

河北地区边界层内不同高度风速变化特征

刘学锋^{1,2} 任国玉² 梁秀慧¹ 秦 莉¹ 张成伟¹ 范增禄¹

(1. 河北省气候中心, 石家庄 050021; 2. 中国气象局气候研究开放实验室)

提 要: 为了研究城市化进程对风速变化的影响,利用 1971—2006 年河北省境内邢台、张家口和乐亭 3 个探空站高空风观测资料 and 对应地面站风观测资料,统计分析了边界层内距地面 10m、300m、600m、900m 4 个高度的长期风速变化特征,比较了不同高度风速变化趋势的异同。分析结果表明:3 站年和季节平均风速随着距地面高度的增加而变大,但最大的风速垂直递增率出现在从 10m 到 300m 之间;各站各高度层月平均风速具有明显的季节变化特征,春季风速最大,夏季较小;在近 36 年里,3 站平均的地面(10m 高)年和季节平均风速变化存在显著的减少趋势,300m 以上各高度层平均风速一般也降低,但远没有地面明显;不同高度平均风速变化趋势的差异可能主要是由城市化以及台站附近观测环境的改变引起的,这使得地面风速明显减弱;但地面以上各层平均风速同样存在一定减弱现象,说明背景大气环流的变化也是地面风速下降的原因之一。

关键词: 边界层 地面风速 高空风速 城市化

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

Liu Xuefeng^{1,2} Ren Guoyu² Liang Xiuhui¹ Qin Li¹ Zhang Chengwei¹ Fan Zenglu¹

(1. Climate Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021; 2. Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Center)

Abstract: In order to understand how urban development changes the variation of wind speeds, using the data of upper air and surface wind speed observed from Xingtai, Zhangjiakou and Laoting, Hebei Province, from 1971 - 2006, the characteristics of variation of wind speeds at altitudes of 10m (surface), 300m, 600m and 900m are analyzed. The similarities and differences of wind speed changes between the different altitudes of boundary layer are compared. Results indicate that annual and seasonal mean wind speeds of the three stations all increase with height; The

资助项目: 中国气象局气候研究开放实验室项目“河北地区城市化对边界层风速变化影响研究(LCS-2006-05)”和中国气象局气象新技术推广项目“观测环境和仪器变化对地面观测资料的影响评估(CMATG2008Z12)”和国家自然科学基金项目(40575039)资助

收稿日期: 2008 年 3 月 22 日; 修定稿日期: 2009 年 4 月 3 日

maximum wind speed vertical increasing rate appears between 10m and 300m; Monthly mean wind speeds at different altitudes for each station have the obvious characteristics of seasonal variation, with the largest wind speed occurring in springtime, and the smallest one in summertime; Surface annual and seasonal mean wind speeds for the 3-station average undergo a significant decreasing trend during the past 36 years; Wind speeds at altitudes from 300m to 900m also see a decreasing trend generally, but the trend is mostly insignificant statistically. Combined with the metadata of observational settings, it seems that the obvious difference of wind speed change between the different altitudes is attributable to the fast urbanization and the change of observational environment, which cause the slowdown of surface wind speed at the three stations. However, the change in atmospheric circulation might also contribute to the significant decrease of surface wind speed, because the wind speed at altitudes of 300m to 900m experiences the weakening trends during the same time period, in spite of the fact that the upper-layer trends are generally insignificant.

Key Words: boundary layer surface wind speed upper wind speed urbanization

引 言

风能资源开发过程中,风资源状况是能否进行风电开发的关键因素。在最新一次风能资源评价中发现,气象站距地 10m 高的观测风速呈现明显减小的趋势。那么地面风速减弱是否与城市化进程和台站周围观测环境变化有关?风速变化趋势在边界层内不同高度是否存在与地面相同的特点?深入了解这些问题,对于理解地面风速变化的原因具有重要参考价值。

