

孟丹,陈正洪,陈城,等,2019. 基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]. 气象,45(12):1756-1761. Meng D, Chen Z H, Chen C, et al, 2019. Research on wind changes at different heights in atmospheric boundary layer based on sounding wind data[J]. Meteor Mon, 45(12):1756-1761(in Chinese).

基于探空风资料的大气边界层不同 高度风速变化研究^{*}

孟 丹¹ 陈正洪¹ 陈 城² 孙朋杰¹ 阳 威¹

¹ 湖北省气象服务中心, 武汉 430205

² 湖北省信息技术与保障中心, 武汉 430074

提 要: 利用 1981—2014 年我国资料齐全的 93 个高空气象观测站(距离雷达 300、600、900 m 高度)的探空风资料,按照气象地理区划,借助 GIS 分析了边界层内不同高度风速及其趋势的时空变化,得到以下结论:300~900 m,东北和华北地区累年平均风速较大,西南和西北地区累年平均风速较小;边界层内各高度同一地区平均风速的月变化趋势基本一致,但各地区季节风速变化不同,同一地区月平均风速的年较差随高度上升而增大;300 m,各地区年平均风速均显著减小;在 600 和 900 m,华北、西北、华中地区年平均风速呈增加趋势,东北地区年平均风速呈减小趋势,但均未通过显著性水平检验;各高度年平均风速空间分布均为东北地区较大,尤其大兴安岭和东北平原地带;从沿海到内陆,由东至西风速逐渐减小;在 300 m,全国年平均风速以减小趋势为主;在 600 m,全国大部分地区年平均风速呈增加趋势,尤其是中部、西北和华东沿海地区;在 900 m 高度,全国年平均风速变化趋势呈现由边界向内部的包围态势,中心地区呈增加趋势,边界地区均呈减小趋势,但是通过显著性水平检验的地区不多。

关键词: 探空风,边界层,平均风速,显著性,变化趋势

中图分类号: P425

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 12. 013

Research on Wind Changes at Different Heights in Atmospheric Boundary Layer Based on Sounding Wind Data

MENG Dan¹ CHEN Zhenghong¹ CHEN Cheng² SUN Pengjie¹ YANG Wei¹

¹ Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430205

² Hubei Information Technology and Security Center, Wuhan 430074

Abstract: Based on the data of air sounding winds from 93 high-altitude meteorological stations (300 m, 600 m and 900 m above the radar) in China from 1981 to 2014, the spatio-temporal variations of wind speed and its trends at different heights in the boundary layer were analyzed using GIS. The following conclusions were obtained. At the height of 300—900 m, the average wind speed over the years in Northeast and North China is larger, while the mean annual wind speed in Southwest and Northwest China is small relatively. The monthly variation trends of average wind speeds at different heights over the same area in the boundary layer are basically the same, but the seasonal wind speed variations in different regions are different. The annual range of monthly average wind speed in the same region increases with altitude. The annual average wind speed at 300 m altitude decreases significantly. At 600 m and 900 m heights, the

^{*} 中国气象局气候变化专项(CCSF201510)资助

2018 年 5 月 16 日收稿; 2019 年 10 月 31 日收修定稿

第一作者:孟丹,主要从事应用气象及新能源气象服务等研究. Email: mdan11@126.com

通信作者:陈正洪,主要从事新能源气象服务和气候变化等研究. Email: chenzh64@126.com

average annual wind speeds in North China, Northwest China and Central China show an upward trend while the average annual wind speed in Northeast China shows a decreasing trend, but none of them have passed the significance level tests. The spatial distribution of average annual wind speed at all altitudes is relatively large in Northeast China, especially in the Greater Khingan Mountains and the Northeast Plain. The wind speed from east to west gradually decreases from the coast to the inland. At 300 m height, the annual average wind speed across China shows mainly a decreasing trend. At 600 m height, annual average wind speed in most parts of China shows an increasing trend, especially in Central China, Northwest China and the eastern coastal areas. At 900 m height, the change in annual average wind speed nationwide shows an encircling trend from the boundary to the interior, with the central area showing an increasing trend and the border areas a downward trend. However, not many areas have passed the significance level tests.

