

基于 GIS 平台的我国太阳能光伏发电潜力研究

王利珍¹, 谭洪卫^{1,2}, 庄智², 雷勇¹, 李进³

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学绿色建筑及新能源研究中心, 上海 200092;
3. 珠海兴业绿色建筑科技有限公司, 珠海 519060)

摘要: 太阳能光伏(PV)系统在我国的应用十分广泛, 但还缺乏其在不同区域的资源利用潜力分析. 建立了太阳能光伏发电潜力评估方法, 通过搭建实验台研究3种常用太阳能光伏系统的转换效率和环境参数的关系, 并拟合出光伏效率方程. 借助地理信息系统(GIS)平台的空分析功能研究我国各地太阳能辐射强度频数和发电潜力空间分布. 通过分析发现单晶硅组件在我国西北和北方地区高达 200 kWh/(m² · a) 以上, 适宜发展 PV 系统, 而西南地区仅约 130 kWh/(m² · a), 可以为各地发展太阳能和制定能源发展规划提供参考.

关键词: 太阳能资源; 光伏系统; GIS 平台; 效率方程

中图分类号: TK 519 **文献标志码:** A

Evaluation of the Photovoltaic Solar Energy Potential in China Based on GIS Platform

WANG Li-zhen¹, TAN Hong-wei^{1,2}, ZHUANG Zhi², LEI Yong¹, LI Jin³

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Research Center of Green Building & New Energy, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Zhuhai Singyes Green Building Technology Limited Company, Zhuhai 519060, China)

Abstract: Solar photovoltaic (PV) systems are widely utilized in our country. However, the associated study about its resource potential analysis is still short of in variant districts. Based on the existed data about solar radiation and conversion efficiency, methods for photovoltaic potential assessment were established. An experiment platform for three common kinds of solar photovoltaic systems was developed for the purpose of analyzing the relationship between conversion efficiency and environmental parameters. A calculating formula for conversion efficiency and solar radiation intensity was fitted. With the help of the spatial analysis function of the geographic information system (GIS) platform, the frequency distribution of solar radiation intensity and the solar PV electricity potential in China were derived. The analytical results show that monocrystalline-silicon PV electricity in northwestern and northern areas have reached a level of more than 200 kWh/(m² · a), making those areas be suitable for the development of PV system. However, the potential in southwest areas reaches a level of only 130 kWh/(m² · a). This can provide a baseline

收稿日期: 2014-06-03

基金项目: 中美洁净能源国际合作项目(2010DFA72740-05); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ15B03)

第一作者: 王利珍(1980-), 女, 博士研究生. 研究方向: 区域建筑能源规划. E-mail: 2009wanglizhen@tongji.edu.cn

通讯作者: 谭洪卫(1959-), 男, 教授. 研究方向: 建筑节能技术和可再生能源利用. E-mail: hw_tan@tongji.edu.cn

reference for solar energy development planning.

Key words: solar resource; photovoltaic system; GIS platform; conversion efficiency

太阳能光伏发电在未来社会发展和能源结构中 will 发挥重要作用. 大规模开发和应用太阳能光伏系统对逐步优化能源结构、节约常规能源、改善生态环境、解决能源短缺问题具有重大意义, 开展太阳能资源评估研究已成为一项紧迫而重要的任务. 国内外学者采用不同的方法, 对太阳能资源进行分析. 国外一些学者借助 GIS 平台对太阳能资源和太阳能规划进行了深入调查和研究, 在 GIS 平台下对资源的利用潜力进行可视化分析. 文献[1-2]分别结合 TRNSYS、3D 城市模型等对太阳能光伏能源资源进行分析; Izquierdo 等^[3]利用屋顶面积分布来研究评价大型光伏能源系统潜力; Rylatt, Gadsden 等^[4-6]开展了太阳能潜力研究. Ramachandra 等^[7]利用 GIS 系统绘制了潜力地图; Kucuksari 等^[8]借助 GIS 寻找最优 PV 工程最佳实施方案, 为应用提供参考; Sanchez 等^[9]采用多目标决策和 GIS 相结合的方法对太阳能发电进行了评价; Ramachandra 等^[10]利用空间地图探讨 Karnataka 州的太阳能潜力等; Sørensen 等^[11]在卫星资料基础上采用 GIS 系统绘制太阳能资源地图, 开展太阳能光伏的应用研究. 我国已有学者开展太阳能资源和太阳能发电系统性能研究. 周杨等^[12]采用太阳总辐射和日照小时数对太阳能资源空间分布特征及资源潜力进行评估; 张春平、张华等^[13-14]分别对太阳能热发电系统和太阳能热风发电系统的空气集热器装置进行了试验研究. 廖志凌等^[15]建立了硅太阳电池非线性工程简化数学模型.

