

中国太阳能资源和环境气象因子影响分析

潘进军, 江滢, 郭鹏, 张永山

中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

摘要 太阳能资源是水电、风电之后的第三大可再生能源。在全球光伏发电中,2012年欧洲(70 GW)占主要份额,约占全球的70%;其次是中国(8.3 GW)、意大利(7.8 GW)、美国(7.8 GW)和日本(6.9 GW)。2006年以来,中国新增装机容量年增长速度达200%~500%,远超过国际新增装机发展速度。分析了全球和中国光伏产业发展现状及中国太阳能资源分布特征,研究了太阳能资源的变化特征和影响太阳能资源开发利用的气象因子的时空变化特征,探讨了其对太阳能资源开发利用的可能影响。1961—1990年中国到达地面的太阳能呈减小趋势变化,1991—2000年呈增加趋势变化。气象因子(如云、沙尘、雾和霾)可能影响到地面太阳能资源情况。在中国,总云量和低云均呈北少南多形式分布;近30年来,中国总云量略呈减少趋势变化,低云略呈增加趋势变化。沙尘天气主要发生在中国西北地区,沙尘日数呈明显的减少趋势变化。雾和霾主要发生在中国东南部区域的局部地区,近30年来,雾日明显减少,霾日快速增加。在中国不同区域,主要影响光伏发电效率的天气现象不同,其影响程度也有所不同,变化特征也不尽相同。

关键词 光伏;环境气象因子;太阳能资源

中图分类号 P422

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.001

Analysis of China's Solar Energy Resources and Environmental Meteorological Factors

PAN Jinjun, JIANG Ying, GUO Peng, ZHANG Yongshan

Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Solar energy resource is the third renewable energy following hydropower and wind power. Europe remained the world's leading region in terms of its cumulative installed capacity, with more than 70 GW as of 2012, which represented about 70% of the world's cumulative PV capacity. Next in the ranking are China (8.3 GW) and the USA (7.8 GW), followed by Japan (6.9 GW). Since 2006, the annual growth rate of newly installed capacity of China has reached up to 200%–500%, far more than those of the other countries in the world. Based on a detailed analysis of the global and China PV industry development status, this paper studies the characteristics of solar resource reserves, China distribution and variation, as well as the environmental and meteorological factors influencing the utilization solar energy resources such as clouds, dust, fog and haze. There was a decreasing trend of reach the ground solar in China from 1961 to 1990, and an increasing trend from 1991 to 2000. The meteorological factors like clouds, dust, fog and haze may affect the situation of reach the ground solar. In China the total cloud and low cloud are less in the north and more in the south. The total cloud has shown a slightly decreasing trend and the low cloud a slightly increasing trend in China for the past 30 years. Sand and dust occur mainly in the Northwest China, and they have shown a significantly reduced trend. Fog and haze occur mainly in the local area of the Southeast China. Fog days have shown a significantly reduced trend, and haze a rapid increasing trend for the last 30 years. The different weather phenomena in different regions influence differently on the photovoltaic power generation efficiency. It is highly recommended that specific analysis should be done before establishment of any photovoltaic power station in order to better use resources and avoid unnecessary economic loss.

Keywords photovoltaic; environmental and meteorological factors; solar energy resource

收稿日期:2014-03-12;修回日期:2014-04-23

基金项目:中国清洁发展机制基金赠款项目

作者简介:潘进军,高级工程师,研究方向为气象灾害防御与气候资源开发利用,电子邮箱:panjinjun@cma.gov.cn

引用格式:潘进军,江滢,郭鹏,等.中国太阳能资源和环境气象因子影响分析[J].科技导报,2014,32(20):15-21.

能源是社会发展、人们赖以生存的物质基础。随着全球经济发展迅猛,能源需求量成倍增长,常规能源日益枯竭,环境污染严重,导致全球气候变化和生态环境恶化等问题。开发无污染、可持续的清洁可再生能源是解决这些问题的必然选择。可再生源主要包括太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能、潮汐能等。继水能和风能之后,太阳能资源的开发利用技术也逐渐成熟起来,随着光伏发电成本的不断降低,利用太阳能资源发电必将进入大规模发展时期。

太阳能发电分为光热发电和光伏发电。与常规的能源相比,光伏发电具有总量巨大、无枯竭风险、不排放温室气体和任何污染物、清洁无污染以及分布广、无须开采和运输等优点。当然,光伏发电也有能量密度低,占用土地面积大,能量不稳定,昼夜、季节和地理条件差异显著,以及易受云、沙尘暴、雾和霾等天气现象的影响。

本文回顾国内外光伏发展现状,分析中国太阳能资源的分布情况、变化特征及可能影响太阳能资源利用的气象要素的时空特征。

1 数据来源

全球各国或区域的光伏累计装机量和当年新装机量;全球各国或区域光伏装机量所占比率等相关数据来源于欧洲光伏工业协会和太阳能光伏网(<http://solar.ofweek.com>)。

