

辛渝, 陈洪武, 李元鹏, 等. 2012. 新疆气象站年均风速均一化订正与基本风压估算初探 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 184–196, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10093. Xin Yu, Chen Hongwu, Li Yuanpeng, et al. 2012. Homogeneity adjustment of annual mean wind speed and elementary calculation of fundamental wind pressure over Xinjiang meteorological stations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 184–196.

新疆气象站年均风速均一化订正与基本风压估算初探

辛渝 陈洪武 李元鹏 陈鹏翔 余行杰 王铁

新疆维吾尔自治区气候中心, 乌鲁木齐 830002

摘 要 为了较好地开展风能资源的详查与综合评价工作, 根据新疆各风区挑选的参照站历史风况资料序列特点, 在参考测站历史“元数据”直接进行非均一性检验与一致性订正基础上, 对其中4个长期无自记风记录参照站采用标准正态均一性检验、Potter检验、平行累计和等客观方法对1970~2009年的年平均风速序列进行了非均一性检验与均一化订正, 同时对测站无自记风时期年最大风速序列的时距换算进行了初步探索。结果表明: 1) 布尔津、淖毛湖、红柳河站的年平均风速存在因测站环境改变或其它不明原因而使序列间断的现象。从年平均风速序列SNHT非均一性订正结果以及测站四周建筑群体的发展规模看, 布尔津测站受测站环境变化等不明原因的影响程度最大, 三度间断, 累积订正量平均达 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。淖毛湖站二度间断, 其中1次与迁站而又未进行迁站订正有关, 订正量约为 $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。红柳河站的1次间断, 也与未进行迁站订正有关, 订正量约为 $0.1\sim 0.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2) 在构建测站无自记风时期历年最大风速序列的时距经验公式中, 十三间房站适于西北统一经验公式, 其余3站适于在一定阈值风速条件下, 根据有自记风时期2 min时距平均风速与10 min时距最大风速的相关比值系数进行订正。

关键词 风能资源详查区 长期无自记风记录气象站 年平均风速 均一化订正 基本风压估算

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0184-13 **中图分类号** P413.2 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10093

Homogeneity Adjustment of Annual Mean Wind Speed and Elementary Calculation of Fundamental Wind Pressure over Xinjiang Meteorological Stations

XIN Yu, CHEN Hongwu, LI Yuanpeng, CHEN Pengxiang, YU Xingjie, and WANG Tie

Xinjiang Uygur Autonomous Region Climate Center, Urumqi 830002

Abstract In order to develop detail survey and integrative evaluation of wind energy resource, the consistency corrections, objective homogeneity tests (such as SNHT, Potter, and CUSUM), and homogeneity adjustment of yearly mean wind speed series were carried out during 1970–2009 from four meteorological stations which represent wind areas according to their historical metadata features. During the period of non-automatic wind recorder, how to build the 10-min interval yearly maximum wind velocity series was also explored elementarily based on observed 2-min interval wind data. The results show as follows: 1) The yearly mean wind speed time series were inhomoge-

收稿日期 2010-07-19 收到, 2011-12-28 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 90915001, 新疆维吾尔自治区气象局业务新技术课题 YX201004, 新疆维吾尔自治区气象局气象科技研究课题 YX200805、YX200808、200903, 新疆强天气发生机理及数值模式方法研究 idm200603

作者简介 辛渝, 女, 1969年出生, 高级工程师, 硕士, 从事短期气候趋势预测与气候变化研究及气候资源开发与利用。E-mail: learnerxy@163.com

neous, which was caused by the change of their surroundings or other uncertain factors at Burqin, Naomaohu, and Hongliuhe stations. From the values of the SNHT homogeneity adjustment and the buildings surrounding the stations, the most largely environment influence occurred at Burqin station where the time series broke off three times and the mean accumulated adjustment value reaches $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ or so. There are two discontinuous points at Naomaohu station, one of which concerns location moving, and that of adjustment value is $0.1-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. There exists one discontinuous point at Hongliuhe station, which also concerns location moving like Naomaohu station, and that of adjustment value is $0.1-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 2) On transforming the yearly maximum wind velocity of 10-min interval from that of observed 2-min interval under the control of some critical wind speed, it is acceptable to adopt the experiential formula fitting to the northwestern part of China at Shisanjianfang station, while it is better to employ their mean portion correlation at the other three stations.

Key words detail survey area with abundant wind energy resource, weather station without long-term automatic wind recorder, yearly mean wind velocity, homogeneity adjustment, time interval conversion of annual maximum wind speed

1 引言

风能资源详查区(下文简称风区)内或其附近的气象站只要不在山区或地形起伏较大地带、周围地形空旷平坦、盛行风上风方无高大障碍物阻挡等,观测资料一般就能反映周围一定范围内平均风况特征,与风区的风气候特征也较相似,因此在风能资源详查与评价工作中常将其拟选为风区“参照站”(或“参证站”)。

笔者曾根据2009年6月1日至12月31日分布在新疆7个风能资源详查区17座测风塔的观测资料,分别逐月计算了它们与其附近气象站10 m左右高度处同期逐小时平均风速以及逐小时平均风速达 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上资料序列的相关系数,并将相关系数达到0.01以上显著性水平、相关性最高的气象站作为各个风能资源详查区参照站,分别是阿拉山口风区中的阿拉山口气象站、达坂城风区中的达坂城气象站、小草湖风区附近的托克逊气象站、额尔齐斯河风区附近的哈巴河与布尔津气象站、十三间房风区中的十三间房站、三塘湖—淖毛湖风区附近的淖毛湖站、哈密东南部风区附近的红柳河气象站。

但从这些测站的“元数据”发现,它们均有过迁站、测风仪高度多变、观测时次变更和观测次数改变导致的资料统计值改变(刘小宁,2000;

刘小宁等,2005)、仪器换型、观测方法与资料精度改变等有可能致使资料序列存在非均一性间断现象(王颖等,2007;陈洪武等,2010)。另外,随着经济的发展,有些测站周围环境发生了变化,是否会破坏风速序列的均一性,尚需考证。按《风电场风能资源评估方法(GB/T 18710-2002)》^①要求,对于任何可能引起参照站风况观测资料非均一的,必须采取一定的技术手段予以均一化订正。然而长序列气候资料的非均一性检验与均一化订正是一项复杂又繁琐的工作,对于风资料序列尤其如此,而且还很不成熟(曹丽娟等,2010)。主要问题是,即使根据不同气候要素特点,采用不同的客观非均一性检验(黄嘉佑和李庆祥,2007;江志红等,2008;李庆祥等,2008;尹嫦姣等,2010;辛渝等,2011)得到的某些“间断点”,也不能直接使用,还需借助气象台站详尽的历史“元数据”对诊断出的“可能间断点”综合判断,辨别真伪,但实际又很难得到这方面的信息(Peterson et al., 1998)。另一方面,鉴于风能资源详查与评价中,参照站基本风压的计算也是一项重要的不可或缺的参量,然而新疆选定的8个参照站中有4站仅有2004年以来的自记风资料,它们是布尔津、十三间房、淖毛湖、红柳河站,而且布尔津、淖毛湖站3次与4次2 min时距平均风速统计序列并存,远不能满足《建筑结构荷载规范(GB50009-2001)》^②对气象站10 min

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.

