

中国太阳能热发电站选址模型研究

王劲峰¹, 孟 斌², 李连发¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;

2 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083)

摘要: 太阳能热发电技术在我国新世纪能源战略中具有重要地位, 太阳能热发电电站位置的合理选择对发电成本有直接影响, 涉及到太阳能热发电技术本身、高时空分辨率的太阳能法直射辐射分布、土地利用分布、水资源分布、社会经济分布, 以及政策税收等众多因素。本文提出了一个太阳能热发电站选址的决策支持系统框架, 就其中的太阳能直射辐射调查进行了初步试验。本文依据供需时空平衡原则进一步讨论了多种绿色能源互补的大能源系统运筹问题。

关键词: 太阳能热发电选址; 太阳能法直射辐射; 决策支持系统; 遥感; 地理信息系统

1 引言

我国的国民生产总值每七年翻一番。这一经济奇迹不仅给世界市场带来了大量产品, 同时也消耗了大量的资源, 已成为世界能源生产和消费大国。2005 年, 我国一次能源产量为 20.611 亿 t 标准煤, 一次能源消费量为 22.33 亿 t 标准煤, 均居世界第 2 位^[1]。预计到 2020 年, 我国一次能源需求为 25~33 亿 t 标准煤。我国以煤为主的能源结构造成严重大气污染, 烟尘和二氧化碳排放量的 70%、二氧化硫的 90%、氮氧化物的 67% 来自于燃煤^[2]。二氧化硫和二氧化碳排放量分别居世界第一位和第二位, 20 世纪 90 年代中期酸雨区已占全国面积的 30% 左右, 此外还有可吸入颗粒物和重金属污染^[2]。而且, 我国已探明的煤炭将在 80 年内采光, 石油将在 15 年左右枯竭, 天然气也将在 30 年用尽。水电站建设对生态环境造成的不利影响等也日益受到全社会的关注。能源总量供应不足, 能源结构不合理, 已经成为影响我国社会经济长期稳定快速发展的制约因素之一。以煤为主的能源消费结构和比较粗放的经济增长方式, 带来了许多环境和社会问题, 经济社会可持续发展受到严峻挑战。大力发展可再生能源已经

成为多数国家的共识。世界上已经有 30 多个国家制定了可再生能源的发展目标, 2020 年可再生能源的发电比例可达 10% 以上, 2050 年可达 40% 或更高的水平, 成为重要的替代能源^[3]。

太阳能热发电是可再生能源的一种。太阳能法向直射辐射 (简称法直射辐射) 是太阳能热发电潜力和电站选址布局的基本依据, 除此之外, 电站选址还需要知道电站占地估算所需的空间高分辨率的土地利用和地形 (DEM), 作为发电介质的当地水资源供给, 计入发电成本的距交通线和电网距离, 作为能源消费者的人口和经济空间分布。数据的精确性和可靠性将直接影响到太阳能热发电站技术路线的选择、效率、电价以及能源利用互补方案。国内外在太阳能热发电选址和相关要素方面进行了大量的研究探索实践, 如美国、德国等。它们在 IT 模型中, 输入项包括动态的遥感云图、气溶胶、水汽、臭氧等因子, 可以输出空间分辨率达 1 km 和时间分辨率达 1 h 的太阳能直射辐射图, 并通过地理信息系统将流沙、沼泽、森林、盐盆、坡度大于 1% 等不适宜区域扣除, 得到当地年发电量排序、基建成本排序和发电成本排序图。我国全面研究太阳能热发电站选址的成果不多, 但一些学者利用气象台站日较差、相对

收稿日期: 2007-01-22; 修回日期: 2007-10-18

资助项目: 本研究得到中科院课题 (KZCX2-YW-308), 国家自然科学基金 (40471111), 863 课题 (2006AA12Z15) 的资助。

作者简介: 王劲峰 (1965 -), 男, 博士, 研究员, 主要从事地球信息科学理论、技术及应用研究。E-mail: Wangjf@lreis.ac.cn

http://www.oilnews.com.cn/gb/misc/2004-11/16/content_593216.htm

湿度、降水等测值估算测点大气透明度，然后用线性回归对测点大气透明度空间化，乘以潜在太阳总辐射，得到逐日太阳总辐射资源图^[4]，太阳辐射分量有不少研究^[5,6]。

