

中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析

李 柯^{1,2}, 何凡能¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:从资源丰富度、稳定性和保障度3个方面,分别选取了较有代表性的太阳总辐射、日照时数和有效日照天数3项量化因子,利用多指标评分法对中国陆地太阳能资源开发潜力进行了综合评价和分析。结果表明:①青藏高原大部、甘肃北部、新疆东部和内蒙中西部地区,太阳能资源极为丰富,最适于进行大规模光电开发;②甘肃中部、新疆、青海东部和南部、内蒙古中东部、东北西部、河北与宁夏北部、四川西部,太阳能资源比较丰富,也适于规模化的太阳能发电;③东北东部和北部、华北平原北部、黄土高原大部、青藏高原东南缘、云南大部、雷州半岛和海南岛,以及新疆北部,太阳能可小规模或季节性开发利用;④其余地区太阳能资源比较贫乏,规模性开发潜力低。

关 键 词:太阳能资源;区域分析;开发潜力;中国陆地

随着世界人口和工业经济的快速发展,化石能源燃烧排放出的大量温室气体已成为全球气候变化的主要驱动力之一,严重危害到人类的生存环境和健康安全。建立以可再生能源(包括太阳能、风能、生物质能、海洋潮汐能等)为主体的持久能源体系成为解决能源短缺与环境安全问题的重要途径^[1-2]。其中,太阳能资源以其分布广泛、就地可取、无需运输、对环境影响小等优势,被国际公认为是未来最具竞争力的新能源之一^[1-5]。

20世纪60年代以来,诸多学者对中国太阳能资源开发利用的相关问题开展了大量研究,在太阳能资源的辐射计算^[6-8]、时空特征^[9-14]、区划分析^[15-19]与开发利用^[20-22]等方面均取得了一些研究成果,但也存在一些问题。例如,一些研究将太阳辐射同太阳能资源画上等号,没有更多地考虑其他因素的影响;有的研究虽然综合考虑了多个评价因子,但在空间数据处理方法和太阳能资源分布图的绘制技术上还比较滞后,图件的空间精度与制图效果有待提高;另外,大部分省市甚至全国的太阳辐射均基于气候学方法进行计算,同实际观测值还存在一定的误差。这些问题都严重影响到了中国太阳能资源开发潜力的综合评估。

鉴于此,本文利用中国陆地辐射站点直接观测的辐射数据和常规气象台站的日照时数观测资料,

计算并分析中国陆地太阳能,在此基础上,综合评价中国陆地太阳能资源潜在规模化的开发潜力,并利用 ArcGIS 绘制中国陆地太阳能资源开发潜力图,希冀这一工作对深入研究与利用中国太阳能资源有所裨益。

1 评价因子遴选

对太阳能资源的开发有多种形式,按能源转换类型的不同,大致可归纳为太阳能光电利用、太阳能光热利用和太阳能光化学利用3种基本形式。近年来,由于材料技术的迅速发展,太阳能电池的造价逐渐降低,加上设备使用周期长,经济效益高等优势,现阶段国内外均把光电利用视为太阳能资源规模化利用中最有活力和前景的领域^[1-2,17]。本文侧重于对太阳能规模化开发潜力的宏观分析,因此以太阳能光电利用为主导,从资源的丰富度、稳定性和保障度3个方面,分别选取了较有代表性的太阳总辐射、日照小时数和有效日照天数3个因子,作为评价中国陆地太阳能资源规模化开发潜力区域分布的指标。

(1) 资源丰富度因子 太阳能产业的开发对象是太阳能,因此太阳能资源的丰欠是影响太阳能大规模开发的首要因素,也是评定太阳能潜力的最主

收稿日期:2010-01; 修订日期:2010-04.

基金项目:科技部“十一五”科技支撑计划课题项目(2006BAD20B06-2)。

作者简介:李柯(1985-),女,湖南长沙人,硕士研究生,研究方向环境变迁与风险评估。E-mail:sqcoco@163.com.

通讯作者:何凡能。E-mail:hefn@igsrr.ac.cn.