本文作者首先提出结合太阳能光伏发电效率的资源潜力计算方法, 然后搭建实验台分析单晶硅、多晶硅、薄膜组件在相同环境条件下的转换效率和环境参数的关系, 最后研究我国各地的太阳能辐射强度频数和发电潜力空间分布.

1 太阳能光伏资源评估方法

1.1 潜力评价

在我国, 太阳能利用是依据 4 类地区的划分标准, 给出单位面积的阳光辐射强度值和日照小时数, 未结合太阳能光伏发电潜力进行评估. 在工程应用

中为了简化计算取平均值进行年发电量估算^[16].

$$E_{pv, out} = A_{pv, s} \eta_e G \quad (1)$$

式中, $E_{pv, out}$ 为年输出功率, W; η_e 为系统年平均转换效率, %; G 为年辐射量, W/m²; $A_{pv, s}$ 为光伏系统有效面积, m².

光伏系统的发电效率主要受辐射强度和电池片温度的影响, 其中辐射强度决定发电电流, 电池片温度主要影响发电电压, 而电池片温度主要是由室外温度、辐射强度综合作用决定^[17]. 太阳能光伏系统在辐射强度不同时, 实际上转换效率是变化值. 本文提出年输出功率通过逐时辐射量和逐时转换效率如公式(2)进行积分运算, 比常规发电量计算软件更精确.

$$E_{pv, out} = A_{pv, s} \int_1^{8760} G(t) \eta(t) dt \quad (2)$$

式中, $G(t)$ 表示第 t 时刻的辐射强度, W/m²; $\eta(t)$ 表示第 t 时刻发电转换效率.

目前, 中国太阳能分布按全年辐射量和日照小时数来衡量太阳能资源分布. 本文研究的太阳能光伏资源潜力是考虑光伏发电效率的太阳能资源潜力, 其受 $G(t)$ 和 $\eta(t)$ 两个因子的影响.

1.2 实验测试

1.2.1 系统概况

本实验平台位于某学校大楼屋顶上, 大楼周围无遮挡, 如图 1 所示由单晶硅、多晶硅、薄膜 3 种电池组件构成, 组件参数见表 1, 光伏 (photovoltaic, PV) 系统产生的直流电通过逆变器转化成交流电后与城市电网连接.

测试时每隔 15 min 采集一次数据, 采集的数据主要包括辐射强度、室外温度、室外风速、电池板组件表面温度、发电量等参数. 采用 TBQ-2 型辐照计测量太阳辐照, 测试范围为 0~2 000 W/m², 信号输出 0~20 mV. T 型热电偶温度传感器测量空气温度和组件表面温度, 测试范围为 -40~350 °C, 精度为 ±0.5%. 采用超声波风速仪测量室外风速, 测量风速的分辨率为 0.01 m/s, 测量范围为 0~70 m/s, 精度为 ±0.3 m/s, 风向的分辨率为 1°, 测量范围为 0~360°, 精度为 ±2°. 系统发电量采用带有 RS485 通讯接口和 MODBUS-RTU 通讯协议的多功能电表.

