

中国及世界风资源变化研究进展

江 滢^{1,2,3}, 罗 勇^{1,2,3}, 赵宗慈^{1,2,3}, ZHU Jinhong⁴

1. 国家气候中心, 北京 100081
2. 中国气象局风能太阳能资源评估中心, 北京 100081
3. 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081
4. Illinois State Water Survey, Department of Natural Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, Illinois 61820, USA

摘要 20 世纪以来,随着能源需求成倍增长,风能资源因其安全、清洁、丰富的特性已成为世界上增长最快的能源方式。有关风能资源可持续利用的近地层风和风能资源变化研究也逐渐开展起来。20 世纪观测事实研究表明,① 全球高纬度地区风速呈增大趋势,而中低纬度地区风速呈减小趋势变化;② 中国近 50 年来年平均风速呈明显的减小趋势变化;③ 中国区域城市化发展、测站迁址及测风仪器的变更都对我国年平均风速的长期变化产生了一定影响,但都不是近 50 年来中国年平均风速呈显著减小趋势的主因;大气环流的变化才是造成中国年平均风速呈显著减小趋势的最可能原因。与风和风能资源预估相关的研究表明,21 世纪由于人为温室气体排放增加和全球变暖,中国年平均和冬季平均风速和风功率密度将可能减小,夏季平均风速和风功率密度的变化不确定性较大。目前,利用气候模式模拟和预估近地层风速方面的研究才刚刚开始,今后还需要做大量和长时间的研究试验,才能得到更可靠的结论。

关键词 近地层风速;风资源;气候变化

中图分类号 P467,TK82

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)13-0096-09

Review of Research on Wind Resources Changes in China and in the World

JIANG Ying^{1,2,3}, LUO Yong^{1,2,3}, ZHAO Zongci^{1,2,3}, ZHU Jinhong⁴

1. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
2. Center for Wind and Solar Energy Resources Assessment, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
3. Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China
4. Illinois State Water Survey, Department of Natural Resources, University of Illinois at Urbana-Champaign, Champaign, Illinois 61820, USA

Abstract Since the 20th century, with the rapid growth of the

world economy, the energy demand has multiplied and energy industries are in a process of massive development with respect to wind resources. The wind energy, clean, renewable, and abundant in nature, offers pollution-free electricity, as the fastest growing energy approach in the world. Studies on wind climate and the change of wind resources are widely carried out. The observations of wind speeds during the 20th century indicate that: ① the wind speed sees an increasing trend in high latitudes and a declining trend in low latitudes of both hemispheres; ② the annual mean wind speed sees an obviously declining trend over broad areas of China; ③ urbanization, the change of anemometers, or the relocation of stations in China are factors that might be responsible for the decreasing trend of mean wind speeds. The decreasing trend in China is mainly due to the changes of atmospheric circulation. Furthermore, the prediction of wind and wind energy in the 21st century shows that as a result of increasing anthropogenic emissions and global warming, the annual and winter mean wind speeds and wind power densities are likely to reduce. The changes of summer mean wind speeds and wind power densities see great uncertainties. At present, the studies on the prediction of surface wind speed by

收稿日期: 2009-05-15

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY 200806009);发展和改革委员会、财政部、中国气象局风能详查和评价工作项目;欧盟-中国能源和环境项目(Europe Aid/123310/D/SER/CN)

作者简介: 江滢,高级工程师,研究方向为风能资源变化、风能资源评估,气候变化监测等;电子信箱:Jiangy@cma.gov.cn

the climate models and simulations have just started, and much work has to be done before some relatively reliable conclusions might be reached.

Keywords surface wind speed; wind energy; climate change

0 引言

20 世纪以来,世界经济迅猛发展,能源需求成倍增长。随着煤炭、石油等常规能源的储量不足、其价格的居高不下和大幅波动,逐渐危及到国家能源安全;而且其使用带来诸多环境问题,对人类社会的可持续发展产生了巨大的威胁。《京都议定书》的生效,可再生能源发展得到世界许多国家的广

泛关注,成为国际能源领域的热点。

作为可再生能源之一的风能资源由于其安全、清洁、丰富的特性在全世界得到广泛应用和快速发展。截止 2008 年底,全球风电机组总装机容量达 120 GW,年平均增长率达 28.7%,已经成为世界上增长最快的能源方式(表 1,数据引自网站 www.gwec.net)。目前,美国、德国、西班牙和中国总装机容量居世界前列,美国、中国、印度和德国 2008 年的新装机容量分居世界前 4 位(图 1^[1])。值得注意的是,2008 年中国新装机容量年增长率高达 106.6%,美国为 49.6%。

中国的风能储量大、分布面广(图 2),近年来发展迅速。截至 2008 年底,全国风电装机容量已达到 12.2 GW,列世界第 4 位,2008 年中国新增装机容量 6.3 GW,居世界第 2 位

表 1 1997–2008 年全球和中国风电装机容量演变表(单位:GW)
Table 1 Tread of the installed capacity of wind power (unit: GW)

年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
全球	总装机容量	7.6	10.2	13.6	17.4	23.9	31.1	39.4	47.6	59.1	74.2	93.9
	新装机容量	1.5	2.5	3.4	3.8	6.5	7.3	8.1	8.2	11.5	15.2	19.9
中国	总装机容量	0.17	0.22	0.27	0.34	0.40	0.47	0.67	0.76	1.26	2.60	5.90
	新装机容量	0.11	0.06	0.04	0.08	0.06	0.07	0.19	0.20	0.50	1.34	3.30

