

黑龙江省大气边界层不同高度风速变化

于宏敏¹, 任国玉², 刘玉莲^{1*}

(1. 黑龙江省气候中心, 哈尔滨 150030; 2. 中国气象局 气候研究开放实验室 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 利用黑龙江省1961—2010年哈尔滨、嫩江、齐齐哈尔、伊春4个气象站探空和地面风速资料, 分析了边界层内不同高度风速的气候学特征和时间变化趋势, 获得以下结论: ①黑龙江省边界层内不同高度年平均风速随高度增加而增大, 10 m到300 m风速垂直递增率最大; 风速在年内具有明显的季节性特征, 各高度都是春季最大, 近地面层冬季风速最小, 其余高度夏季风速最小。②1961—2010年, 近地面10 m高度平均风速1970年代最大, 其后各年代风速逐渐减小, 2000年代风速最小; 300、600、900 m高度, 平均风速1980年代最大, 从1980年代到2000年代逐渐减小, 300 m高度平均风速最小出现在1960年代, 600 m和900 m最小出现在1970年代。③1961—2010年, 近地面10 m高度平均风速呈明显减弱趋势, 递减率为0.162 m/(s·10 a), 递减趋势主要发生在1970年代以后, 但300、600和900 m高度平均风速变化均不显著。④黑龙江省近地面风速变化趋势可能主要与观测环境改变和城市化等非自然因素影响有关, 上层的风速变化则主要受大尺度大气环流变化的影响。

关键词: 气候变化; 风能资源; 风速; 边界层; 黑龙江省

中图分类号: P425 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2013)10-1718-13

DOI: 10.11849/zrzyxb.2013.10.007

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。大气流过地面时, 地面上各种粗糙元, 如土丘、庄稼、树木、房屋等, 会使大气流动受阻, 这种摩擦阻力由于大气中的湍流而向上传递, 并随高度的增加而逐渐减弱, 达到某一高度后便可忽略。此高度即称为大气边界层厚度, 它随气象条件、地形、地面粗糙度而变化, 一般为300~1 000 m。

近地面和大气边界层的风速及其变化对于气候变化监测和风能资源评价具有重要意义, 得到越来越多的关注^[1-5]。研究发现, 最近几十年我国大范围地区近地面风速已经明显减弱, 北方地区风速下降更为明显, 部分地区变化速率可达0.2 m/(s·10 a)^[1, 6-9]。刘传顺等^[10]根据地面气象观测资料对黑龙江省地面风速变化进行了分析, 指出近50 a黑龙江省地面10 m高风速也呈明显的减小趋势, 减小速率为0.3 m/(s·10 a), 进入1970年代以后减小趋势更加显著。

对于我国近地面风速明显减弱的原因, 刘学锋等^[11-12]和张爱英等^[8]认为主要和城市化

收稿日期: 2012-07-19; 修订日期: 2013-02-05。

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2011-18); 公益性行业(气象)科研专项 (GYHY201106013, GYHY201206012); 国家科技支撑计划课题 (2007BAC29B02); 水利部公益性行业专项 (200801001)。

第一作者简介: 于宏敏 (1966-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域气候变化研究。
E-mail: yuhongmin66@163.com

*通信作者简介: 刘玉莲 (1974-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为区域气候变化。E-mail: liuy174@qq.com

及观测场周围人工建筑物增加有关,但大尺度大气环流的变化也具有一定作用。刘学锋等^[12]发现,河北省边界层内300 m以上各高度层平均风速一般也呈降低趋势,但远没有近地面明显,说明背景大气环流变化是近地面风速下降的一个原因,同时城市化和台站周围观测环境改变对风速减弱具有更重要影响。卞林根等^[13]在对北京大气边界层风廓线观测研究中发现,近地面郊区风速大于城区,城、郊风速的垂直分布特征也有较大差异,说明随着城市化发展,被人工建筑包围起来的气象观测站近地面风速将呈现下降趋势。但是,对于观测到的近地面风速减弱的原因,目前还没有完全达成共识^[2,9],需要开展进一步研究。分析探讨不同地区各类台站大气边界层内风速变化以及各高度风速与近地面风速之间的关系,为了解观测场周围环境变化对风速变化产生的影响提供了一种新的思路。

就风能资源评价来说,目前主流风机高度多在50 m和70 m,而我国气象观测站网的风速观测中没有这两个高度的信息,评估时需要采用地面观测风速对拟建风电场测风数据进行订正。背景大气环流的变化对边界层内风速变化的影响、城市化和观测场周边环境改变对气象站测风资料的影响,直接关系到测风数据订正的准确性,对风电场的设计方案及经济性分析产生影响。分析了解大气边界层中风速气候特征及其变化规律,认识不同层次风速变化的原因,包括理解近地面风速观测的代表性和测量偏差,对于客观评价风能资源潜力及其随时间变化规律,推动未来风能资源开发和规划,也具有实际价值。

本文应用黑龙江省近地面边界层内风速观测资料,比较分析不同高度风速变化情况,以期进一步理解区域地面风速变化的机理,为当地风能资源评价工作提供科学信息。

1 资料及方法

1.1 资料来源和处理

资料来自黑龙江省内4个气象探空观测站(哈尔滨、嫩江、齐齐哈尔、伊春)1961—2010年逐日探空和地面风速观测记录。4个站按国家一级高空站设置标准,间距300 km,分别位于不同气候区域,对于黑龙江全省城镇气象台站具有一定代表性(图1)。

哈尔滨站位于黑龙江省南部,松嫩平原东部,东临张广才岭支脉丘陵,北部为小兴安岭山区,中部有松花江流过,平原辽阔(表1)。原址在哈尔滨市东郊,1969年6月迁至西郊,1981年1月又迁回东郊,两址距离14 km。随城市化发展,现址周围有不同高度建筑物环绕。嫩江站位于黑龙江省西北部,北依大兴安岭伊勒呼里山,东接小兴安岭,南连松嫩平原。1971年6月由原址迁到南郊,距离1 km。齐