② 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 建筑结构荷载规范(GB50009-2001) [S], 28-29.

时距年最大风速序列长度的需要。故有必要围绕这 4 个特殊参照站风速统计序列的均一化订正和不自记风时期 10 min 时距年最大风速的换算展开专门研究, 希望这一研究能为其它气象站的均一化订正或最大风速时距的换算提供一些可行性参考建议。

2 资料来源与测站测风观测变更概况

2.1 资料来源

本文所收集的新疆各测站的“元数据”、不同时期测站的平行对比观测资料以及人工与自动站两年平行观测期对自动站记录的质量监控分析等, 均来源于新疆维吾尔自治区气象信息中心。另外还收集整理全国风能资源详查时中国气象局在上述详查区布设的测风塔资料, 以及企业所建测风塔 2006~2008 年的测风资料等。

2.2 待检站测风观测变更概况

布尔津、淖毛湖站分别于 1959 年 12 月 1 日、1960 年 1 月 1 日建站, 分别在 1969 年 11 月 30 日和 1969 年 9 月 30 日前使用维尔德测风仪, 之后改为 EL 型。红柳河与十三间房站均于 1952 年 7 月 1 日建站。其中, 红柳河站在 1968 年 11 月 30 日前使用维尔德风压板式测风仪, 之后为 EL 型;

十三房站在 1952 年 7 月 1 日至 1955 年 6 月 30 日间使用丁字型三杯式测风仪, 1955 年 7 月 1 日至 1968 年 8 月 31 日间使用维尔德风压板式。4 站在使用 EL 型电接风向风速仪期间, 只有配套的指示器部分, 无记录器。2005 年 4 站同时正式启动自动站, 增加了逐小时 10 min 时距的平均风速、日最大风速以及日极大风速等项目的观测, 在 2004~2005 年 EL 型与 EC 型平行对比观测期间, 只对 4 次定时 2 min 时距平均风速进行对比。

鉴于 1970 年以前, 新疆测站极其稀少, 测风仪多为维尔德型, 所有测站除了有人工站升级为自动站的平行对比观测记录、以及测站远距迁站有 2 或 3 个代表月的 3 或 4 次定时对比观测外, 其余时期均无, 在此只对 1970~2009 年测风观测仪相对均一时期的统计序列进行非均一性检验与均一化订正, 同时利用近年有自记风记录资料开展最大风速的时距换算探讨。经过这种均一化订正后的序列长度也完全能够满足《建筑结构荷载规范 (GB50009-2001)》^①及《风电场风能资源评估方法 (GB/T18710-2002)》^②对资料年限的使用要求 (30 年)。

限于篇幅, 略去各站风仪高度改变时间, 仅给出风仪高度变化范围 (见表 1)。此外, 这一期

表 1 1970~2009 年 4 站风况资料序列的变更

Table 1 The alternation of wind data series at four stations during 1970 - 2009

站名	仪器高度/m	迁站时间与平行对比观测	4 次定时观测时间	3 次定时观测时间
布尔津	10.5~13.0		1985-01-01- 1987-12-31、 2005-01-01- 2009-12-31	1970-01-01- 1984-12-31、 1988-01-01- 2004-12-31
淖毛湖	10.3~10.8	1985-01-01、2003-01-01、2004-06-01 (观测场近距迁移, 高差 3.0~29.3 m, 无平行对比观测)	1985-01-01- 1987-12-31、 2003-01-01- 2009-12-31	1970-01-01- 1984-12-31、 1988-01-01- 2002-12-31
红柳河	10.3~11.6	2002-07-01 (观测场近距迁移, 高差 126.2 m, 无平行对比观测)	1970-01-01- 2009-12-31	
十三间房	7.8~10.9	1999-01-01 (高差 151.8 m, 相距 31.6 km 左右, 1998 年 7 月、1999 年 1 月有 3 次定时平行对比观测)	1970-01-01- 2009-12-31	

① 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 建筑结构荷载规范 (GB50009-2001) [S], 28-29, 72-74.

② 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/T18710-2002) [S], 2.

间的另一重大变更便是 2005 年由人工站更换为自动站所带来的仪器变更、观测方法变更、资料精度变更所造成的非均一: EL 电接式风速仪被 EC 型光电感应仪替代; 人工目视指示器“心算”2 min 时距的平均风速改为 EN 型处理仪的 2 min 精确计算; 2 min 时距平均风速观测资料由人工“心算取整”改为 EN 型处理仪计算后保留一位小数。这一变更时间也包括本研究所涉及的其他气象站。

3 年平均风速序列非均一化订正步骤与方法

针对上述待检站测风观测的变更情况, 先参照本站“元数据”直接进行一致性检验与订正(即“直接检验/订正”, 见图 1), 然后围绕“测站环境是否改变或其它不明原因导致统计序列是否间断”的主题, 参照其它测站“一致性检验与订正”之后的统计序列, 采用客观非均一性检验与订正法进行间接检验与订正(即“间接检验/订正”)。

3.1 迁站一致性订正

由于淖毛湖、红柳河虽然有迁站现象, 但无平行对比观测, 在此暂假设为“未迁”, 不做迁站一致性订正。而十三间房新旧站址相距远、高差大, 两地还有一山相隔, 则需根据 1998 年 7 月和 1999 年 1 月的 3 次定时平行对比观测资料进行迁站一致性订正。

