陈洪武，辛渝，陈鹏翔，等. 2010. 新疆多风区极值风速与大风日数的变化趋势 [J]. 气候与环境研究，15 (4)：479－490. Chen Hongwu，Xin Yu，Chen Pengxiang，et al. 2010. Variation tendency of the extreme value of wind speeds and gale frequency over the windy regions in Xinjiang [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese)，15 (4)：479－490.

新疆多风区极值风速与大风日数的变化趋势

陈洪武 辛渝 陈鹏翔 李元鹏 余行杰 白素琴 王胜利

新疆维吾尔自治区气候中心，乌鲁木齐 830002

摘 要 在新疆5大风区代表气象站历史风况资料均一化处理基础上，从平均风速、极端风速强度、极端风速频次、大风持续时间等4个方面分析了极端风气候特征的演变趋势。结果表明：1）达坂城风区瞬间风速≥17.0 m·s^{-1}的年大风日数以及极端弱风频次没有显著的变化趋势，但极端强风的强度显著减弱，发生频次显著减少，大风年时数与最长持续时间仅从20世纪90年代中期显著减少，风力可利用时间增加。2）阿拉山口风区极端强风的强度显著减弱，极端强风频次与极端弱风频次均显著减少，大风日数、大风年时数、大风年最长持续时间均从20世纪90年代中期显著减少，风力可利用时间增加。3）十三间房风区仅极端弱风的频次显著增加、平均风速显著减小，其余变化均不明显。4）淖毛湖与哈巴河呈现出对称的极端强风强度显著减弱、极端强风频次显著减少、极端弱风频次显著增加趋势，大风日数、大风年时数、大风年最长持续时间等虽呈显著的减小趋势，但具有很大不确定性。5）十三间房风区平均风速的显著减小主要是弱风天数增加引起的，而其余风区则主要是由极端强风的强度减弱引起，极端风力频率和持续时间的影响作用相对略小。

关键词 极端风速 大风日数 气候变化 新疆

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0479-12 **中图分类号** P425.4＋7 **文献标识码** A

Variation Tendency of the Extreme Value of Wind Speeds and Gale Frequency over the Windy Regions in Xinjiang

CHEN Hongwu, XIN Yu, CHEN Pengxiang, LI Yuanpeng,
YU Xingjie, BAI Suqin, and WANG Shengli

Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Urümqi 830002

Abstract Based on the historical wind data of five weather stations over the windy regions in Xinjiang, and using the homogeneous approach, the extreme climatic revolution tendencies of the wind characteristics were analyzed mainly aiming at four aspects, that is the mean wind speed, the intensity and the frequency of the extreme strong or weak wind, the duration of gale. The results show as follows: 1) No obvious variation tendency showed in the annual frequency of gale in Dabancheng as well as the extreme weak wind, while an evident weaken tendency existed in the intensity of extreme strong wind and a descending trend in the frequency of that. The annual duration of gale and its longest duration have experienced an obvious reducing trend only since the mid of the 1990s. So the chance of available wind power is rising. 2) The intensity of the extreme strong wind was strikingly reducing while the frequen-

收稿日期 2010-01-30 收到，2010-05-19 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑计划课题 2007BAC29B02、国家自然基金 90915001、中国气象局行业专项项目 2008416048、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 IDM200603 和新疆气象局业务新技术课题 YX201004

作者简介 陈洪武，男，1961年出生，学士，正研级高工，主要从事气候变化与气象能源研究。E-mail：0991chw@163.com

cy of that was descending as well as the extreme weak wind in Alataw Shankou, and the frequency of gale, annual duration of that and its longest duration have descended evidently only since the mid of the 1990s, so that the chance of available wind power has been increasing. 3) Only the frequency of the extreme weak wind experienced an obvious ascending trend, so that the annual mean wind speed descended strikingly in Shisanjianfang windy region. 4) The frequency and the intensity of the extreme strong wind showed an obvious decrease and weaken trend while evident raising tendency in the frequency of the extreme weak wind over Naomaohu and Habahe Xian windy regions. The frequencies of gale, its annual duration and the longest duration have reduced strikingly, but these situations were uncertain because of the damaged observational surrounding near the stations. 5) The annual mean wind speed reduced obviously mainly caused by the ascending in the frequency of the extreme weak wind in Shisanjianfang windy region, while caused by the weakening in the intensity of the extreme strong wind in the other areas by the means of contrasting with the frequency and the duration.

Key words extreme value of wind speed, frequency of gale, climate change, Xinjiang

1 引言

自 IPCC 第二次评估报告（Ando et al.，1995）以来，气候研究中关于极端气候事件的强度和频率变化以及极端气候指标定义和分析技术（丁裕国和江志红，2009）方面的研究日益增多。通过这些研究，人们力图回答“气候是否更易变了或者变得更加极端化了?”这一问题。而且学术界提供的极端气候指数也在不断增加，但大部分与降水和温度有关，对风的极端指标定义及其研究却十分少见。特别是对新疆地区极端风速变化的专门研究，到目前为止还未见报道。前人有关新疆风速变化以及相关的沙尘天气发生频次、强度变化等的研究表明，新疆多风区的大风［瞬间风速≥17.0 m·s^{-1}（中国气象局，2003)］日数在明显减少（张家宝和史玉光，2002；何清等，2003)，有些站点的平均风速也在显著减小（辛渝等，2008)。这些结果与针对国内其他地区的研究有相似性（范一大等，2005；刘学锋等，2009a，2009b)。但是，目前还不清楚在近几十年里位于新疆几大风能丰富区的平均风速和极端强风频率、强度是否发生了明显变化? 弄清这个问题，对于当地防灾减灾、科学评价风能资源开发潜力等，具有实际意义。

2 资料来源

本研究根据新疆阿拉山口、达坂城、十三间房、淖毛湖、哈巴河县等代表站资料，重点从年平均风速（年平均最大风速、大风年持续总时数)、日平均风速（日最大风速）的年极端风速、日平均风速（日最大风速）的极端风速年频次以及大风最长持续时间，即从风速的年平均变化（或大风日数的平均变化)、极端强风时强度的变化、极端风速频次的变化、强风持续时间（即以大风最长持续时间近似替代极端强风持续时间，下同）等 4 个层面 10 个统计量的时间序列进行全面分析。