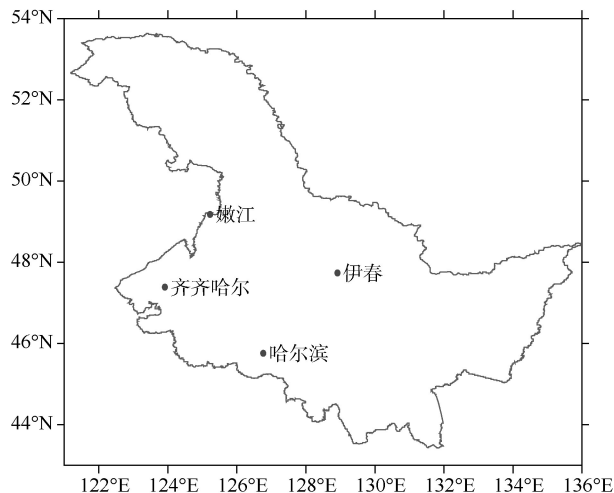


图1 黑龙江省4个探空台站地点

Fig.1 Distribution of the four sounding stations in Heilongjiang Province

齐哈尔站位于黑龙江省西部的松嫩平原腹地,地势北高南低,北部和东部是小兴安岭南麓,中部和南部为冲积平原。1964年1月由原址北迁6 km,2002年1月又北迁1 km。伊春站位于黑龙江省东北部,小兴安岭纵贯全境。1989年1月由原址北迁41 km。气象站迁址可以对某些气候变量的地面观测历史记录产生非均一性,即在时间序列上出现不连续点或断点,影响气候变化时间特征特别是趋势变化特征的分析。但是,采用统计方法检验4个站近地面和高空年平均风速数据,没有发现明显的非均一性,因此未作资料均一化处理。

表1 黑龙江省4个探空站位置及其变动情况

Table 1 The locations and relocations of the four sounding stations in Heilongjiang Province

站号	站名	东经/(°E)	北纬/(°N)	海拔/m	迁站次数	迁站年份
50953	哈尔滨	126.77	45.75	142.3	2	1969, 1981
50557	嫩江	125.23	49.17	242.2	1	1971
50745	齐齐哈尔	123.92	47.38	145.9	2	1964, 2002
50774	伊春	128.92	47.73	240.9	1	1989

首先将各探空站每日07:00、19:00两个时次不同高度测风资料进行信息化处理;然后用2个时次平均作为不同高度的日平均风速,依次统计边界层内300、600、900 m高度的月、季、年单站平均风速和4个站平均风速;同时计算4个站近地面10 m高EL型电接风07:00、19:00测风记录的平均值作为地面日平均风速,并统计了与各高度层相对应的月、季、年平均地面风速。4个站均为国家基本站,资料的完整性较好,为了利于比较,均选用1961—2010年完整的50 a观测资料。

1.2 计算方法

气候变化趋势或速率的估计采用最小二乘法,计算样本与时间序号(自然数列1, 2, …)的线性回归系数。趋势系数为风速序列与时间序号(自然数列1, 2, …)的相关系数。趋势系数为正(负),则表示平均风速在所统计的时间内有线性增多(减少)的趋势;反之亦然。采用 t 检验法对风速变化趋势进行显著性检验,并选择 $\alpha=0.05$ 为显著性水平,分别对各站和4站平均风速的变化趋势进行显著性检验。

采用气象季节划分方法,以3—5月为春季,6—8月为夏季,9—10月为秋季,11月至翌年2月为冬季,季平均风速是季内各月平均风速平均值,年平均风速是年内12个月平均风速的平均值,气候平均取1971—2000年30 a平均,全省平均为4站风速的算术平均。

2 结果及分析

2.1 风速年内变化特征

从图2可见,全省平均不同高度平均风速具有明显的季节变化特征,春季风速较大,风速较小的季节除近地面10 m高度为冬季外,其余高度都在夏季。近地面10 m高度的风速最大值出现在5月,其次是4月和6月,最小值在1月;300 m高度风速最大值出现在4月,其次是10月和5月,最小值在7月;600 m高度风速最大值出现在4月,其次是10月和11月,最小值在7月;900 m高度风速最大值出现在4月和11月,其次是10月,最小值在7月。多年平均风速随高度增加而递增,10、300、600、900 m高度年平均

风速分别为2.9、7.4、8.3、8.6 m/s (表2), 从10 m到300 m风速递增最明显, 增幅达4.5 m/s, 300 m以上层次平均风速垂直递增速率明显减小, 说明随高度增加风速受地面粗糙度的影响在逐渐弱化。