要评价因子之一。由于光照产生的电流强度与光强呈正比,所以太阳能资源的丰富度主要取决于太阳光强度,而刻画光照强度的物理指标为单位时间太阳总辐射值,因此,本文采用太阳年总辐射量作为揭示一地太阳能资源丰富程度的评价指标。

(2) 资源稳定度因子 太阳能并非一种随时随地都能利用的资源,它受天气、气候、地形等因素的影响,具有明显的日变化和季节变化。因此,日照时间也是太阳能资源潜力评价中不可忽视的重要因子之一,一般采用日照时数来衡量^[15,17]。日照时数刻画的是一地日照的总时长,本文将其作为太阳能资源开发潜力的评价指标之一,以此揭示太阳能资源稳定程度的区域差异。

(3) 资源保障度因子 如果日照时间低于 3 h,太阳能就无光电利用价值^[17]。而日照时数中包含了这些无开发潜力时间。因此,从资源保障度的角度考虑,本文将 ≥ 3 h 的有效日照天数作为太阳能资源潜力评价中的另一因子,以反映太阳能实际可供利用的天数。

2 数据来源与制图方法

2.1 数据来源

本文所使用的太阳能数据来自于中国气象局发布的《中国辐射日值数据集》和《中国地面气候资料日值数据集》,主要包括总辐射、净全辐射和散射辐射等气象辐射观测资料以及日照时数等常规气象观测数据。相比于通过总辐射观测值同日照时数百分率的线性关系建立的气候学公式计算出的总

辐射值,辐射仪的测量值更接近实际的辐射能量值。但 1993 年以前全国辐射台站使用的仿苏式辐射仪,观测结果相对误差为 10,高于 1993 年以后改用全自动遥测辐射仪的相对误差(0.5),为保证数据的一致性和准确性,本文选用 1995–2004 年有连续观测资料的 99 个辐射站点的辐射数据和 387 个常规气象台站的日照数据(图 1)作为基础,统计得到太阳总辐射、日照时数和 ≥ 3 h 有效日照天数的多年平均值。

2.2 制图方法

在统计各观测站点评价因子数值的基础上,本文利用 GIS 技术,绘制出太阳总辐射、日照时数和 ≥ 3 h 有效日照天数 3 项指标的空间分布图。所用底图来自于中国科学院资源环境科学数据中心,空间数据的处理和分析过程均通过 ArcGIS 软件实现。点数据转换为面数据时采用的插值方法为径向基函数(Radial Basis Function)中的规则样条函数插值法(Completely Regularized Spline)。该方法如同将一个软膜插入并经过各个已知样点,同时使表面的总曲率最小,适用于像太阳能这样空间分布连续、样点数据准确的大量点数据的插值。中国陆地太阳能资源开发潜力分区图,则是根据综合评价方法,将 3 项评价指标分布图进行空间叠加而成。

3 评价因子空间分布特征

中国陆地太阳年总辐射(图 2)、年日照时数(图 3)和 ≥ 3 h 年有效日照天数(图 4)的空间分布具有以下特征:

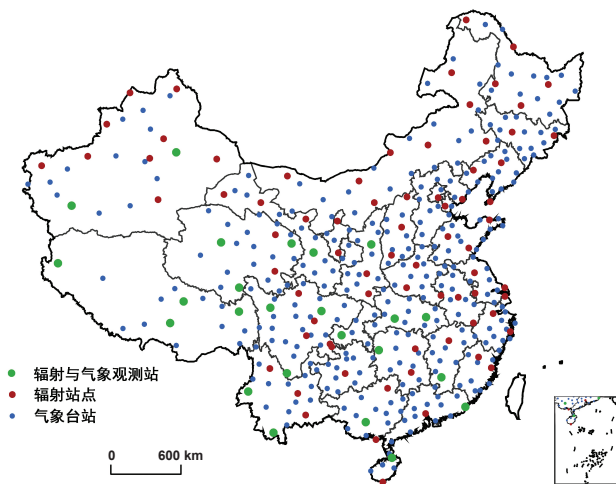


图 1 中国辐射站点和气象站点分布图

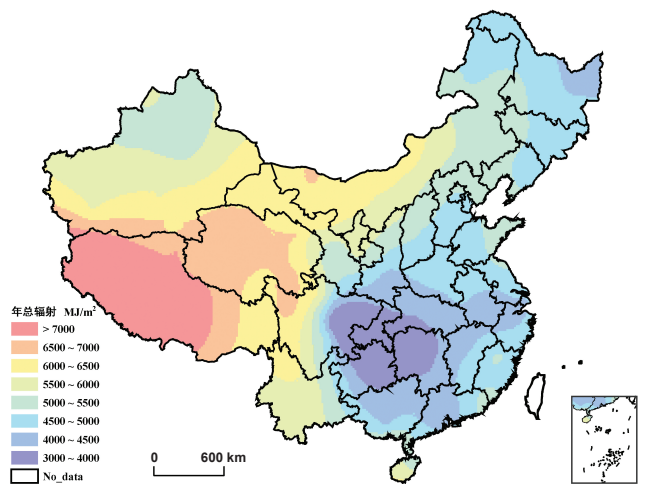


图 2 中国太阳年总辐射分布图

Fig.1 Distribution of China's radiation and meteorological stations Fig.2 Distribution of China's surface annual solar total radiation

3.1 太阳年总辐射

中国太阳年辐射总量大致可以从内蒙的锡林浩特和云南腾冲连一直线分为东、西两部分。东部地区太阳年总辐射在 5500 MJ/m² 以下，整体较弱。其中，内蒙古东部、河北与山西北部太阳年总辐射相对较高，约 5500 MJ/m²；东北三省西部、山东和辽东半岛、甘肃南部、广西南部以及海南岛等地，辐射值在 5000~5500 MJ/m² 间；东部低值区集中在四川东部、重庆、贵州北部和湖南西北部，年总辐射量小于 4000 MJ/m²；受云量与空气湿度影响^[18]，四川盆地太阳年辐射为全国最低值，仅 3300 MJ/m² 左右。西部地区太阳年总辐射整体强于东部，高值中心在地势高、云量少的青藏高原地区，年辐射量基本在 6500 MJ/m² 以上，最大值在葛尔可达 8570 MJ/m²，为全国之冠；青海、内蒙古西部和北部、甘肃中北部、四川西部的年总辐射量也很丰富，均高于 6000 MJ/m²；天山以北、阿尔泰山以西的新疆北部年辐射量略低，最高值不超过 5500 MJ/m²。

3.2 年日照时数

年日照时数的分布格局也可分为东部和西部，大致以黑龙江哈尔滨至西藏拉萨连线为界。东部不仅日照强度弱且日照时间也短。相对而言，东部北方日照时数要多于南方，黄河以北日照时数基本保持在 2400 h/a 上下，而淮河以南的大部分地区日照时数低于 2000 h/a。四川盆地依然是低值中心，其中都江堰年日照时数仅有 808 h，为全国最低。对比图 2 和图 3 还可以看出，西藏东南部的太阳辐射强度虽然大，但日照时间却较少，只有 1300 h/a 左右，大大降低了该地区的太阳能开发潜力。

西部地区有两个日照时数的高值区，一为青

高原西部，一为内蒙西部和新疆、甘肃、青海 3 省的交界地带，年日照时数都在 3200 h 以上。内蒙的马鬃山、拐子湖为 3370 h/a，西藏定日为 3351 h/a，最长日照时数在西藏狮泉河可达 3581 h/a。新疆中部和西部、青海南部、内蒙东北部和黑龙江大部为西部的相对低值区。