近年来,许多学者^[1-12]对风速的变化特征及趋势进行了研究,一些研究发现了地面风速下降的现象。任国玉等^[1]发现:近 50 年来全国大部分地面台站观测的平均风速呈下降趋势,下降明显的地区变化速率可达 $-0.2 \text{ m s}^{-1}/10\text{a}$;毛飞等^[7]发现在青藏高原的那曲地区其风速的年代际变化也是减小的;彭珍等^[2]在北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究中指出:北京夏季平均风速呈现非常明显的逐年递减趋势,而且距离地表越近递减趋势越显著;卞林根等^[4]在对北京大气边界层风廓线观测研究中发现,除了近地层郊区的风速大于城区外,城区和郊区风

速的垂直分布特征有较大差异。在 100 至 200m 高度以下,城区和郊区风速和风向随高度分布都出现了明显的拐点,300m 以上高度风向和风速基本趋于一致。陈燕、刘宁微、刘学锋等^[3,8,11]研究也发现城市化发展对风速的变化是有影响的。

在这些研究中,有些限于地面气象站观测的风速变化分析,有些研究的资料时间尺度较短,对近地面边界层内不同高度、较长时间尺度的风速变化情况研究较少,对不同高度风速长期变化趋势特点还不是十分了解和清楚。因此,应用边界层内不同高度(近地面 10、300、600、900m)风速观测资料,比较研究不同高度近 36 年平均风速的变化情况,探讨城市化发展对风速变化的影响,以期对进一步识别引起近几十年地面风速变化的原因有所启示,同时为未来风能资源开发和规划,以及合理应用气象观测数据提供科学依据。

1 资料及方法

1.1 资料来源

资料来自邢台、张家口、乐亭 3 个气象站 1971—2006 年逐日探空和地面风速观测记录,3 个站分别位于河北不同气候区域,对于

河北全省城镇气象台站具有一定代表性。

邢台位于太行山山前平原(地级市),其观测场位于市区中部(表 1),1978 年 12 月、2000 年 1 月分别由原址西迁 100m 和 280m,1978 年 12 月至 1979 年 4 月仪器高度由 10.6m 升到 17.2m,1979 年至 2000 年期间观测场四周由原先的相对开阔环境,陆续成为由不同高度建筑物所环绕,自 2000 年搬入新址(公园内)之后,观测场周围再次变得相对开阔;张家口位于河北西北部(地级市),观测场位于南部城区,年主导风向(NNW)下风方,1971—2006 年期间没有迁站,仪器高度没有变化,在 1971—1982 年期间,观测场北到东南方向出现成排建筑物(大约 100m 左右),其余方向有孤立建筑物存在,1983 年之后从北到东南方向观测场(距离在 50~70m 左右)附近又有新建筑物竖起,在西南、西北方向也有新建筑物竖起;乐亭位于冀东平原,观测场位于县城西北郊外,主导风向(ENE)下游,在 1994 年 1 月由县城西郊迁址西北郊外,仪器高度保持不变,1971—1993 年期间观测场的北、西南—西北方向有建筑物,东、南方向是树林,1994 年迁到新址后,东北到东南方向(大约 100m 开外)有成排建筑物存在,西南和西北有建筑物,1997 年 1 月观测场南面(大约 100m)又矗立起建筑物,1998 年偏北方向(约 70m 左右)有新建筑物产生。

表 1 三个探空站位置及其变动情况

| 站号 | 站名 | 东经 (E) | 北纬 (N) | 海拔 (m) | 迁站址 时间 | 变更高 度时间 |
|-------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------------|------------|
| 53798 | 邢台 | 114°30' | 37°04' | 78 | 1978.12; 2000.01 | 1978.12 |
| 54401 | 张家口 | 114°53' | 40°47' | 725 | 无 | 无 |
| 54539 | 乐亭 | 118°53' | 39°26' | 27 | 1994.01 | 无 |

在研究过程中,将 3 个探空站每日 08、20 时两个时次不同高度测风资料进行了信息化处理,并用 2 个时次平均作为不同高度的日平均风速,依次统计了边界层内 300、

600、900m 高度的月、季、年单站平均风速和 3 站平均风速,同时计算该 3 个站近地面 10m 高 EL 型电接风 2 分钟 02、08、14、20 时次测风资料做为地面风速日平均值,并统计了与各高度层相对应的月、季、年平均风速。由于 3 个站均为国家基本站,因此资料的完整性较好,为了利于比较,均选用 1971—2006 年完整的 36 年资料。