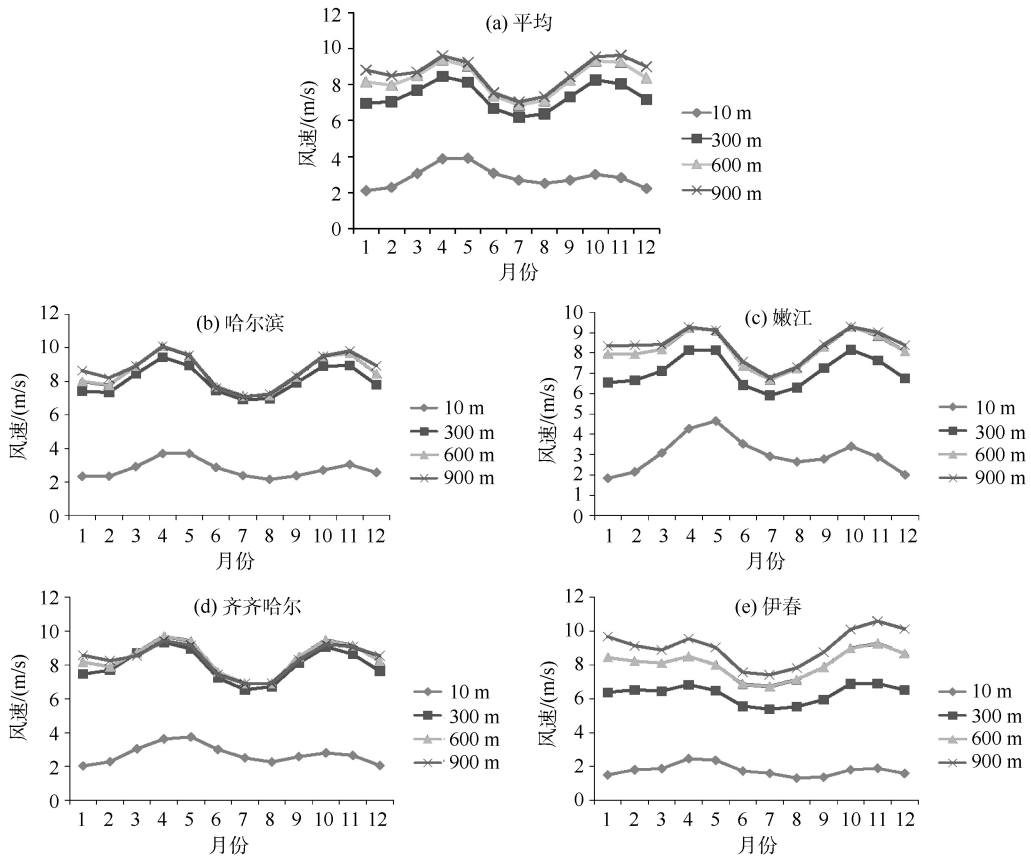


图2 黑龙江省边界层内不同高度月平均风速比较

Fig. 2 The monthly mean wind speed at different heights in boundary layer in Heilongjiang Province

表2 不同高度年平均风速 (1971—2000年)

Table 2 Annual mean wind speed at different heights in Heilongjiang Province (1971 – 2000) (m/s)

	10 m	300 m	600 m	900 m
哈尔滨	3.375	8.035	8.513	8.663
嫩江	3.183	7.087	8.184	8.363
齐齐哈尔	3.038	8.003	8.382	8.354
伊春	1.812	6.282	8.061	9.047
4站平均	2.852	7.352	8.285	8.607

各站不同高度风速季节变化和月变化特点有相似, 也有差异。从季节变化看, 地面10 m高度4个站季节平均风速都是春季最大, 冬季最小; 其它高度, 除伊春600 m和900 m的季节平均风速最大值在冬季外, 其余台站都出现在春季, 夏季风速最小。从月变化看, 10 m高度月平均风速最大值哈尔滨和伊春出现在4月, 嫩江和齐齐哈尔在5月, 最小值都在1月; 其它高度, 月平均风速最大值哈尔滨和齐齐哈尔在4月, 嫩江在

10月,伊春在11月,最小值都在7月。

比较各高度4个站年平均风速(表2、图3),10 m高度风速最大是哈尔滨,其次为嫩江、齐齐哈尔,最小是伊春;300 m和600 m高度均是哈尔滨年平均风速最大,其次为齐齐哈尔、嫩江,伊春风速最小;900 m高度是伊春风速最大,其次为哈尔滨、嫩江,齐齐哈尔风速最小。从4个站年平均风速垂直递增率看(表3),各地各高度层之间存在明显差异。10 m到300 m垂直递增率最大的是齐齐哈尔,最小的是嫩江;300 m到600 m垂直递增率最大的是伊春,最小的是齐齐哈尔;600 m到900 m垂直递增率最大的是伊春,齐齐哈尔略有减小。伊春站由300 m到600 m再到900 m垂直递增率明显高于其他站,主要与小兴安岭的山地地形有关。从地面到900 m高度,垂直递增率从大到小依次为伊春、齐齐哈尔、哈尔滨、嫩江,平均为0.647 m/(s·100 m)。

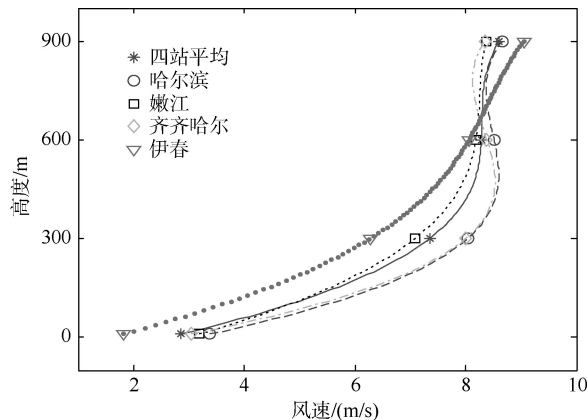


图3 边界层内不同高度各站及其平均年平均风速垂直分布(1971—2000年)

Fig.3 Vertical distribution of annual mean wind speed at different heights in Heilongjiang Province (1971 - 2000)

表3 不同高度4站及其平均年平均风速垂直递增率(1971—2000年)

Table 3 The vertical rate of annual mean wind speed between different heights in Heilongjiang Province (1971 - 2000) (m/(s·100 m))

	10 ~ 300 m	300 ~ 600 m	600 ~ 900 m	10 ~ 900 m
哈尔滨	1.607	0.159	0.050	0.594
嫩江	1.346	0.366	0.060	0.582
齐齐哈尔	1.712	0.126	-0.009	0.597
伊春	1.541	0.593	0.329	0.813
4站平均	1.552	0.311	0.107	0.647

图4是各站低层各月平均风速与900 m高度月平均风速差值序列,选取的时段为各站都无迁站与仪器变更的稳定期。边界层内越往上,大气流动受地面摩擦影响越小,本文以900 m高度风速为基准,计算下面各层风速与其差值,分析各层风速受地面摩擦影响程度。可见,600 m高度风速,平原(哈尔滨、齐齐哈尔)和半山(嫩江)测站各月受地面影响程度相对较山地(伊春)测站小,冬季受地面影响风速减小程度大于其它各季。300 m高度风速,平原测站(哈尔滨、齐齐哈尔)受地面影响风速减小程度略大于600 m,夏季受地面影响风速减小程度较弱,冬季较强;半山(嫩江)测站受地面影响

