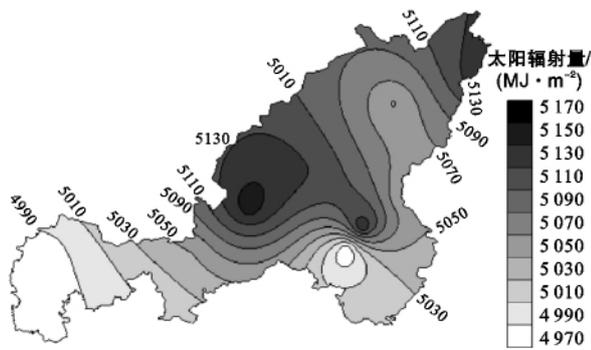


图 3 榆林地区年太阳总辐射分布

### 2.3 资源潜力评估

2.3.1 太阳能资源丰富程度 由上述 4 季及年均太阳能总辐射分析可知,榆林地区太阳能资源最为丰富的地区是长城沿线地区,根据国内太阳能资源的区划标准(表 1),榆林地区 12 个县(区)均属于太阳能资源丰富区,其中府谷—神木—榆林—横山—靖边大部—佳县—米脂—吴堡—绥德—子洲北部属于资源很丰富区,定边—靖边西南和子洲以南地区属于资源丰富区(图 4)。

2.3.2 太阳能资源稳定程度 按照式(3),对研究区 1971—2008 年 12 个气象站日照时数(日值)进行计算,得到各站点 38 a 平均  $K$  值(表 5),可见榆林地区太阳能资源稳定度  $K$  均小于 2,说明榆林地区太阳能资源稳定。

2.3.3 太阳能资源利用价值 根据中国气象局颁布的太阳能资源评估方法标准及已有的研究结果,利用

各月日照时数大于 6 h 的天数为指标,可反映一天中太阳能资源的利用价值。一天中日照时数如小于 6 h 则认为太阳能不具有利用价值。据此,统计了研究区 38 a(1971—2008 年)中 12 个气象观测站日照时数大于 6 h 的天数并求平均,结果表明各站点中年均日照时数大于 6 h 的天数均超过 250 d,其中,最大为府谷达到 283.07 d,最少为定边也有 258.77 d,说明在不考虑成本、技术可行性的前提下,榆林地区太阳能资源具有较高的潜在利用价值。



图 4 榆林地区太阳能资源丰富程度分布

表 5 榆林地区太阳能资源稳定度  $K$

站名	$K$ 值	站名	$K$ 值	站名	$K$ 值
府谷	1.19	定边	1.35	绥德	1.38
榆林	1.27	靖边	1.26	吴堡	1.36
神木	1.37	横山	1.22	米脂	1.24
佳县	1.21	子洲	1.39	清涧	1.23

2.3.4 太阳能资源储量和可利用量 根据式(4),榆林地区总面积为 43 578 km<sup>2</sup>,年平均太阳总辐射 5 064 MJ/m<sup>2</sup>,可计算出榆林地区太阳能资源总储量为 6.13×10<sup>13</sup> kWh。再根据式(5),按 1%陆地面积,转换效率 20%计算榆林地区太阳能资源的可利用量,则可得到榆林地区太阳能资源可利用量可达 1 226 kWh。

### 3 结论

(1) 榆林地区夏季太阳总辐射最大,冬季最小,春、秋两季介于其间。春、夏、秋 3 季是太阳能利用的最佳季节。

(2) 榆林地区年太阳总辐射量介于 4 970~5 163 MJ/m<sup>2</sup>,最高值区在长城沿线一带,府谷、神木、榆林、佳县、靖边、横山、绥德、吴堡、米脂、清涧均在 5 000 MJ/m<sup>2</sup>以上,最大为横山 5 162.3 MJ/m<sup>2</sup>,低值区主要位于定边西南部和子洲南部。

(3) 榆林各县(区)均属于太阳能资源丰富区,其中府谷—神木—榆林—横山—靖边大部—佳县—米脂—吴堡—绥德—子洲北部属于资源很丰富区,定边—靖边西南和子洲以南地区属于资源丰富区。

(4) 榆林地区太阳能资源十分稳定,在不考虑成本、技术可行性的前提下,榆林地区太阳能资源具有较高的潜在利用价值。

(5) 榆林地区太阳能资源总储量可达 6.13×10<sup>13</sup> kWh,太阳能资源可利用量可达 1 226 kWh。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周扬,吴文祥,胡莹,等.西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J].自然资源学报,2010,25(10):1738-1749.
- [2] 韩虹,任国玉,王文,等.黄土高原地区太阳辐射时空演变特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):61-66.
- [3] 王伟,王玉,李缠云,等.黄土丘陵沟壑区气候与气候生产力变化分析:以延安市为例[J].水土保持通报,2008,28(6):151-154.
- [4] 陈志华.1957—2000年中国地面太阳辐射状况的研究[D].北京:中国科学院大学,大气物理研究所,2005.
- [5] 姚玉璧,李耀辉,王毅荣,等.黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):202-208.
- [6] 孙娴,王娟敏,姜创业,等.陕西省山地日照时间的空间分布特征[J].自然资源学报,2010,25(4):625-635.
- [7] 吴林荣,王娟敏,刘海军,等.陕西省太阳辐射及其日照时数的时空变化特征[J].水土保持通报,2010,30(2):212-214.
- [8] 吴林荣,江志红,鲁渊平,等.陕西省日照时数和日照百分率时空分布演变特征[J].陕西气象,2008(1):18-21.
- [9] 吴林荣,江志红,鲁渊平,等.陕西太阳总辐射的计算及分布特征[J].气象科学,2009,29(2):187-191.
- [10] 王炳忠,张富国,李立贤.我国的太阳能资源及其计算[J].太阳能学报,1980,1(1):1-9.
- [11] 苏志,方旭.广西太阳总辐射的计算及分布特征[J].广西气象,2003,24(4):32-341.
- [12] 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.
- [13] 沈瑱,曾燕,肖卉,等.江苏省日照时数的气候特征分析.气象科学,2007,27(4):425-429.
- [14] 李爱贞,刘厚凤.气象学与气候学基础[M].北京:气象出版社,2004:29-56.
- [15] 杜尧东,毛慧琴,刘爱君,等.广东省太阳总辐射的气候学计算及其分布特征[J].资源科学,2003,25(6):66-70.
- [16] 章毅之,王怀清,胡菊芳,等.太阳能资源评估方法[S].中华人民共和国气象行业标准 QX/T89-2008,2008.
- [17] 王娟敏,孙娴,姜创业,等.基于 ArcEngine 太阳能资源评估业务系统的研制及应用[J].资源科学,2010,32(11):2246-2252.