挑选出的 5 站有过因迁站、资料序列的时距时次不一、测风仪高度多变且变幅大、仪器换型、观测方法变更（由人工改自动）以及资料精度改变等致使风速序列非均一现象（见表 1)。而且这些变化不同步，甚至没有平行对比观测，使得资料的时空可比性大大降低。另外，有些测站还存在因环境改变、仪器超检、老化或故障、人员变更造成的不同时期观测误差差异等不明原因有可能致使测风资料序列不均一的现象。因此，为了能够比较客观地反映风的气候演变，研究时段均为测风仪使用期最长的 EL 型感应仪时期，但根据期间各个测站风观测项目的不同，本文所定义的不同研究对象又各有不同的研究时段（见表 2 注)。

资料来源于新疆气象信息中心审核通过的新疆所有气象站建站以来的所有风资料记录与台站历史沿革信息以及国家气象信息中心提供的新疆所有探空站 17 层等压面上的逐月平均风速等。另外还有新疆气候中心收集整理的 2009 年 5～11 月阿拉山口、达坂城、哈巴河县、十三间房等风能资源详查区各 3 座和淖毛湖 1 座共 13 座气象测风塔资料，以及 2006～2008 年上述风能资源详查区

表 1　造成各气象站风速资料序列非均一的直接原因

Table 1　Direct reasons resulting in the inhomogeneity of the data time series of the wind speeds at each station

		变动项目及开始时间							
站点	研究时段	测仪高度/m	EL 电接型风仪替换维尔达风向风速感应仪	EL2 型瞬时风向风速自记记录	EL 型电接风向风速自记	测站搬迁	EC 感应仪替换 EL 感应仪与 2 min 时距平均风速精度改变	仪器变化 *	观测时次变更
阿拉山口	1969～2000 年	6.9～12.2	1968－03－01		1971－01－01	2001－07－01	2005－01－01	1993－08－01	
达坂城	1969～2004 年	10.3～11.4	1968－03－12	1971－04－01	1977－05－01		2005－01－01	1993－08－01	
哈巴河	1969～2004 年	11.1～12.2	1969－01－01		1985－08－01		2005－01－01	2005－01－01	
十三间房	1969～1998 年	7.8～10.1	1968－09－01			1999－01－01	2005－01－01	2005－01－01	
淖毛湖	1970～2004 年	10.3～10.8	1969－10－01				2005－01－01	2005－01－01	1985～1987 年以及自 2003 年始为 4 次定时观测，其余为 3 次观测且夜间不定班

注：* 包括 EN 测风处理仪替换 EL 电接风速自记引起测风精度或仪器性能改变以及 2 min 时距平均风速由人工目测改为 EN 器测、大风天气现象由目测改为器测。

9 座企业测风塔完整年度的铁塔资料等。这些测风塔与距离最近的气象站点的地理环境、气候特征均相似（见图 1）。

3　资料序列的预处理

3.1　缺测值的插补

由于仪器故障以及人为因素等，有的测站风况序列存在一定缺测。其中，哈巴河县站日最大风速的完整率为 99.0%，阿拉山口为 99.6%，达坂城为 99.2%。为了消除其影响，参照 Karl and Knight(1998) 进行了专门的插补：将缺测年前后 10 年的当日观测值作为样本，利用等概率随机数发生器，随机选取其中一个值代替缺测。这可能对本文研究对象及其长期变化趋势的估计有些保守，但不会影响其本质。

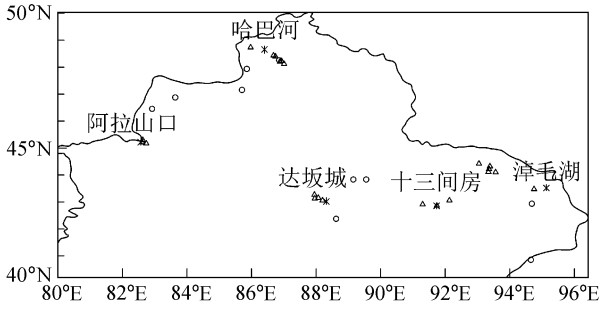

图 1　新疆多风区代表气象站、测风序列相对均一参考气象站、测风塔的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of the meteorological stations in windy areas, the relative homogeneity reference stations of data time series, and the anemometer towers in Xinjiang

3.2　2 min 时距平均风速统计序列的均一化处理

根据测站“元数据”，在直接的非均一性检验与订正（时次一致性订正、高度一致性换算）基础上，根据与邻近测站的空间相关水平，构建与之相关的相对均一的参考序列，采用 Potter (1981) 客观非均一性检验对 5 站进行了检验（见图 2）。同时对诊断的可靠性还采用独立于测站密度的方法予以验证：第一，以各站的本站气压为均一化参考序列进行验证；第二，将历年 12 月的平均风速按 North 法则进行经验正交分解 (EOF)，对分解的第一时间系数采用严格的非参数化 Mann-Kendall 检验进行突变分析。其中，时次一致性订正是指对于 3 或 4 次定时 2 min 时距并

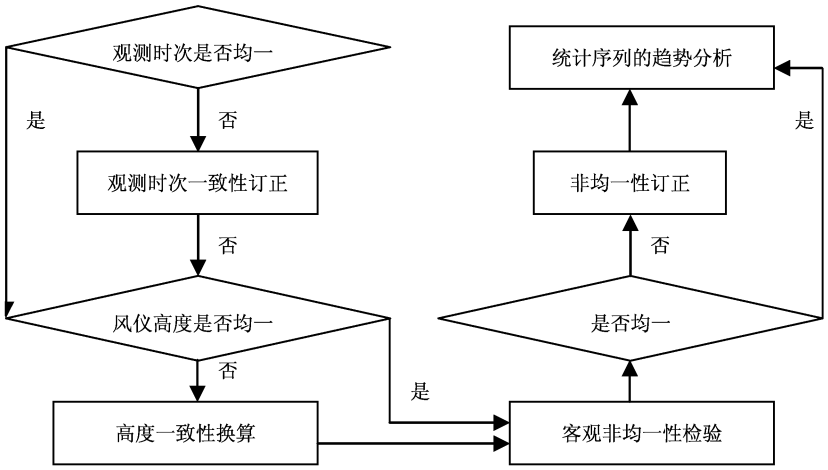

图 2 平均风速统计序列的均一化订正流程

Fig. 2 Homogeneity adjustment flow chart of the mean wind speed time series

存的统计序列，均将 4 次定时的统计值按 3 次重新统计。对于测站风仪高度不一致的，按照“风电场风能资源评估方法（GB/T 18710－2002）[①]”，参照附近测风塔资料计算得到的风切变指数，将不同时期的风速统计值换算到同一高度处。经计算，哈巴河县、阿拉山口、达坂城、淖毛湖、十三间房风切变指数的平均值分别为 0.14、0.13、0.11、0.09 和 0.07。对于其他需在客观非均一性检验中参照的站点资料，也根据附近测风塔资料计算得到的风切变指数进行风仪高度一致性订正，附近无测风塔的测站，则暂按推荐值 0.16 进行高度一致性换算。