1.2 计算方法

为定量分析风速的变化趋势,采用最小二乘法计算不同高度年及四季平均风速的变化倾向率^[10]。即计算样本与时间的线性回归系数:

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (t_i y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (1)$$

式中: y_i 为不同高度平均风速序列,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, t_i 为时间序列 ($t_i = 1, 2, \dots$), $n = 36$ 。称 $10 \times$ 为风速变化速率,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} / 10\text{a}$ 。 < 0 表示在计算时段内呈下降(减小)趋势, > 0 表示呈上升(增加)趋势。值绝对值的大小可以度量其上升(增加)、下降(减小)的程度。

季节划分是以 3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至翌年 2 月为冬季,季平均风速是该季 3 个月风速平均值,年平均风速则是年内 12 个月风速的平均值。计算风速距平值的基准时期是 1971—2006 年。

2 结果及分析

2.1 风速年内变化特征

图 1 为不同高度 3 个站点平均的月平均风速变化。图 1a 表明,不同高度平均风速具有明显季节变化特征,春季较大,夏季较小,风速最大值出现在 4 月份,最小值出现在 8

月份。多年平均风速随距地面高度增加而递增,10、300、600、900m高度年平均风速分别为2.3、6.3、6.9、7.1 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表2)。其中从10m到300m风速递增最明显,增幅达4.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,300m以上层次平均风速垂直递增速率明显减小,说明随着高度的增加风速受地面粗糙的影响在逐渐弱化。

就年内风速分布而言,邢台(图1b)、张家口(图1c)、乐亭(图1d)不同高度风速月际和季节变化基本一致。除张家口900m风速冬季较大,最大值出现在12月外,其余站点各高度风速均为春季最大,夏季最小,最大、最小值分别出现在4月、8月。

通过对同一高度3个站年风速变化比较,在600m以下各高度,风速从大到小为乐亭、张家口和邢台(表2);在900m高度,风速

从大到小为张家口、乐亭和邢台。从3个站年风速垂直变化梯度看,垂直递增速率从大到小为张家口、邢台、乐亭。这与3个站所处地理位置、地形条件、海拔高度和大气环流综合影响有关。乐亭地处冀东平原,位于渤海湾沿岸,由于海面粗糙度比陆地明显偏小,且当大陆高压东移出海变性加强,并停滞在海上,或太平洋高压显著加强,其后部或北部有低压(低槽)发展,则高压后部往往产生大风,所以乐亭地面风速较大,风速垂直递增速率最小;张家口海拔725m,地处冀北高原(海拔1300~1500m)南侧,为冬季冷空气南下必经之路,因此各高度层风速也较大,但由于近地层偏北气流受冀北高原阻挡,低层风速减弱,风速垂直递增速率较大;邢台地处太行山前平原,地势相对封闭,各层年风速均小。

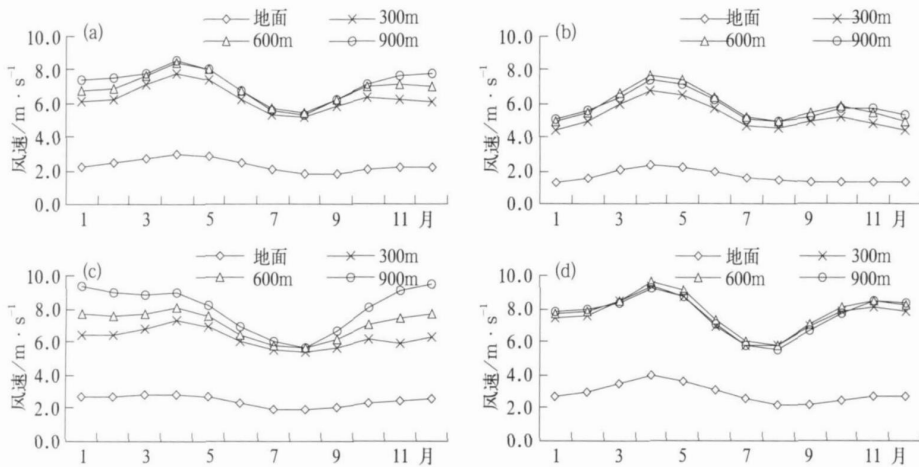


图1 边界层内不同高度风速月际变化图

(a) 3站平均; (b) 邢台; (c) 张家口; (d) 乐亭

表2 不同高度风速累年平均值 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(1971—2006年)