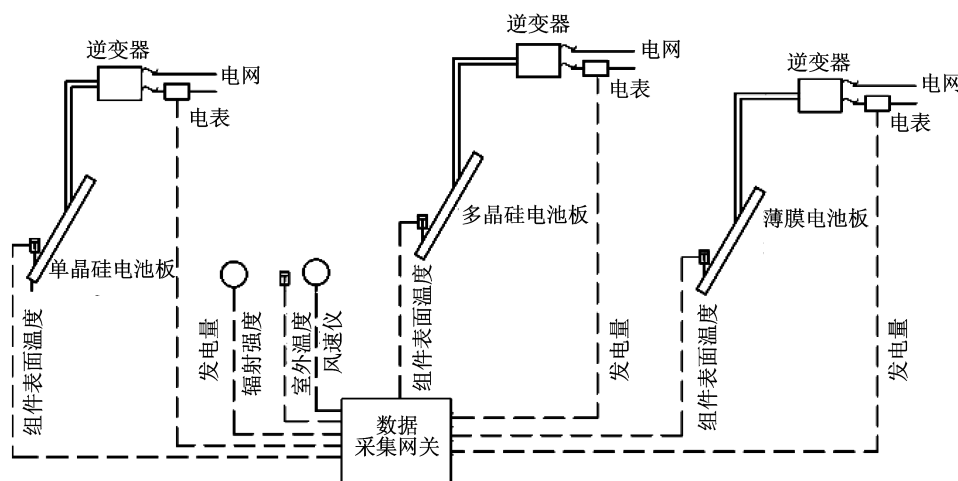


图 1 实验系统原理图

Fig.1 Diagram of the experimental system

表 1 光伏组件主要特征参数

Tab.1 Characteristic parameters of photovoltaic system

PV 组件类型	单个组件尺寸/m		组件数/组	装机容量/W
	长	宽		
单晶硅	1.580	0.808	6	1 020
多晶硅	1.655	0.992	6	1 320
薄膜	1.330	1.100	10	1 150

1.2.2 实验结果分析

测试期间(2010 年 8 月 19 日至 9 月 16 日)辐射强度与室外温度 T 、环境风速 V 数据如图 2 所示.分析汇总 PV 系统逐时发电量与辐射强度数据,剔除实验误差工况点,对采集的数据按式(3)计算光伏系统的转换效率,得到图 3(见下页).

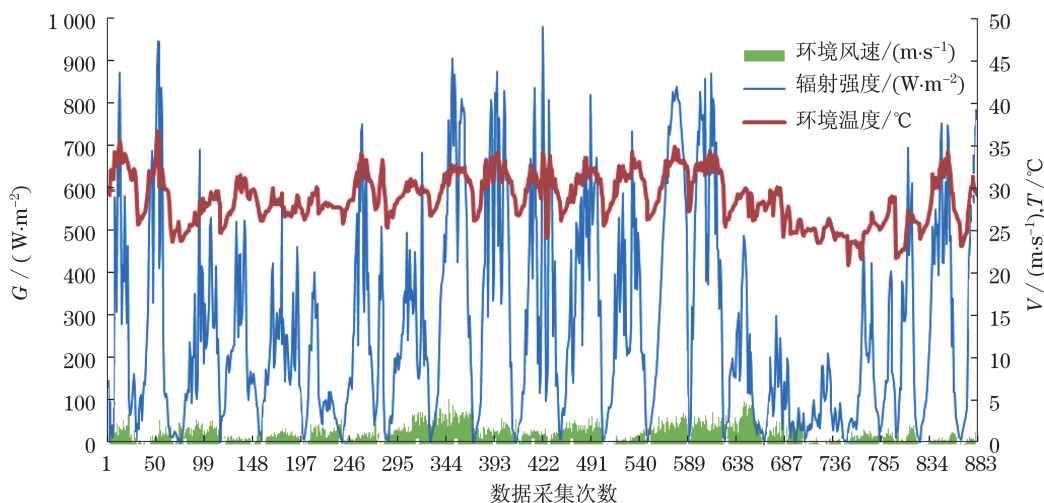


图 2 上海地区辐射强度与室外温度、环境风速

Fig.2 Radiation intensity, outdoor air temperature and wind velocity in Shanghai

$$\eta(t) = \frac{E_{pv}(t)}{G(t)A_{pv,s}} \times 100\% \quad (3)$$

由图 3 可知,在相同环境参数下,单晶硅组件效率最高,依次是多晶硅和薄膜组件.辐射强度和转换效率的关系总结如下:a.辐射强度与转换效率之间存在一定的强相关性,不同组件转换效率与辐射强度呈现同一规律;b.在低辐射强度下(小于 100 W/m^2),转换效率增长较快,随着辐射强度增加,转换效率增

速减慢;c.当辐射强度达到 200 W/m^2 后,转换效率逐渐趋于稳定.辐射强度大于 500 W/m^2 时,组件表面温度受辐射强度升高的影响导致转换效率略呈降低趋势.