对检测出的非均一性序列，则采用 Hans（1986）的标准正态均一性检验（SNHT）方法，参照附近风况序列相对均一的测站（见图 1）资料进行了“环境影响（包括广义的测站环境变化、观测方法变更、人员变动等外在因素引起的变化）”的非均一性订正。事实上这种订正尚不够严格，因环境变化对测风的影响既可能是突变过程，也可能是渐变过程，二者目前难以区分，暂按非均一性检验检测出的间断点以突变对待。

限于篇幅，上述非均一化检验与均一化订正的过程将另文给出，在此仅给出结果。淖毛湖、哈巴河县、达坂城均因测站环境变化等不明原因影响了年平均风速序列的均一性，显著“间断点”分别出现在 1989 年（1997 年，淖毛湖站两度影响）、1985 年、1988 年，显著性水平均达 0.01 以上。阿拉山口、达坂城两站并未因 1993 年 8 月 1 日起定时 2 min 时距的平均风速由人工观测改为 EN 型自动处理仪而使年值序列在更新仪器前后出现间断。

3.3 观测方法改变致使日最大风速间断的一致性处理

阿拉山口、达坂城两站自 1993 年 8 月 1 日起，风速的测量从人工计数“电接点”改为由 EN 型自动处理仪计算。采用 Potter 法检验发现，两站均因观测方法的变更造成日最大风速序列间断。这是显而易见的主观误差和人为误差共同造成的。数字测风处理仪比电接风的测量精度要高，两者的测量偏差不可避免。在新疆的实际业务中，这种容许误差范围是，当 10 min 平均风速≥7.0 $m \cdot s^{-1}$时，最大容许误差不得超过 10%。因此，在对日最大风速序列进行分析时需根据风速的大小进行均一化订正。在此，为了把复杂问题简单化，暂且把 EL 型人工观测看作是参考标准（目的是为了只做少量的误差修正），把误差算到自动仪器上（胡玉峰，2006）。但是为了保守起见，在此只取平均容许误差的 5%，仅对日最大风速≥10.0 $m \cdot s^{-1}$时所产生的“可能误差值”进行系统性订正。

① 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 风电场风能资源评估方法（GB/T 18710－2002）[S]. 2.

3.4 观测方法改变致使大风日数间断的一致性处理

经 Potter 法检验发现，观测方法的变更同样也造成年大风日数序列的间断。对阿拉山口、达坂城两站的年大风日数序列进行均一化订正的方法如下：以 EL 型人工观测到的大风为标准，建立期间各站年平均风速（x）与年大风日数（y）的线性回归方程（r 表示相关系数）

阿拉山口：

$$y=-12.8596+27.7760x\ (r=0.7178),\quad (1)$$

达坂城：

$$y=-25.7475+29.0917x\ (r=0.7882),\quad (2)$$

以此为基础，将 EN 型观测到的年平均风速代入该方程即可求得逐年的大风日数，替代 EN 数字测风处理仪观测到的年大风日数。事实上，这种“计算的年大风日数”一般略大于 EN 型数字处理器器测的大风日数，说明该方法是对“EN 型漏测大风补记”的有效手段。但对大风天气现象持续时间暂时无法做到人工与自动观测记录的一致性订正，按原始记录分析。以下所涉及的日平均风速、日最大风速均是经过环境、观测方法或高度一致性订正后的风况序列而言的。

4 极端“强风”事件定义及其阈值的确定

由于逐时、逐日平均风速以及日最大风速的边际分布在多数情况下是偏态的（一般符合 Weibull 或 Rayleigh 分布），若用正态序列的极值诊断公式来估计其特征量，则会产生较大误差。因此，本文专门根据有自记风记录的阿拉山口、达坂城、哈巴河县气象站的日最大风速序列定义了不同风区极端“强风”事件的阈值。具体作法：将研究时段内日最大风速序列的第 95 个百分位上的值定义为极端“强风”事件的阈值，当某站某日最大风速超过极端“强风”事件的阈值时，就称之为一次极端“强风”事件。这也是目前国际上在气候极值变化研究中最多见的将某个百分位值作为极端值的阈值检验方法，以突出极端事件的不同地域性特征。对极端事件阈值的确定，一般有非参数和参数［如 Gamma 分布函数（丁裕国和江志红，2009）］两种确定法。本研究对于极端“强风”阈值的确定采用 Bonsal et al.（2001）的非参数化方案。步骤如下：

设某站的日最大风速有 n 个值，将这些值按升序排列 x_1，x_2，…，x_m，…，x_n，某个值小于或等于 x_m 的概率 p 可表示为

$$p=\frac{m-0.31}{n+0.38},\quad (3)$$

其中 m 为 x_m 的序号。据此得到了 3 个气象站的极端“强风”阈值（见表 2）。若按朱瑞兆（1984）对西北地区不同时距的经验换算公式推算：哈巴河县站日最大风速极端最大阈值为 13.7 m·s^{-1}，相当于瞬间风速≥20.3 m·s^{-1}（蒲氏 8 级大风以上）、2 min 平均风速≥14.7 m·s^{-1}的极端强风，阿拉山口日最大风速的极端最大阈值相当于瞬时风速≥36.5 m·s^{-1}（蒲氏 12 级）、2 min 平均风速≥26.7 m·s^{-1}的极端强风，达坂城日最大风速的极端最大阈值相当于瞬间风速≥28.8 m·s^{-1}（蒲氏 11 级以上）、2 min 平均风速≥21.4 m·s^{-1}的极端强风。

同时，为了考察十三间房、淖毛湖无自记风记录台站的极端风速变化，在此特别地以日平均风速为考察对象，将其最大、最小的极端阈值也按上述方法确定（极端最小值按第 5 个百分点，见表 2）。凡出现日平均风速大于日平均风速极端最大阈值者，也视为该日有极端强风天气。反之，小于日平均风速极端最小阈值者，表示该日出现极端弱风天气。可见，对于哈巴河县、淖毛湖、十三间房风区而言，日平均风速≤1.0 m·s^{-1}即为极端弱风天气，与其他非多风区弱风时的风力一致。