本文以太阳能热发电的技术 资源 经济原理为基础，参考我国的数据可获取性和经济性，以及目前技术条件的可行性，设计了太阳能选址技术方案；并重点研究了作为该选址方案中最重要的太阳能法直辐射的调查问题，设计了基于地理信息系统（GIS）和遥感技术（RS）的太阳能法直辐射调查方案与实验。

2 太阳能热发电站选址原理

2.1 太阳能热发电站选址影响因素及相互关系

大型太阳能电站可以是 MW 级和高压电网并联的荒漠光伏电站、MW 级和低压网并联的城镇光伏电站、低成本太阳能聚光热发电，并辅助以

大规模电站的热电循环，太阳能综合利用建筑。

图 1 描述了太阳能热电站选址的基本原理，反映了发电技术、成本、发电规模、投资量及回收期、和政策之间的相互依存关系。其输入项包括：太阳辐射时空分布（天文潜力）、全国地形（场点坡度与遮挡）、土地利用（用地成本）、水资源（太阳能发电介质：水、空气、熔盐）、交通（距离导致人员及设备维护成本）、电网（输电成本）、技术创新（技术成本）、基准电价（比较优势）、政策税收（环境容量、京都议定书、可再生能源法、税赋减免、其他优惠政策）。其中作为圆角方框的电站空间品位和政策环境税收是主要的可控项。矿石品位指单位体积或单位重量矿石中有用组分或有用矿物的含量，类似地，电站空间品位指法直辐射强大从而使得太阳能热利用效率较高。当太阳能热发电上网电价高于当地可用的基准电价时，可以通过选择电站空间品位更高的地区以降低成本，或者降低税收从而降低太阳