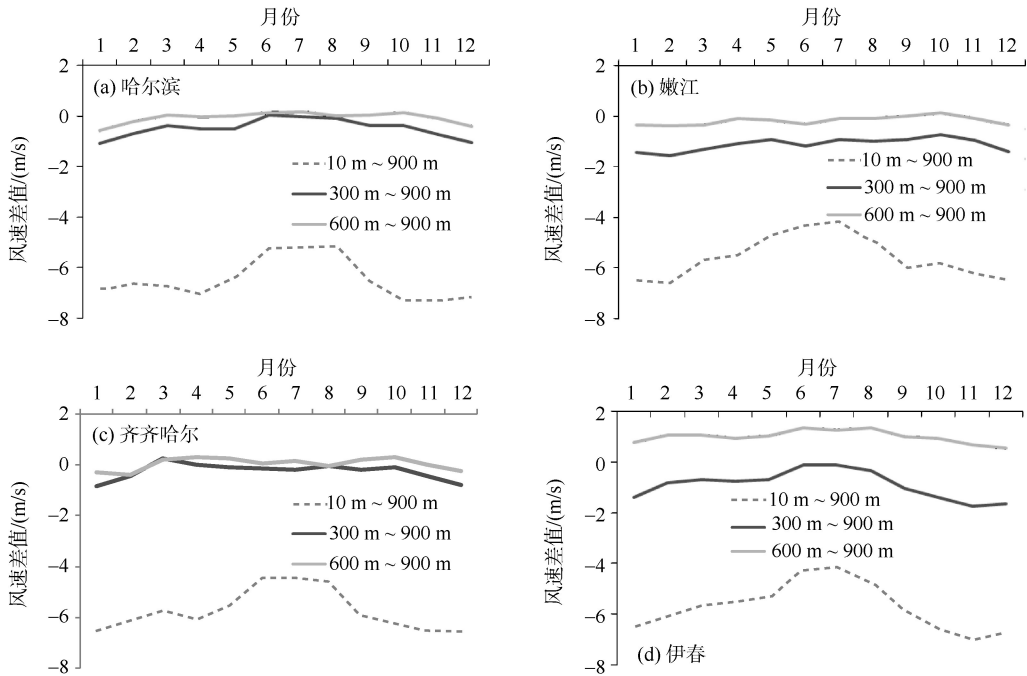


图4 各站10、300、600 m月平均风速与900 m月平均风速差值(1989—2001年)

Fig.4 The monthly mean wind speed difference based on the 10 m, 300 m, 600 m and 900 m in Heilongjiang Province (1989 - 2001)

表4 不同地面条件台站10、300、600 m平均风速与900 m平均风速差值(1971—2000年)

Table 4 The mean wind speed difference of 10 m, 300 m and 600 m from 900 m at different stations in Heilongjiang Province(1971 - 2000)

季节		年度	春季	夏季	秋季	冬季
平原	10~900 m	-5.63	-5.51	-4.52	-6.08	-6.34
	300~900 m	-0.95	-0.87	-0.61	-0.84	-1.34
	600~900 m	-0.16	-0.06	-0.06	-0.05	-0.38
半山地	10~900 m	-5.64	-5.57	-4.48	-6.06	-6.37
	300~900 m	-0.35	-0.05	-0.25	-0.15	-0.76
	600~900 m	0.03	0.24	0.05	0.23	-0.25
山地	10~900 m	-7.27	-6.92	-6.04	-7.82	-8.18
	300~900 m	-2.76	-2.56	-2.10	-3.00	-3.27
	600~900 m	-0.99	-0.95	-0.69	-1.00	-1.21

风速减小程度较600 m更强, 冬季受影响程度大于其它各季; 山地(伊春)测站受地面影响, 风速减小程度最强。近地面10 m高度风速(表4), 平原和半山地测站减小5.63 m/s和5.64 m/s, 山地测站减小7.27 m/s, 多于平原与半山地测站1.64 m/s和1.63 m/s; 不同下垫面测站冬季受地面摩擦影响, 风速减弱程度均较大, 夏季风速受地面摩擦减弱程度均较小。

2.2 风速年代和趋势变化特征

表5为各年代各站不同高度平均风速距平, 图5表示边界层内不同高度各年代平均风

表5 边界层内不同高度各年代年平均风速距平值

Table 5 Wind speed anomaly at different heights in each decade in Heilongjiang Province (m/s)

层次	站名	1960年代	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
10 m	哈尔滨	0.143	0.877	-0.191	-0.686	-1.202
	嫩江	-1.002	0.285	0.062	-0.346	-0.413
	齐齐哈尔	0.463	0.040	0.258	-0.298	0.011
	伊春	0.394	0.119	-0.042	-0.078	-0.281
300 m	哈尔滨	-0.269	-0.212	0.097	0.115	0.002
	嫩江	0.021	-0.139	0.072	0.065	0.293
	齐齐哈尔	0.194	-0.269	0.136	0.132	-0.774
	伊春	-0.697	-0.004	0.210	-0.205	-0.080
600 m	哈尔滨	-0.075	-0.161	0.054	0.106	0.043
	嫩江	-0.014	0.084	-0.002	-0.082	0.100
	齐齐哈尔	0.211	-0.304	0.191	0.113	-0.391
	伊春	-0.359	0.015	0.027	-0.042	0.073
900 m	哈尔滨	0.139	-0.104	0.056	0.049	-0.015
	嫩江	0.215	0.076	-0.032	-0.043	0.051
	齐齐哈尔	0.089	-0.364	0.200	0.164	-0.061
	伊春	-0.459	-0.077	0.064	0.014	-0.008