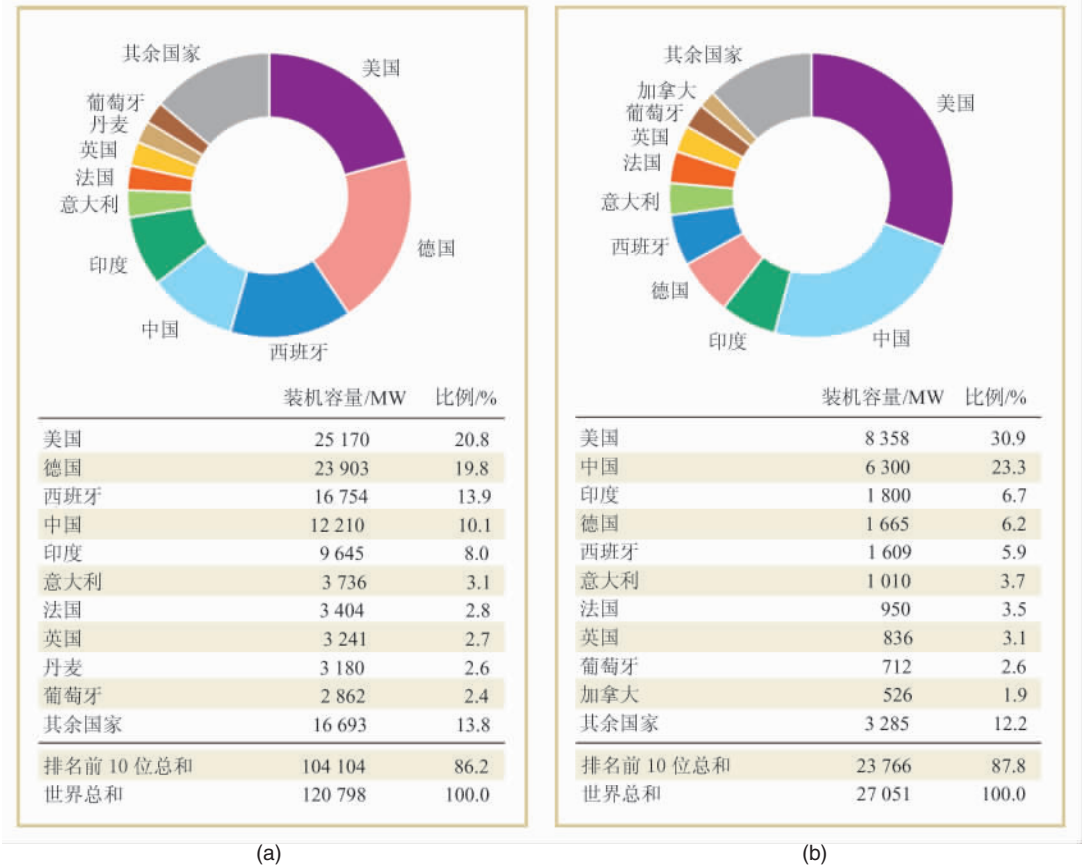
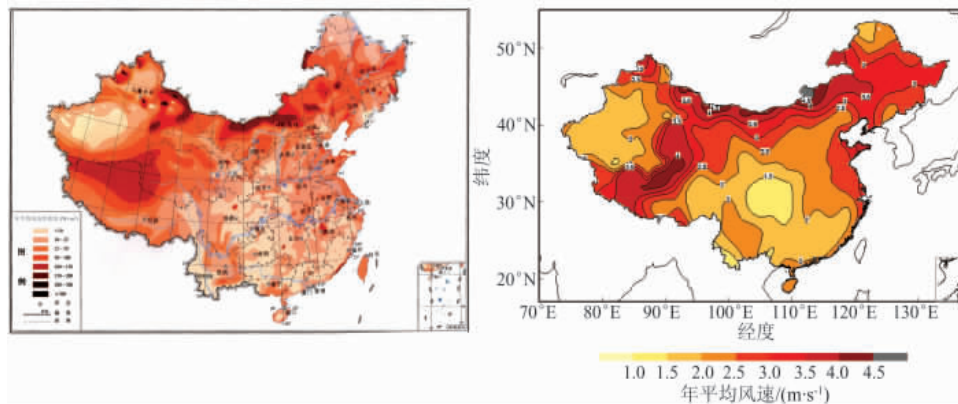


图 1 全球总装机容量(a)和 2008 年新装机容量(b)排名前 10 位的国家装机容量分配示意
Fig. 1 Top 10 of total (a) and new (b) installed capacity in the world

(a) 年平均风功率密度 (引自文献[3]), 单位: W/m^2 (a) Annual mean wind power density
(from Ref. [3]), unit: W/m^2

(b) 年平均风速 (本文计算结果)

(b) Observed wind speed (calculated by this
paper), unit: W/m^2

图2 中国近地层(离地 10 m)年平均风功率密度和观测的年平均风速分布图(1971–2000 年)

Fig. 2 Distribution of annual mean wind power density and observed wind speed from 1971 to 2000

(www.gwec.net)(表 1、图 1)。根据 2007 年制定的中国可再生能源中长期发展规划, 到 2020 年中国风电装机容量目标为 30 GW。预计在 2030 或 2040 年前后, 中国的风力发电装机容量可望超过 100 GW, 成为继火电和水电之后的第 3 大发电能源^[2]。