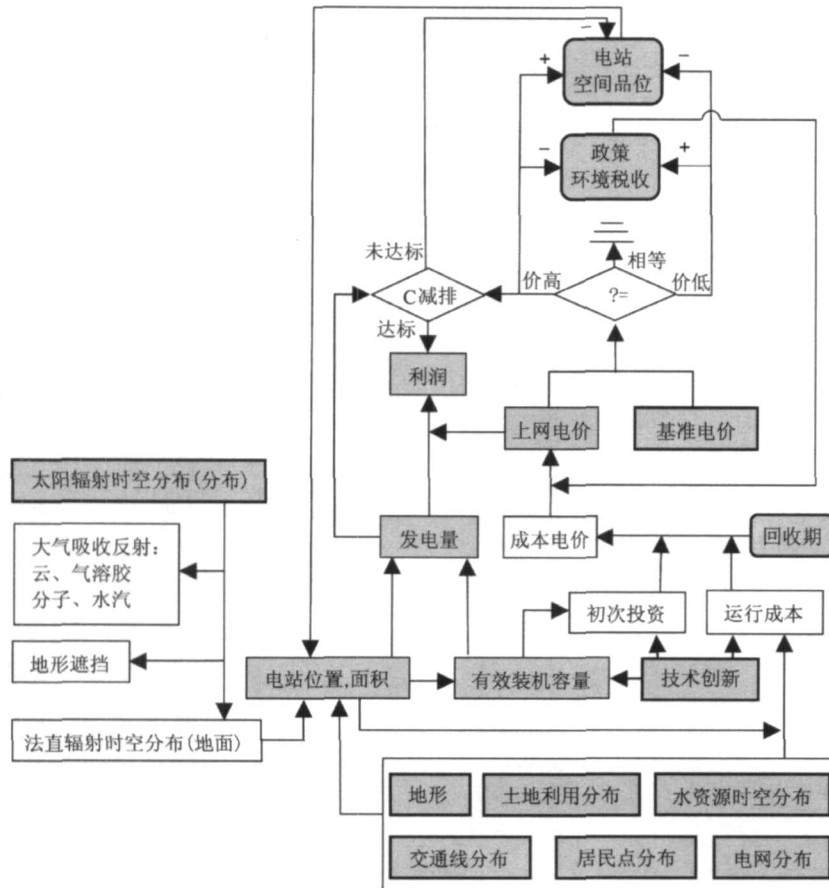


Fig. 1 Principle of location choice for solar heat power plant

能热发电成本，保证太阳能发电的价格具有一定的竞争力。当前，太阳能热发电在大多数地区价格仍然高于当地基准电价，但是其环境表现优于传统电站，如果其环境效应可以抵消其价格的相对劣势，则太阳能热发电仍是首选，如果其环境优势不足以抵消价格劣势（未达标），则可以通过降低空间品位增加发电量从而减少碳排放。上网电价形成于成本电价，后者由初次投资、运行成本和回收期形成。初期投资受电站所采用的技术和装机容量决定；运行成本由发电所采用的技术，如太阳能聚光发电新技术、线形 Fresnel 高温聚光方法以及耐高温非真空吸热管式吸热器、塔式太阳能电站高温空气吸热器及储热技术、耐高温的双端开口金属吸热体真空吸热管等关键技术和部件等，以及发电要素成本决定；电站位置受太阳能法直射辐射空间分布、地理环境、发电介质和电站空间品位选择所决定；电站位置、面积和发电技术决定了有效装机容量（有效是指不同的光-热-电转换效率）。其中太阳法直射辐射分布决定了可发电的最大潜力，主要受到天文辐射、大气吸收和地形遮挡影响。

图 2 列举了其中的空间因素与发电成本的定性关系，具体参数需要用地理信息系统、遥感、测站、模型和技术经济分析比较确切地进行定量估计，最终建立太阳能热电站选址决策支持系统（Location Choice System of Solar Heat Power Plant, LCS-SHPP）；然后，用 GIS 多指标约束和 GA 及蚂蚁算法^[7]输入 LCS-SHPP 搜寻一座有经济竞争力的太阳能热发电厂的潜在靶区位置，其寻址条件包括如下方面：年太阳法直射辐射大于 X (kWh/m^2) 并且保证率大于 $P(\%)$ ，荒漠地区，坡度小于 1%

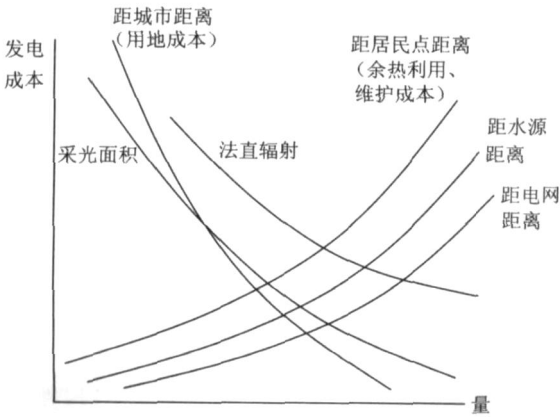


图 2 太阳能发电成本中的空间因素

Fig. 2 Spatial factors of the cost of solar heat power plant

的面积大于 A (km^2)，距离主要交通线 Y (km) 左右，距离电网 E (km) 左右，距离水源地 W (km) 左右、 H (km) 以内居民多于 Z 万人，居民年人均收入在 C (元) 以上（买得起电）。

2.2 基于 GIS/RS 的太阳能法直射辐射估计方案

(1) 太阳能法直射辐射机理估计

太阳法直射辐射可写作：

$$DNI = E_0 \times (R \times ozon \times gas \times WV \times ae) \times Cl$$

其中 E_0 为天文辐射， R 为瑞利散射， $ozon$ 为臭氧吸收， gas 为混合大气吸收， WV 为水汽吸收、 ae 为气溶胶吸收散射， Cl 为云吸收散射。其中气溶胶厚度和水汽可以用 MODIS Terra/Aqua 双星进行估计，时空分辨率分别为 2 次/天和 500m；云用 NOAA 监测，时空分辨率分别是 2 次和 1km^2 。误差项用地面测值进行订正。