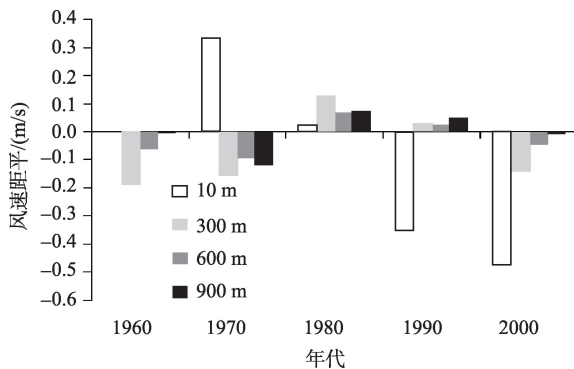


图5 边界层内不同高度4站平均各年代年平均风速距平
Fig.5 The 4-station averaged annual mean wind speed anomaly at different heights in each decade in Heilongjiang Province

速距平变化。对近地面 10 m 高度，各站平均风速 1960 年代较小，1970 年代最大 (3.182 m/s)，从 1970 年代到 2000 年代逐渐减小，2000 年代达到最小值 (2.381 m/s)；哈尔滨和嫩江从 1970 年代到 2000 年代都是减小趋势，伊春从 1960 年代到 2000 年代风速持续减小，而齐齐哈尔从 1960 年代到 2000 年代的变化规律是：大一小一大一小一大；平均风速最大的年代哈尔滨 (4.252 m/s)、嫩江 (3.468 m/s) 都出现在 1970 年代，齐齐哈尔 (3.501 m/s)、伊春 (2.206 m/s) 出现在 1960 年代，平均风速最小的年代哈尔滨、伊春均出现在 2000 年代，嫩江和齐齐哈尔分别出现在 1960 年代和 1990 年代。因此，哈尔滨、嫩江、伊春 3 站的近地面年代平均风速均表现出长期减小趋势，但齐齐哈尔没有明显趋势变化，地面平均风速年代和趋势变化明显不同于其它站。该站于 2002 年有一次迁站，其后台站周围建筑物减少，观测环境改善，致使地面平均风速增大，可能是导致其 2000 年代风速增加的主要原因之一。

对 300、600、900 m 高度风速，各站平均 1980 年代到 2000 年代都呈减小趋势，平均风速最大年代在 1980 年代，除 300 m 平均风速最小在 1960 年代外，600 m 和 900 m 风速最小都出现在 1970 年代。

随高度和季节变化, 各站平均年平均风速变化具有明显差异(表6、图6)。1961—2010年, 近地面10 m高度风速变化具有明显的递减趋势, 递减率为 $0.162 \text{ m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$, 通过了0.05的显著性检验; 1971—2010年和1981—2010年, 近地面10 m高度风速下降速率更大(均通过0.05的显著性检验)。而300 m高度年平均风速变化在1961—2010年和1971—2010年呈增加趋势, 1981—2010年呈下降趋势, 但均未通过显著性检验; 600 m和900 m高度风速变化也不明显, 1961—2010年和1971—2010年间呈不显著的上升趋势, 1981—2010年间则为不显著的下降趋势。

1961—2010年, 各站平均近地面10 m高度各季节平均风速变化均呈减小趋势, 并通过了0.01显著性检验。高空300 m及以上高度, 春季和冬季平均风速均为增加趋势, 其中300 m高度冬季增加通过0.05显著性检验, 其余均未通过显著性检验; 夏季全部表现为不明显的减小, 但均未通过显著性检验; 秋季900 m高度是不明显的减小趋势, 600 m高度是不明显的增加趋势, 300 m高度的增加趋势通过了0.05显著性检验(表6)。

表6 4站平均不同高度年和季节平均风速变化速率(1961—2010年)

Table 6 Changing rate of 4-station averaged annual and seasonal mean wind speed for different heights in

Heilongjiang Province (1961–2010)

($\text{m}/(\text{s}\cdot 10\text{a})$)

层次	春季	夏季	秋季	冬季	年
10 m	-0.218**	-0.113**	-0.156**	-0.161**	-0.162*
300 m	0.000	-0.006	0.023*	0.068*	0.028
600 m	0.010	-0.034	0.006	0.053	0.016
900 m	0.028	-0.032	-0.001	0.039	0.015

注: ** $\alpha=0.01$ 水平下通过显著性检验; * $\alpha=0.05$ 水平下通过显著性检验。下同。

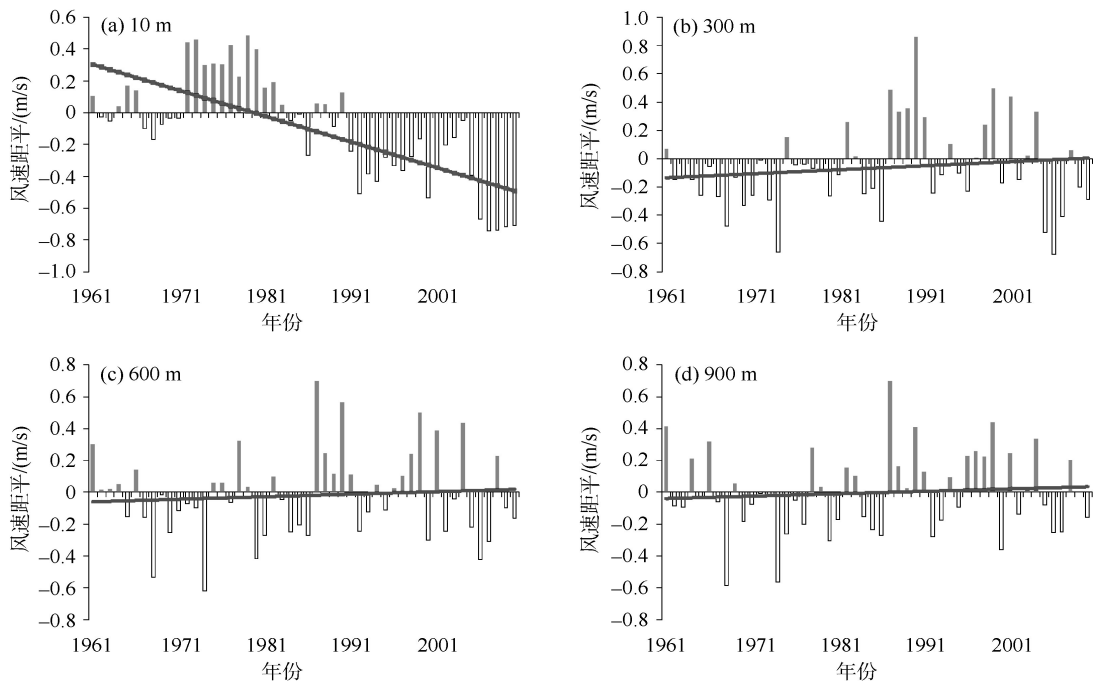


图6 边界层内不同高度年平均风速距平变化

Fig.6 The change of wind speed anomaly at different heights in Heilongjiang Province