影响到地面太阳辐射的环境气象因子相关数据来源于中国气象局气象信息中心。

2 太阳能资源开发利用现状

自1954年 Charbin 和 Pilsen 成功研制单晶硅太阳能电池之

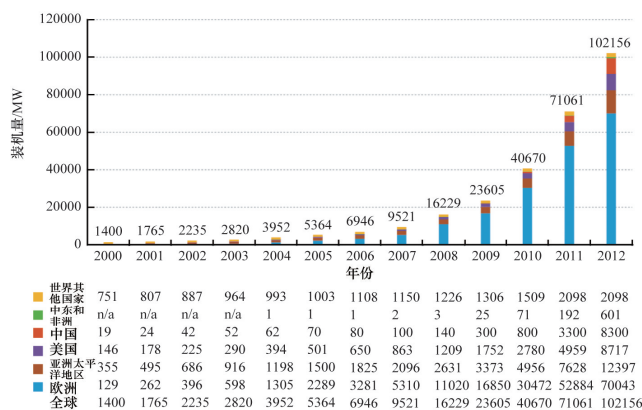
后,太阳能资源光伏利用经历了技术研发、稳步发展和飞跃3个阶段。

2000年之前为技术研发阶段,太阳能电池的种类不断增多、从尝试性应用到商业应用,范围日益广阔、市场规模也逐步扩大。

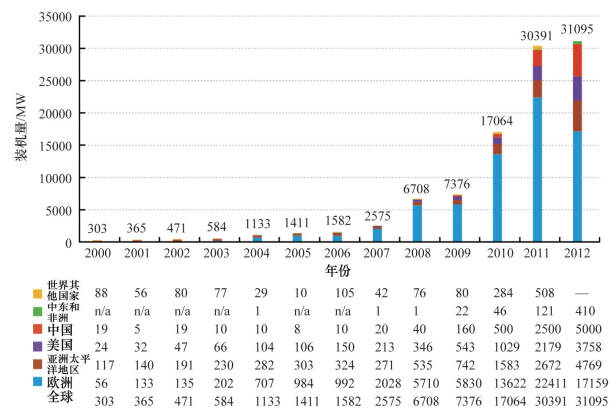
2000—2006年为稳步发展阶段。2000年全球累计装机1.4 GW,当年新装机0.3 GW^[1](图1),全球累计光伏发电相当于减排200万t CO₂。之后光伏装机量逐年增加,2006年全球累计装机达6.9 GW,当年新增装机1.6 GW。截止到2006年全球已建成10余座MW级光伏发电系统,6个MW级联网光伏电站,相当于减排1200万t CO₂。

2007—2012年为飞跃阶段,太阳能光伏技术成为一个成熟的主流方式电源。2012年全球累计光伏装机102.2 GW^[1],能产生16个煤炭发电厂或1个反应堆的电量。2012年全球累计装机量是2006年的14.8倍,2000年的73倍(图1^[1])。2012年新增装机31.1 GW,是2006年的19.4倍,2000年的103倍,减排超过5300万t CO₂,2012年光伏累计装机量相当于减排17000万t CO₂。

在全球光伏发电中,欧洲占主要份额。2012年新增光伏装机的55%来自欧洲,约7.6 GW;其次是中国(5.0 GW)、意大利(3.4 GW)、美国(3.3 GW)和日本(2 GW)(图1、图2)^[1]。欧洲光伏工业协会(EPIA)预计到2017年全球新增装机容量可达48 GW,若再有有利政策驱动的话,可达84 GW。对于累计装机,欧洲仍然全球领先。2012年欧洲累计装机容量超过70 GW,占全球光伏累计装机的70%(2011为75%)。之后,累计装机较多的是中国(8.3 GW)、美国(7.8 GW)和日本(6.9 GW),其次是澳大利亚(2.4 kW)和印度(1.2 GW)(图1)。



(a) 累计装机



(b) 当年新增装机

图1 2000—2012年全球光伏装机量演变(单位:MW)

Fig. 1 Evolution of global PV installations for 2000—2012 (unit: MW)

在欧洲,2012年德国占有44%的新增装机份额(图2(a)),连续7次居欧洲新增光伏装机榜首;之后是意大利,约占20%,法国、英国、希腊、保加利亚和比利时分别占欧洲光伏市场的4%~6%。目前,欧洲光伏发电能满足2.6%的一般电量需求,5.2%的高峰电力需求。

2012年,中国新增光伏装机仅次于欧洲,新增装机5GW,占欧洲之外光伏市场的36%(图2(b))^[1]。2006年以前中国光伏装机量发展较慢,2006年以来的年增长速度达200%~500%(图3)。中国光伏发电发展最快的两年是2009和2011年,年新增装机量分别是前一年的400%和500%。