(2) 太阳能法直射辐射地面插值

我国大陆现有 122 个法直射辐射测点、其中国际交换站 10 个，美国直法辐射有 235 个站。可以利用这些空间离散的站点测值对我国太阳能直法辐射资源总量进行估计。根据有限的样本估计总体的方法的理论基础是抽样统计理论，经典统计方法包括简单随机统计^[8]、空间简单随机统计^[9]、Kriging 统计^[10]、空间系统统计^[11]、空间分层统计和空间 Sandwich 统计^[12]。利用这些空间测点，可用 Kriging 系插值和空间非静态插值理论，并对结果的不确定性进行估计^[13]。

(3) 太阳能法直射辐射的半经验估计

将以上两种方法结合有望得到更加准确的估计，即用地基方案获得的离散点对天基方案的面值进行订正；然后用 Cokriging 空间化及时间插值得到全国 1km 分辨率到达地表太阳下行瞬时法直射辐射分布图。进一步归纳得到小时、日、月、年、多年空间平均值，用于太阳能热发电站不同技术指标的效率评估。

3 太阳能热发电站选址的初步试验

3.1 法直射辐射分布

我国大陆现有 122 个法直射辐射测点，97 个站点具有多年平均年法直射辐射值，根据这些数据，利用考虑样点空间代表性的 Kriging 空间插值方法，得到全国多年平均法直射辐射分布图（见图版 彩

图 1): 普通 Kriging (见图版 彩图 1a)、海拔为解释变量的 Cokriging (见图版 彩图 1b)、纬度为解释变量的 Cokriging (见图版 彩图 1c)、和纬度 +海拔为解释变量的 Cokriging (见图版 彩图 1d) 空间插值图。比较结果差距不大。但其可靠性需要用空间抽样理论进行评价^[14]。更加可靠和细致的结果需要用上节半经验估计方法进行细致计算。

3.2 生产资料分布

除去太阳能法直辐射, 太阳能热发电还需要大面积陆地、水资源, 并涉及人口经济等, 图版彩图 2列举了部分我国已经建立的相关要素高分辨率地理信息系统, 它们与太阳直法辐射等要素按图 1信息流方式系统建模, 形成太阳能热发电电站选址和经济评价专家决策支持系统。

我国荒漠面积为 292万 km², 约占其陆地面积的 30%, 主要分布在西北内陆地区和青藏高原。主要类型有草地荒漠、典型荒漠、极旱荒漠以及高寒荒漠, 这些区域的法直辐射达 1500kW h/m²/y 以上, 以此为基数作保守估计, 太阳能法直辐射总量达 4.38 ×10¹⁵ kW h/y, 按热电转换效率 10% 计, 1%的荒漠用于发电, 则我国太阳能热发电潜力达 4.38 ×10¹² kW h/y。比较而言, 三峡工程全部完工后, 三峡电站总装机容量 1820万 kW, 设计多年平均发电量 847亿 kW h。而 2006年全社会用电量已经达到 29368亿 kW h, 预计 2020年, 我国全社会用电量将达到 4.6 ×10¹² kW h/y^[15]。

3.3 成本估算

根据以上我国太阳能法直辐射资源分布和目前发电技术, 在西部太阳能直射资源好的地区该技术的规模化商业化太阳能热发电站的电力成本约为 1.2元 /度, 塔式和槽式基本相当。在北京延庆的 1MW 电站, 电价格约为 2.4元 /度。这些差别主要是由于当地的太阳光资源和电站容量引起的。目前塔式和槽式电站的一次投资约 3万元 /kW ~3.5

万元 /kW。而且在近城市地区的利用, 太阳能热发电的余热可以用来给城市供暖, 这是风力和太阳能光伏所没有的。也是荒漠太阳能热发电所没有的, 这可能会进一步提高城市太阳能热发电的经济性。除以上全国尺度上的我国太阳能发电潜力总量估计, 具体电站选址应当依据图 1所示的决策支持系统。

4 结论与讨论

我国面积广阔, 荒漠面积占 1/3, 其上太阳能法直辐射资源丰富, 太阳能热发电潜力是三峡电站最高发电量的 50倍, 2006年全社会用电量的 2倍, 基本可满足 2020年全社会预期用电量。