表7给出各站不同高度年和季节平均风速变化趋势,图7表示各站各高度年平均风速变化速率的垂直分布情况。哈尔滨站近地面10 m高度平均风速变化年和四季都呈显著的减小趋势,300 m和600 m高度风速变化冬季均表现为显著增加,900 m高度年和四季风速变化趋势不显著;嫩江站近地面10 m高度风速变化年和四季不明显,300 m高度风速变化年和秋、冬季明显增加,600 m高度风速变化年和四季都无明显趋势,900 m高度仅夏季表现为显著减小;齐齐哈尔站近地面10 m高度风速变化年和四季都表现为明显的减小趋势,300 m高度风速变化年和四季为减小趋势,除冬季外其它季节的减小都通过0.05显著性检验,600 m和900 m高度风速年和四季变化趋势不显著;伊春站近地面10 m高度风速变化年和四季都表现为减小趋势,300、600 m高度风速变化年和春季、冬季表现为递增趋势,900 m高度年和春季增加趋势明显。

表7 4站不同高度年和季节平均风速变化趋势

Table 7 Changing trend of annual and seasonal mean wind speed at different heights of four stations in Heilongjiang Province (m/(s·10a))

层次	站名	春季	夏季	秋季	冬季	年
10 m	哈尔滨	-0.529**	-0.322**	-0.433**	-0.393**	-0.413**
	嫩江	0.033	0.075	0.086	0.064	0.065
	齐齐哈尔	-0.202**	-0.082*	-0.118**	-0.154**	-0.144**
	伊春	-0.173**	-0.124**	-0.159**	-0.160**	-0.156**
300 m	哈尔滨	-0.006	0.030	0.109	0.145*	0.074
	嫩江	0.042	0.004	0.140*	0.105*	0.084*
	齐齐哈尔	-0.167*	-0.150*	-0.156*	-0.114	-0.145*
	伊春	0.131*	0.091	0.000	0.137**	0.100*
600 m	哈尔滨	-0.033	-0.003	0.061	0.150*	0.051
	嫩江	-0.023	-0.069	0.037	0.017	0.005
	齐齐哈尔	-0.049	-0.101	-0.070	-0.057	-0.070
	伊春	0.145*	0.035	-0.004	0.102*	0.077*
900 m	哈尔滨	-0.088	-0.072	-0.016	0.098	-0.012
	嫩江	-0.048	-0.120*	-0.045	-0.044	-0.047
	齐齐哈尔	0.068	-0.010	0.035	0.020	0.026
	伊春	0.178*	0.074	0.020	0.082	0.094*

哈尔滨和伊春站年平均风速变化趋势的垂直剖面比较相似,均表现为近地面显著下降,300 m及以上高度呈不明显上升趋势;但嫩江和齐齐哈尔站比较特殊,前者近地面没有显著下降,900 m高度却出现了比较明显的减小,而后者近地面风速呈明显减小趋势,但与哈尔滨和伊春站比较减小程度略小,而且300 m和600 m高度年平均风速变化与其他站截然不同,呈现出比较明显的下降趋势,300 m高度下降趋势尤其明显(图7)。

3 讨论

对于黑龙江省4个探空站的高空风速观测数据,在资料处理当中曾使用SHNT方法^[14]对其进行了非均一性检验,没有发现明显断点,因此未作均一化处理。但是,在1961—2010年间,有两次全国范围的测风仪器变更,1967—1970年期间,地面测风仪由维尔德

型转换为EL电接风风速计, 2004—2007年期间, 又由EL电接风风速计转换为DYYZ II风向风速计自动站仪器测风, 可能在一定程度上导致近地面风速观测记录出现不连续性。本文获得的近地面10 m平均风速在1970年代初期确比1960年代中后期系统偏高, 可能在一定程度上与更换仪器引起的非均一性有关。但是, 由于近地面10 m风速下降主要发生在1970年代中期以后(图6), 即使考虑变更仪器产生的非均一性, 使用订正后资料计算获得整个时期地面平均风速序列, 其长期下降趋势也将很明显。因此, 更换仪器引起的非均一性不至于对本文主要分析结果产生显著影响。地面环境改变对测风影响无疑具有显著影响^[1], 其对黑龙江省地面平均风速的影响已有另文分析讨论^[15]。

本文分析发现, 黑龙江省各探空站各个季节平均近地面风速冬季最小, 边界层内其它高度却是夏季较小。任国玉等^[16]对全国风速气候学特征的分析结果表明, 全国平均来看, 850 hPa(海拔约1 500 m)以下平均风速均为夏季最小; 刘学锋等^[12]在分析河北省边界层内平均风速变化时也指出夏季平均风速最小。在北半球中高纬度地带, 南北温度差异造成的热成风影响占据主导地位, 这种南北温度差异在冬季、春季和秋季较大, 因而这些季节的平均风速也较强, 夏季风速一般较弱; 另外, 中国大部地区处于盛行西风带, 上层以偏西风为主, 夏季来自海洋的偏南暖湿气流活跃, 偏南风较多, 低层气流和高空气流运动不完全一致, 东部沿海地带近地面和高层气流运动方向甚至相反, 促使低层的偏东风因受高层偏西风的影响而削弱, 而冬季近地面则盛行西北风, 与高空气流方向基本一致, 低层西北风得到加强, 这也是我国大部分地区近地面风速在夏季很弱的一个原因。但是, 黑龙江省探空站所测得夏季近地面风速却不是最小, 最小风速发生在冬季, 与其他地区存在明显差异。造成这一差异的主要因素可能在于探空站处于较高的纬度和特殊的地形区域, 同时也与探空站所在地城市化发展有关。黑龙江省是我国纬度最高的省份, 冬季受西伯利亚高压影响明显, 盛行沉降运动, 地面空气静稳, 风速微弱; 另外, 除哈尔滨站外, 其余3个站或者位于大兴安岭东坡背风坡, 或者处于小兴安岭山地内部, 地形作用突出, 冬季地面风速进一步降低。本文分析还发现, 与全国平均或北方其他地区比较, 黑龙江省春季最大风速出现在5月, 而不是通常的4月。这与纬度偏高, 中春时节相对推迟有关。