Key words: sounding wind, boundary layer, average wind speed, significance, variation trend

引 言

IPCC 第五次评估报告明确指出,人类对气候系统的影响是明确的,过去的 130 年全球升温 0.85°C 。大量的观测、模拟数据和研究分析多是围绕着全球气候变暖及其次生影响这一重点展开,对于风的研究还不够深入。

随着新能源的发展和重视,风电开发如火如荼,涌现出很多关于风资源变化和评估的研究。对于地面风的研究包括:Guo et al(2011)利用 1969—2005 年全国 652 个台站的数据进行了分析,结果表明大部分台站的年平均和季节性平均风都有明显减弱;李艳等(2011)利用全球气候耦合模式的试验和预测结果,预测我国区域年平均风速在 21 世纪前半叶存在减弱趋势,后半叶以增强趋势为主;郑祚芳等(2014)应用北京 20 个气象站观测风场资料,分析出自然气候变化和下垫面人为改变造成了风能资源的减少;方艳莹等(2012)运用中尺度数值模式 WRF 与 CFD 软件相结合的方法对广东省海陵岛地区的风能资源做数值模拟分析,并采用测风塔数据进行误差检验,验证了方法实际应用的可行性;谢今范等(2014)利用东北地区气象站和测风塔观测资料,结合中尺度模式,模拟分析了观测站点稀少地区的风能资源;等等。多数研究表明地面风呈减小趋势,多由大气环流变化和城市效应等原因导致,这造成了一些风电企业对于未来风电发展的困惑和担忧,衍生出一系列关于高空风的研究,探讨全球风速的真实变化,开拓新的风能资源利用领域。

近年来关于高空风的研究开始增多。如:任国

玉等(2009)研究表明 850 hPa 处,春季平均风速最大,夏季最小,年内变化不明显;张爱英等(2009)利用 1980—2006 年全国探空站资料分析得出对流层中下层(包括 850、700、500、400 hPa 等压面)年平均风速呈降低趋势,平均气候倾向率为 $-0.10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,未通过显著性水平检验;Lin et al(2013)利用全球无线电探空仪档案中国区域 149 个站点 1964—2009 年(许多站点 1974—1990 年资料缺失)的资料,分三个时间段,着重分析了 850 和 500 hPa 两个等压面风速变化,并提出了解释这些变化的观察证据;于宏敏等(2013)利用黑龙江 4 个探空站 50 年的资料研究得出地面年平均风速显著减弱,但 300、600、900 m 高度的年平均风速有不显著的增强趋势,认为这一结论与朱锦红等(2003)、Lucarini and Russell(2002)的研究结论——对流层中高纬度西风有增强趋势是一致的;孟丹等(2016)和丁乃千等(2014)对湖北省探空站 500~3000 m 海拔高度探空风资料分析得出,各地风速变化增大、减小趋势不一。

现有的探空风研究多是依据规定海拔高度和规定气压层进行的。中国的地形复杂,境内海拔高度不一,导致同一海拔高度层的资料,在某些更高海拔地区缺失参证价值或者无法观测,无法得到全国范围的风速分布;气压高度层虽没有这一劣势,但对于风电企业和政府而言,规定气压层的风不够直观明了。大气边界层是指接近地球表面、受地面摩擦阻力影响的大气层。大气边界层厚度随着气象条件、地形、地面粗糙度而变化,一般为 300~1000 m,相应的风速及其变化对风能资源评价的意义重大。因此,为了解全国大气边界层的风速变化及其分布,本

文采用距离地面雷达 300、600、900 m 高度的探空风资料进行分析研究。

1 资料来源与处理

气象资料来自国家气象信息中心,从全国(不含港澳台)高空风定时值记录中筛选出 1981—2014 年 08、20 时资料完整率高的 93 个高空气象观测站距离雷达 300、600、900 m 高度的逐日风数据。该数据集以高空测风月报表数字化资料为数据源,研制过程中实施了较为严格的质量控制,主要包括不同高度层的风速允许值范围检查和水平风场的垂直切变检查(Liao et al,2014)。基础地理信息资料为全国省(区、市)边界图。