但是由于近百年来全球和中国的气候已经发生了显著的变化。近 100 年(1906–2005 年)全球年平均地表气温增加 0.74°C ($0.56\sim 0.92^\circ\text{C}$), 中国年平均气温比全球平均气温还要略高。而且在考虑人类活动各种情景, 气候模式预估未来 50~100 年的气候变化仍将会继续向着变暖的趋势发展^[4-5](图 3)。

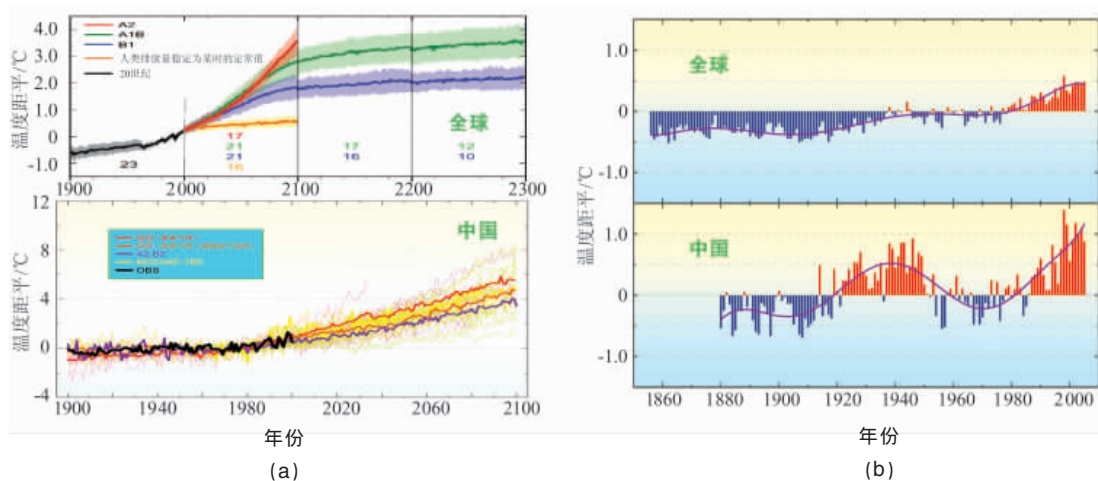


图3 不同的气候模式和人类排放情景设计对 20 和 21 世纪全球(1900–2300 年)和中国(1900–2100 年)气温变化的模拟和预估 ((a), 引自文摘[4, 5])和观测的全球和中国(1880–2005 年)年平均地表气温的距平变化 ((b), 引自文摘[5])

Fig. 3 Simulations and predictions of temperature change by different climate models and human emissions scenarios ((a), from Ref. [4, 5]) and the anomaly of annual mean surface temperature ((b), from Ref. [5])

因此,在风能资源的开发利用中一定要充分考虑气候变化的背景。在全球及中国显著增暖的背景下,近地层风和风能资源发生了怎样的变化,未来风和风能资源将怎样变化等问题都是国家合理制定风电发展规划、电网规划、风电上网价格等必须考虑的问题。由于风功率密度 $W = \frac{1}{2} \rho v^3$ ^[6], 文献中将风和风能变化相关研究结合起来讨论。本文重点综述风速和风功率密度变化研究,综合国内外多种研究成果,阐述了对 20 世纪全球和中国风速变化的检测评估,以及对 21 世纪全球和中国风速变化预估的研究进展。

1 风和风资源变化观测事实研究

关于近地层风或风资源变化观测事实的研究可以简单地分为两类,一类是关于海浪或近海面风速变化观测事实的研究;另一类是陆地上近地层风速变化观测事实的研究。

关于近海面风速变化观测事实的研究相对较多,总体上来说,在 20 世纪后半叶,全球平均近海面风速没有明显的变化趋势^[7](研究时段:1949–1988 年),热带北大西洋^[8-9](研究时段:1964–1993 年和 1950–2002 年)和北太平洋高纬地区风速呈增加趋势^[9-10](研究时段:1950–2002 年和 1949–1992 年),

而赤道、南大西洋热带和北太平洋亚热带风速呈减小趋势变化^[7](研究时段:1949–1988年)。

关于陆地上近地层风速变化观测事实的研究相对较少。欧洲地区,Pirazzoli等^[11]利用意大利沿海器测风速资料研究表明,意大利近地层风速在1951–1970年中期呈减小趋势,之后呈增加趋势;Z. Yan等^[12]认为1958–1998年期间欧洲西北部大风出现频率呈减小趋势变化,且广义线性模型(CLMs)对其具有一定的模拟能力;荷兰于1962–2002年期间研究发现中等风暴事件频率减小^[13]。Klink^[14]、Hobbins^[15]、Tuller^[16]、Pryor

等^[17]研究表明,20世纪后期北美地区风速也呈减小趋势变化。而在南半球的澳大利亚中纬度地区近地层陆地器测风速表现为减小趋势^[18]。高纬度($>65^{\circ}$)地区在南极附近^[19–20]和阿拉斯加^[21]风速呈增大趋势变化。

Cristina等^[22]利用离地10 m测风数据和探空数据推算了当前风机轮毂高度(80 m)的风速分布(图4^[22]),一般来说,高纬度和沿海地区风速大,中低纬度和内陆风速小。到目前为止未见全球近地层器测风速变化方面的研究,但通过各国专家对局地器测风速变化的相关研究(图3中的示意部分)可