| 站名 | 地面 | 300m | 600m | 900m |
|-----|-----|------|------|------|
| 邢台 | 1.7 | 5.2 | 5.8 | 5.8 |
| 张家口 | 2.4 | 6.2 | 7.1 | 8.0 |
| 乐亭 | 2.9 | 7.5 | 7.8 | 7.6 |
| 平均 | 2.3 | 6.3 | 6.9 | 7.1 |

2.2 风速年代和趋势变化特征

2.2.1 年代变化特征

各年代3个站及其平均的年平均风速如表3所示,3站平均地面风速总体变化趋势从1970年代至1990年代呈现逐渐减小趋

势,其中 1970 年代到 1980 年代减小幅度最大,由 $2.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $2.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。单站变化基本相似,只是邢台在 1980 年代风速偏

小。但是,300、600、900m 各高度上 1970 年代至 1990 年代,3 站平均的风速各年代数值相差不大,没有明显年代际变化。300 至 900m 各单站年代际变化也没有明显规律。

表 3 边界层内不同高度各年代风速值 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

| 层次 | 站名 | 1970 年代 | 1980 年代 | 1990 年代 | 2001—2006 年 |
|--------|-----|---------|---------|---------|-------------|
| 地面 10m | 邢台 | 1.8 | 1.5 | 1.7 | 1.7 |
| | 张家口 | 3.1 | 2.3 | 2.1 | 2.1 |
| | 乐亭 | 3.5 | 3.0 | 2.5 | 2.2 |
| | 平均 | 2.8 | 2.3 | 2.1 | 2.0 |
| 300m | 邢台 | 5.4 | 5.2 | 5.3 | 4.8 |
| | 张家口 | 6.0 | 6.3 | 6.5 | 6.1 |
| | 乐亭 | 8.0 | 7.7 | 7.3 | 7.0 |
| | 平均 | 6.5 | 6.4 | 6.4 | 6.0 |
| 600m | 邢台 | 5.8 | 5.7 | 6.1 | 5.6 |
| | 张家口 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.0 |
| | 乐亭 | 8.1 | 7.8 | 7.7 | 7.6 |
| | 平均 | 7.0 | 6.9 | 7.0 | 6.7 |
| 900m | 邢台 | 5.8 | 5.7 | 6.0 | 5.7 |
| | 张家口 | 8.0 | 8.1 | 8.1 | 7.8 |
| | 乐亭 | 7.7 | 7.4 | 7.7 | 7.6 |
| | 平均 | 7.2 | 7.1 | 7.3 | 7.0 |

2.2.2 区域平均风速变化趋势

在所分析 36 年中,随高度和季节变化,3 站平均的年风速变化具有明显差异(表 4)。10m 高风速存在显著的递减趋势(表 4 和图 2a),递减率为 $-0.31\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10\text{a}$ 通过了 0.01 的显著性检验;随着高度上升,年风速变化趋势逐渐减小,在 900m 转化为弱的正值;300m 高度递减率为 $-0.11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10\text{a}$ (图 2b),

表 4 3 站平均不同高度风速变化速率 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10\text{a}$)

| 层次 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 年 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 地面 | -0.364 ** | -0.404 ** | -0.216 ** | -0.248 ** | -0.305 ** |
| 300m | -0.063 | -0.137 * | -0.088 | -0.140 * | -0.110 ** |
| 600m | -0.006 | -0.020 | -0.064 | -0.048 | -0.038 |
| 900m | 0.046 | 0.035 | -0.067 | 0.001 | 0.001 |