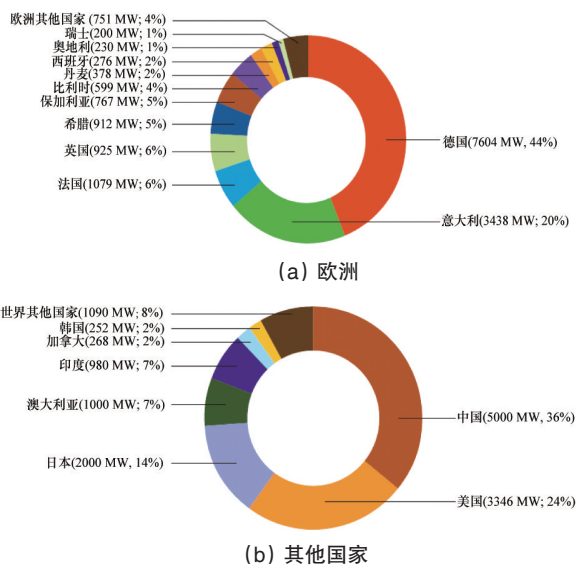


图2 2012年新增光伏装机和份额
Fig. 2 PV market split in 2012

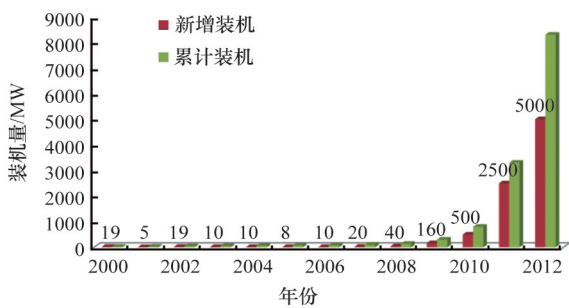


图3 中国光伏装机演变
Fig. 3 Evolution of China PV installations 2000—2012

3 中国太阳能资源分布和变化特征

3.1 中国太阳能资源分布

中国每年到达陆地表面的太阳辐射总能量约为 1.47×10^{16} kW·h。由于受到纬度、地势、气候特征等影响,太阳能资源分布较复杂^[2](图4,图中地图为Arcgis程序自带中国地图,下同),基本可以分为4个区域带^[3]。1) 最丰富带。新疆东南边缘、西藏大部、青海中西部、甘肃河西走廊西部、内蒙古阿拉善高原及其以西地区,该区域太阳能资源非常丰富,年平均

总辐射辐照度超过 200 W/m^2 ,其中西藏南部和青海格尔木地区年平均总辐射辐照度近 250 W/m^2 。2) 很丰富带。在最丰富带的西北和以东地区,即新疆大部、西藏东部、云南大部、青海东部、四川盆地以西、甘肃中东部、宁夏、陕西北部、山西北部、河北西北部、内蒙古中东部至锡林浩特和赤峰一带,年平均总辐射辐照度为 $160 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 。3) 较丰富带。中国中东部和东北的大部地区年平均总辐射辐照度为 $120 \sim 160 \text{ W/m}^2$ 。4) 一般带。以四川盆地为中心,四川东部、重庆、贵州大部、湖南西北部等地太阳能资源较差,年平均总辐射辐照度不足 120 W/m^2 。

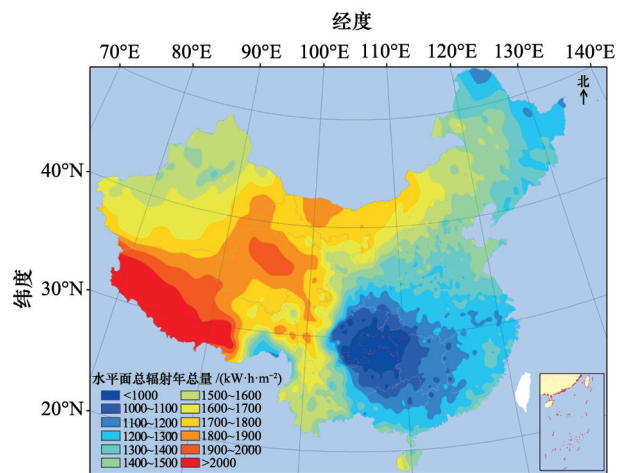


图4 中国太阳能资源分布
Fig. 4 Distribution of China solar energy resources

中国太阳能资源最丰富带约占全国国土面积22.8%,很丰富带占44%,较丰富带占29.8%,一般带占3.3%,从资源总量上说,中国绝大部分地区都适宜于太阳能开发利用^[3]。

3.2 中国太阳能资源变化特征

Wild等^[4]认为,近40年来全球地面太阳辐射从变暗到变亮,也就是到达地面的太阳能资源有变少到增多。但IPCC第4次评估报告^[5]中指出,太阳辐射的从变暗到变亮的变化特征具有区域性,不是全球性的,起因也可能很复杂。