表 2 中，各种极端风速的发生频次或大风频次以及大风年时数以年为单位进行合计。对于历年极端强风强度的确定，则是为了避免单个极值记录可能存在的偶然性，用每年 10 个最极端记录的平均（合计）来表示该年度的极端气候状况。即将每年的日平均风速、日最大风速、大风最长持续时间序列分别按年从大到小排序，把每年前 10 个最大的日平均风速或日最大风速的平均值作为极端最大风力强度，把每年前 10 次最长的大风持续时间之和作为极端强风持续期。

表 2 新疆多风区风统计序列的线性趋势

Table 2 The linear trend of the wind statistical time series over the windy regions in Xinjiang

	年平均风速/ $m \cdot s^{-1}$	日平均风速年极端最大值/ $m \cdot s^{-1}$	日平均风速极端最小值的年频次(阈值)/ $m \cdot s^{-1}$	日平均风速极端最大值的年频次(阈值)/ $m \cdot s^{-1}$	年大风日数	年平均最大风速/ $m \cdot s^{-1}$	日最大风速年极端最大值的线性变化趋势/ $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$	年极端强风频次的线性变化趋势/ $d \cdot a^{-1}$	年总时数的线性变化趋势/ $h \cdot a^{-1}$	年极端最长持续时间的线性变化趋势/ $h \cdot a^{-1}$
哈巴河	−0.03**	−0.06**	0.65** (1.0)	−0.52** (9.1)	−0.89**	−0.10**	−0.18**	−1.31** (13.7)	−8.16**	−2.67**
阿拉山口	−0.01*	−0.10**	−0.59** (1.3)	−0.43** (14.2)	−0.43**	0.01	−0.13**	−0.69** (24.3)	−9.25**	−1.22*
达坂城	−0.01	−0.05**	−0.01 (2.3)	−0.26* (13.2)	−0.55	−0.02	−0.08**	−7.913	−19.9**	−2.69**
十三间房	−0.02*	−0.02	1.03** (0.5)	−0.26 (10.2)	1.03				0.89	−0.18
淖毛湖	−0.04**	−0.06**	0.69** (0.8)	−0.53** (11.3)	−1.62**				−6.69**	−0.78**

注：*、** 分别表示通过了 0.05、0.01 以上的显著性检验。哈巴河、达坂城有关日平均风速、大风日数、大风时数的研究时段为 1969～2004 年，有关日最大风速的研究时段分别为 1986～2004 年、1972～2004 年；阿拉山口站有关日平均风速、大风日数、大风时数的研究时段为 1969～2000 年，有关日最大风速的研究时段为 1971～2000 年；十三间房、淖毛湖无日最大风速观测，有关栏空白，其余研究对象的时段分别为 1969～1998 年、1970～2004 年。

5 各统计量的变化趋势、突变分析及其检验

采用趋势系数（魏凤英，2007）对表 2 中 4 个层面风速的年平均变化（或大风日数的平均变化）、极端强风时强度的变化、极端风速频次的变化、强风持续时间（以大风最长持续时间近似替代极端强风持续时间）10 个统计量的变化进行分析。趋势的显著性检验采用非参数化的 Kendall 秩次相关检验（辛渝等，2008）。此法的优点在于它允许缺测值的存在，并且无需证明资料服从某一特定分布。此外由于该法的本质就是用来检验资料的相对量级的，故资料本身量级很小时，依然可以使用。突变检验采用非参数化的 Mann-Kendall 检验（魏凤英，2007）。

6 结果分析

6.1 年平均风速、日平均风速年极端最大值及其变化趋势

新疆风区的年平均风速的确在减小，除达坂城外，其余均达到了 0.05 以上的显著性水平（图 3），但平均递减率均小于以往研究（张家宝和史玉光，2002；杨青等，2003；辛渝等，2008）。其中，阿拉山口、达坂城、十三间房的年平均风速递减率仅 0.01～0.02 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$，与统计平均所要求的精度以及本身的量值相比，这种变化微乎其微。但是，哈巴河县、淖毛湖风区多年平均风速虽远小于上述强风区，风速的年平均递减率却较大，这可能与对这两站的环境均一化订正不足有关，也可能与各风区对气候变化的敏感响应度不同有关。年平均风速的减小主要体现在 20 世纪 90 年代以后，这是大气候变化背景中的共同点。

每年日平均风速的极端最大值除十三间房无明显变化外（图 4），其余均显著减小，显著性水平达 0.01 以上，其中阿拉山口减小最显著，以 0.10 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 的平均速率递减，其他站以 0.05～0.06 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 的平均速率递减，仍然是 20 世纪 90 年代后减弱幅度最大。另外，从有风自记记录的哈巴河县、阿拉山口、达坂城站的日最大风速年极端最大值的变化趋势看，强度也在显著减弱，显著性水平达 0.01 以上。这说明这些风区极端强风的强度在显著减弱。特别是哈巴河县站，尽管气候平均上的风力强度以及极端强

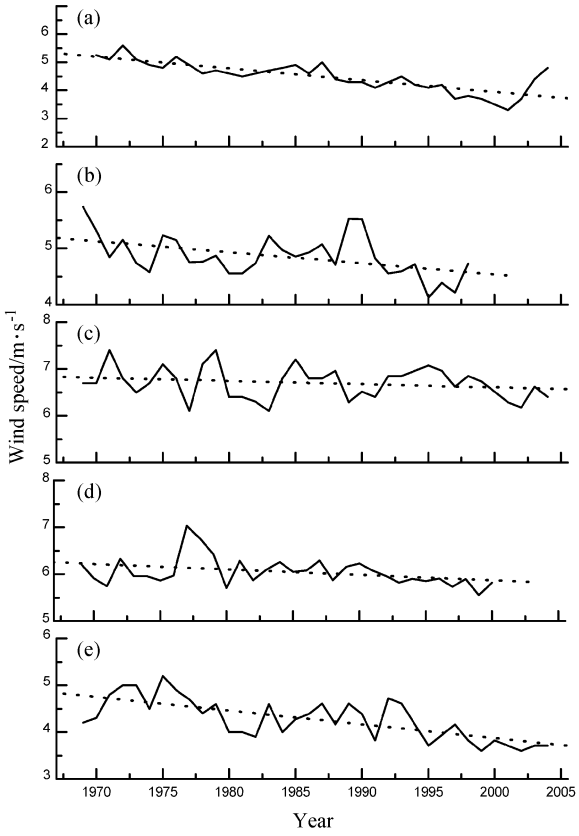

图 3　年平均风速（实线）及其线性趋势（虚线）：（a）淖毛湖；（b）十三间房；（c）达坂城；（d）阿拉山口；（e）哈巴河县

Fig. 3　Variation (solid line) and its linear trend (dashed line) of the annual mean wind speeds: (a) Naomaohu; (b) Shisanjianfang; (c) Dabancheng; (d) Alataw Shankou; (e) Habahe Xian