3.3 年有效日照天数

≥3 h 年有效日照天数与年日照时数的空间分布大体一致，但也存在差异：①>350 d/a 的日照高值中心分布范围较小。内蒙西部、新疆东部和甘肃北部的日照时数为 3200 h/a，相当于平均有 9 h/a 日照，但有效日照时间却不如青藏高原西部。这说明青藏高原的日照时间虽然理论上要少于纬度更高的地区，但其特殊的气候条件使得该地区实际日照时间要长于高纬度的内蒙等地，几乎保证每天多于 8 h 的高强度太阳辐射。②低于 210 d/a 的日照低值中心分布范围更广。湖北、安徽南部、江西、浙江、福建和广西等地，纬度低、云量大、降水多、日照少，一年之中不足 3 h 的日照时间占有相当大的比重，因此这些地区的日照时数虽然比四川、重庆、湖南、贵州等地要略多，但有效日照少，太阳能资源开发潜力非常有限。

4 太阳能资源开发潜力综合评价

4.1 评价方法

为了便于中国太阳能资源的规模化开发利用，应根据太阳能利用的技术特征、太阳能资源量的区域差异等来划分评价指标等级。过去的气象工作者在这方面已做出了很多成果^[15-19]。尽管因评价目的

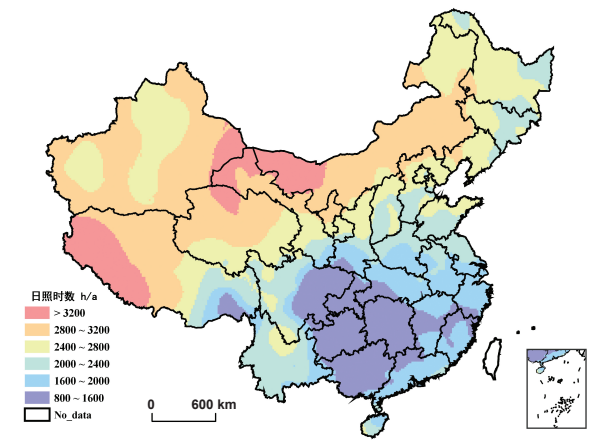


图 3 中国年日照时数分布
Fig.3 Distribution of China's surface annual sunshine duration

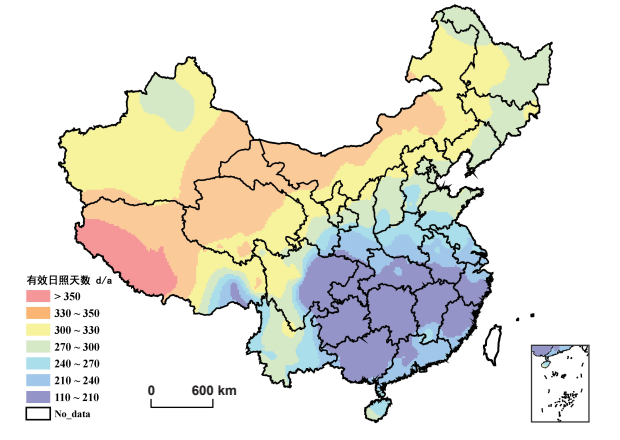


图 4 中国 ≥3 h 年有效日照天数分布
Fig.4 Distribution of China's surface annual available (≥3 hours) sunshine days

不同或评价指标单位不同,不同的学者采用的划分标准有一些区别,但大体范围是一致的。本文对评价指标中太阳年总辐射的划分,以国家气象科学研究所的王炳忠对总辐射的分级^[18]为标准,由高到低分为4级;对年日照时数和年有效日照天数的划分,则参照寿陞扬^[17]专门针对太阳能光电利用区划制定的分级标准,由高到低也分为4级;在此基础上,为进一步区分中国太阳能资源极端丰富区的分布范围,本文以各评价指标最高等级区内最大的一个四分位数作为分割阈值,将最高等级区再分为Ⅰ、Ⅱ两级,即每项指标总共分5级(表1)。分级赋值之后,将各评价因子分值相加,其平均值即为各地太阳能资源开发潜力总分值,计算公式如:

$$P_{Total} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$$

式中: P_i 表示各评价指标分级值; P_{Total} 表示太阳能资源开发潜力总得分; n 表示评价指标个数。在计算出评价总分的基础上,将全国太阳能资源开发潜力分为6个等级区,即极度丰富区、丰富区、较丰富区、一般区、较贫乏区和贫乏区(表2)。