对于中国区域,20世纪60—90年代,太阳能资源呈减少趋势变化,其中西南、华南、华北和华东减小幅度明显,个别地区在20世纪90年代比60年代减小6%;西北和东北减少幅度较小。1990年以后,太阳能资源开始呈增加趋势变化^[6-14]。陈芳^[15]和季国良^[16]对青藏高原、陈志华等^[17-19]对中国西北、Zhang等^[20,21]对中国东部的太阳能资源变化进行了研究,结论是总体上说中国地区从1961—1990年太阳能资源呈减小趋势变化,每10年减少约4.61%;1991—2000年太阳能资源呈增加趋势变化,每10年增加约1.76%。

4 环境气象因子影响分析

中国太阳能资源在近50年发生了较大的变化。到达地面的太阳辐射变化的可能影响因子较为复杂,除了受到太阳本身的变化影响外,在到达地面的过程中还会受到云、沙尘、

水汽和气溶胶等气象因子变化的影响。考虑到中国不同地区或不同时段云、沙尘、温度等气象因素特征差异较大,这些环境气象因子的时空分布和变化特征直接影响了到达地表的太阳能资源量^[22],对中国太阳能资源开发利用的科学规划具有重要指导意义。

4.1 云

云对到达地面的太阳资源产生有非常重要的影响。全球表面大约有50%地区为云所覆盖,云对辐射的透射、吸收、反射和自身发射的红外辐射控制着入射至地球表面的太阳辐射。云分为高云、中云和低云。从高云至低云,云体颜色由白色至灰黑色,云体厚度由薄而透明至厚而不透。太阳高度角高于 10° 时,太阳直接辐射就可以通过高云;而太阳直接辐射不能透过最密的低云^[23]。从图5(b)可以看出,中国总云量分布主要呈北少南多的分布形式,其中西藏西部、内蒙古

北部和东北局部地区多年平均总云量少于50%;西藏东南边缘和四川盆地多年平均总云量多于80%。低云对太阳能开发利用的影响更为显著。中国低云分布形式与总云量的分布形式基本一致,也呈北少南多的分布形式,其中西北和内蒙中东部低云少于10%;西藏东南部边缘、四川盆地和广西局部的地区低云多于60%。中国云量的分布形态与太阳能资源的分布形态存在一定的相似之处,表现为西北地区云量少,太阳能资源丰富;四川盆地及周边地区,云量多,太阳能资源较不丰富。

1981—2012年,中国年平均总云量呈减小趋势变化,平均每10年减少0.3%。Kalsner等^[24-29]的研究也表明,过去几十年中国总云量呈减小趋势变化,但不同研究时段、不同区域减小程度有所不同。1981—2010年中国平均低云呈增加趋势变化,平均每10年增加0.2%(图5(c))。