测试数据中辐射强度在 10 W/m^2 以下时转换效率非常低,假定为弱辐射;对辐射强度介于 $10 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 和 200 W/m^2 以上情况分别进行转换效率数据拟合,得到 3 种太阳能光伏系统转换效率计

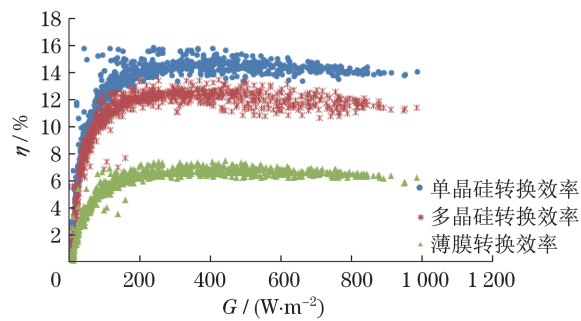


图3 不同组件的转换效率与辐射强度
Fig.3 Conversion efficiency and radiation intensity of three kinds of PV systems

算式如下:

$$\eta_{\text{mono}} = \begin{cases} 3.578 \ln G - 4.040, & 10 \leq G \leq 200 \\ -0.0006G + 14.798, & G > 200 \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_{\text{poly}} = \begin{cases} 3.415 \ln G - 5.054, & 10 \leq G \leq 200 \\ -0.0012G + 12.71, & G > 200 \end{cases} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{thin}} = \begin{cases} 1.907 \ln G - 3.456, & 10 \leq G \leq 200 \\ -0.0003G + 6.790, & G > 200 \end{cases} \quad (6)$$

式中, η_{mono} 表示单晶硅组件转换效率; η_{poly} 表示多晶硅组件转换效率; η_{thin} 为薄膜组件转换效率. 当转换效率逐渐趋于稳定, 组件温度和转换效率分析如图4所示.

组件表面温度的升高会降低光伏系统转换效

率, 可通过风冷的方式降低组件表面温度. 对实验数据进行分析发现, 在相同的辐射强度和风速条件下, 室外气温变高转换效率会降低; 在相同的辐射强度和室外气温下, 风速越大越有利于光伏发电.

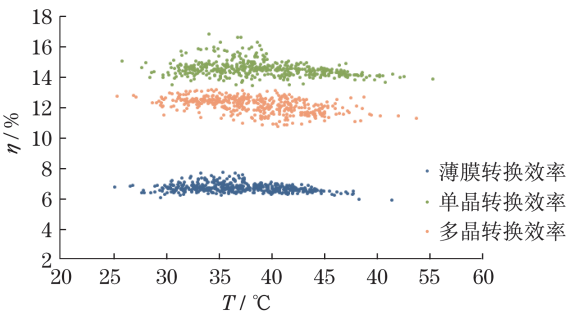


图4 转换效率与组件表面温度
Fig.4 Conversion efficiency vs the surface temperature of battery plate

1.3 上海地区太阳能光伏资源潜力评价

对上海地区全年 8 760 h 辐射强度进行频数分析, 有 4 418 h 辐射强度为 0, 如图 5 所示. 在 4 342 h 中, 28.9% 的日照时数处于低效区 (0~100 W/m²), 17.7% 处于近高效区 (100~200 W/m²), 53.4% 处于高效区 (200 W/m² 以上), 可见有 71.1% 为近高效区和高效区.

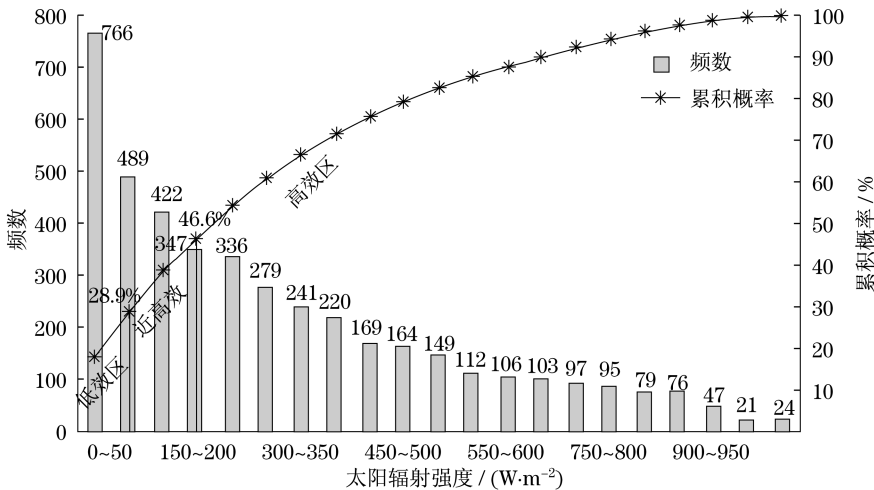


图5 上海全年辐射强度频数和累积概率分布
Fig.5 Frequency and cumulative probability distribution of annual radiation intensity in Shanghai

据式(2)和式(4)计算上海地区单晶硅、多晶硅和薄膜组件全年发电量分别为 180.9, 151.1, 82.3 kWh/(m²·a).