由于一地风向的气候特征比较稳定, 年代际变化不大, 一般一年的风向频率特征与多年统计

差异甚微, 因此可直接以十三房站 1999 年 1 月 1 日以后的资料序列作为长年代风向特征统计基础, 只需对年平均风速序列进行订正延长。考虑到现行针对风能资源的测算均根据近年测风塔的观测数据与同期参证站的相关而言的, 故在此以新址测得的年平均风速为参考标准期(即 1999~2009 年), 对原址 1970~1998 年的统计序列进行订正。广义地讲, 这种订正属于气候要素的空间内插与客观推算(么枕生和丁裕国, 1990; 马开玉等, 1993; 钱喜镇和崔秀兰, 1995)。在对风速的超短资料订正过程中, 经典的做法是待考察点(Y)风速的数学期望 $E(Y)$ 采用下式计算,

$$E(Y) = \sum_{i=1}^{17} P(A_i) K_i E(X | A_i), \quad (1)$$

其中, X 为基本站(本文指该站的旧址, 下同)风速, A_i 为基本站风向, 本文按 16 方位和一个静风方位(A_{17} 表示)计, $A_1 - A_{16}$ 为从北风(N)开始、顺时针依次表示的 16 个方位。 $E(X | A_i)$ 表示基本站在某风向 A_i 条件下基本站的条件数学期望。 $P(A_i)$ 与 $E(X | A_i)$ 可分别由基本站基本时期内各风向频率累计值 $[v(A_i)]$ 和各种风向的平均风速估计。 K_i 为相邻测站某风向条件 A_i 下的平均风速的比值, 即

$$K_i = \frac{E(Y | A_i)}{E(X | A_i)} \quad (i = 1, 2, \dots, 16). \quad (2)$$

其中 $E(Y | A_i)$ 表示基本站在某风向 A_i 条件下待考察点(本文指新址, 下同)的条件数字期望。由于在一定的大范围环流背景下, K_i 相对稳定, 它取决于地形动力影响, 年变化不显著, 该比值可用在各月中, 可将不同季节的考察资料合并

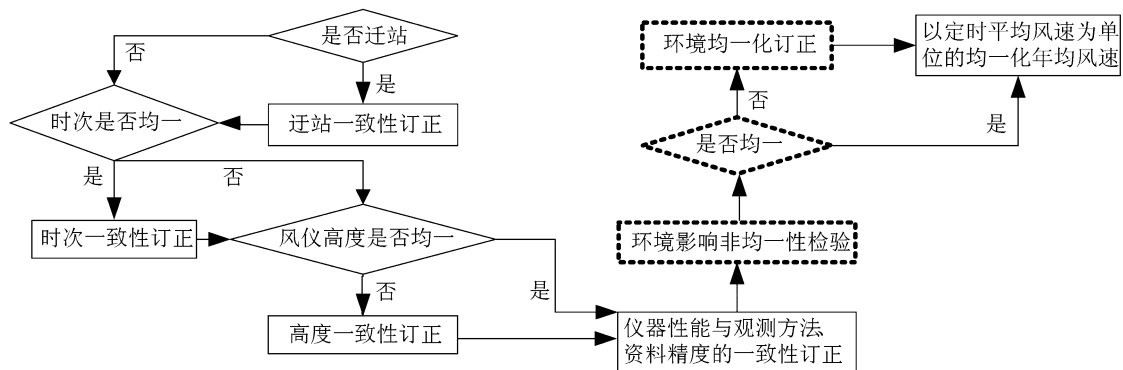


图 1 年平均风速序列均一化订正流程

Fig. 1 The flow chart of homogeneity adjustments of yearly mean wind speed

一起统计。故公式 (2) 中的 K_i 可以由新、旧两址在平行对比观测期间 (1998 年 7 月与 1999 年 1 月 3 次定时平行观测期) A_i 条件下新址的平均风速 $\bar{y}_i$ 和旧址的平均风速 $\bar{x}_i$ 之间的比值 K'_i 估计, 即

$$K_i \approx K'_i = \frac{\bar{y}_i}{\bar{x}_i}, (i = 1, 2, \dots, 16) \quad (3)$$

因此旧址时期的统计序列可以近似按公式 (4) “移植”到新址统计序列中去:

$$E(Y_j) = (\sum_{i=1}^{16} f_i \hat{y}_i + f_{17} \hat{y}_{17})/m, \quad (4)$$

其中, $E(Y_j)$ 即为新址待订正月 j 的月平均风速, 新址在旧址 A_i 条件下平均风速估计值

$$\hat{y}_i = \begin{cases} K'_i \bar{x}_i, & (i = 1, 2, \dots, 16) \\ \bar{y}_{17}, & (i = 17) \end{cases} \quad (5)$$

它由旧址在 A_i 条件下的观测风速 $\bar{x}_i$ 和 A_i 条件下新、旧两址之间平均风速的比值 K'_i [即公式 (3)] 决定。其中, $\bar{y}_{17}$ 为平行观测期旧址为静风时新址的平均风速。 f_i 为旧址待订正月某风向 i 的频次, f_{17} 为旧址待订正月静风的频次, m 为订正月所有风向的观测次数。在此值得说明的是, 平行观测期旧址无西南偏南风 (SSW), 而旧址在多年的风向特征统计中, 该风向频率也极少, 仅占 0.6%, 因此在此将其按西南风 (SW) 处理, 可能会对订正延长序列的精度略有影响, 但不会改变比值 K'_i 的基本属性。

3.2 时次一致性检验与订正

对淖毛湖、布尔津站 4 次定时观测期得到的记录分别按 3 次与 4 次进行日 (月) 平均风速的统计, 并以显著性水平为 0.05 的 t 检验 (魏凤英, 2007) 进行显著性差异检测。结果表明, 两站因观测时次不一, 年值统计序列均存在显著差异。鉴于 4 次定时观测期的资料年代很短, 且从统计上讲, 4 次与 3 次观测统计值的差异可近似看作系统性偏差, 以常数替代, 故在此人为地将 4 次定时观测记录均改按 3 次统计, 这样就可做到观测时次一致的统计序列。

3.3 风仪高度一致性订正

从表 1 可见, 除淖毛湖站风仪高度变化范围

很小且接近 10 m 外, 其余 3 站变幅相对较大。故在此参照《风电场风能资源评估方法 (GB/T 18710-2002)》^①按指数律换算到 10 m 高度处, 但为了较客观地反映各风区的粗糙度 α , 不按《建筑结构荷载规范 (GB50009-2001)》^②推荐的任何常数 0.14 或 0.16, 而是根据附近测风塔的观测资料先按公式 (6) 计算上下两层间的粗糙度

$$\alpha_l = \frac{\lg(v_{l+1}/v_l)}{\lg(z_{l+1}/z_l)}, \quad (6)$$

其中 v_{l+1} 、 v_l 分别为测风塔在第 z_{l+1} 、 z_l 高度处的实测风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。然后根据各层之间粗糙度的计算值, 用最小二乘法的拟合值作为附近气象站的粗糙度。本研究所采用的测风塔观测层数为 4~6 层。经计算, 布尔津气象站的粗糙度取 0.14、淖毛湖取 0.09、十三间房取 0.07、红柳河取 0.13。