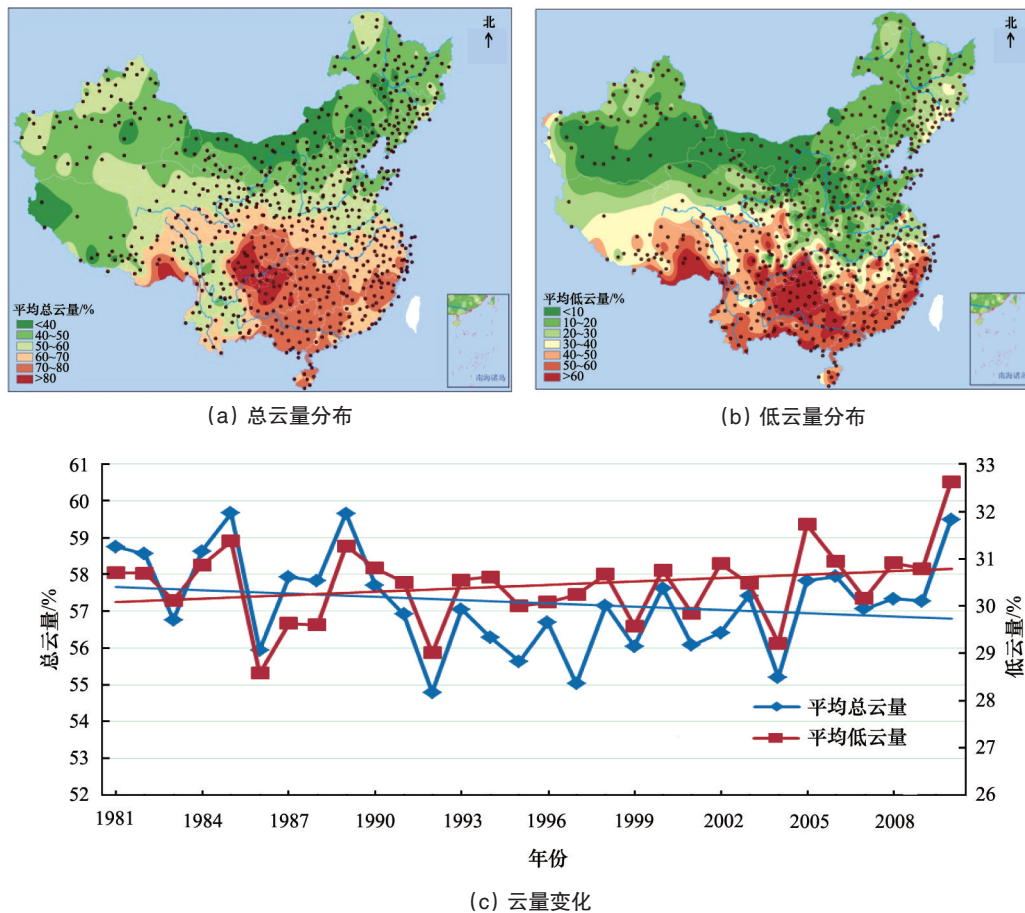


图5 中国1981—2010年平均云量分布和变化

Fig. 5 Distribution and evolution of China cloud from 1981 to 2010

4.2 沙尘

沙尘是指发生在大气中由风吹起地面沙尘使水平能见度降低的天气现象,一般分为浮尘(水平能见度小于10 km)、扬沙(能见度为1~10 km)和沙尘暴(能见度小于1 km)。沙尘向大气输送的沙尘粒子是空气中气溶胶粒子的主要成分之一,气溶胶粒子增加的直接效应是影响到达地表的太阳能

资源的量。从图6可以看出,1981—2010年沙尘现象主要发生在中国西北地区。其中,沙尘暴主要发生在中国西藏西部、新疆南部、内蒙古东部和甘肃北部一带;年沙尘暴日数约为5日,局部地区年沙尘暴日数多于10日。扬沙分布与沙尘暴相似,只是范围略广于沙尘暴,其中内蒙东部、甘肃北部及塔里木盆地地区年扬沙日数多于40日。浮尘主要发生在塔里木