注: **为 $\alpha=0.01$ 水平下通过显著检验; *为 $\alpha=0.05$ 水平下通过显著检验

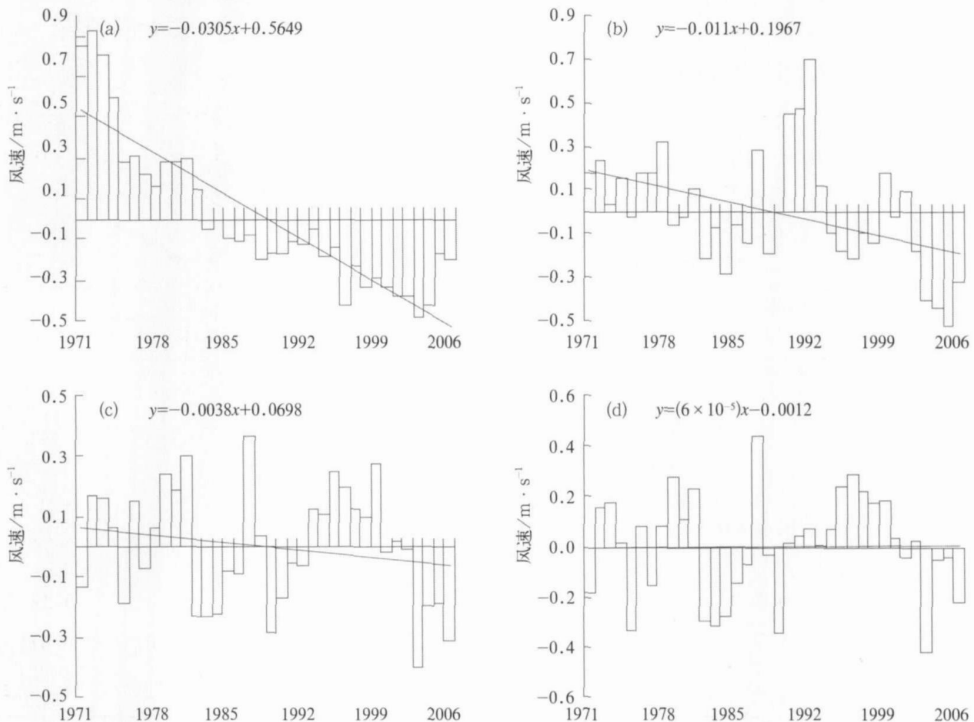


图 2 河北地区边界层内不同高度年平均风速距平变化 (a) 10m; (b) 300m; (c) 600m; (d) 900m。直线表示线性趋势

通过了 0.01 的显著性检验,而 600、900m 高度由递减转化为递增(图 2c、图 2d),变化趋势不显著,没有通过显著性检验。

各季节风速变化趋势有相似性。一般情况下,10m 高季节风速变化存在显著的递减倾向,春、夏、秋、冬季分别为 -0.40、-0.22、-0.25、-0.36 $m \cdot s^{-1} / 10a$,其中以春季最大,冬季次之,夏季最小,但各季节均通过了 0.01 的显著性检验(表 4);随着高度上升,季节风速递减率逐渐减小,由负值转化为正值,仅 300m 高度的春、秋季平均风速减少趋势通过了信度为 0.05 的显著性检验,其他高度的季节风速变化趋势均不显著。

2.2.3 单站风速变化趋势

各站不同高度年、季风速变化趋势呈现出各自特点(表 5)。邢台地面(10m)年及春、冬、夏三季平均风速变化趋势表现为递减,秋季略有递增,除春季风速变化通过了信度为 0.01 的显著性检验外,其他季节和年的变化趋势均没有通过显著性检验。这可能与邢台的迁站经历有关。距地面 300m 高层次上,除夏季外,年及各季风速变化趋势均通过了 0.05 的显著性检验,其中年平均风速变化趋势为 -0.16 $m \cdot s^{-1} / 10a$,通过了 0.01 的显著

性检验;距地面 600、900m 高度,年及各季风速变化速率或为正值或为负值,但均未通过检验,变化趋势不明显。

张家口地面年及各季平均风速变化均呈现递减趋势,而且趋势显著,均通过了 0.01 的显著性检验,其中年风速变化速率为 -0.37 $m \cdot s^{-1} / 10a$,各季中以冬季为最大,达 -0.48 $m \cdot s^{-1} / 10a$;在 300m 高度,年及各季风速变化均呈现递增趋势,其中年及冬、夏季平均风速增加通过了 0.05 的显著性检验,年风速变化速率为 0.17 $m \cdot s^{-1} / 10a$;在 600、900m 高度上,年和各季风速变化趋势有升有降,但均不显著。