太阳能电站选址除考虑太阳能直法辐射资源量和可利用土地面积以外, 还需要发电介质、电站维护、环境效应等的成本和效益估算等, 以及投资量、回收期、技术进步等考量; 从总量估计所依据的太阳能热发电要素的空间分布到具体选址所依据的这些要素的空时 (年、月、日) 精细分布; 在有聚落的荒漠地区需要将当地的生活、生态和生产活动纳入决策支持系统之内。开发相应的太阳能热发电电站选址决策支持系统是实施可再生能源战略的必要步骤, 目前, 我国尚未立项来建立这样一个系统。

火电、水电、核电、太阳能、风能、生物质能等等用地类型和占地面积各异, 空间分布存在

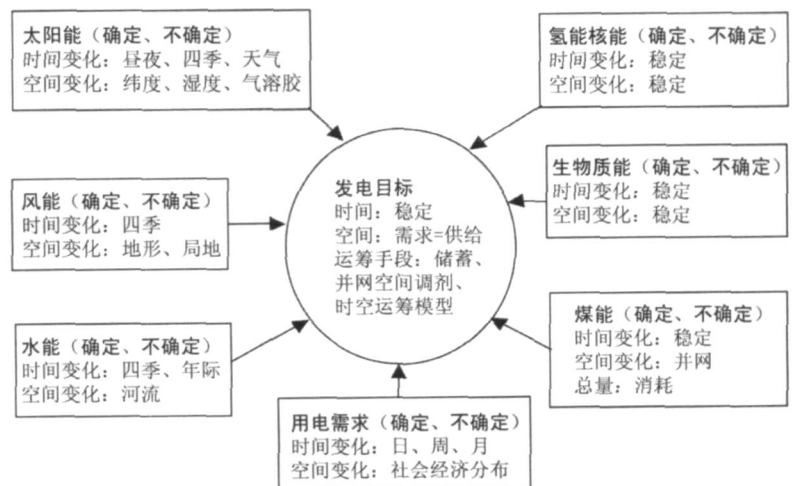


图 3 多能源系统互补时空运筹

Fig.3 Spatiotemporal coordination between multi-energy systems

明显差异, 工作时间互不相同; 另一方面, 不同类型的社会经济存在及其活动对能源需求亦有明显的时空分异, 例如, 居民用电日高峰在 9~11am 和 7~10pm, 而炼铝用电则无时间上的特别要求。因此有可能进行多系统互补运筹, 实现供需双方时空上的最大匹配, 减少空驶浪费和蓄能成本, 最大限度发挥各种发电方式的潜力 (图 3)。具体实现的技术路线可以借助 GIS 格网系统同化存储太阳、风、生物质等多元数据, 然后用粒子群算法进行大规模系统优化。

参考文献

- [1] 国家统计局编. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2006
- [2] 中国能源综合发展战略与政策研究课题小组. 国家能源战略的基本构想. 中国经济时报, 2003 年 11 月 10 日.
- [3] Eric Martinot 全球可再生能源发展报告 [R/OL]. http://www.ren21.net/pdf/RE2005_Global_Status_Report_Chinese.pdf
- [4] 何洪林, 于贵瑞, 刘新安 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究 () ——太阳辐射要素. 自然资源学报, 2004, 19 (5), 679~687.
- [5] 曹双华, 曹家枞. 太阳逐时总辐射混沌优化神经网络预测模型研究. 太阳能学报, 2006, 27 (2), 164~169.
- [6] 白建辉, 王庚辰. 北京地区太阳紫外辐射的长期变化趋势及分析. 太阳能学报, 2000, 21 (2), 192~197.
- [7] Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston: Addison-Wesley Longman Publishing Co. 1989.
- [8] Cochran W G. Sampling Techniques, 3d ed. USA: John Wiley & Sons. 1977.
- [9] Rodriguez-Iturbe I, Mejia J M. The design of rainfall networks in time and space. Water Resources Research, 1974, 10, 713~728.
- [10] Journel A, Huijbregts C H. Mining Geostatistics. London: Academic Press Inc. LTM. 1978.
- [11] Haining R. Spatial Data Analysis: Theory and Practice. Cambridge: Cambridge University Press. 2003.
- [12] Wang J, Liu J, Zhuang D, et al. Spatial sampling design for monitoring the area of cultivated land. International Journal of Remote Sensing, 2002, 13, 263~284.
- [13] Sun Y, Wang J, et al. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. Theoretical and Applied Climatology, 2005, 80 (1), 37~48.
- [14] 王劲峰. 空间分析. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 李琼慧, 白建华, 李隽. 数据考量电力未来. 国家电网报, 2006 年 03 月 05 日.
- [16] 刘纪远, 张增祥, 庄大方 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化遥感时空信息研究. 北京: 科学出版社. 2005.