盆地地区,局部地区年浮尘日数超过100日。1981—2010年,年沙尘暴日数、扬沙日数和浮尘日数均呈明显减小趋势,平

均每10年分别减少0.6、1.8、2.2日(图6(d))。沙尘暴、扬沙和浮尘日数的减少趋势有利于太阳能资源的开发和利用。

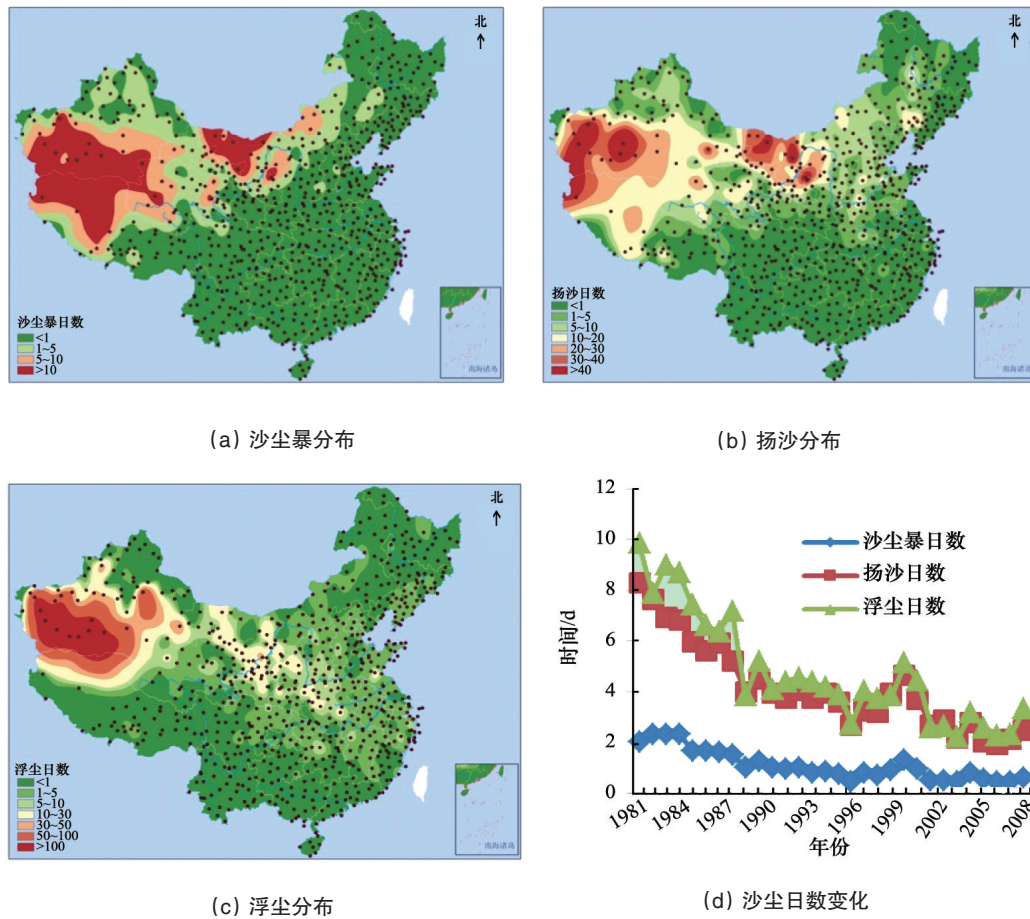


图6 中国1981—2010年平均年沙尘日数分布和变化

Fig. 6 Distribution and evolution of sand dust days from 1981 to 2010

4.3 雾和霾

雾和霾与沙尘类似,同样可以降低大气透明度,影响太阳能资源的利用效率。除了东北地区外,中国东部大部地区年雾日大于10日,其中江南和四川等地的局部地区雾日超过50日。霾主要发生在中国华北、华南、江南等地,一般年霾日在10日左右,个别地区年霾日超过50日(图7)。

从全国平均来看,雾日呈明显的减少趋势变化,平均每10年减少4.1日。而霾日,在2000年以前,霾日变化相对平稳,平均每10年增加0.9日;2000年以后,霾日呈明显增加趋势,平均每10年增加7.5日(图7(c))。雾日的减少与中国近30年来大气水汽含量及降水减少有关;而霾日的增加可能与近几十年来中国经济的快速发展,化石能源消费的快速增加等因素有关。

4.4 气象因子综合影响

能见度能够综合反映大气对太阳辐射的消弱能力,是低

云、沙尘、雾霾等气象因子对光伏发电影响的综合指标之一。从图8可以看出,中国的能见度呈明显的东西分布,东部能见度低,西部能见度高。其中,新疆东部、甘肃北部和内蒙古东部,西藏西部和东部的能见度最高,多年平均能见度超过50 km;四川局部地区能见度最低,多年平均能见度不足10 km。

纬度和地形的影响是造成中国太阳能资源分布背景因素。在此背景下,能见度的影响是不容忽视的。对比中国太阳能资源分布(图4)和能见度分布(图8)可知,中国西北和西藏高原大部地区属于太阳能资源最丰富和很丰富地区,该地区能见度一般都大于50 km,而中国四川盆地及其周边区域能见度较低、云量较大,大部地区能见度低于20 km,局部地区低于10 km;该地区总运量大于70%,局部地区大于80%;年平均总辐射辐照度不足120 W/m²,太阳能资源属于一般地区。