乐亭在地面、300 和 600m 高度的年风速均呈现递减趋势,而且都通过了 0.01 的显著性检验,其中以地面年风速递减为最大,达 -0.49 $m \cdot s^{-1} / 10a$ 。600m 以下各高度四季平均风速也都呈递减趋势,除 600m 高度冬季没有通过显著性检验外,其余均通过了 0.05 的显著性检验,地面各季风速变化则通过了信度为 0.01 的显著性检验。尽管随高度增加平均风速下降速率呈现减小特征,但与其他两站比较,600m 以下风速递减率明显偏大。900m 高度年及各季风速变化趋势不显著。

表 5 各站不同高度年和季节平均风速变化趋势 ($m \cdot s^{-1} / 10a$)

| 层次 | 站名 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 年 |
|----------|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 地面 (10m) | 邢台 | -0.052 | -0.144 ** | -0.021 | 0.005 | -0.052 |
| | 张家口 | -0.476 ** | -0.468 ** | -0.239 ** | -0.323 ** | -0.372 ** |
| | 乐亭 | -0.564 ** | -0.601 ** | -0.386 ** | -0.428 ** | -0.492 ** |
| 300m | 邢台 | -0.174 * | -0.168 * | -0.122 | -0.168 * | -0.160 ** |
| | 张家口 | 0.202 * | 0.155 | 0.207 ** | 0.155 | 0.174 ** |
| | 乐亭 | -0.216 * | -0.398 ** | -0.350 ** | -0.406 ** | -0.345 ** |
| 600m | 邢台 | 0.001 | 0.006 | 0.003 | 0.004 | 0.031 |
| | 张家口 | 0.045 | 0.048 | 0.020 | 0.064 | 0.039 |
| | 乐亭 | -0.071 | -0.168 * | -0.245 ** | -0.247 ** | -0.184 ** |
| 900m | 邢台 | -0.001 | 0.007 | -0.005 | 0.006 | 0.0177 |
| | 张家口 | 0.052 | -0.002 | -0.074 | 0.005 | -0.011 |
| | 乐亭 | 0.090 | 0.037 | -0.078 | -0.066 | -0.004 |

注: **为 $\alpha=0.01$ 水平下通过显著检验; *为 $\alpha=0.05$ 水平下通过显著检验

3 讨论

近 50 年来包括河北在内的我国东部大部分台站地面风速呈明显下降趋势。对于观测资料中地面风速减弱的原因,目前还没有认识清楚。人们怀疑城市化和台站附近观测环境变化对风速下降可能有一定影响,但不同于对地面气温变化趋势中城市化影响的识别,对于地面风速变化中城市化影响识别更为困难,因为风速记录对微观环境变化非常敏感,采用对比城镇站与乡村站变化趋势方法常常不能奏效。在这种情况下,利用边界层内探空风资料,对比分析地面和边界层不同高度同期风速变化趋势,对于认识城镇化和台站观测环境变化对地面风速的影响,不失为一种比较有效的途径。

分析表明,3 个站不同高度上平均风速变化趋势的差异主要体现在地面与其他 3 个层次之间。与我国东部其他各级地面气象站一样,河北的 3 个探空站地面平均风速在近 36 年里也明显减弱。但是,这 3 个站近地面以上层次观测的风速变化一般不存在显著减弱趋势,与地面风速变化趋势差异显著。由于各站所处的地理位置和地形条件不同,各个高度平均风速变化趋势存在若干差别,但 3 站平均的风速变化趋势具有随高度减小现象,其中从地面到 300m 高度风速变化趋势的递减速率最大。这说明,近地面的风速受到不同程度的城市化以及台站附近观测环境变化的影响,出现显著的减弱趋势;随着高度增加,风速受城市化、地面粗糙度及微观环境变化的影响渐趋弱化甚至消失,风速减弱现象随之变得不明显。