文中的季节划分:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月至次年 2 月为冬季。将各探空站每日两时次不同高度测风资料的平均值代表不同高度的日平均风速,依次统计边界层内离地 300、600、900 m 高度的月、季、年、累年单站平均风速。参考《中国气象地理区划标准》(中国气象局预测减灾司和中国气象局国家气象中心,2006),将全国划分为七大区域(表 1)探讨各区域的风速变化。

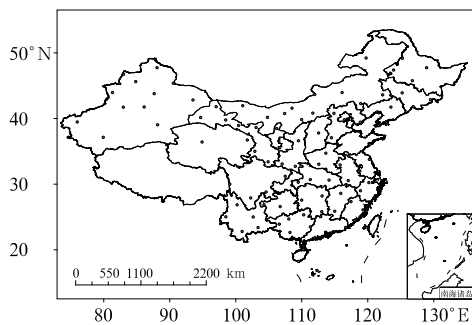


图 1 高空气象观测站位置
Fig. 1 Locations of meteorological sounding stations in China

表 1 全国气象地理区划

Table 1 The meteorological geographic division in China		
地区	省(区、市)	站点个数/个
东北地区	辽宁、吉林、黑龙江	9
华北地区	内蒙古、山西、河北、北京、天津	16
华东地区	山东、江苏、安徽、上海、浙江	8
华中地区	河南、湖北、湖南、江西	10
华南地区	广西、广东、福建、海南	13
西南地区	四川、云南、贵州、西藏、重庆	11
西北地区	宁夏、青海、陕西、甘肃、新疆	26

2 我国大气边界层不同高度风速及其趋势的时空变化特征

2.1 不同地区各高度累年风速比较

表 2 列出 1981—2014 年我国不同地区边界层 3 个高度累年平均风速值,由表可知,除了华东地区外,各地区的累年平均风速均随高度上升而增大,华东地区在 600~900 m 存在一个微弱的倒切变过程。边界层内 300 m 高度,累年平均风速最大的是华北地区,东北地区次之,西北和西南地区风速最小。在 600 和 900 m 高度,累年平均风速最大的地区均为东北地区,华北地区次之,西北地区风速最小。

表 2 我国不同地区不同高度 34 年平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 The average wind speed in 1981—2014 at different levels in different divisions (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			
地区	300 m	600 m	900 m
东北地区	6.6	7.8	8.5
华北地区	6.7	7.5	7.9
华东地区	6.4	6.9	6.8
华中地区	4.6	5.4	5.7
华南地区	5.3	6.2	6.6
西南地区	4.5	5.3	6.2
西北地区	4.5	4.9	5.3

2.2 不同地区各高度风速的年内变化

图 2a~2c 为边界层 3 个高度不同地区的平均风速月变化图。由图可知,在 300 m 高度,华北、东北地区月平均风速呈双峰型变化,春季风速最大,秋季次之,夏季风速最小,月平均风速最大值出现在 4 月,最小值出现在 8 月;华东地区风速月变化与东北地区相似,但其年较差不如东北地区显著;华南地区秋冬季风速较大,春夏季风速较小,11 月风速最大,8 月风速最小;华中地区月平均风速波动较小,最大值与最小值仅相差 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;西北地区月平均风速变化呈单峰型,最大值出现在 5 月;西南地区上半年风速较大且各月之间存在较大波动,下半年风速较小,且各月风速之间变化不大。在 600 和 900 m 高度,各地区月平均风速变化趋势相对一致,且与 300 m 高度平均风速月变化基本相似,但其各月之间风速波动更为明显,其中,东北和华北地区月平均风速变化呈明显的双峰型,春季风速最大,夏季最小,年较差变大;华东地区月平均风速变化与 300 m