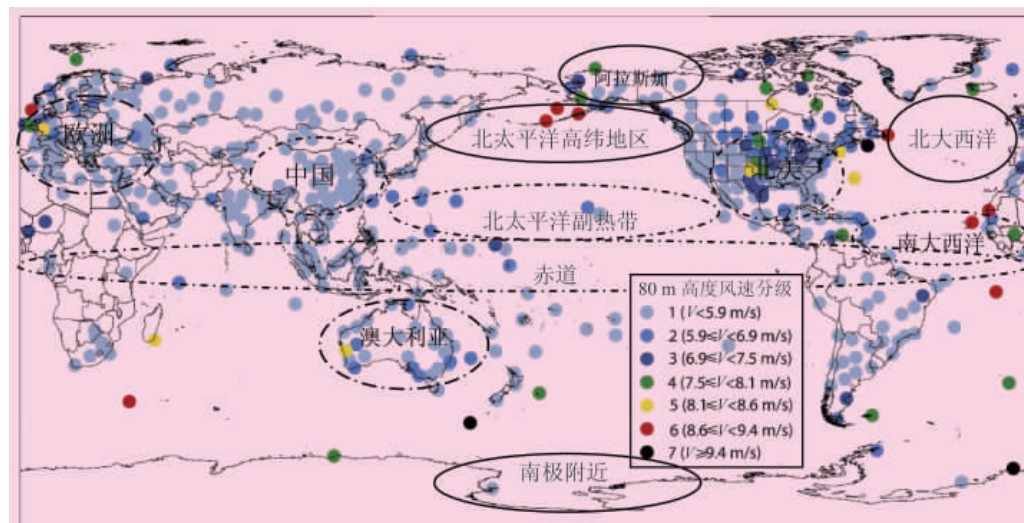


图4 利用近地层和探空器测风速推算的2000年全球80 m高度风速分布图

Fig. 4 Map of wind speed extrapolated to 80 m and averaged over all days of the year 2000 at sounding locations with 20 or more valid readings from the year in 2000

注:虚线圈浅蓝色区域示意风速减小区域,实线圈浅粉色区域示意风速增加区域,均为本文所标示出的
风速增加或减少区域示意

Notes: The light blue regions indicated where the wind speed is decreasing and pink regions indicated where the wind speed is increasing. Both of them are plotted by the author according to the references

以大体归纳为近几十年来,高纬度地区风速表现为增加趋势,而中低纬度地区风速呈减小趋势变化。

风速的变化比较复杂,不仅受到大尺度大气环流变化的影响,还受到局地地形和中、小尺度大气环境变化的影响。因此,尽管在某一区域风速整体上存在减小或增大趋势,但在该区域内风速的变化仍有可能存在不同变化特征。下面以澳大利亚和中国的研究作为两个具体实例。

Tim. R. McVicar等^[18]通过详细研究澳大利亚1975–2006年风速变化特征(图5)时发现,澳大利亚多年年平均风速较大的地区刚好位于澳大利亚干旱地区,风速较小的地区刚好位于湿润地区(图5(a)^[18]);1975–2006年除了澳大利亚中部、东南昆士兰州和新南威尔士州东北部、南部维多利亚州和塔斯马尼亚州平均风速呈增加趋势外,澳大利亚大部地区(88.6%)风速呈减小趋势,其中57.5%减小趋势通过显著性检验(图5(b)^[18])。Tim. R. McVicar等^[18]还指出澳大利亚局地平均风速呈增大趋势的主要原因是由该地区降水及与降水相

关的潜热通量和感热通量发生变化所造成的。

中国国土范围广、南北跨度大,是世界上南北跨度最大的国家($3^{\circ}58'N\sim53^{\circ}30'N$)。随着中国风电产业的发展,气候变暖背景下风能资源的可持续利用问题倍受关注,中国风气候、风能蕴藏量变化的研究也逐步发展起来。

近年来,一些研究利用近50年中国观测资料计算分析,多数研究一致表明中国风速有下降趋势(表2和图6^[23]黑实圈线),但对中国风速下降原因的研究很少。例如,任国玉等^[24]采用国家基准气候站和基本气象站的地面资料,通过分析认为,近47年来全国年平均风速经历了明显的减弱趋势,减小速率大于每10年0.1 m/s。Xu Ming^[25]利用挑选出来的305个国家基准气候站和基本气象站的地面资料,分析了1969–2000年全国风速变化,认为中国年平均风速稳定下降了28%,日平均风速大于5 m/s的日数下降了58%。王遵娅等^[26]认为中国平均风速存在的逐年减弱的变化趋势。并且还指出,中国高原区和西南区风速变化的波动性大,风速减小

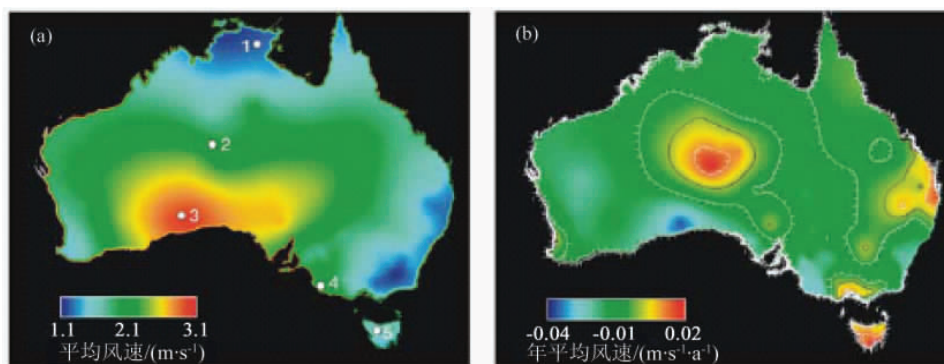


图5 澳大利亚近地层风速(2 m)多年平均风速分布(a)和变化趋势分布(b)(1975-2006年)