3.4 仪器性能、观测方法与资料精度的一致性检验与订正

对 4 站 2004~2005 年由 EL 型与 EC 型平行观测期得到的统计序列进行显著性水平为 0.05 的 t 检验。检验表明, 各站日 (月) 统计序列均有显著差异, 且两者差值大小也具有月际变化特征。平行观测期对 EC 型仪的质量监控分析也验证了这点。显然, 这种差异是由测量仪器改变 (EL 型改为 EC 型)、观测方法改变 (人工从指示器目测“心算”改为 EN 型器测) 以及资料精度改变 (EL 型 2 min 时距平均风速取整, EC 型 2 min 时距平均风速保留一位小数) 共同造成的。在此以 EC 型观测仪得到的统计序列为标准期 (2005~2009 年), 统一将各站 EL 型时期的统计序列按下式订正:

$$\begin{cases} v_{m-d,m} = v_{d,m} + \Delta \bar{v}_m, \\ \Delta \bar{v}_m = \bar{v}_{p-d,m} - \bar{v}_{p-\alpha,m}, \end{cases} \quad (7)$$

其中, $v_{m-d,m}$ 为某月 ($m=1, 2, \dots, 12$) 待订正序列; $v_{d,m}$ 为订正月份经过时次与高度一致性订正的 EL 型统计序列; $\Delta \bar{v}_m$ 为两者平均值的代数差, 也近似看作系统性偏差; $\bar{v}_{p-d,m}$ 、 $\bar{v}_{p-\alpha,m}$ 分别为平行观测期 (2004 年与 2005 年) 同一月份 EL 型和 EC 型测得的 3 或 4 次定时平均风速得到的平均值。

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.

② 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 建筑结构荷载规范 (GB50009-2001) [S], 28-29.

3.5 资料序列的客观非均一性检验与均一化订正

经上述一致性检验与订正后，仍有可能因测站环境改变、仪器超检老化故障、观测人员变更等其它不明原因致使统计序列非均一，对此采用客观的非均一性检验与均一化订正。这类问题的核心一般是依赖空间站点的相关，采用比值或差值进行检验与订正（么枕生和丁裕国，1990；马开玉等，1993；尹嫦姣和丁裕国，2010），还可通过构建均一性参考序列进行检验与订正（Easterling and Peterson, 1995；Peterson et al., 1998；黄嘉佑和李庆祥，2007）。本研究以没有迁站、观测环境少变、观测时次一致、测风仪高度变化在 2 m 以内，且与待检站相关性最好、通过 0.05 以上显著性检验水平的 4~5 个参考站统计序列的加权平均作为标准参考序列（刘小宁，2000；李庆祥等，2008；江志红等，2008）。非均一性检验以 Alexandersson (1986) 发展的标准正态均一性检验（Standard Normal Homogeneity Test, SNHT）方法为主，同时结合 Potter 检验（Potter, 1981）、待检站与其构建的标准参考序列的平行累计和（Cumulative Sum, CUSUM）控制曲线（Peterson, et al., 1998）等综合判断。SNHT 与 Potter 检验的显著性水平均取 0.05。为了检测出所有间断点，采取半级分段法。对检测出的间断序列按比值法参照构建的标准参考序列对间断前后的序列进行客观的均一化订正（江志红等，2008；李庆祥等，2008）。

需补充说明的是，由于 SNHT 与 Potter 检验等非均一性检验均要求待检序列与标准参考序列必须满足正态分布，而 0.05 显著性水平的正态检验（么枕生和丁裕国，1990；马开玉等，1993）表明，淖毛湖站与十三间房站迁站前或后的风速年值统计序列均满足正态分布，而为其构建的参

考序列均不满足，其余两站及其参考序列均不满足正态分布，因此需对不满足正态分布的待检或标准参考序列进行正态化转换。正态转换的常用方法有：对数变换、平方根变换、角变换、幂变换（魏凤英，2007）和立方根（或四次方根）转换、双曲正切转换（施能，1995）等。经过比较，若采用四次方根转换，则所有序列均符合 0.05 显著性检验水平下的正态分布特征，故本文均采用四次方根转换。

4 年平均风速序列非均一性检验合理性验证与均一化订正结果分析

4.1 年平均风速客观非均一性检验结果合理性验证与不确定间断点成因分析

限于篇幅，各站 SNHT 和 Potter 检验统计参数的变化曲线、CUSUM 曲线等略去，直接给出上述“直接检验/订正”和“间接检验”之后的非均一性检验结果，从表 2 可见：布尔津站年均风速序列间断点最多，分别出现在 1984 年、1993 年、2004 年；淖毛湖站次之，分别出现在 1988 年、1997 年；红柳河站 2003 年间断，十三间房站均一。

为了辨别上述检验结果的合理性，再一次通过分析测站“元数据”以及咨询的方式进行了调查。经分析认为：

布尔津站 2004 年前后的间断具有一定不确定性，很可能与人为操作有关。因为，北疆各站同时在 2004~2005 年进行 EL 型和 EC 型平行对比观测时，一些操作人员或许改变原有的风速目测方法，在应该目视 EL 型指示器“心算”2 min 时距的平均风速时，参考了 EC 型配套的自动处理仪（EN 型）计算出的风速值，“四舍五入”地以

表 2 年平均风速序列客观的非均一性检验
Table 2 Objective nonhomogeneity test of annual mean wind speed

站名	相关系数变化范围	与构造的标准参考序列 的相关系数	间断点	订正系数
布尔津	0.785~0.913	0.957	1984 年，1993 年，2004 年	1.138981, 1.057397, 1.159310
淖毛湖	0.806~0.861	0.891	1988 年，1997 年	1.043629, 1.039717
红柳河	0.749~0.825	0.881	2003 年	1.119475
十三间房	0.624~0.683	0.736		

EN 型处理仪的取整记录作为 EL 型的“目测值”，从而使对比差值产生人为“虚假系统性偏差”。另外，陈洪武等（2010）的研究表明，阿拉山口、达坂城站虽因 1993 年 8 月起开始使用 EN 型处理仪（感应器仍为 EL 型），但因 2 min 时距的平均风速记录仍保留人工观测取整的作法，相应的年值统计序列并未因仪器的换型而在 1994 年前后出现间断现象。