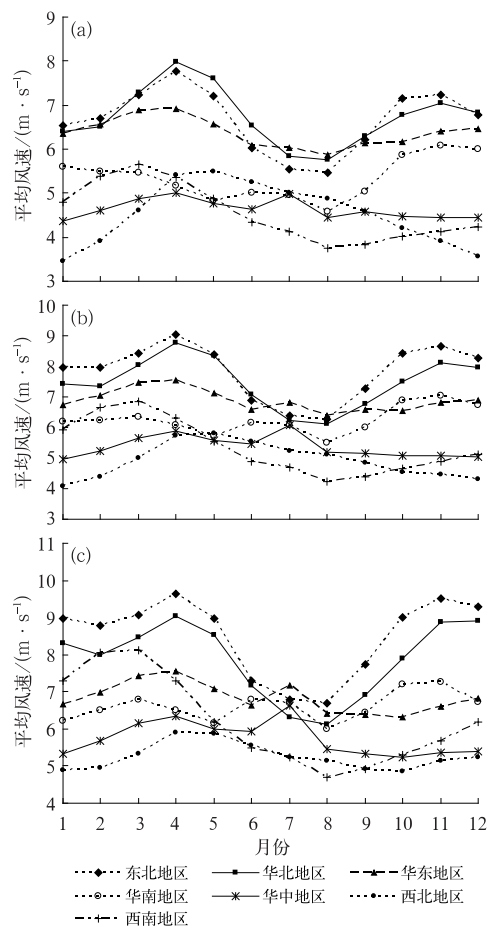


图 2 各高度不同地区平均风速月变化
(a)300 m, (b)600 m, (c)900 m

Fig. 2 Variation of the monthly average wind speeds at different levels in different divisions
(a) 300 m, (b) 600 m, (c) 900 m

相比,各段峰谷之间的差异也更大。总体来看,东北、华北、华东地区的风速高于西北、西南地区,与陈城等(2018)分析的规定海拔高度探空风的区域分析特征基本一致。

2.3 不同地区各高度风速变化趋势

按地区求出年平均风速后,以此计算各地区年平均风速的变化趋势系数。表 3 列出了不同地区边界层各高度年平均风速变化趋势及其显著性水平。由表可知,在 300 m 高度,各地区年平均风速均呈减小趋势,且通过了 0.01 显著性水平检验,其中华东地区年平均风速减小趋势最大,达到 $-0.189 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,西北地区减小趋势最小,为 $-0.058 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,空间分布特征与 Guo et al(2011)全国地面风北部减小最多,中南部减小最少的观点基本吻合。在 600 m 高度,除东北和西南地区年平均风速呈减小趋势外,其他地区年平均风速均呈增加趋势,但均未通过显著性水平检验。在 900 m 高度,华北、西北、华中地区年平均风速呈增加趋势,东北、华东、西南、华南地区风速呈减小趋势,也都未通过显著性水平检验。

2.4 各高度年平均风速的空间分布

统计 93 个高空气象观测站的资料,得出各站点年平均风速序列和年平均风速的趋势系数。借助 GIS 软件空间分析模块,绘制不同高度年平均风速和趋势系数的空间分布。

表 3 我国不同地区不同高度年平均风速变化趋势[单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]
Table 3 Variation trends of the annual average wind speeds at different levels
in different divisions [unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

高度/m	东北地区	华北地区	西北地区	华东地区	西南地区	华中地区	华南地区
300	-0.131 *	-0.101 *	-0.058 *	-0.189 *	-0.103 *	-0.140 *	-0.063 *
600	-0.042	0.019	0.017	0.003	-0.018	0.020	0.013
900	-0.038	0.011	0.009	-0.020	-0.047	0.018	-0.056

注: * 表示通过 0.01 的显著性水平检验。
Note: * means passing through 0.01 significance level of test.