A Location Choice Model of Solar Heat Power Plant in China

WANG Jinfeng¹, MENG Bin², LI Lianfa¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 College of Arts & Science of Beijing Union University, Beijing 100083, China)

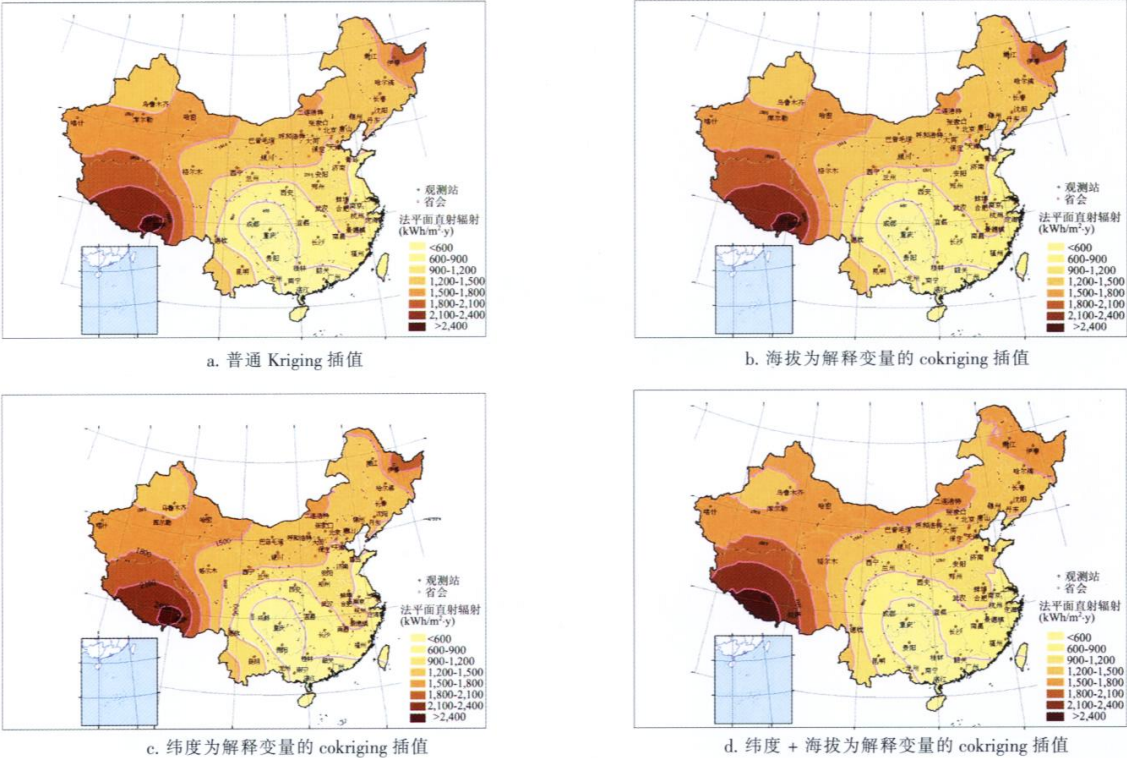
Abstract: Thirty percent of territory of China is desert and Gobi, where there is plenty of solar radiation. The potential power of solar energy of China is 50 times that of the Grand Three Gorges Hydraulic Power Station, or two times the total amount of electricity used in the year 2006, which would meet the expected total demand for electricity of the whole country in 2020.