红柳河站 2002 年 7 月 1 日迁站（见表 1），由于无平行对比观测而未进行迁站一致性订正，而在客观非均一性检验中，诊断出序列在次年有间断，说明此次迁站对序列的均一性还是有一定影响的。此处的非均一化订正其实是由测站迁站而又无法参照 3.1 节所提到的方法进行一致性订正引起的。

诊断出淖毛湖站 1988 年前后的间断有一定“漂移”现象。该站 1985 年 1 月迁站（表 1）的同时，还更换了测风仪，没有进行相应的“一致性订正”，造成客观非均一性检验检测出的“间断点”与此间隔 3 年。这既可能是由于原址的观测环境已受到破坏才搬迁造成，也可能是由于搬迁后才造成序列间断，还可能是由于仪器换装、仪器灵敏度改变造成。该站另外两次迁站，距离均很近，测场高差仅 3~7 m，未检验出间断。

可见，按图 1 所示流程得到的诊断结果有一定说服力。另外值得说明的是，十三间房站旧址年平均风速序列（即 1970~1998 年）以及新址序列（即 1999~2009 年）在各检验时段内采用上述方法也是全部均一的，而当按 3.1 节的方案将旧址序列“移植”到新址序列，即两序列“合二为一”，再采取客观非均一性检验时，待检序列仍然均一。这进一步证明，采用 3.1 节的方案对新址序列的“后向”延长也是可靠、可行的，可推而广之。

4.2 序列非均一影响因子大小的比较

按图 1 所示流程对各站年平均风速序列进行一致性订正和均一化订正之后，经过 SNHT、Potter、CUSUM 曲线等非均一性客观检验表明，订正后的序列全部均一，说明订正合理。图 2 给出了各测站年平均风速原始序列演变图以及在经过迁站、时次、高度、测量仪器、观测方法、资料精度一致性订正基础上的客观均一化订正之后

的演变图。可见，测站远距迁移是造成序列非均一的主要原因，订正值最大，十三间房站年均风速订正后约是订正前的 1 倍。

人工站改为自动站所伴随的观测方法、测量仪器、资料精度改变也是导致统计序列间断的原因。通过计算各站 2004~2005 年“人工站”与“自动站”年平均风速的代数差可见，十三间房站人工观测期的年平均风速比自动站偏小 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，淖毛湖站偏小 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，另两站偏小 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

观测时次不一也是影响序列均一的一个方面。通过计算淖毛湖站 1985~1987 年以及 2003~2009 年由 4 次 2 min 平均风速得到的年平均风速序列与 3 次观测得到的年平均风速序列的代数差发现，两者之差为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。类似地，计算得到的布尔津站因时次不一造成的年统计值的差异为 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

高度差对风速序列均一化订正的最大值仅 $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均风速越大，订正量就越大。本研究中除十三间房站 1970 年 11 月~1979 年 12 月风仪高度为 7.8 m 以及布尔津站 1969 年 11 月~1989 年 5 月风仪高度为 13.0 m，与其它时期风仪高度差异较大，订正量超过 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上而外，其余因高度差异带来的统计差均可忽略不计。

在上述一致性订正基础上，从表 2 对测站环境改变或其它不明原因造成的间断所采用的订正系数以及多年平均风速可以得出：红柳河站年平均风速的订正量约 $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，迁站的影响程度远不及十三间房站。淖毛湖站两度间断，既有迁站引起，也有环境改变等不明原因引起，订正值平均也仅为 $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。布尔津站 3 度间断，累积订正量平均约达 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，未迁过站。所处地址有过 3 次具有明显意义的更名：建站至 1982 年为“布尔津县郊外”，1983~2004 年为“布尔津县东北郊外”，2005~2010 年为“布尔津县环城北西路”。可见，诊断出的第一（1984 年）与第三（2004 年）间断点与地址的更名时间相近，很可能与该站所处城镇化发展速度有关。而经过调查发现，该站四周的确有很大变化，建筑群体与人口密度逐年增加，交通更加便利。这也说明，诊断出该站 2004 年的间断还可能与测站环境改变有关。相比之上，哈密地区 3 个风区参照站观测环境的影响远不及该站。

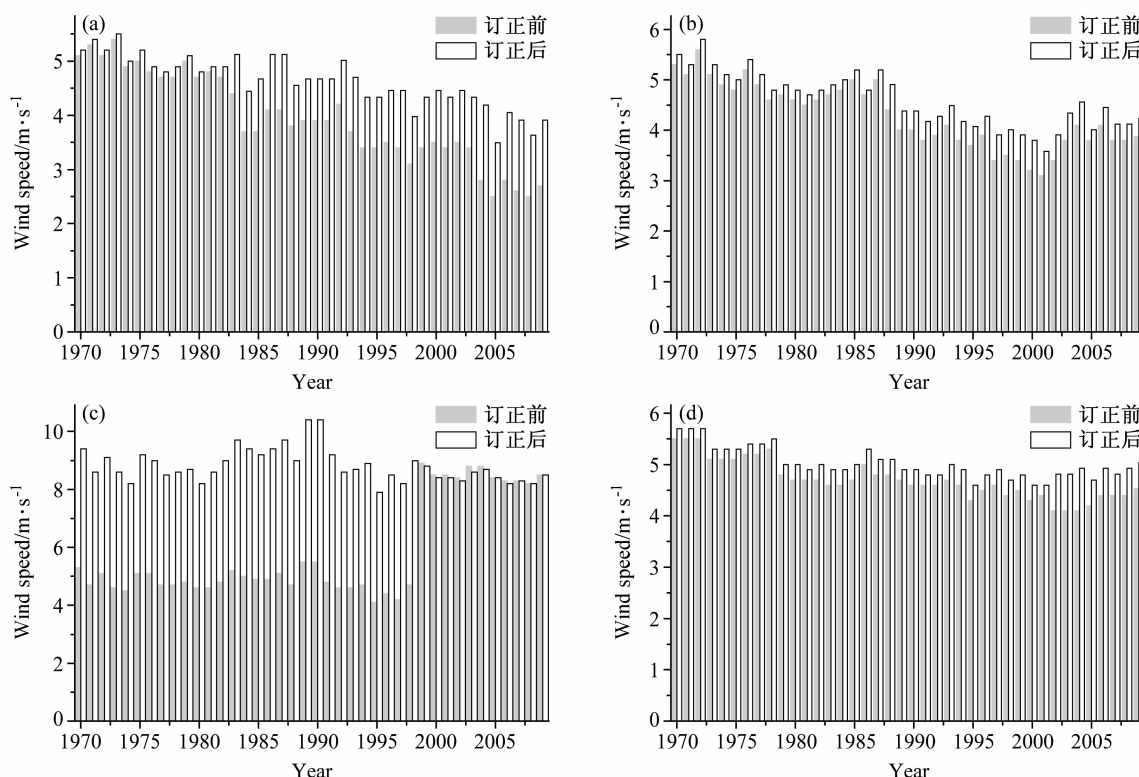


图2 (a) 布尔津站、(b) 淖毛湖站、(c) 十三间房站、(d) 红柳河站均一化订正后的年平均风速序列变化

Fig. 2 The variations of yearly mean wind speed based on homogeneous adjustment at (a) Buerjin station, (b) Naomaohu station, (c) Shisanjianfang station, and (d) Hongliuhe station