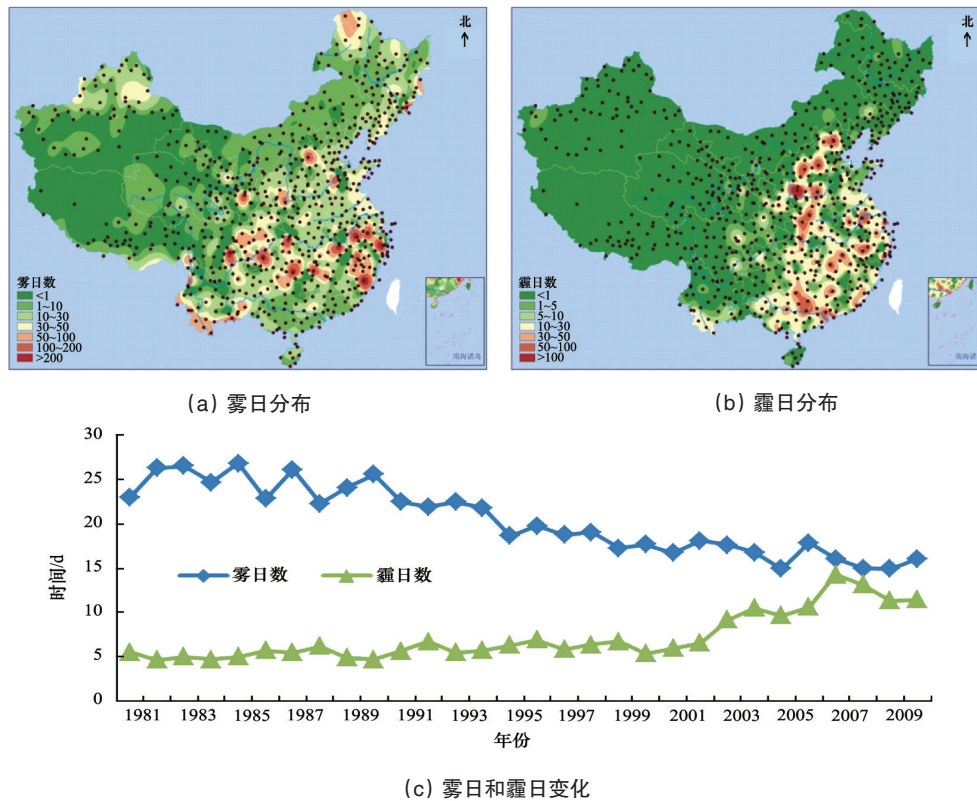


图7 中国1981—2010年平均年雾、霾日分布及变化

Fig. 7 Distribution and evolution of mist and haze in China form 1981 to 2010

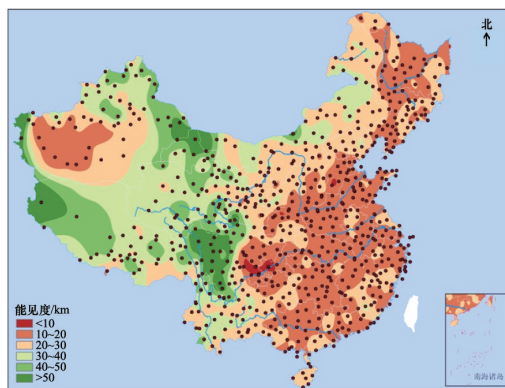


图8 1981—2010年平均能见度分布

Fig. 8 Distribution of China visibility from 1981 to 2010

5 结论

1) 全球光伏发电经历了技术研发、稳步发展和飞跃3个阶段。在飞跃阶段世界累计装机增长了14.8倍,是发展阶段初期的73倍。2012年世界新增装机31.1 GW,至少减排5300万t CO₂。在全球光伏发电中,欧洲占主要份额,其次是中国、意大利、美国和日本。2006年以来中国新增装机容量年增长速度达200%~500%,远远超过全球其他国家新增装机发展速度。

2) 中国太阳能资源丰富但分布较复杂。基本上可以分为最丰富带、很丰富带、较丰富带和一般带4个区域。1961—1990中国到达地面的太阳能呈减小趋势变化,1991—2000年开始呈增加趋势变化。

3) 云、沙尘、雾和霾都可能影响到地面太阳能资源情况。一般来说,中国总云量和低云均呈北少南多的形式分布;沙尘天气主要发生在中国西北地区;雾和霾主要位于中国东南部区域的局部地区。近30年来,中国总云量略呈减少趋势变化,低云略呈增加趋势变化;沙尘日数呈明显的减少趋势变化;雾日明显减少,而霾日快速增加。在中国不同区域主要影响光伏发电效率的气象因子不同,其影响程度也有所不同,变化特征也不尽相同,建议建立光伏电站前,针对拟建区域进行更有针对性的分析,这样才能更好的利用资源和避免不必要的经济损失。值得注意的是,太阳的总辐射强度是直接辐射强度和散射辐射强度的总和。太阳能发电主要是光—热—电转换(光热发电)和光—电转换(光伏发电)两种形式。其中光热发电主要利用太阳能的热效应,与总辐射关系密切;而光伏发电的基本原理是利用光伏打效应,将太阳辐射能直接转换为电能,因此光伏利用受气象因子,尤其是低云的影响更显著、更直接些。然而,各种气象因子对光伏和光热利用的影响程度和机制,将在进一步的研究中开展相关的计算和分析。

参考文献 (References)