Where are the profitable candidate sites for the plants and the technique - economic properties of the sites? Considering the distribution of land cover and the state of art techniques of power plant, we give an initial estimate of the cost of the solar heat electricity generation. Besides the direct normal solar radiation and land use and technology, the media of power production such as water resources or solvable salt or gas, maintenance expense, spatial distribution of human and economic activities, environmental and ecological influence, investment and reward-

ing period have to be accounted in making a detailed estimation of the cost and benefit. Geographical information system, remote sensing, spatial statistics, econometrics and spatial operation are tools in the decision making system. This study proposes a conceptual decision making system of choosing sites for solar heat power plants and produces a draft map of direct normal solar radiation of the country based on the observed data and Cokriging technique, for providing one of the layers of the suitable sites for the plant location.

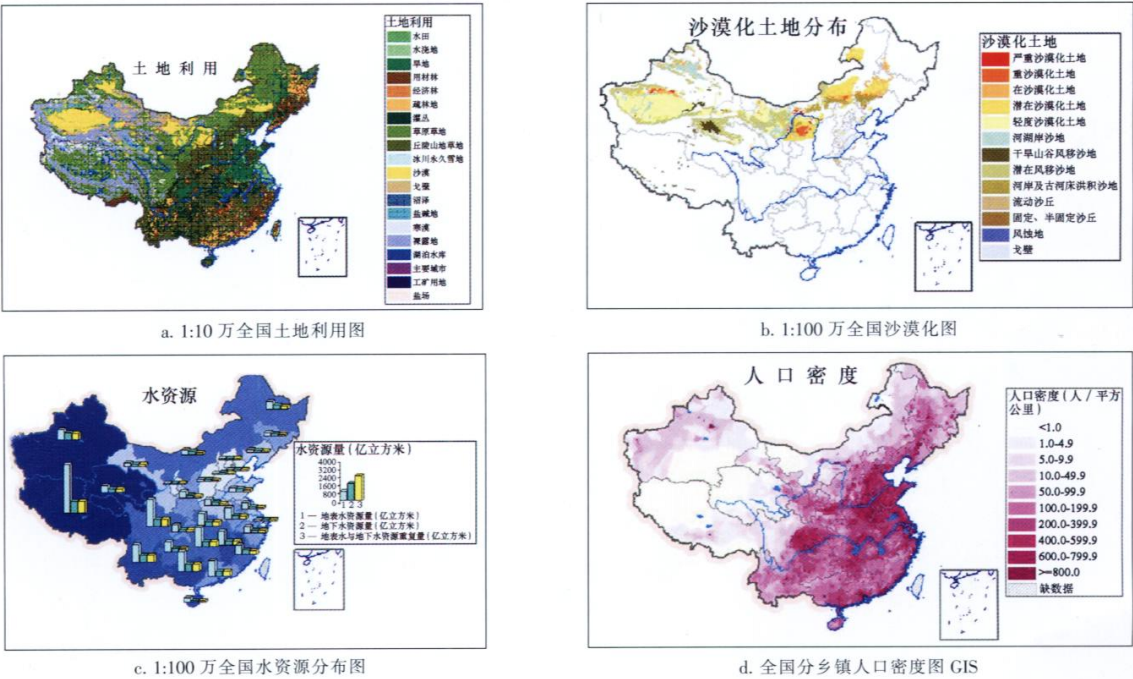
Coal power, hydraulic power, nuclear power, solar energy power, wind power and biomass power use different types of lands and areas, the temporal steady and spatial distributions and working times of the various powers are obviously different; in another aspect, the demands for electricity are also heterogeneous in space and time. Accordingly, there is room to coordinate the demand and supply in space and time.

Key words: location choice; solar heat power plant; solar direct normal radiation; decision making system; remote sensing; geographical information system



彩图 1 全国多年平均法直辐射分布图

Fig.1 Map of Years Average Direct Normal Radiation of China



彩图 2 太阳能电站选址涉及高分辨率要素示意图(引自“中华人民共和国人口环境与可持续发展地图集”)

Fig.2 Illustrative Map of Some Factors in Location Choice of Solar Heat Power Plant