2 基于 GIS 平台的太阳能发电潜力分析

作者采用《中国建筑热环境分析专用气象数据

集》中 270 个气象台站的气象数据, 包括年辐射量、各站点全年水平面逐时辐射量参数, 各站点总辐射小时数相差不大, 稳定在 4 300~4 550 h 之间. 利用可再生能源在线监测系统和光伏组件实验数据, 研究太阳能辐射量和光伏系统发电量的特性等, 用 SQL 编写程序对 270 个站点全年水平面辐射量进行小时数处理分析, 将辐射小时数划分为 0~100 W/m²,

100~200 W/m², 200 W/m² 以上 3 个区间进行辐射强度频数分析, 结果见图 6(a) ~ (c). 以常用单晶硅

组件系统为例, 采用式(2)和 GIS 平台得到全国各地光伏发电潜力分布如图 6(d)所示.

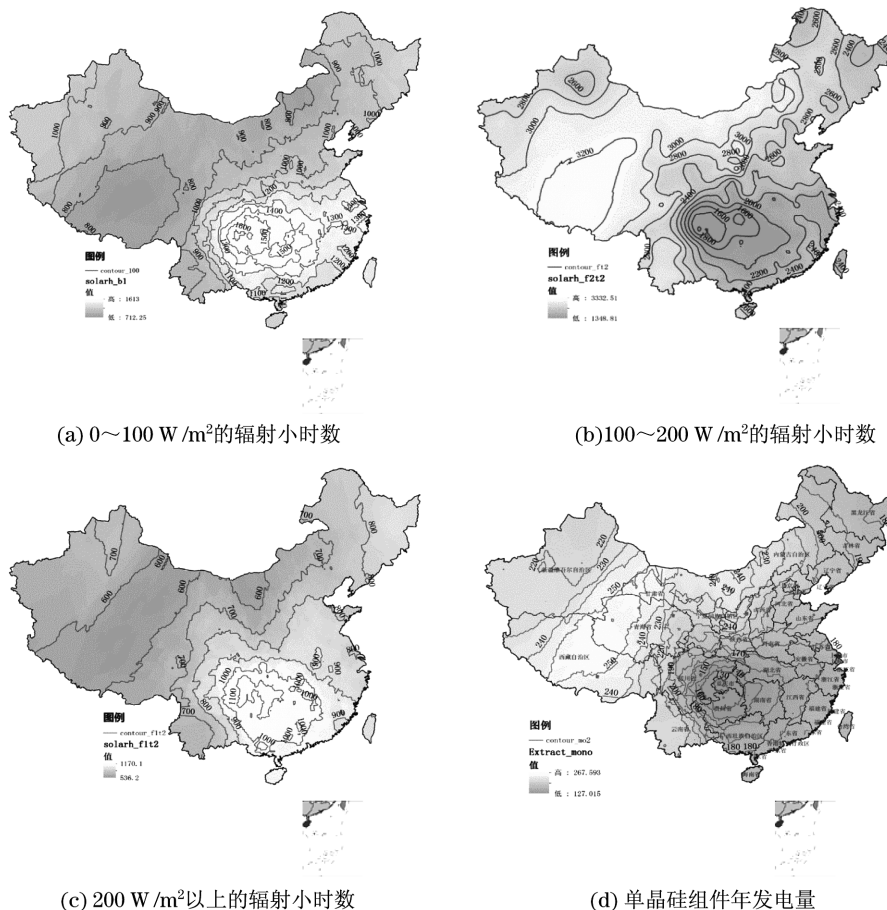


图 6 我国太阳能辐射小时数和光伏发电潜力空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of sunshine duration and PV power potential

利用 GIS 平台克里金插值分析功能, 对 3 个区间段太阳辐射强度的小时数和发电量潜力进行空间分析. 图 6(a) 中西南部的四川、重庆、贵州、湖南等地, 0~100 W/m² 的低转换效率辐射小时数达到 1 300~1 600 h, 远超过全年辐射小时数的 1/3. 图 6(b) 和 (c) 中西北部大于 200 W/m² 的辐射小时数超过 2 600 h. 图 6(d) 中单晶硅组建全国发电量潜力分布在 127~267.6 kWh/(m²·a) 之间, 西北和北方都具有较高的 PV 发电潜力, 高达 200 kWh/(m²·a) 以上.