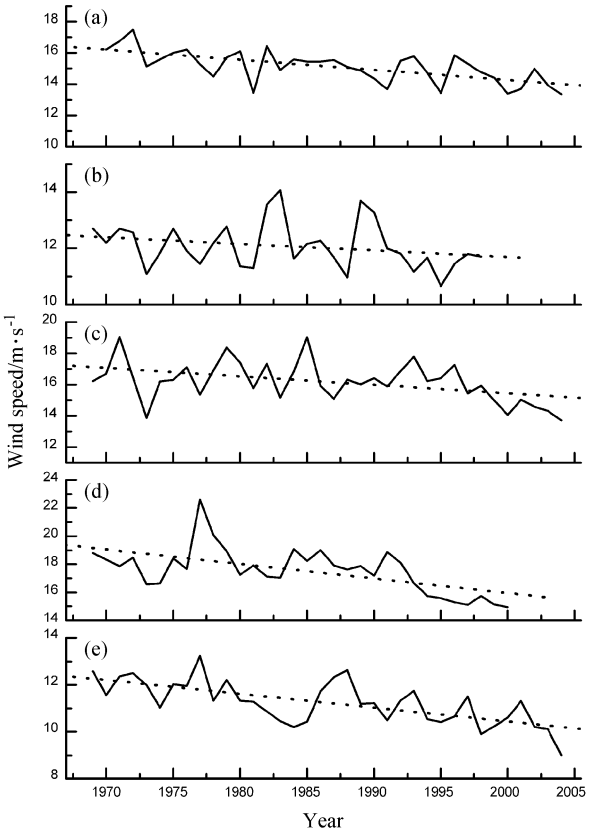

图 4　同图 3，但为日平均风速极端最大值

Fig. 4　Same as Fig. 3, but for the extreme maximum of the daily mean wind speeds

风的强度远不及阿拉山口、达坂城风区，但极端强风强度的平均递减率远远大于这些风区，这可能主要与该站的测站环境造成测得风速减小幅度最大有关。

6.2　极端风速频次与年大风频次的变化趋势

除十三间房站日平均风速年极端最大的频次无明显变化趋势外，其余以 0.26～0.53 d·a^{-1}的速率显著减少，仍是淖毛湖、哈巴河县的递减率最大。这说明极端强风的强度减弱的同时，极端强风的频次也在显著减少。从图 5 可见，极端强风减少的频次始于 20 世纪 90 年代初期以后。另一方面，哈巴河县、十三间房、淖毛湖日平均风速≤1.0 m·s^{-1}的极端弱风的天数显著增加，突变检验表明，3 站均在 1980 年前后突变增加，显著性水平均达 0.01 以上。而阿拉山口风区，日平均风速≥14.2 m·s^{-1}或日最大风速≥24.3 m·s^{-1}的极端强风的频次虽然显著减少了，出现极端弱风（日平均风速≤1.3 m·s^{-1}）的频次并没有因此增加，反而也显著减少了，且突变检验表明，两者均在 1993 年前后突变减少。对达坂城风区而言，日平均风速≥13.2 m·s^{-1}或日最大风速≥19.0 m·s^{-1}的极端强风频次虽显著减少了（检验无突变），但日平均风速≤2.3 m·s^{-1}的极端弱风频次并没有显著的变化趋势（图 6）。

十三间房、达坂城风区的年大风日数变化不显著，其余 3 站显著减少（图 7）。其中，淖毛湖站的减少趋势最大，年均减少 1.5 d 左右，不确定性也最大。因为该站大多时期夜间不守班，年大风日数的观测有可能不完整，同时，该站测风环境破坏也比其他各站要大得多，两度因测站环境影响而间断。其次，哈巴河县站年均减少近 1 d，也是因测风环境变化导致该站大风日数减幅偏

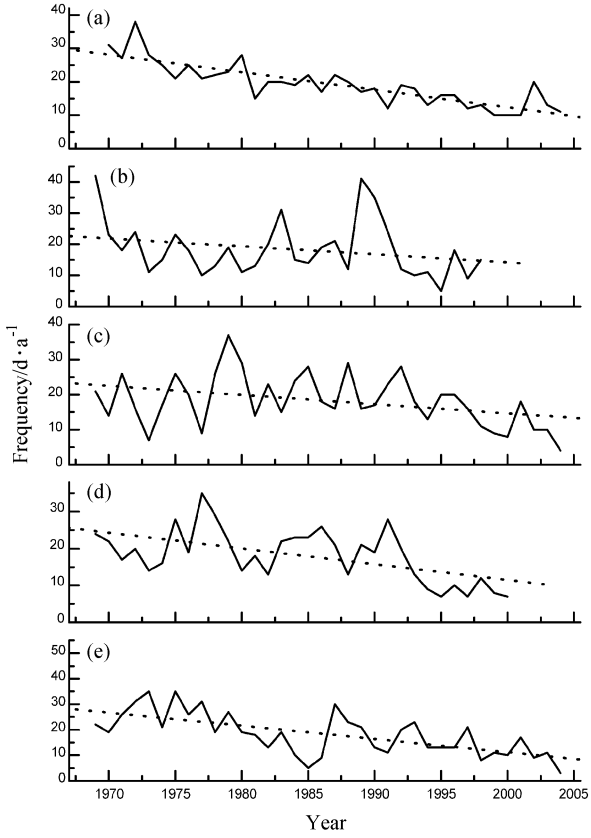

图5 日平均风速年极端最大频次的变化：(a) 淖毛湖（日平均风速≥11.3 m·s^{-1})；(b) 十三间房（日平均风速≥10.2 m·s^{-1})；(c) 达坂城（日平均风速≥13.2 m·s^{-1})；(d) 阿拉山口（日平均风速≥14.2 m·s^{-1})；(e) 哈巴河县（日平均风速≥9.0 m·s^{-1})

Fig. 5 Variations of the frequency of the extreme maximum daily mean wind speed: (a) Naomaohu (daily mean wind speed≥11.3 m·s^{-1}); (b) Shisanjianfang (daily mean wind speed≥10.2 m·s^{-1}); (c) Dabancheng (daily mean wind speed≥13.2 m·s^{-1}); (d) Alataw Shankou (daily mean wind speed≥14.2 m·s^{-1}); (e) Habahe Xian (daily mean wind speed≥9.0 m·s^{-1})