Fig. 5 Climatology and trends for wind speed during 1975–2006, (a) shows the annual climatology, and (b) shows the annual trend

表 2 近 10 年关于中国近地层风速变化研究统计表

Table 2 Studies on wind speed changes in China during the past 10 years

作 者	研究区域	气象站类别 (站数)	时段	主要结论
任国玉等 ^[24]	中国	国家基本和基准站 (323)	1951–2002	年平均风速呈显著下降趋势 (每 10 年 0.1 m/s)
王毅荣等 ^[28]	河西走廊	国家基本和基准站 (19)	1971–2004	环境风没有明显减小趋势
王遵娅等 ^[26]	中国	国家基本和基准站 (686)	1954–2000	几乎全部地区的年平均风速都显著减小
Xu Ming 等 ^[25]	中国	国家基本和基准站 (305)	1969–2000	年平均风速逐步减小 28%
李振朝等 ^[30]	河西绿州	国家基本和基准站 (13)	1951–2000	70 年代达到峰值, 然后逐渐减少
刘晋秀等 ^[31]	黄河三角洲	利津站 (1)	1962–2000	40 年来年平均风速减小约 1.5 m/s
Chen Shenbin 等 ^[27]	西藏	国家基本和基准站 (101)	1961–2000	风速减小
李艳等 ^[32]	中国	国家基本和基准站 (186)	1960–1999	风速和风能密度显著减弱可能与冬夏季风有关
李艳等 ^[33]	中国	国家基本和基准站 (604)	1960–1999	平均风速和风能密度逐年减低现象; 主要由下垫面人为改变的影响导致的
江滢等 ^[23]	中国	国家基本、基准和一般站 (535)	1956–2004	全年大风减小, 小风增大, 年和各季平均风速减小; 大气环流变化是平均风速减小的主要原因

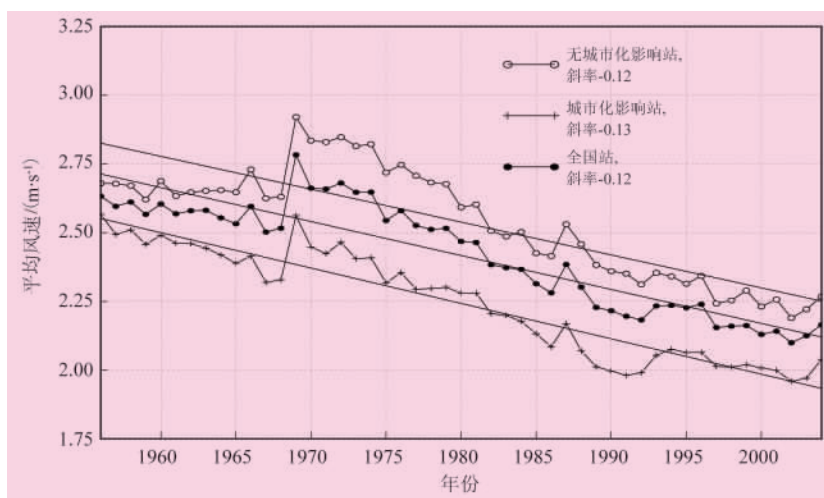


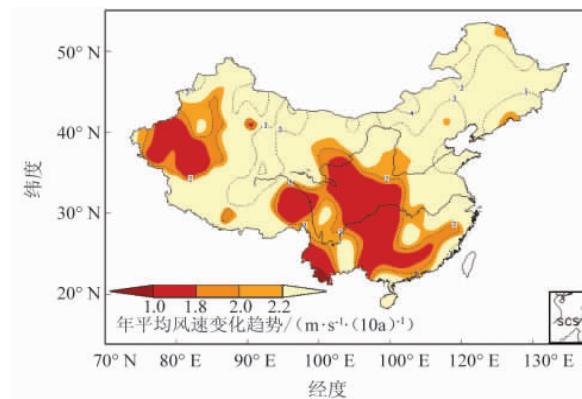
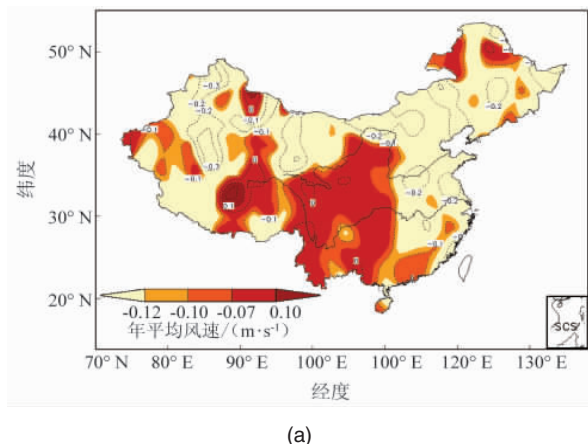
图 6 中国全国站、城市化影响台站和无城市化影响站年平均风速变化曲线(1956-2004 年)

Fig. 6 Trerels of mean wind speeds for urban stations (curve with +), rural stations (curve with o) and all stations (curve with ·) in China from 1956 to 2004