3 结 论

a. 本研究搭建太阳能光伏系统实验平台, 对测试结果数据进行处理分析, 得到单晶硅、多晶硅和薄膜电池组件系统的光伏效率方程.

b. 作者分析了上海地区的太阳能辐射强度频数分布, 有 71.1% 的辐射强度小时数大于 100 W/m²,

属于近高效和高效区.

c. 借助 GIS 平台空间功能分析, 对全国各地的太阳能辐射强度研究发现西北和北方大部分地区, 辐射强度大于 200 W/m² 的小时数超过 2 600 h, 而西南地区约 1 600 h.

d. 以单晶硅组件为例, 我国各地光伏发电潜力分布在 127~267 kWh/(m²·a), 其中西北和北方地区高达 200 kWh/(m²·a) 以上, 适宜发展 PV 系统, 而西南地方较低约 130 kWh/(m²·a).

参考文献:

- [1] Hofierk J, Kaňvuk J. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools[J]. Renewable Energy, 2009, 34(10): 2206-2214.
- [2] Choi Y, Rayl J, Tammineedi C, et al. PV analyst: coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed

- photovoltaic potential in urban areas [J]. *Solar Energy*, 2011, 85(11): 2924 – 2939 .
- [3] Izquierdo S, Rodrigues M, Fueyo N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large – scale photovoltaic energy – potential evaluations[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(10): 929 – 939.
- [4] Rylatt M, Gadsden S, Lomas K. GIS – based decision support for solar energy planning in urban environments[J]. *Computers Environment and Urban Systems*, 2001, 25(6): 579 – 603.
- [5] Gadsden S, Rylatt M, Lomas K, et al. Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(1): 37 – 48.
- [6] Gadsden S, Rylatt M, Lomas K. Putting solar energy on the urban map: a new GIS – based approach for dwellings [J]. *Solar Energy*, 2003, 74(5): 397 – 407.
- [7] Ramachandra T V, Shruthi B V . Spatial mapping of renewable energy potential [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11 (7): 1460 – 1480 .
- [8] Kucuksari S, Khaleghi A M, Hamidi M, et al. An integrated GIS, optimization and simulation framework for optimal PV size and location in campus area environments [J]. *Applied Energy*, 2004, 113: 1601 – 1613.
- [9] Sánchez-Lozano J M, Teruel-Solano J, Soto-Elvira P L, et al. Geographical information systems (GIS) and multi-criteria decision making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations; case study in south-eastern Spain [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 24: 544 – 556.
- [10] Ramachandra T V, Shruthi B V. Wind energy potential mapping in Karnataka, India, using GIS[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46 (9/10): 1561-1578.
- [11] Sørensen B. GIS management of solar resource data [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 67 (1/2/3/4): 503 – 509.
- [12] 周杨, 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 .
- [13] 张春平, 刘志刚, 赵耀华, 等. 碟式聚光太阳能热发电系统用腔式吸热器热性能分析[J]. *上海理工大学学报*, 2004, 26(4): 294 – 297.
- [14] 张华, 张静敏, 黄惠兰, 等. 太阳能热风发电系统的空气集热器试验装置的研制[J]. *上海理工大学学报*, 2007, 29(4): 383 – 390.
- [15] 廖志凌, 阮新波. 任意光强和温度下的硅太阳电池非线性工程简化数学模型[J]. *太阳能学报*, 2009, 30 (4): 430 – 435 .
- [16] 太阳光发电协会. 太阳能光伏发电系统的设计与施工[M]. 刘树民, 宏伟, 译. 北京: 科学出版社, 2009.
- [17] Fanney A H, Dougherty B P, Davis M W. Measured performance of building integrated photovoltaic panels [J]. *Journal of Solar Energy Engineering, Trans ASME*, 2001, 123(3): 187 – 193.

(编辑: 丁红艺)