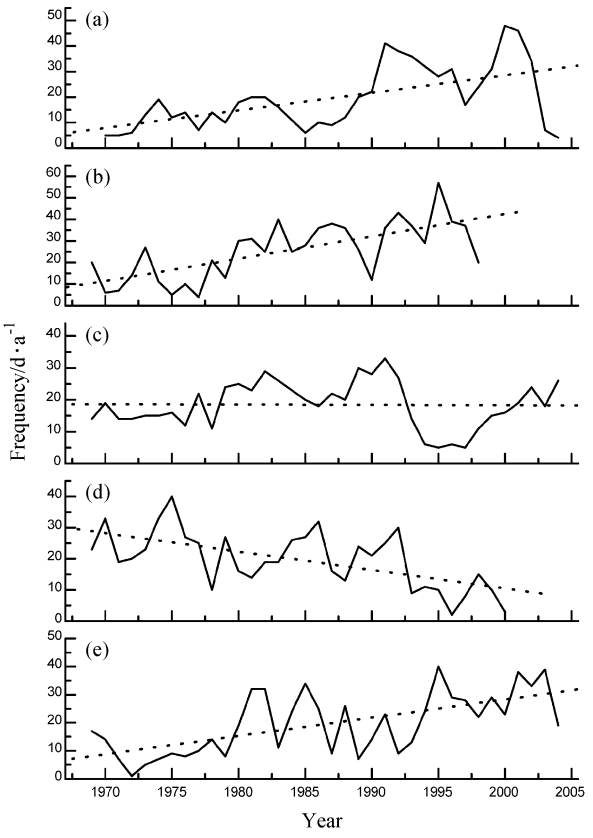

图6 日平均风速年极端最小频次的变化：(a) 淖毛湖（日平均风速≤0.8 m·s^{-1})；(b) 十三间房（日平均风速≤0.5 m·s^{-1})；(c) 达坂城（日平均风速≤2.3 m·s^{-1})；(d) 阿拉山口（日平均风速≤1.3 m·s^{-1})；(e) 哈巴河县（日平均风速≤1.0 m·s^{-1})

Fig. 6 Variations of the frequency of the extreme minimum daily mean wind speed: (a) Naomaohu (daily mean wind speed≤0.8 m·s^{-1}); (b) Shisanjianfang (daily mean wind speed≤0.5 m·s^{-1}); (c) Dabancheng (daily mean wind speed≤2.3 m·s^{-1}); (d) Alataw Shankou (daily mean wind speed≤1.3 m·s^{-1}); (e) Habahe Xian (daily mean wind speed≤1.0 m·s^{-1})

大。如将大风观测分为人工目测与器测两个阶段分别考虑，阿拉山口与达坂城人工目测期呈不显著的变化趋势，器测期则为减小趋势，这与均一化订正后的其他各站年平均风速在这一时期呈减小趋势是一致的，说明对器测时期达坂城、阿拉山口两站年大风日数的均一化处理较有客观性。与其他测站相比，十三间房站年大风日数的变化趋势，是该地大风气候变化特征的真实写照。

6.3 大风年时数与大风年最长持续时间的变化趋势

从表2以及图8、图9可见，除十三间房站的大风年时数、大风年最长持续时间（用一年中前10次大风最长持续时间之和表示）无明显变化趋势外，而其余测站均显著减少。这与极端强风强度减弱、频次减少的趋势完全一致。其中，达坂城站减少幅度最大，大风年时数平均每年减少近20 h，其他站年平均减少7～9 h。但这种减少趋势均因测站环境的变化或观测方法的变更也有不同程度的夸大现象。以阿拉山口站为例，测站不受环境变化影响，若客观地将人工观测期（1969～1992年）与器测观测期分别对待，人工观测期大风年时数与大风年最长持续时间均为不显著的减少趋势（表3），器测期大风年时数有极弱的不