本文所选4个探空站不同高度年平均风速的差异, 应该与台站所处的地理位置、地形条件和大气环流综合影响有关。哈尔滨、齐齐哈尔和嫩江站位于松嫩平原, 地势开阔, 年内特别是春季多大风, 近地面风速较大, 10 m到300 m高度年平均风速的垂直递增率也较大; 伊春位于小兴安岭山地, 地形起伏较大, 域内生长大面积的原始森林, 600 m高度以下年平均风速均较小, 300 m到600 m垂直递增率明显高于其他站, 900 m

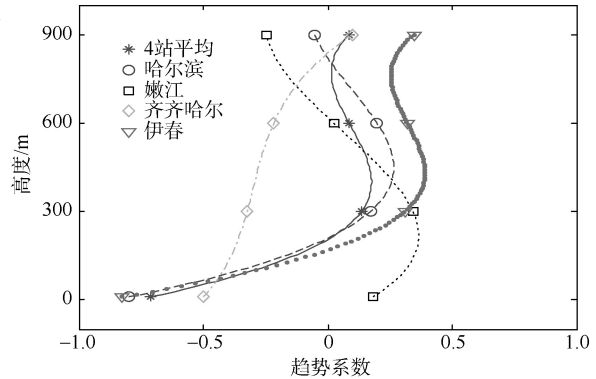


图7 边界层内不同高度年平均风速变化趋势系数分布 (1961—2010年)

Fig.7 Tendency coefficient of annual mean wind speed for four stations at different heights in Heilongjiang Province (1961-2010)

高度平均风速也比其他站大。

随着高度增加,各站年平均风速多表现为增大,但齐齐哈尔900 m风速却不比600 m风速大,反而略有减小。这可能与城市建筑物或城市“冠层”的影响有关。这种影响导致“冠层”顶部高度以下风速明显减弱,“冠层”以上的300 m和600 m附近由于气流爬升或“狭管”效应致使风速增大,并与900 m附近自由大气风速接近甚至超过。齐齐哈尔站长期位于市区西部,2002年迁至市区西北部,探空气球经由城市“冠层”的频次比较高,距离较长,因而平均风速垂直廓线明显不同于其他台站。

黑龙江省4个探空站近地面平均风速呈现明显的随时间减弱的趋势,但上层各层平均风速变化呈现出并不明显的增强趋势。近地面风速的明显减弱现象与针对全国和河北省的研究一致,但上层风速具有弱增强趋势却与先前分析结果不完全一致,先前研究表明对流层下层或边界层上层风速变化呈不明显的下降趋势^[8,12]。朱锦红等^[17]发现,20世纪80年代中期以后对流层中高纬度西风有明显加强趋势。Lucarini等^[18]研究表明,1960—2000年间北半球高层年平均位势高度在中纬度地带上升,高纬度地带降低,夏季从华北到阿留申群岛一带为位势高度上升区,西伯利亚北部为下降中心,这说明高空西风的增强主要发生在中高纬度。中国大陆大部处于中纬度地区,而黑龙江省处于中国最北部,纬度偏高,其边界层上层平均风速的不明显增强可能主要是大尺度大气环流变化的结果。

对于多数站近地面风速的显著减弱,最主要的原因应该是局地人为活动影响,包括观测场周围环境改变和城市化的影响。模拟分析^[7]和观测分析表明^[10],城市以外地区平均地面风速的减少没有气象台站观测到的明显;刘学锋等^[12]分析发现,河北省乡村站或观测环境变化不大的台站地面风速也有减少,但减少幅度显著偏低。黑龙江省4个探空站观测的平均风速减弱,主要发生在近地面附近,说明城市化和观测环境改变造成的影响比其他地区还要显著。这一结论对于正确评价风电场区域近地面风速和风能密度的真实变化具有实际意义。

4 结论

利用1961—2010年哈尔滨、嫩江、齐齐哈尔、伊春4个气象站探空和地面风速资料,分析了黑龙江省边界层内不同高度风速的时空变化特征,得到以下结论:

(1) 黑龙江省边界层内不同高度年平均风速随着距地面高度的增加而增大,10 m到300 m风速垂直递增率最大;风速在年内时间分布上具有明显的季节性特征,各高度都是春季风速最大,近地面层冬季风速最小,其余高度夏季风速最小。

(2) 在1961—2010年间,近地面10 m平均风速1970年代最大,从1970年代到2000年代逐渐减小,2000年代风速最小;在300、600、900 m高度,平均风速1980年代最大,从1980年代到2000年代逐渐减小,300 m高度平均风速最小年代在1960年代,600 m和900 m高度风速最小年代均在1970年代。

(3) 1961—2010年期间,近地面10 m高度平均风速明显减弱,递减率为 $0.162 \text{ m}/(\text{s} \cdot 10 \text{ a})$,这个变化主要发生在1970年代以后;而300、600和900 m各高度平均风速的趋势变化都不够显著。

(4) 黑龙江省近地面风速变化趋势可能主要与观测环境改变和城市化等非自然因素影响有关,但上层的风速变化则主要受大尺度大气环流变化的影响。

参考文献(References):