5 年最大风速换算探讨

5.1 气象站基本风压计算需求分析

《建筑结构荷载规范 (GB50009 - 2001)》^①明确规定：基本风压 ω_0 是根据气象台站历年自记风速仪测得的 10 min 时距的年最大风速记录，按极值 I 型确定的重现期 (50 年或 100 年一遇) 最大风速 v_0 计算的；对于风杯式测风仪， ω_0 按贝努利方程计算。其中，空气密度既可按气象台站的温度、湿度、气压观测资料计算得出，也可根据温度与海拔高度之间的关系得到；对于以往无自记的定时观测资料，均应通过时次、时距的适当修正后加以采用；若风速仪高度与标准高度 10 m 相差过大时， v_0 的计算需换算到标准高度的风速；选取的年最大风速序列，一般应有 25 年以上的资料，当无法满足时，至少也不宜少于 10 年。然而

本研究中的 4 个风区参证站仅从 2004 年之后才有完整的风速自记记录，因此必需对无自记风时期由 2 min 平均风速得到的年最大风速进行时次和时距的修正。另外，从上一节分析可见，淖毛湖、红柳河、布尔津站年平均风速在各种一致性订正之上，仍然存在环境改变或其它不明原因导致的非均一性间断现象，因此还需对构建的年最大风速序列进行非均一化订正 (本研究采用表 2 中的订正系数对间断点进行订正)，以便科学合理地推算出气象站基本风速的概率极值。

5.2 西北地区平均风速时距转换的经验公式

在有关如何将一日 4 次定时 2 min 时距平均风速得到的最大值换算到自记 10 min 时距平均风速最大值时，朱瑞兆 (1984) 曾根据全国 300 多站的资料按七大分区的特点分别建立了两者的经验换算关系，其中对西北地区而言，采用下式换算：

① 中华人民共和国建设部，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2002. 建筑结构荷载规范 (GB50009 - 2001) [S]. 27 - 28, 72 - 74.

$$y = 0.85x + 5.21, \quad (8)$$

其中, y 为自记 10 min 时距平均风速, x 为 4 次 2 min 时距平均风速。

然而, 此换算公式在新疆风区参证站中的拟合精度如何, 尚需根据近年以及今后新增的风速自记观测记录予以验证。另一方面, 布尔津与淖毛湖站绝大部分时期为 3 次定时观测, 对无自记风时期挑选的定时年最大风速还不能直接用公式 (8) 换算, 必需对这些不满足要求的、从 3 次定时记录中挑选的年最大风速进行时次与时距的修正。

5.3 待检参照站平均风速时距转换经验公式的建立与优选分析

鉴于 4 站无自记风时期 10 min 时距的年最大风速均需由 2 min 时距的平均风速通过经验公式换算得到, 其中会存在一定估算误差, 同时“人工站”与“自动站”平行观测期得到的 2 min 时距平均风速的代数差又具有随机性, 且自记 10 min 时距的平均风速在 2004~2005 年期间又无对比观测记录, 因此对无自记风时期 (即 EL 型指示仪目测) 测得的定时年最大风速记录均假定为 EC 型仪 2 min 时距的计算结果, 不考虑观测仪器、观测方法、资料精度差异的订正。即本研究的核心问题是如何根据 2004~2009 年完整的观测资料建立各站 2 min 时距的定时日最大平均风速与 10 min 时距日最大风速的经验换算关系, 从而较合理地推算各站无自记风时期的年最大风速。另外, 鉴于十三间房站曾迁站, 新址距待开发的风电场最近, 而风速的局地变化又极强, 特别是极端强风局地性更强, 生命史更短, 故依据该站新址观测期 (1999~2004 年) 的风速资料以及 1998 年 7 月平行观测期新址资料估算无自记风时期 10 min 时距的年最大风速。推算思路如下:

首先以年为单位, 考察各站累年 (1970~2009 年) 风向频率以及由 3 或 4 次定时观测记录挑取的历年最大风速及其所对应的风向。主要特征如下: 布尔津站冬半年以东南偏东风最大、夏半年西北风最大且两个风向最大风速的平均值相差无几, 年最大风速的风向主要在西北到西风扇区以及东南到东南偏东扇区; 红柳河站年最大风速的风向较布尔津站略复杂, 东风的最大风速最

大, 西风次之, 年最大风速的风向主要分布在东北至东南偏东扇区以及西至西北扇区; 淖毛湖站年最大风速的风向十分单一, 出现在西北偏西至西北扇区; 十三间房站更加单一, 新址年最大风速的风向为北风 (详见图 3)。各站最大风速的主导风向均与盛行风向完全一致, 也与各风向的平均风速大小分布一致 (图略)。这些强风特征与地形的“狭管效应”密不可分。因此可根据工程抗风设计需要, 从 2004~2009 年完整的气候资料中筛选出测站若干场具有典型代表性的“强风”天气过程 (或样本), 在这些样本中, 通过建立 3 或 4 次定时 2 min 时距平均风速的日最大风速值与 10 min 时距平均风速日最大值的关系, 拟合出无自记风时期 10 min 时距的“历年最大风速”。这样做的目的, 主要是考虑强风条件下大气层结稳定, 推算过程中随机混淆误差会大大降低。对各站筛选出的强风样本 (“强风”样本的阈值风速见表 3) 按如下两种方式分别建模:

(1) 回归求取法。首先建立了 2 min 时距日最大风速与 10 min 时距日最大风速之间线性、二次方以及三次方的拟合关系式, 发现线性关系式均方误 (黄嘉佑和李庆祥, 2007; 尹嫦姣等, 2010) 最小, 因此以建立的线性回归关系 [公式 (8)] 推算无自记风时期的 10 min 时距年最大风速。

$$\hat{y}_{10,t} = \hat{a} + \hat{b}x_{2,t}, \quad (9)$$

其中, $\hat{y}_{10,t}$ 为无自记风记录时期第 t 年 10 min 时距日最大风速估算值, $x_{2,t}$ 为期间第 t 年 3 或 4 次定时 2 min 时距平均风速日最大值。

$$\hat{a} = \bar{y}_{S,10} - \hat{b}\bar{x}_{S,2},$$

$$\hat{b} = \frac{\sum_{s=1}^S (x_{2,s} - \bar{x}_{S,2})(y_{10,s} - \bar{y}_{S,10})}{\sum_{s=1}^S (x_{2,s} - \bar{x}_{S,2})^2}, (s = 1, 2, \dots, S)$$