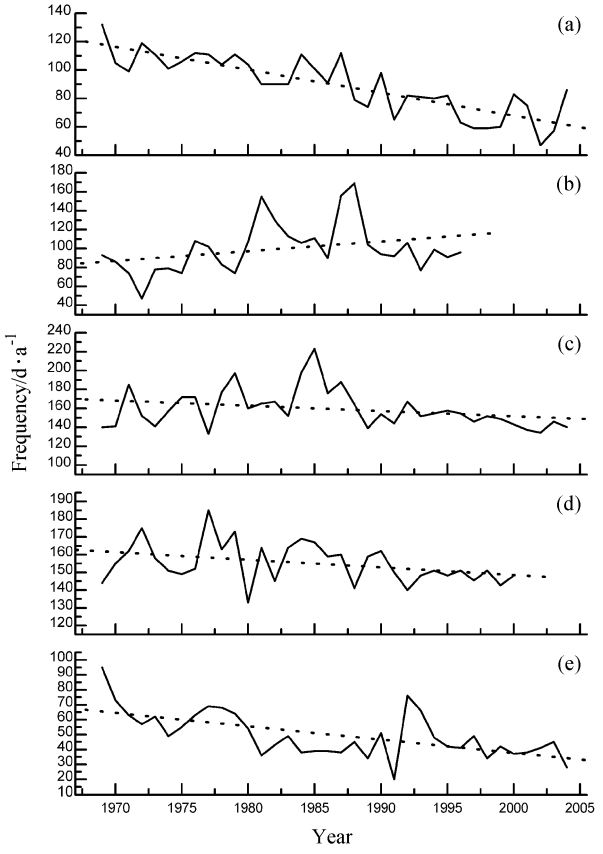

图 7　同图 3，但为年大风日数

Fig. 7　Same as Fig. 3，but for the yearly frequency of the gale

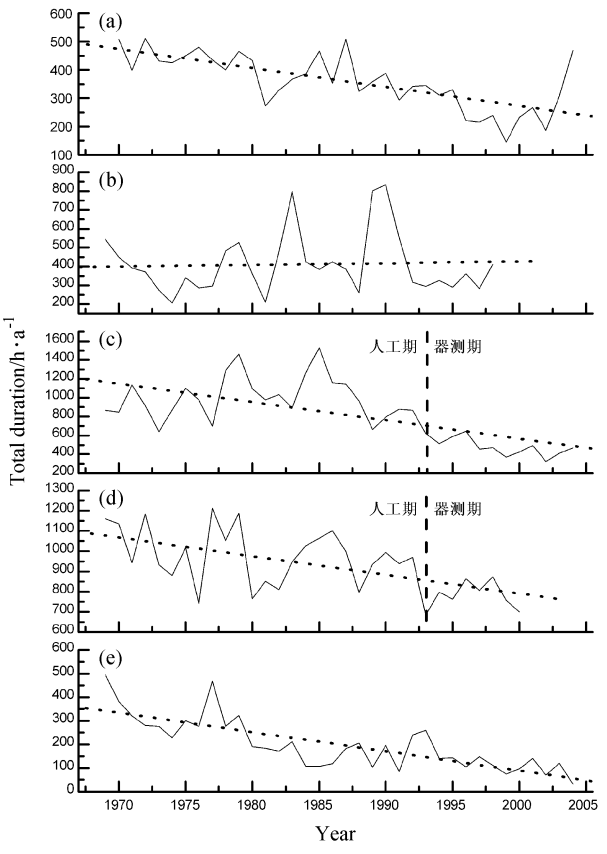

图 8　同图 3，但为大风年时数

Fig. 8　Same as Fig. 3，but for the yearly total lasting time of the gale

显著增加趋势，但大风年最长持续时间显著减少（表 3），说明该站大风年时数变化不显著（与不受环境变化和观测方法变更影响的十三间房地区变化一致），大风最长持续时间减少的趋势的确存在，主要体现在 1994 年以后，但表 2 中对该站变化趋势的估计比气候的真实变化要大得多。再如达坂城站，人工观测期大风年时数与大风年最长持续时间变化均呈不显著的增加趋势（表 3），而 1994 年后的器测期均呈显著的减少趋势（表 3）。同时，结合大风人工观测期与器测期年日数的变化可见，阿拉山口、达坂城两地大风年最长持续时间的变化趋势与大风年日数的趋势是同步的，仅是显著性是否显著的差异而已。另一方面，达坂城站人工与器测期大风时数的这种变化情形也表明，观测方法的变更对测风序列的影响比测站环境的影响要大得多。这又一次证明上述对 EN 型器测期年大风日数、日最大风速订正的必要性及重要意义之所在。

6.4　极端气候指数与气候平均态指数变化的比较

从上述分析判断，极端气候变化可以和平均气候变化大不相同。本文从趋势比较的角度来做定量讨论。定义 R 为本文所取极端气候序列趋势与同一研究对象年平均序列（或大风年时数、大风年日数）趋势之比，即“趋势系数比”。则 $R=1$ 表明极端气候与平均气候趋势一致；$R>0$ 表明气候变化更多地反映在极端气候状态上；$R<0$ 表明极端气候与平均气候相反（但对于日平均风速极端最小年频次的讨论，R 为正、负值的意义恰与上述相反，因为两者恰是相反的两个极端）。为讨论方便，不计两序列中变化趋势不显著的站点，计算了各站相关研究对象的 R 值（见表 4）。

对于平均风速而言，一般 $R>0$，表明极端气候变化多与平均气候变化同相。从量上看，前者是后者的 1～5 倍，说明气候变化经常强烈地表现在极值强度变化现象上；对于日平均风速极端最大的频次或年极端强风（日最大风速≥某阈值风

表 3 大风时数的变化

Table 3 Variation of the lasting time of the gale $h \cdot a^{-1}$

	大风年时数		大风年最长持续时间	
	人工期（1969～1992年）	器测器	人工期（1969～1992年）	器测器
阿拉山口	−4.91	2.23（1994～2000年）	−0.65	−3.85** （1994～2000年）
达坂城	2.01	−17.19* （1994～2004年）	0.18	−5.35** （1994～2004年）

*、** 分别表示通过了0.05、0.01以上的显著性检验。

表 4 各种极端风特征相对于气候平均态变化的趋势系数比（*R*）

Table 4 The tendency coefficient ratio (*R*) between the extreme features and climatic basic condition

	日平均风速年极端最大值	日最大风速年极端最大值	大风年最长持续时间	日平均风速极端最小年频次	日平均风速极端最大年频次	年极端强风频次
哈巴河	2	1.8	0.3	−0.7	0.6	1.5
阿拉山口	10			1.4	1	0.3
达坂城			0.3			
十三间房						
淖毛湖	1.5		0.1	−0.4	0.3	
$R>0$ 时的均值	4.5	1.8	0.2	1.4	0.6	0.9
$R<0$ 时的均值				−0.6		

注：表中达坂城站大风年最长持续时间与大风年时数的趋势比仅是相对于器测期而言的。

速）频次而言，与大风日数也是同相变化的，前者约是后者的0.5～1.0倍；极端弱风频次相对于大风日数而言，一般两者反相；从量上看，前者约是后者的0.5倍。但也存在同相现象（如阿拉山口站），且极端弱风减少的频次约是大风减少频次的1.5倍，说明气候变化还表现在极值频率的变化现象上，但相对于极值强度变化要小得多；大风年最长持续时间与年时数的气候变化，前者平均约是后者的1/5。与极值强度变化相比，量要小得多。上述现象又一次说明了极值研究的必要性，因为气候变化不仅反映在平均状况中，而且还反映在极值强度、频次、持续时间上，但对新疆风区而言，极端最大风速强度的变化在风的气候演化中显得更为突出。

从表4还可见，十三间房不存在风的极端变化；而哈巴河县站恰与此相反：3个方面均表现出了极端变化；达坂城从20世纪90年代中期后仅大风的持续时间出现了极端变化。这说明新疆各风区风的演化特征极为复杂。

7 结论与讨论

（1）新疆多风区年平均风速普遍以0.01～0.04 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$的速率减小，递减率最大的是在受测站环境影响大的相对小风区中，尽管已对其进行了非均一性订正，但由于用于非均一性订正的可参考站密度有限，对年平均风速递减率的估计仍然略有偏大。而十三间房、阿拉山口年平均风速的变化趋势是气候变化的真实写照。这一结果与在河北地区的研究结果有相似性（刘学锋等，2009a，2009b）。

（2）极端最大的日最大风速强度或日平均风速最大强度普遍减小、发生频次普遍减少；但极端弱风天气的发生频次变化却出现了地点间差异：哈巴河县、十三间房、淖毛湖极端弱风频次显著增加（北疆冬季寒潮减弱的标志），阿拉山口却显著减少，达坂城变化不明显。对于造成这些弱风事件变化差异的原因还需进一步研究。