- [1] 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): 948-952. [REN Guo-yu, GUO Jun, XU Ming-zhi, *et al.* Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 948-952.]
- [2] Fu G, Yu J, Zhang Y, *et al.* Temporal variation of wind speed in China for 1961–2007 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 104:313-324. doi:10.1007/s00704-010-0348-x.
- [3] 金巍, 任国玉, 曲岩, 等. 1971—2010年东北三省平均地面风速变化[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 648-653. [JIN Wei, REN Guo-yu, QU Yan, *et al.* Change in surface mean wind speed of northeast China during the period of 1971 – 2010. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4): 648-653.]
- [4] 张文佳, 张永战. 中国风电的时空分布特征和发展趋势[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 585-596. [ZHANG Wen-jia, ZHANG Yong-zhan. Studies on characteristics of the spatial-temporal distribution and development trend for wind farms in China. *Journal of Natural Resource*, 2007, 22(4): 585-596.]
- [5] 吴丰林, 方创琳. 中国风能资源价值评估与开发阶段划分研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(8): 1412-1421. [WU Feng-lin, FANG Chuang-lin. Wind power resource appraisal and development stage regional division of China. *Journal of Natural Resource*, 2009, 24(8): 1412-1421.]
- [6] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236. [WANG Zun-ya, DING Yi-hui, HE Jin-hai, *et al.* An updating analysis of the climate change in china in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [7] Zuo Hongchao, Li Dongliang, Hu Yinqiao, *et al.* Characteristics of climate trends and correlation between pan-evaporation and environmental factors in the last 40 years over China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (12): 1235-1241.
- [8] 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 近30年我国高空风速变化趋势分析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 680-687. [ZHANG Ai-ying, REN Guo-yu, GUO Jun, *et al.* Change trend analyses on upper-air wind speed over China in past 30 years. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(3): 680-687.]
- [9] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, *et al.* Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 99: 421-430.
- [10] 刘传顺, 刘玉莲. 近50a黑龙江省地面平均风速变化[J]. 黑龙江气象, 2010, 27(2): 26-29. [LIU Chuan-shun, LIU Yu-lian. Change in surface mean wind speed of Heilongjiang Province in past 50 years. *Heilongjiang Meteorology*, 2010, 27(2): 26-29.]
- [11] 刘学锋, 江滢, 任国玉, 等. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响[J]. 高原气象, 2009, 28 (2): 433-439. [LIU Xue-feng, JIANG Ying, REN Guo-yu, *et al.* Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(2): 433-439.]
- [12] 刘学锋, 任国玉, 梁秀慧, 等. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征[J]. 气象, 2009, 35(7): 46-53. [LIU Xue-feng, REN Guo-yu, LIANG Xiu-hui, *et al.* The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Hebei Province. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(7): 46-53.]
- [13] 卞林根, 程彦杰, 王欣, 等. 北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特刊): 13-25. [BIAN Lin-gen, CHENG Yan-jie, WANG Xin, *et al.* Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2002, 13(S1): 13-25.]
- [14] 刘小宁. 我国40年年平均风速的均一性检验[J]. 应用气象学报, 2000, 11(1): 27-34. [LIU Xiao-ning. The homogeneity test on mean annual wind speed over China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(1): 27-34.]
- [15] 于宏敏, 徐永清, 张洪玲, 等. 城市化对近地面风速变化的影响: 以黑龙江省为例[J]. 太阳能学报, 待刊. [YU Hong-min, XU Yong-qing, ZHANG Hong-ling, *et al.* The impact on wind speed trend of urbanization at Heilongjiang Province. *Acta Energetica Solaris Sinica*, in press.]
- [16] 任国玉, 张爱英, 王颖, 等. 我国高空风速的气候学特征[J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1583-1592. [REN Guo-yu, ZHANG Ai-ying, WANG Ying, *et al.* Climatology of upper wind speed over China. *Geographical Research*, 2009, 28 (6): 1583-1592.]

- [17] 朱锦红, 王绍武, 张向东, 等. 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, 2003, 13(4):417-421. [ZHU Jin-hong, WANG Shao-wu, ZHANG Xiang-dong, *et al.* Under the background of global warming of the atmospheric circulation basic mode. *Progress in Natural Sciences*, 2003, 13(4): 417-421.]
- [18] Lucarini V, Russell G L. Comparison of mean climate trends in the Northern Hemisphere between National centers for Environmental Prediction and two atmosphere-ocean model forced runs [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107, 4269, doi: 10. 1029/ 2001JD001247.

The Characteristics of Wind Speed Variation at Different Altitudes of Boundary Layer in Heilongjiang Province

YU Hong-min¹, REN Guo-yu², LIU Yu-lian¹

(1. Heilongjiang Climate Center, Harbin 150030, China; 2. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: Using the data of upper air and surface wind speed observed from Harbin, Nenjiang, Qiqihar and Yichun of Heilongjiang Province, from 1961 to 2010, the characteristics of variation of wind speed in boundary layers are analyzed. The following conclusions are drawn: 1) The annual mean wind speed increases with height from the ground to 900 m, and the distribution of wind speed at different time of the year has obvious characteristics of seasonal variation, with the maximum in springtime and the minimum in wintertime at near-surface layer, and the minimum in summertime at the remaining height layers; the maximum wind speed vertical increasing rate appears between 10 m and 300 m. 2) In 1961 – 2010, the largest mean wind speed at 10 m height is in the 1970s, and gradually decreases from the 1970s to the 2000s, with the smallest value occurring in the 2000s; at 300 m, 600 m, 900 m heights, the largest mean wind speed is in the 1980s, and wind speed gradually reduces from the 1980s to the 2000s, with the smallest value being in the 1960s at 300 m and in the 1970s at 600 m and 900 m. 3) During 1961 – 2010, the mean wind speed at 10 m is weakening and the diminishing rate is 0.162 m/(s · 10a), and the trend occurs mainly after the 1970s. At 300 m, 600 m and 900 m, the mean wind speed trends are not significant. 4) It seems that the significant slowdown trends of the surface wind speed in Heilongjiang Province is mostly caused by the fast urbanization and the change of observational environment.

Key words: climate change; wind energy resources; wind speed; boundary layers; Heilongjiang Province