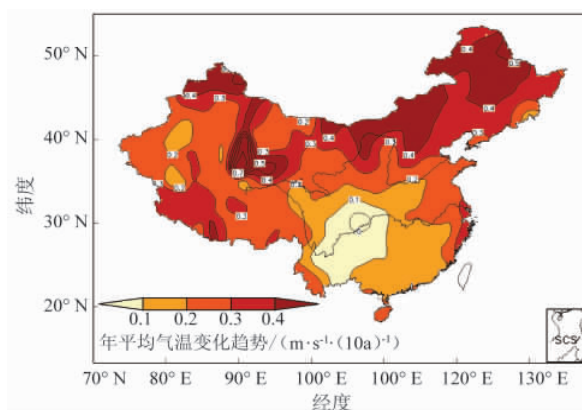
趋势较其他区不明显。但是,Chen Shenbin 等^[27]认为西藏地区风速呈较明显的减小趋势(每 10 年 -0.13 m/s , 1961–2000 年)。此外,王毅荣等^[28]通过对比分析河西走廊高山气象站和绿洲气象站测风资料,认为河西走廊地区的环境风速比较稳定,没有明显的减小趋势,风速受绿洲和城市化影响十分明显。还有个别研究分析了近 50 年中国风向的变化,注意到冬季北风和西北风频率呈减小的趋势^[29]。

这些研究都明确指出中国年平均风速存在明显的减小趋势。但是,对气象台站所在城市的城市化发展是否是造成中国平均风速明显减小趋势的主要原因这一问题存在明显的分歧;中国风速长期变化区域特征及其可能原因方面的观点也存在不一致性^[25–26]。江滢等^[23]就这些问题进行了深入研究,指出,近 50 年来除西藏高原及其东部和东南部地区年平均风速不存在显著线性变化趋势外,中国大部地区年平均风速呈明显的减小趋势(图 7(a), (b)^[23,34]),冬季是中国平均风速减小最显著的季节;全国平均年大风日数、最大风速也呈明显的减小趋势。从全国平均来看,出现较大风速的日数减少了、而出现较小风速的日数增加了、静风日减小了,中国大部地区年平均风速的减小趋势主要是出现较大风速日数减少造成的;城市化发展、测站迁址及测风仪器的变更都对全国年平均风速的长期变化产生一定影响,但都不是近 50 年来中国年平均风速呈显著减小趋势的主要原因(图 6 中有和无城市化影响站曲线);大气环流的变化才是造成中国年平均风速呈显著减小趋势的最可能原因,即在全球和亚洲变暖的背景下,西伯利亚高压减弱,海陆温差和气压差减小,亚洲纬向环流加强、经向环流指数减弱,亚洲冬季风和夏季风减弱导致中国平均风速减小。中国寒潮次数减少、温带气旋减少、强气旋减弱以及沙尘暴次数减少也是中国大范围风速减小的体现和佐证。此外,还需要指出的是,中国变暖最明显的北方地区,相应年平均风速和大风日数减小最明显,而变暖较小的西南地区,相应年平均风速减小不明显(图 7(b)、(c)^[23,34])。人类活动在全球变暖以及上述事实中的作用,有待进一步研究证实。

目前关于中国区域风能近 50 年的变化方面的研究还很少。李艳等^[32]指出 1960–2000 年中国各季和全年的年风能密



(b)



(c)

图 7 中国区域年平均风速(a)、年平均风速变化趋势(b)和年平均温度变化线性趋势分布图(c)(1956–2004 年)

Fig. 7 Distributions of the linear trend of annual mean wind speed (a) and the averaged annual mean wind speed (b) and the linear trend of annual mean temperature (c) from 1956 to 2004

度呈显著减弱趋势变化;风能资源丰富地区变化幅度大,风能资源贫乏地区变化幅度小。风能资源的分布特点和变化趋势与影响中国的冬、夏季风系统的气候变化关系密切。此外,李艳等^[33]还指出由于下垫面人为改变的影响,导致了我国近地层风能密度以减弱的变化趋势为主。

2 未来风和风能变化预估研究

自 1990 年以来气候模式研究快速发展,尤其是在利用气候模式模拟 20 世纪温度变化及其预估 21 世纪人类活动对温度和降水变化的影响等方面取得了丰硕成果^[4,35–45]。然而,利用气候模式模拟检验近地层风速或风能资源的研究和预估未来风或风能变化方面的研究还很少。

关于风和风能变化预估方面的仅有研究中,多数研究集中在欧洲地区,个别研究南美等地区。S. C. Pryor 等^[46]利用区域气候模式预估 A2 和 B2 情景下 21 世纪后期(2071–2100 年)北欧近地层风速和风功率密度小幅增加,且冬季风能资



人类排放增加的 3 种情景, 均预估 21 世纪后期中国区域年和冬季风功率密度比 20 世纪小; 对于夏半年(7 月和 10 月平均), 全球气候模式预估结论与区域气候模式预估结论不一致。也就是说, 21 世纪后期中国区域年平均和冬半年平均(1 月和 4 月平均)风功率密度比 20 世纪小的可能性比较大, 而 21 世纪后期夏半年平均(7 月和 10 月平均)风功率密度将如何变化, 不确定性较大, 还有待于进一步研究。

3 结论和展望

本文回顾了近年来国内外关于过去和未来近地层风速变化方面的研究, 总结出以下结论。

1) 20 世纪观测事实研究指出, 近几十年来, 全球高纬度地区风速呈增加趋势, 而中低纬度地区风速呈减小趋势变化。

2) 近 50 年来中国年平均风速、大风日数、最大风速均呈明显的减小趋势变化。冬季是中国平均风速减小最显著的时节。从全国平均来看, 出现较大风速的日数减少了、而出现较小风速的日数增加了、静风日减小了, 中国大部地区年平均风速的减小趋势主要是由出现较大风速日数减少造成的;