图 3 展示了全国边界层内 300、600 和 900 m 高度风速的分布。300 m 高度年平均风速在 $2.0 \sim 8.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 600 m 在 $2.7 \sim 9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 900 m 则在 $3.2 \sim 9.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从年平均风速的量级上看,随着高度上升,各地风速随高度上升基本呈增加趋势。三个高度,均为东北地区风速较大,尤其是大兴

安岭和东北平原地带。其余地区平均风速基本由沿海地区向内陆、由东向西逐渐减小,在四川盆地附近风速最小,这些特征基本与对规定高度层(海拔 500、1000、1500、2000、3000 m)风(陈城等,2018)的分析结果一致。

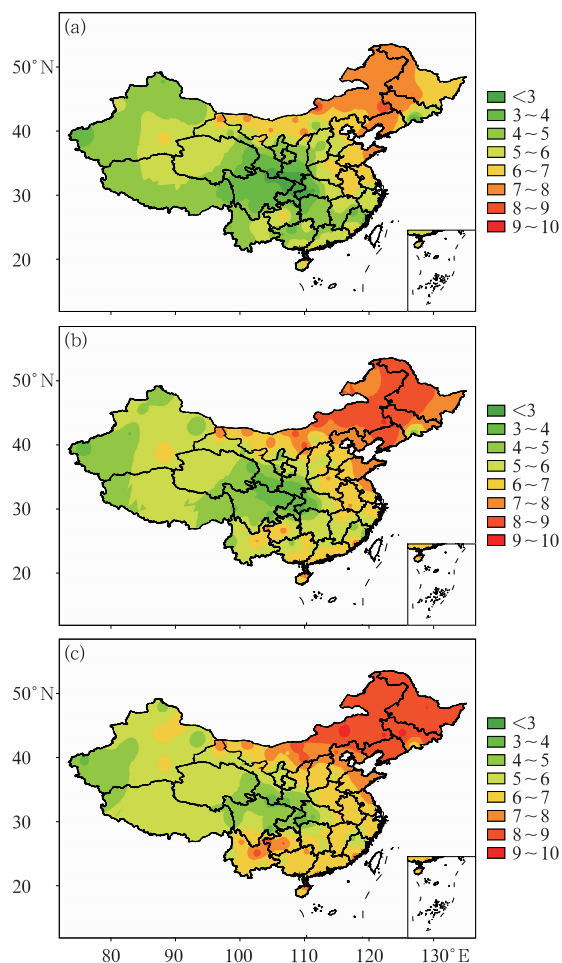


图 3 各高度年平均风速全国分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 300 m, (b) 600 m, (c) 900 m

Fig. 3 Spatial distribution of the annual average wind speeds at different levels (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 300 m, (b) 600 m, (c) 900 m

2.5 各高度年平均风速变化趋势空间分布

图 4 展示了 1981—2014 年全国边界层内 300、600 和 900 m 高度年平均风速的变化趋势。在 300 m 高度,趋势系数范围为 $-0.664 \sim 0.429 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,年平均风速的减小趋势在全国占绝对主导地位,只有湖北、重庆、四川、广西、广东等小部分地区呈增大趋势,但仅海南三亚、湖北宜昌、四川达县通过了 0.01 显著性水平检验。600 m 高度,趋势系数在 $-0.207 \sim 0.316 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,全国大部分地区年平均风速呈增加趋势,尤其是中部、西北和华东沿海地区,其中通过 0.01 显著性水平检验的有新疆阿勒泰、青海格尔木和西宁、广西南宁、湖北宜昌、四川达县、福建邵武、北京等地。900 m 高度,趋势系数在 $-0.284 \sim 0.190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,

$(10 \text{ a})^{-1}$,全国年平均风速变化趋势呈现由边界向内部的包围态势,中心地区仍呈增加趋势,边界地区均呈减小趋势,但是通过显著性水平检验的并不多,只有甘肃武都、湖北宜昌、北京、新疆阿勒泰的增加趋势,以及广西西部地区的减小趋势通过了 0.01 显著性水平检验。

3 结论与讨论

(1) 与对流层中下层规定气压层风速的垂直变化相似,各地区累年平均风速基本随高度上升而增大,从累年平均风速的地区分布来看,在 300~900 m 高度,东北和华北地区风速较大,西南和西北地区风速较小。