4.2 结果分析

根据上述评价结果,本文运用 ArcGIS 软件绘制中国陆地太阳能资源开发潜力分区图(图5),从图中可以看出,中国太阳能资源开发潜力具有以下空间分布特征:

(1) 极度丰富区 位于青藏高原西部,年总辐射量大于8000 MJ/m²,年日照时数在3300 h左右,年有效日照天数达350 d以上,太阳能资源非常丰富,是中国太阳能开发最高潜力区,占全国土地面

积的3.7%。青藏高原西部属高原气候区,海拔高、云量少、空气稀薄、气温较低,自然环境条件也十分有利于太阳能发电,加上当地传统化石能源的缺乏,太阳能资源的开发显得更为迫切。

(2) 丰富区 分布在西藏中部和北部、青海大部、甘肃北部、新疆东部和内蒙中西部地区。该区年日照时数为3000~3300 h,年有效日照天数约为330~350 d,太阳年总辐射平均6500 MJ/m²左右,略低于极丰区。自西藏西部高值中心到内蒙古西部地区,太阳总辐射从8570 MJ/m²渐降至6000 MJ/m²,降低了30%。尽管如此,该区的太阳能资源仍是十分丰富的,且分布范围广,占到国土面积的18.2%,是中国未来太阳能规模化利用的重点开发区域。

(3) 较丰富区 分布在丰富区的东西两侧,在各级潜力区中面积最广,比重达29.8%。西侧的新疆地区除天山以北、阿尔泰山以东以外,太阳能资源都比较丰富,如喀什的年辐射量为5753 MJ/m²,年日照时数为2883 h,年有效日照天数为313 d;东侧太阳能较丰区,主要包括内蒙古中部和东部、东北三省西部、河北北部、宁夏北部、甘肃中部、青海东部和南部、四川西部和西藏局部。以甘肃中部为界,东侧较丰区又可分为南北两段:北段如锡林浩特年日照时数近3000 h,年有效日照天数达330 d,但年总辐射值仅为5604 MJ/m²;南段青藏高原东南部则恰好相反,辐射强度大,但降水较多,日照时间较少,如西藏那曲站年总辐射可达7140 MJ/m²,但年日照时数仅有2584 h。

(4) 一般丰富区 包括东北地区东部和北部、华北平原北部、黄土高原大部、青藏高原东南缘、云南

表 1 太阳能资源开发潜力评价指标分级
Tab.1 Criteria for solar energy utilization potential assessment

指标等级	分级值	年总辐射/(MJ/m ²)	年日照时数/(h/a)	年有效日照天数/(d/a)
I	100	>7000	>3200	>350
II	80	6200~7000	2400~3200	330~350
III	60	5200~6200	2000~2400	270~330
IV	40	4200~5200	2000~1600	210~270
V	20	<4200	<1600	<210

表 2 太阳能资源开发潜力分级

Tab.2 Classification of solar energy utilization potential

	极丰富区	丰富区	较丰区	一般区	较贫区	贫乏区
潜力评价总分	100	90~100	70~90	50~70	30~50	≤30
潜力区面积比例/%	3.7	18.2	29.8	23.3	13.5	11.5

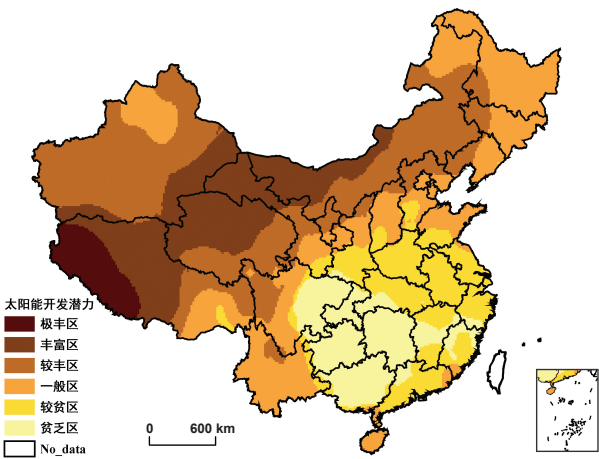


图 5 中国陆地太阳能资源开发潜力分区
Fig.5 Distribution of mainland China's surface solar energy potential of utilization