3) 城市化发展、测站迁址及测风仪器的变更都对中国人年平均风速的长期变化产生一定影响, 但都不是近 50 年来中国人年平均风速呈显著减小趋势的主要原因; 大气环流的变化才是造成中国人年平均风速呈显著减小趋势的最可能原因。在全球和亚洲变暖的背景下, 西伯利亚高压减弱, 海陆温差和气压差减小, 亚洲纬向环流加强、经向环流指数减弱, 亚洲冬季风和夏季风减弱导致中国平均风速减小。

4) 到目前为止, 利用气候模式模拟检验近地层风速或风能资源的研究较少。仅有的研究表明, 全球和区域气候模式都能较好地模拟出中国多年(或季)平均风速分布状况, 但都不能模拟出观测到的近 50 年中国(或季)平均风速明显减小的变化趋势。相比之下, 区域气候模式比全球气候模式能较好地模拟中国区域近地层风速分布和变化特征。

5) 全球和区域气候模式预估 21 世纪中后期中国大部分地区年和冬季平均风速和风功率密度将可能略减小, 夏季平均的变化不确定性较大, 还有待于进一步研究。

值得注意的是, 一方面, 目前不同来源的观测到的全球和中国的近地层风速资料还需要进一步经过严格的订正, 以求得到更为一致的观测数据; 另一方面, 由于当前科学水平的限制, 无论是全球气候模式还是区域气候模式, 对未来气候变化的预估都存在着相当大的不确定性。尤其气候模式模拟风速变化方面的可靠性不高; 在风功率密度的预估方面, 才刚刚开始, 今后还需要做大量和长时间的研究试验, 才能得到更可靠的结果。此外, 21 世纪的预估只考虑人为温室气体排放增加的影响, 没有考虑气候的自然变化, 未来的研究将应该同时考虑人类和自然的气候变化。

参考文献 (References)

[1] Global Wind Energy Council. Global wind 2008 report [R]. 2008, <http://www.gwec.net>.

- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 可再生能源中长期发展规划[J]. 可再生能源, 2007, 25(5): 32.
National Development and Reform Commission. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(5): 32.
- [3] 中国气象局. 中国风能资源评价报告[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 56.
China Meteorological Administration. *China's wind energy resource assessment report*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 56.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The physical science basis[R]. Solomon D Q S, Manning M, *et al.*, ed. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. Cambridge, United: Cambridge University, 2007: 996.
- [5] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告 [R]. 北京: 科学出版社, 2007: 422.
Committee of China's National Assessment Report on Climate Change. *China's national assessment report on climate change* [C]. Beijing: Science Press, 2007: 422.
- [6] 朱瑞兆. 中国太阳能风能资源及其利用 [M]. 北京: 气象出版社, 1988: 217.
Zhu Ruizhao. *China's solar and wind energy resources and their use*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1988: 217.
- [7] Ward M N, Hoskins B. Near surface wind over the global ocean 1949–1988[J]. *J Climate*, 1996, 9: 1877–1895.
- [8] Gulev S K, Hasse L. Changes of wind waves in the north Atlantic over the last 30 years[J]. *Int J Climatol*, 1999, 19: 1091–1117.
- [9] Gulev S K, Zolina O, Grigotieva S. Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data[J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L24302, doi: 10.1029/2004GL021040.
- [10] Gower J F, R. Temperature, wind and wave climatologies, and trends from marine meteorological buoys: The northeast pacific [J]. *J Climate*, 2002, 15: 3709–3718.
- [11] Pirazzoli P A, Tomasin A. Recent near-surface wind changes in the central Mediterranean and Adriatic areas [J]. *Int J Climatol*, 2003, 23: 963–973.
- [12] Yan Z, Bate S, Chandler, R E, *et al.* Changes in extreme wind speeds in NW Europe simulated by generalized linear models [J]. *Theo Appl Climatol*, 2006, 83: 121–137, doi: 10.1007/s00704-005-0156-x.
- [13] Smits A, Klein Tank A M G, Ko'mnen G P. Trends in storminess over the Netherlands, 1962–2002[J]. *Int J Climatol*, 2005, 25: 1331–1344.
- [14] Klink K. Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United States, 1961 to 1990 [J]. *Clim Res*, 1999, 13: 193–205.
- [15] Hobbins M T. Regional evapotranspiration and pan evaporation: Complementary interactions and long-term trends across the conterminous United States [R]. ANUSPLIN Version 4.3 User Guide, Cent for Resour and Environ Stud, Canberra, ACT: Aust Natl Univ, 2004.
- [16] Tuller S E. Measured wind speed trends on the west coast of Canada[J]. *Int J Climatol*, 2004, 24: 1359–1374.
- [17] Pryor S C, Barthelmie R J, Riley E S. Historical evolution of wind climates in the USA [J]. *J Phys Conf Ser*, 2007, 75: 012065, doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012065.
- [18] McVicar T R, van Niel T G, *et al.* Wind speed climatology and trends for Australia, 1975–2006 [J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L20403, doi: 10.1029/2008GL035627.
- [19] Aristidi E, *et al.* An analysis of temperatures and wind speeds above Dome C, Antarctica[J]. *Astron Astrophys*, 2005, 430: 739–746.
- [20] Turner J, Colwell S R, Marshall G J, *et al.* Antarctic climate change during the last 50 years[J]. *Int J Climatol*, 2005, 25: 279–294.
- [21] Lynch A H, Curry J A, Brunner R D, *et al.* Toward an integrated assessment of the impacts of extreme wind events on Barrow, Alaska[J].