(2) 在 300~900 m 高度,同一地区不同高度平均风速的月变化趋势基本一致,各地区的季节风速变化不同,例如东北地区春、冬季风速较大,而西北地区春、夏季风速较大,风电场应根据当地实况,合

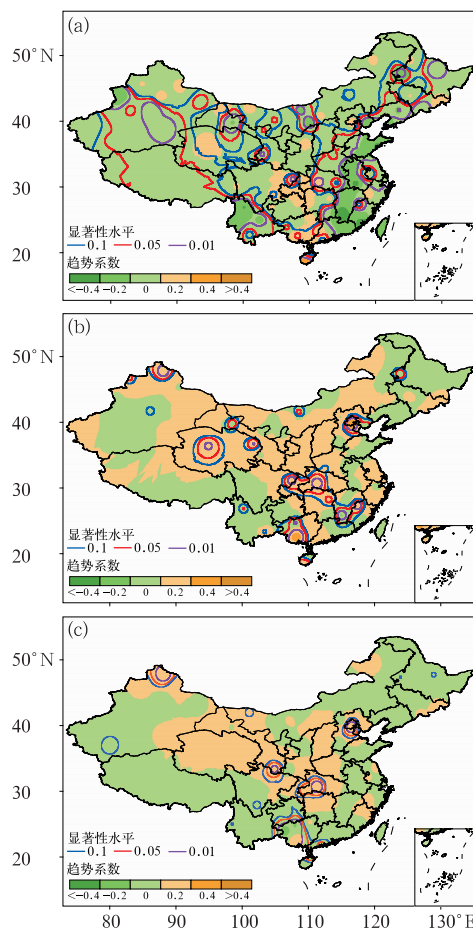


图 4 同图 3,但为变化趋势分布[单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the trends of the annual average wind speeds [unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]

理安排,科学发电。同一地区各高度平均风速各月波动幅度不一,越往高处月平均风速之间的峰谷差值越大,这与任国玉等(2009)对流层月平均风速的年较差从下向上增加的研究结论一致。

(3) 在 300 m 高度各地区年平均风速均显著减小;在 600 和 900 m 高度,华北、西北、华中地区年平均风速呈增加趋势,东北地区年平均风速以减小趋势为主。

(4) 各高度年平均风速空间分布均为东北地区较大,尤其是大兴安岭和东北平原地带;从沿海到内陆,由东至西风速逐渐减小,四川盆地附近风速最小。

(5) 研究期内,在 300 m 高度全国年平均风速以减小趋势为主;在 600 m 高度,全国大部分地区年平均风速呈增加趋势,尤其是中部、西北和华东沿海地区;在 900 m 高度,全国年平均风速变化趋势呈现由边界向内部的包围态势,中心地区仍呈增加趋势,边界地区均呈减小趋势,但是通过显著性水平检验的并不多。

由此可知,除了地表邻近层 300 m 风速因人类活动、地表摩擦等原因造成的风速显著减小外,我国大部分地区的边界层风速并没有显著的增加或减小趋势,这为风电开发企业和政府可持续开发利用风能资源提供了一定的信心支撑。下垫面状态、大气热力状态和辐射平衡变化时刻影响着风速的变化,应当深度认识这些原理过程,在某些风资源不佳的地区,通过科学不断的进步提升,未来可以利用高空风发电,充分利用各种地形下的这一清洁能源。