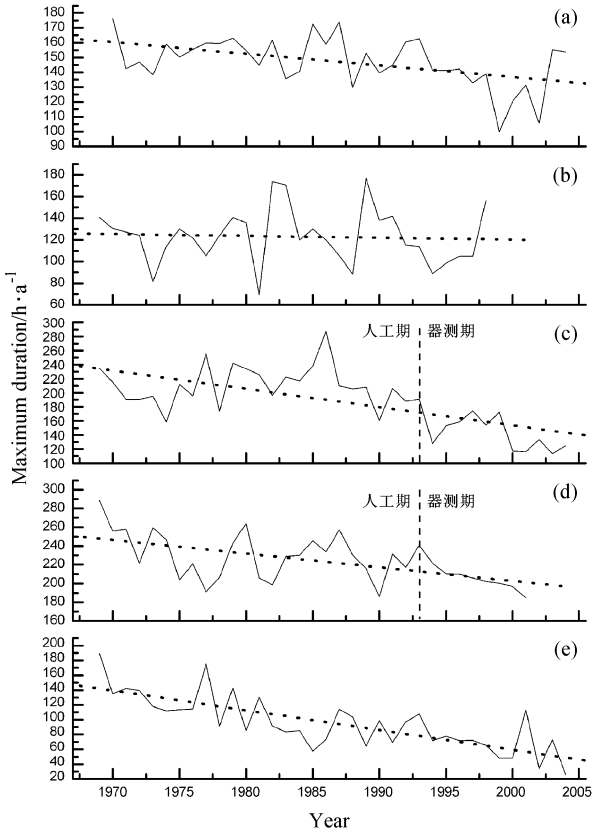

图 9　同图 3，但为一年中前 10 次大风持续最长时间之和的变化趋势
Fig. 9　Same as Fig. 3, but for the variation tendency of annual total duration of gale for the first 10 gales in a year

（3）以达坂城、十三间房为代表的极端强风区的年大风频次变化不显著，其余地区均显著减少。

（4）十三间房大风年时数、大风年最长持续时间均无明显的变化倾向；阿拉山口大风年时数无明显减少趋势，大风年最长持续时间仅从 20 世纪 90 年代中期显著减少；达坂城大风年时数、最长持续时间仅从 20 世纪 90 年代中期显著减少；哈巴河县、淖毛湖大风年时数、大风最长持续时间虽然有显著的缩短趋势，但因测站环境变化的影响，估计值有可能略偏大。

（5）对新疆风区而言，日最大风速极端最大强度（或日平均风速极端最大强度）在风的气候演变中比其频率与持续时间的变化更重要，常是气候平均变化的 1～5 倍。

参考文献（References）

Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperature over Canada [J]. J. Climate, 5 (14): 1959－1976.

丁裕国，江志红. 2009. 极端气候研究方法导论（诊断及模拟与预测）[M]. 北京：气象出版社，17. Ding Yuguo, Jiang Zhihong. 2009. The Instruction of Extreme Climate Event Research Approach (Diagnose, Simulation and Forecast) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 17.

范一大，史培军，周俊华，等. 2005. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析 [J]. 自然灾害学报，14 (3)：22－28. Fan Yida, Shi Peijun, Zhou Junhua, et al. 2005. Research on change of dust storm in China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (3): 22－28.

Hans A. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data [J]. Int. J. Climatol., 6: 661－675.

何清，杨青，李红军. 2003. 新疆 40 a 来气温、降水和沙尘天气变化 [J]. 冰川冻土，25 (4)：423－427. He Qing, Yang Qing, Li Hongjun. 2003. Variations of air temperature, precipitation and sand-dust weather in Xinjiang in past 40 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (4): 423－427.

胡玉峰. 2006. 自动气象站原理与测量方法 [M]. 北京：气象出版社，133. Hu Yufeng. 2006. The Principle of Automatic Meteorological Station and Its Measure Approach [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 133.

Ando M, Carcavallo R, Epstein P, et al. 1995. Human population health [M] //Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific－Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Watson R T, Zinyowera M C, Moss R H, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 572.

Potter K W. 1981. Illustration of a new test for detecting a shift in mean in precipitation series [J]. Mon. Wea. Rev., 109 (9): 2040－2045.

Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (2): 231－241.

刘学锋，江滢，任国玉，等. 2009a. 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，28 (2)：433－439. Liu Xuefeng, Jiang Ying, Ren Guoyu, et al. 2009a. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 433－439.

刘学锋，任国玉，梁秀慧，等. 2009b. 河北地区边界层内不同高度风速变化特征 [J]. 气象，35 (7)：46－53. Liu Xuefeng, Ren Guoyu, Liang Xiuhui, et al. 2009b. The characteristics of wind speed variation at different altitudes of boundary layer in Hebei Province [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (7): 46－53.

魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京：气象出版社，63－66. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnose and Forecast Technique [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 63－66.

辛渝，崔彩霞，张广兴，等. 2008. 博州不同级别降水及极端降水事件的时空变化 [J]. 中国沙漠，28 (2)：362－369. Xin Yu, Cui Caixia, Zhangguangxin, et al. 2008. Spatial-temporal variation of precipitation for different grade and the events of extreme precipitation over Bole, Xinjiang [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28 (2): 362－369.

辛渝，陈洪武，张广兴，等. 2008. 博州气候暖湿化中若干其它气候特征的变化 [J]. 中国沙漠，28 (3)：526－536. Xin Yu, Chen Hongwu, Zhang Guangxing, et al. 2008. Change of some other climate features on climate warming and wetting background over Bole region [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 28 (3): 526－536.

杨青，何清，李红军，等. 2003. 艾比湖流域沙尘气候变化趋势及其突变研究 [J]. 中国沙漠，23 (5)：503－508. Yang Qing, He Qing, Li Hongjun, et al. 2003. Dust climate change trend and jump in Ebinur Lake area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 23 (5): 503－508.

张家宝，史玉光. 2002. 新疆气候变化及短期气候预测研究 [M]. 北京：气象出版社，21－77. Zhang Jiabao, Shi Yuguang. 2002. Climate Change and Its Research for Short term Forecast in Xinjiang [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 21－77.

中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京：气象出版社，26，51－52. China Meteorological Administration. 2003. Specifications for Surface Meteorological Observation [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 26, 51－52.

朱瑞兆. 1984. 我国不同概率风压的计算 [J]. 气象学报，42 (2)：211－218. Zhu Ruizhao. 1984. The wind pressure calculation based on different probability density function in China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 42 (2): 211－218.