$\hat{a}$ 、 $\hat{b}$ 值均由 2004~2009 年筛选出的 S 对 2 min 时距定时日最大风速 $x_{2,s}$ 与 10 min 时距日最大风速 $y_{10,s}$ 样本序列按最小二乘法估算得出, S 为筛选的样本容量, $\bar{x}_{S,2}$ 、 $\bar{y}_{S,10}$ 分别为 S 个样本 $x_{2,s}$ 和 $y_{10,s}$ 的平均值。建立的各时次时距转换的线性关系见表 3。

(2) 平均比值求取法

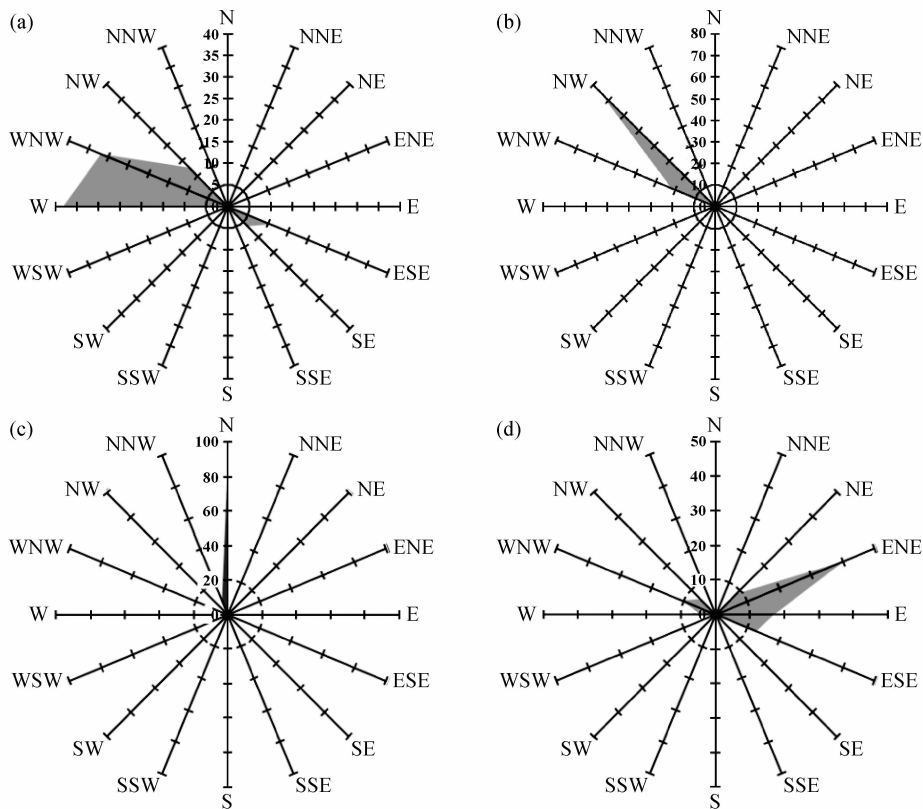


图3 同图2，但为对应于最大风速的风向分布
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the wind direction distributions corresponding to the maximum wind speed

表3 利用筛选的阈值风速样本建立的2 min时距最大风速转换为10 min时距最大风速的半经验换算式
Table 3 The empirical relationship between the 2-min interval and 10-min interval maximum wind speed based on the choice samples representing local strong breeze weather background

站名	2 min时距阈值风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3次定时线性关系	4次定时线性关系	3次定时比值关系	4次定时比值关系
布尔津	9.0	$\hat{y}_{10,t} = 3.44 + 0.71x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 5.60 + 0.50x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 1.06x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 1.07x_{2,t}$
十三间房	29.5		$\hat{y}_{10,t} = 8.19 + 0.75x_{2,t}$		$\hat{y}_{10,t} = 1.101x_{2,t}$
淖毛湖	15.0	$\hat{y}_{10,t} = 6.91 + 0.60x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 6.16 + 0.64x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 1.02x_{2,t}$	$\hat{y}_{10,t} = 1.00x_{2,t}$
红柳河	13.0		$\hat{y}_{10,t} = 5.04 + 0.73x_{2,t}$		$\hat{y}_{10,t} = 1.08x_{2,t}$

注：表中空白表示该站一直是4次定时观测，无需用3次定时观测记录推算10 min时距的最大风速。

$$\hat{y}_{10,t} = k x_{2,t}, \quad (10)$$

其中， $k = \bar{y}_{S,10} / \bar{x}_{S,2}$ 为2004~2009年期间筛选出的样本中10 min时距平均风速日最大值 $y_{10,s}$ 的平均值 $\bar{y}_{S,10}$ 与3或4次定时2 min时距平均风速日最大值 $x_{2,s}$ 的平均值 $\bar{x}_{S,2}$ 的比值（见表3）。
为综合比较上述两模型以及公式（8）对4站2 min时距与10 min时距平均风速转换的估算能力，以各模型的拟合值与观测值的偏差标准误（Standard Error of Mean Bias）作为评估参数，偏差标准误越小，表明拟合精度越高、估算误差

也就越小。3种评估效果对比见表4。可见，除十三间房站采用公式（8）拟合误差最小外，其余3站按平均比值〔见公式（10）〕最好，因此各站可根据各自最佳估算模型通过历年2 min时距的年最大风速值估算出历年10 min时距的年最大风速。同时还可见，此比值系数介于1.00%~1.08%之间。其中，淖毛湖站2 min时距定时最大风速可近似替代10 min时距最大风速，布尔津站与淖毛湖站则需要在2 min时距的定时最大风速上增加6%~8%。

表 4 几种半经验换算式估算的年最大风速偏差标准误的比较

Table 4 The comparison of standard error of mean bias of the yearly maximum wind speed based on the several empirical conversion formula estimating

站名	偏差标准误				
	3 次定时线性拟合	4 次定时线性拟合	3 次定时比值拟合	4 次定时比值拟合	西北统一公式拟合
布尔津	1.83	1.81	1.28	1.32	3.73 *
十三间房	—	3.43	—	1.76	1.72
淖毛湖	2.07	1.7	1.44	1.3	2.93 *
红柳河	—	3.3	—	1.79	2.62