大部、雷州半岛和海南岛、以及新疆北部,分布范围占全国面积的 23.3%。该区太阳能光照强度和日照时间都处于中等水平,如哈尔滨站年辐射总量达到 4774 MJ/m^2 ,日照时数 2439 h/a ,年有效日照天数 286 d,为太阳能资源潜力高值区与低值区之间的过渡地带,适合于局部、小规模或季节性利用。

(5) 较贫乏区 主要包括河北、山东、山西、陕西和甘肃南部,河南、安徽全境,江苏、浙江、湖北、江西、福建和广东大部分地区,面积比重为 13.5%。该区太阳能潜力指标值偏低,多属第 4 等级,太阳能资源规模性利用的价值较低。

(6) 贫乏区 包括四川盆地、重庆、湖南、广西和湖北西南一隅。本区太阳光照强度低,日照时间短,如成都的年辐射量只有 3172 MJ/m^2 ,为全国最低,日照时数也仅 967 h/a ,一年之中日照时间高于 3 h 的只有 132 d,基本不具备太阳能资源规模性开发利用的潜力。

5 结论与讨论

通过对中国陆地太阳能资源开发潜力的详细分析,得到以下 4 点主要结论:

(1) 本文以太阳能规模化光电利用为主导,从资源的丰富度、稳定度和保障度 3 个方面,分别选取太阳总辐射、日照时数和有效日照天数 3 项指标,较全面地评价了中国陆地太阳能资源潜在规模化开发潜力的区域分布格局,为中国太阳能资源开发利用规划提供了理论依据。

(2) 相比于以往研究中基于气象学经验公式,通过人工插值绘图得到的太阳能分布等值线图,本文利用 GIS 技术绘制的太阳能资源评价因子与开发潜力分布系列栅格图,由于基于太阳总辐射的实测数据,采用地统计方法进行空间插值,并通过更为直观的色彩变化表现图像内容的空间差异,因此,在空间精度控制与信息可视性等方面均得到了加强。

(3) 从评价结果看,中国太阳能规模化利用潜力的区域差异较大,潜力最高的是青藏高原西部、西藏中部和北部、青海大部、甘肃北部、新疆东部和内蒙中西部地区,最适于进行大规模光电开发;其次是新疆、内蒙古中部和东部、东北三省西部、河北北部、宁夏北部、甘肃中部、青海东部和南部、四川西部和西藏局部;另外在东北地区东部和北部、华

北平原北部、黄土高原大部、青藏高原东南缘、云南大部、雷州半岛和海南岛、以及新疆北部,太阳能开发潜力属中等,可小规模、季节性利用;其余区域,尤其是四川盆地、重庆、湖南、广西等地,太阳能资源十分匮乏,基本不具备规模化开发潜力。

(4) 在分析过程中,还存在一些需要进一步探讨的问题。例如,如何将太阳能开发起限制作用的环境因子,如气象灾害、能源需求、经济水平等进行量化,纳入评价体系当中,得到更符合实际利用情况的太阳能资源开发潜力,有待今后进一步研究;此外,如何在现有辐射观测资料的基础上,发展新方法来提高太阳辐射能的空间插值精度,也是一个值得深入探讨的问题。