- Bull Am Meteorol Soc*, 2004, 85: 209–221.
- [22] Cristina L A, Jacobson M Z. Evaluation of global wind power[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: D12110, doi: 10.1029/2004JD005462.
- [23] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, doi: 10.1007/S00704–009–0152–7.
- [24] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942–956.
Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942–956.
- [25] Xu Ming, Chang Chihpei, Fu Congbin, et al. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111:1–8, doi: 10.1029/2006JD007337.
- [26] 王遵亲, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228–236.
Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228–236.
- [27] Chen Shenbin, Yunfeng L, Thomas A. Climatic change on the Tibetan Plateau: Potential evapotranspiration trends from 1961–2000 [J]. *Clim Change*, 2006, 76: 291–319.
- [28] 王毅荣, 林纾, 李青春, 等. 河西走廊风能变化及储量 [J]. 气象科技, 2007, 35(4): 558–562.
Wang Yirong, Lin Shu, Li Qingchun, et al. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(4): 558–562.
- [29] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 近 50 年我国风向变化特征 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 666–672.
Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 666–672.
- [30] 李振朝, 韦志刚, 高荣. 近 50 年河西绿洲地面风的时空变化特征[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 259–263.
Li Zhenchao, Wei Zhigang, Gao Rong. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 259–263.
- [31] 刘晋秀, 江崇波, 范学伟. 黄河三角洲近 40 年来气候变化趋势及异常特征[J]. 海洋预报, 2002, 19(2): 31–35
Liu Jinxiu, Jiang Chongbo, Fan Weiye. *Marine Forecasts*, 2002, 19(2): 31–35.
- [32] 李艳, 王元, 汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征 [J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 61–72.
Li Yan, Wang Yuan, Tang Jianping. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2007, 43(3): 61–72.
- [33] 李艳, 王元, 储惠芸, 等. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(21): 2646–2653.
Li Yan, Wang Yuan, Chu Huiyun, et al. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(21): 2646–2653.
- [34] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 20 个全球气候模式和 3 个区域气候模式对未来中国风能变化预估[J]. 资源科学, 2009, 待刊.
Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. *Acta Natural Resources Sinica*, 2009, in press.
- [35] Wang B, Kang I S, Lee J Y. Ensemble simulation of Asian Australian monsoon variability by GCMs[J]. *J Climate*, 2004, 17: 803–818.
- [36] 任国玉, 徐影. 气候变化的观测事实与未来趋势 [J]. 科技导报, 2004, 22(7): 15–16.
Ren Guoyu, Xu Ying. *Science and Technology Review*, 2004, 22(7): 15–16.
- [37] Luo Y, Zhao Z C, Xu Y, et al. Projections of climate change over China for the 21st century[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 19(4): 401–406.
- [38] 孙颖. 用于 IPCC 第四次评估报告的气候模式比较研究介绍[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(4): 161–163.
Sun Ying. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(4): 161–163.
- [39] Phillips T J, Gleckler P J. Evaluation of continental precipitation in 20th century climate simulations: The utility of multi-models statistics [J]. *Water Resour Res*, 2006, 42, W03202, doi: 10.1029/2005WR004313.
- [40] Sun Y, Solomon S, Dai A, et al. How often does it rain?[J]. *J Climate*, 2006, 19: 916–934.
- [41] Cook K H, Vizy E K. Coupled model simulations of the West African monsoon system: 20 th century simulations and the 21st century predictions[J]. *J Climate*, 2006, 19: 3681–3703.
- [42] Zhou T, Yu R. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models[J]. *J Climate*, 2006, 19(22): 5843–5858.
- [43] 张莉, 丁一汇, 孙颖. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. 大气科学, 2008, 32(2): 261–270.
Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(2): 261–270.
- [44] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 全球和中国降水、旱涝变化的检测评估[J]. 科技导报, 2008, 26(6): 28–33.
Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying, et al. *Science and Technology Review*, 2008, 22(7): 28–33.
- [45] 汤剑平, 陈星, 赵鸣, 等. IPCC A2 情景下中国区域气候变化的数值模拟[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 13–25.
Tang Jianping, Chen Xing, Zhao Ming, et al. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(1): 13–25.
- [46] Pryor S C, Barthelmie R J, Kjellstrom E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: Analyses using a regional climate model[J]. *Clim Dyn*, 2005, 25: 815–835.
- [47] Rockel, B, Woth K. Future changes in near surface wind speed extremes over Europe from an ensemble of RCM simulations [J]. *Clim Change*, 2007, doi: 10.1007/s10584–006–9227–y.
- [48] Pryor S C, School J T, Barthelmie R J. Potential climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: Results from empirical downscaling of multiple AOGCMs [J]. *Clim Res*, 2005, 29: 183–198.
- [49] Bloom A, Kortroni V, Lagouvardos K. Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS [J]. *Nat Hazards Earth Sys Sci*, 2008, 8: 1247–1257.
- [50] Garreaud R D, Falvey M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios [J]. *Int J Climatol*, 2008, doi: 10.1002/joc.1716.
- [51] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 近 50 年中国风速变化多气候模式模拟检验[J]. 气象学报, 2009, 待刊.
Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, in press.
- [52] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C. Projection of wind speed changes in China in 21st century by three regional climate models[J]. *Chinese Geographical Sciences*, 2009, in press.
- [53] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 全球气候模式对未来中国风速变化预估 [J]. 大气科学, 2009, 待刊.
Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, in press.
- [54] 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 中国风和风能变化研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学大气科学学院, 2009.
Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. Research on the changes of wind and wind energy [D]. Nanjing: College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, 2009.

(责任编辑 朱宇)