- [1] European Photovoltaic Industry Association. Global market outlook for photovoltaics 2013–2017[R/OL]. 2013–05–08, <http://www.epia.org/news/publications/global-market-outlook-for-photovoltaics-2013-2017/>.
- [2] 申彦波, 程兴宏, 赵东. 气象与太阳能生态城[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
Shen Yanbo, Cheng Xinghong, Zhao Dong. Weather and solar eco-city [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.
- [3] 中国气象局风能太阳能资源中心. 中国太阳能资源分布图[R/OL]. 2011–08–10, <http://cwera.cma.gov.cn/Website/index.php?ChannelID=121&NewsID=1988>.
CMA Wind and Solar Energy Resources Center. Distribution of China solar energy resources[R/OL]. 2011–08–10, <http://cwera.cma.gov.cn/Website/index.php?ChannelID=121&NewsID=1988>.
- [4] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface[J]. *Science*, 2005, 308(5723): 847–850.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: The physical science basis[M]//Solomon S, Manning M. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 王雅婕, 黄耀, 张稳. 1961—2003年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势[J]. *气候与环境研究*, 2009, 14(4): 405–413.
Wang Yajie, Huang Yao, Zhang Wen. Changes in surface solar radiation in mainland China over the period from 1961 to 2003[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2009, 14(4): 405–413.
- [7] Shi G Y, Hayasaka T, Ohmura A, et al. Data quality assessment and the long-term trend of ground solar radiation in China[J]. *Journal of Applied Meteorology Climatology*, 2008, 47: 1006–1016.
- [8] 杜春丽, 沈新勇, 陈渭民, 等. 43a来中国城市气候和太阳辐射的变化特征[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(2): 200–207.
Du Chunli, Shen Xinyong, Chen Weimin, et al. Urban climate and solar radiation changes in China in recent 43 years[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, 31(2): 200–207.
- [9] 石玉林, 陈传友, 何贤杰, 等. 资源科学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Shi Yulin, Chen Chuanyou, He Xianjie, et al. Resource science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [10] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(1): L01812, doi: 10.1029/2005GL024586.
- [11] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of 40years of solar radiation data from China, 1961—2000[J]. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32(6): L06803, doi: 10.1029/2004GL022322.
- [12] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961—2000[J]. *Annals of Geophysics*, 2005, 23: 2425–2432.
- [13] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近30年太阳辐射状况研究[J]. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 24–31.
Li Xiaowen, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years[J]. *Journal of Applied Meteorological Sciences*, 1998, 9(1): 24–31.
- [14] 徐群. 近29年冬季中国太阳辐射的显著变化[J]. *中国科学: B辑*, 1990, 20(10): 1112–1120.
Xu Qun. The solar radiation significant changes in recent 29 years winter in our country[J]. *Science China B*, 1990, 20(10): 1112–1120.
- [15] 陈芳, 周陆生. 玉树地区太阳总辐射量变化的气候特征[J]. *青海环境*, 2002, 12(2): 47–49.
Chen Fang, Zhou Lusheng. Climatic features of the variation of total solar radiation in Yushu region[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2002, 12(2): 47–49.
- [16] 季国良, 吕兰芝. 格尔木太阳辐射与气温的多年变化[J]. *高原气象*, 1997, 16(1): 30–35.
Ji Guoliang, Lü Lanzhi. Secular variation characteristics of solar radiation and air temperature at golmud[J]. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 30–35.
- [17] 杨勤, 梁旭, 赵光平, 等. 宁夏太阳辐射逐日、月、年总量的变化特征[J]. *干旱区研究*, 2009, 26(3): 413–423.
Yang Qin, Liang Xu, Zhao Guangping, et al. Change characteristics of daily, monthly and annual solar radiation in Ningxia Hui Autonomous Region[J]. *Arid Zone Research*, 2009, 26(3): 413–423.
- [18] 陈志华, 石广玉, 车慧正. 近40a来新疆地区太阳辐射状况研究[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(6): 734–739.
Chen Zhihua, Shi Guangyu, Che Huizheng. Analysis of the solar radiation of Xinjiang Uygur Autonomous Region in recent 40 years[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(6): 734–739.
- [19] 查良松. 西北地区太阳辐射量变化的研究[J]. *干旱区地理*, 1995, 18(1): 8–13.
Zha Liangsong. Research on the variation of solar radiation in Northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 1995, 18(1): 8–13.
- [20] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Analysis of 40 year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou in Eastern China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 78(4): 217–227.
- [21] 周淑贞, 郑景春. 上海城市太阳辐射的日变化和季节变化[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 1992(2): 63–73.
Zhou Shuzhen, Zheng Jingchun. The diurnal and seasonal variation of solar radiation at Shanghai City[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science Edition*, 1992(2): 63–73.
- [22] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, 23(9): 915–923.
Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, Factors and probable climatic effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 915–923.
- [23] 王秀俊. 云对太阳辐射的影响[J]. *科技转让集锦*, 2012(7): 96–99.
Wang Xiujun. The influence of clouds on solar radiation[J]. *The Transfer of Technology*, 2012(7): 96–99.
- [24] Kaiser D P. Analysis of total cloud amount over China, 1951—1994[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(19): 3599–3602.
- [25] Kaiser D P. Decreasing cloudiness over China: An updated analysis examining additional variables[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(15): 2193–2196.
- [26] 吴浏, 刘佳. 近二十年全球变暖背景下东亚地区云量变化特征分析[J]. *热带气象学报*, 2011, 27(4): 551–559.
Wu Jian, Liu Jia. Trend of cloud amount in East Asia under the backdrop of global warming in the past 20 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2011, 27(4): 551–559.
- [27] 陈少勇, 董安祥, 王丽萍. 中国西北地区总云量的气候变化特征[J]. *成都信息工程学院学报*, 2006, 21(3): 423–428.
Chen Shaoyong, Dong Anxiang, Wang Liping. Climate change features of total cloud cover over Northwest China[J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology*, 2006, 21(3): 423–428.
- [28] 张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 1971—2004年青藏高原总云量时空变化及其影响因子[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 959–969.
Zhang Xueqin, Peng Lili, Zheng Du, et al. Variation of total cloud amount and its possible causes over the Qinghai-Xizang Plateau during 1971—2004[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(9): 959–969.
- [29] 丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近20年全球总云量变化趋势分析[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 670–677.
Ding Shouguo, Zhao Chunsheng, Shi Guangyu, et al. Analysis of global total cloud amount variation over the past 20 years[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2005, 16(5): 670–677.

(责任编辑 朱宇)