参考文献

- 陈城,孟丹,孙朋杰,2018. 利用探空风资料研究我国中低空风速变化规律[J]. 干旱气象,36(1):82-89. Chen C, Meng D, Sun P J, 2018. Research on change characteristics of wind speed at mid-low altitude layer over China based on radiosonde wind speed data[J]. J Arid Meteor, 36(1):82-89(in Chinese).
- 丁乃千,陈正洪,孟丹,等,2014. 1980 年~2013 年恩施中低空风速变化特征研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),48(6):937-943. Ding N Q, Chen Z H, Meng D, et al, 2014. A study on the variation of the wind speed in the middle-lower troposphere of Enshi during 1980—2013[J]. J Huazhong Norm Univ (Nat Sci), 48(6):937-943(in Chinese).
- 方艳莹,徐海明,朱蓉,等,2012. 基于 WRF 和 CFD 软件结合的风能资源数值模拟试验研究[J]. 气象,38(11):1378-1389. Fang Y Y, Xu H M, Zhu R, et al, 2012. Study on numerical simulation of wind energy resources based on WRF and CFD models[J]. Meteor Mon, 38(11):1378-1389(in Chinese).
- 李艳,汤剑平,王元,等,2011. 我国近地层风能资源气候变化之未来情景预测[J]. 太阳能学报,32(3):338-345. Li Y, Tang J P, Wang Y, et al, 2011. Prediction of climate change of the near-surface wind energy potential over China[J]. Acta Energ Solar Sin, 32(3):338-345(in Chinese).
- 孟丹,陈正洪,丁乃千,等,2016. 宜昌地区中低空风速变化特征分析[J]. 自然资源学报,31(2):354-362. Meng D, Chen Z H, Ding N Q, et al, 2016. Analysis on tendency of middle and low air wind speed over Yichang Region[J]. J Nat Resour, 31(2):354-362(in Chinese).
- 任国玉,张爱英,王颖,等,2009. 我国高空风速的气候学特征[J]. 地理研究,28(6):1583-1592. Ren G Y, Zhang A Y, Wang Y, et al, 2009. Climatology of upper wind speeds over China[J]. Geogr Res, 28(6):1583-1592(in Chinese).
- 谢今范,刘玉英,王玉昆,等,2014. 东北地区风能资源空间分布特征与模拟[J]. 地理科学,34(12):1497-1503. Xie J F, Liu Y Y, Wang Y K, et al, 2014. Spatial distribution characteristics of wind resource and its simulation in Northeast China[J]. Sci Geogr Sin, 34(12):1497-1503(in Chinese).
- 于宏敏,任国玉,刘玉莲,2013. 黑龙江省大气边界层不同高度风速变化[J]. 自然资源学报,28(10):1718-1730. Yu H M, Ren G Y, Liu Y L, 2013. The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Heilongjiang Province[J]. J Nat Resour, 28(10):1718-1730(in Chinese).
- 张爱英,任国玉,郭军,等,2009. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析[J]. 高原气象,28(3):680-687. Zhang A Y, Ren G Y, Guo J, et al, 2009. Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years[J]. Plateau Meteor, 28(3):680-687(in Chinese).
- 郑祚芳,高华,刘伟东,2014. 北京地区近地层风能资源的气候变异及下垫面改变的影响[J]. 太阳能学报,35(5):881-886. Zheng Z F, Gao H, Liu W D, 2014. Influence of climate change and human activities of the near-surface wind energy potential over Beijing[J]. Acta Energ Solar Sin, 35(5):881-886(in Chinese).
- 中国气象局预测减灾司,中国气象局国家气象中心,2006. 中国气象地理区划手册[M]. 北京:气象出版社. Forecasting Disaster Reduction Division of CMA, National Meteorological Center of CMA, 2006. National Meteorological Geography Region Manual [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 朱锦红,王绍武,张向东,等,2003. 全球气候变暖背景下的大气环流基本模态[J]. 自然科学进展,13(4):417-421. Zhu J H, Wang S W, Zhang X D, et al, 2003. The basic mode of atmospheric circulation under the background of global warming[J]. Prog Nat Sci, 13(4):417-421(in Chinese).
- Guo H, Xu M, Hu Q, 2011. Changes in near-surface wind speed in China: 1969—2005[J]. Int J Climatol, 31(3):349-358.
- Liao J, Wang B, Li Q X, 2014. A new method for quality control of Chinese rawinsonde wind observations[J]. Adv Atmos Sci, 31(6):1293-1304.
- Lin C G, Yang K, Qin J, et al, 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960[J]. J Climate, 26(9):2891-2903.
- Lucarini V, Russell G L, 2002. Comparison of mean climate trends in the northern hemisphere between national centers for environmental prediction and two atmosphere-ocean model forced runs [J]. J Geophys Res, 107(D15):4269.