参考文献

- [1] Vasilis F, James E M, Ken Z. The technical, geographical, and economic feasibility for solar energy to supply the energy needs of the US. *Energy Policy*, 2009, 37 (2): 387–399.
- [2] John B, Lado K, Daniele P, et al. The potential of solar electric power for meeting future US energy needs: a comparison of projections of solar electric energy generation and Arctic National Wildlife Refuge oil production. *Energy Policy*, 2004, 32(2): 289–297.
- [3] Dickinson W C, Cheremisinoff P N. *Solar Energy Technology Handbook*. London: Butterworths, 1980.
- [4] Zekai Sen. Solar energy in progress and future research trends. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(4): 367–416.
- [5] 温敏, 张人禾, 杨振斌. 气候资源的合理开发利用. *地球科学进展*, 2004, 19(6): 896–902.
- [6] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. *气象学报*, 1964, 34(2): 304–31.
- [7] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算. *太阳能学报*, 1980(1): 1–9.
- [8] 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. *南京气象学院学报*, 2005, 28(4): 516–521.
- [9] 左大康. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. *气象学报*, 1963, 33(1): 78–96.
- [10] 杨胜朋, 王可丽, 吕世华. 近 40 年来中国大陆总辐射的演变特征. *太阳能学报*, 2007, 28(3): 227–232.
- [11] 赵东, 罗勇, 高歌, 等. 我国近 50 年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化. *太阳能学报*, 2009, 30 (7): 946–952.
- [12] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近 30 年太阳辐射状况研究. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 24–31.
- [13] 查良松, 丁祖荣. 我国太阳辐射量时间序列分析. *中国科学技术大学学报*, 1996, 26(1): 130–136.
- [14] 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. 资源科学, 2003, 25(6): 66–70.

[15] 朱瑞兆. 我国太阳能风能资源评价. 气象, 1984(10): 19–23.

[16] 张家诚, 朱瑞兆, 林之光. 中国气候总论. 北京: 气象出版社, 1991: 370.

[17] 寿陞扬, 王明, 陈二永. 我国太阳能资源的生态区域. 生态经济, 1992(6): 40–44.

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

[19] 朱瑞兆. 中国太阳能 _ 风能综合利用区划. 太阳能学报, 1986(1): 1–9.

[20] 列加索夫, 库兹明, 傅民杰. 能源问题. 地理科学进展, 1983(2): 17–21.

[21] 高峰, 孙成权, 刘全根. 我国太阳能开发利用的现状与建议. 能源工程, 2000(5): 8–11.

[22] 姚伟. 太阳能利用与可持续发展. 中国能源, 2005, 27(2): 46–47.

Analysis on Mainland China’s Solar Energy Distribution and Potential to Utilize Solar Energy as an Alternative Energy Source

LI Ke^{1,2}, HE Fanneng¹

- (1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;
2. Graduated University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With rapid population growing and dramatic industrial economy developing, the world faces the dual challenges of massive energy requirements and environmental issues caused by extensive fossil fuel depletion. One of the main candidates for facing these challenges are renewable sources of energy (including solar, wind, biomass, geothermal, hydro, wave and tidal energies). Among these sources, solar energy comes at the top of the list due to its abundance, and more even distribution in nature than any other renewable energy types. However, analyses of China’s solar energy potential so far have generally relied on climatological empirical formula which is hard to spread and undeveloped drawing technique. Therefore, based on general solar radiation observations taken from 99 China’s radiation stations and sunshine duration observations taken from 387 of China’s 752 meteorological stations, this text counted average annual solar total radiation as the factor of abundance, sunshine duration as the factor of stabilization and available sunshine days (≥ 3 hours) as the factor of guarantee from the years 1995–2004. Using ArcGIS cartography software and the aforementioned data, the following text depicted a series of maps of mainland China’s solar energy distribution. Then these maps were overlaid to present a more accurate picture of mainland China’s solar energy potential. An analysis of these maps leads to the following conclusions. The greatest solar energy potential is in the Qingzang Plateau, Northern Gansu, Eastern Xinjiang and Mid–Western Inner Mongolia, where are the best locations for extensive solar energy utilization; solar energy potential in Xinjiang, Eastern Inner Mongolia, western part of Northeast Plain, Northern Hebei and Ningxia, Southeast Qinghai and Western Sichuan, is the second best, also perfect for solar energy development. In the areas of the northeast part of Northeast Plain, most parts of Loess Plateau, Yunnan and Hainan, Northern Huabei Plain, and Northern Xinjiang, solar energy potential is at average level. The other areas of mainland China have small solar energy potentials due to the lack of solar radiation.

Key words: solar energy; regional analysis; potential of utilization; mainland China

本文引用格式:

李柯, 何凡能. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1049–1054.