最近的 36 年,河北省 3 个探空站所在地城市化进程加快,观测站周围环境遮蔽程度逐渐加大。邢台站曾有迁址经历,从建筑物密集城区迁往相对开阔的区域(公园内)造成

地面风速序列前后变化,部分抵消了本应下降的风速变化趋势,从对与邢台空间距离相近任县、南和和内邱等站风速资料分析中(递减率均通过了 0.01 的显著性检验)得到了进一步证实,邢台的风速变化因为迁站原因,其变化趋势有其特殊性,是该站地面风速变化趋势没有其他站显著的主要原因。张家口和乐亭站分别位于较大城市和小城市,城镇化速率也很快,观测场附近环境改变也比较大,在各自城市主导风向上游陆续有建筑物竖起,加之站址没有迁移,地面风速减弱趋势就非常明显。

但是,由于地面以上的其他层次风速也在一定程度上存在着减弱现象,特别是各站 300m 高度和乐亭 600m 高度,风速减少趋势比较明显,因此河北省地面风速的显著下降似乎又不完全是由于城镇化和观测环境变化引起的,大尺度背景环流场的变化可能也是原因之一。一些研究发现,在过去的 50 年,我国东部夏季风和冬季风环流均明显减弱^[11-12],对我国地面气温、降水和沙尘暴发生频率变化造成重要影响,也说明城市化和观测环境变化不是地面风速下降的唯一因素。

4 结论

应用河北省 1971—2006 年 3 个站点的探空和地面风速资料,分析了边界层内不同高度风速的变化趋势,获得以下结论:

(1) 边界层内不同高度年平均风速随着距地面高度的增加而变大,风速在年内时间分布上具有明显的季节性特征,春季风速最大,夏季较小。10m 到 300m 风速垂直递增速率最大。

(2) 在近 36 年内,地面平均风速从 1970 年代至 1990 年代呈现逐步减小趋势,其中 1970 年代到 1980 年代减小幅度最大,但

300m 高度以上 1970 年代至 1990 年代的变化没有明显规律可循。在整个分析时期,各站平均风速线性变化趋势最显著的层次仍然在地面,300m 以上各高度层风速变化趋势尽管也多为负值,但一般不明显。

(3) 不同高度平均风速的差异主要是由城市化以及台站附近观测环境的变化引起的,这使得地面风速明显减弱;但地面以上各层风速也有减弱现象,说明大尺度大气环流的变化是地面风速下降的另一原因。本文所分析的 3 个台站地面平均风速减弱现象应为城市化、观测环境变化和大气环流变化共同作用的结果。

致谢: 李元华、田国强、刘莉同志参加了资料整理和统计工作,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [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.
- [2] 彭珍,胡非.北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究[J].地球物理学报,2006,49(6):729-732.
- [3] 陈燕,蒋维楹.南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J].地球物理学报,2007,50(1):66-73.
- [4] 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.
- [5] 李倩,刘辉志,胡非,等.大风天气下北京城市边界层阵风结构特征[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(1):40-44.
- [6] Dupont E, Menut L, Carissimo J, et al. Comparision between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment[J]. Atm Environment, 1999, 33:979-994.
- [7] 毛飞,卢志光,郑凌云,等.近 40 年那曲地区日照时数和风速变化特征[J].气象,2006,32(9):77-83.
- [8] 刘宁微,马雁军.城市化发展对气象要素的影响[J].气象,2006,32(9):28-34.
- [9] 傅玮东,姚艳丽,李迎春.新疆吉木萨尔县 45 年气候变化特征分析[J].气象,2007,33(6):96-101.
- [10] 韩素芹,刘彬贤,解以扬,等.利用 255m 铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J].气象,2008,34(1):54-58.
- [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.
- [12] 植石群,钱光明,罗金铃.广东省沿海风随高度变化研究[J].热带地理,2001,21(2):131-134.
- [13] 施能,陈家其,屠其璞.中国近百年来 4 个年代际的气候变化特征[J].气象学报,1995,55(4):431-439.
- [14] 丁一汇,董文杰,何金海,等.亚洲季风及其与中国气候和环境变化的关系[M].中国气候与环境演变(上卷).北京:科学出版社,2005:422-428.
- [15] 姜大膀,王会军.20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性[J].科学通报,2005,15:74-80.