注：表中空白意义同表 3；* 表示该站大部分时期为 3 次定时观测，不宜直接采用西北统一公式进行换算。

各站历年 2 min 时距定时最大风速原始序列以及估算的、相对均一的 10 min 时距的年最大风速见图 4。按极值 I 型（马开玉等，1993）对估算出的 10 m 高度上 10 min 时距的年最大风速序列进行 50 年一遇的概率最大风速推算，布尔津、十三间房、淖毛湖、红柳河站分别为 $27.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $43.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $30.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中，红柳河站的概率极值最大风速明显小于估算的 10 min 时距的年最大风速（ $31.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。

为了客观地反映空气密度对风压估算的影响，在按伯努利方程估算 10 m 左右高度上的基本风压时，结合各风区地形、历年最大风速对应的天气气候背景、最大风速对应的盛行风向等，按历年最大风速出现的最多月份作为空气密度 ρ 估算的代表月。估算时，从气体状态方程出发，考虑水汽的影响，

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \left(\frac{p - 0.378e}{1000} \right), \quad (11)$$

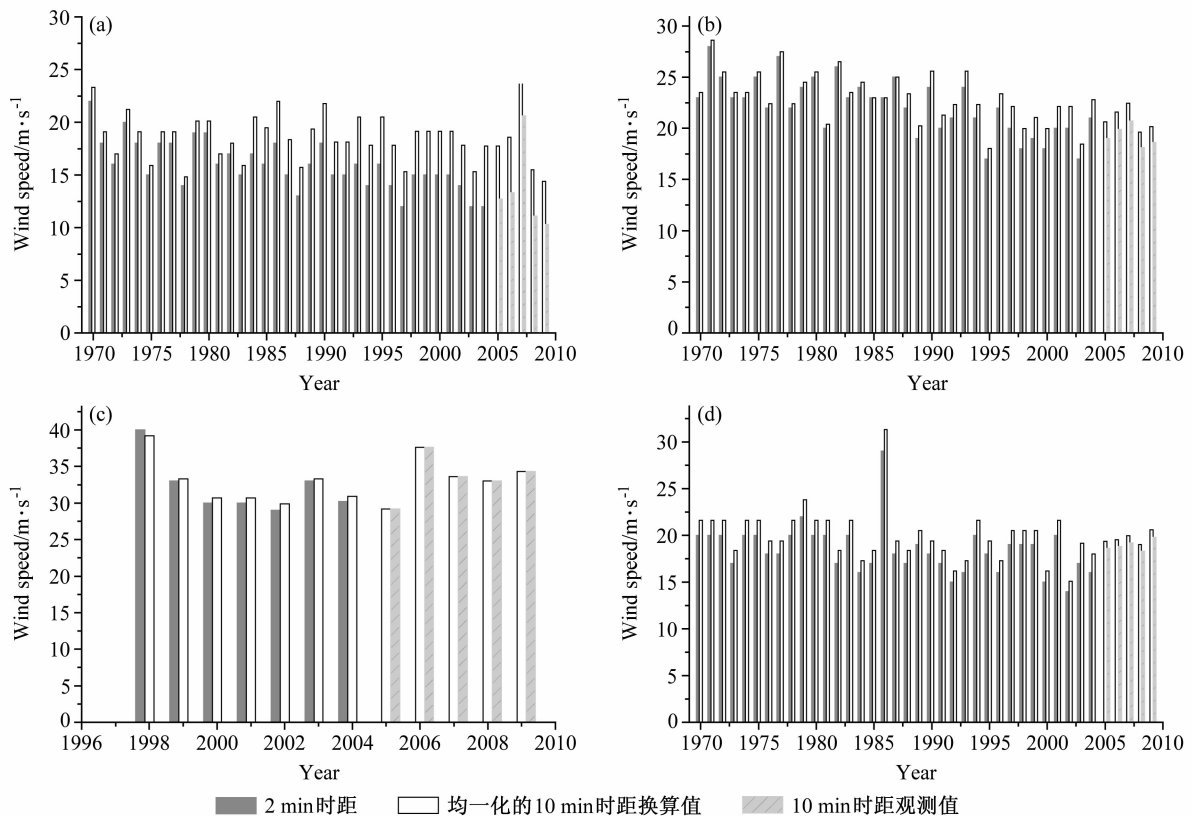


图 4 同图 2，但为推算的和观测的均一化 10 min 时距年最大风速

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the estimated and observed yearly maximum wind speed with 10-min interval homogeneity

其中 t 、 p 、 e 分别为各参照站空气密度估算代表月的月平均气温、月平均气压、月平均相对湿度。本研究中, 十三间房站与淖毛湖站均以 5 月为代表月, 布尔津站与红柳河站均以 3 月为代表月。经估算, 布尔津站、十三间房站、淖毛湖站、红柳河站的基本风压分别达 0.47、1.03、0.53、0.44 kPa 以上。估算的基本风压与《建筑结构荷载规范 (GB50009-2001)》^① 中根据全国挑选的气象站风况资料计算的基本风压分布图相近。

6 结论与讨论

本研究在参考测站历史“元数据”对新疆风区长期无自记风记录的 4 个特殊参照站的年平均风速序列进行一致性订正基础上, 开展了客观非均一性检验与均一化订正以及无自记风时期年最大风速序列构建的初步探索。结果表明:

(1) 除十三间房站外, 其余均有因测站环境变化或其它不明原因而使统计序列存在非均一性间断现象。其中, 布尔津站受测站环境变化等不明原因的影响程度最大, 三度间断, 累积订正量平均达 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。淖毛湖站两度间断, 其中 1 次与近距迁站而又未进行订正有关, 订正量约为 $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。红柳河站的 1 次间断也与未进行迁站一致性订正有关, 订正量约为 $0.1 \sim 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 在利用人工站与自动站并行观测期资料进行“系统偏差订正”时, 可能受人为影响限制, 会使两系统的观测对比产生“虚假误差”, 从而影响统计序列的一致性订正效果、客观非均一性检验结果等。

(3) 在 2 min 时距的年最大风速与 10 min 时距的年最大风速的换算模型中, 十三间房站适于采用西北统一公式, 其余 3 站适于在一定阈值风速条件下的相关平均比值系数法。

本研究对于测站环境改变或其它不明原因造成年平均风速序列间断的均一化订正方法比较单一。有时这种变化对资料序列的影响是渐进的, 但目前尚无法定量表达这种渐变程度, 采用与之

相关的空间站点按常数比值订正, 造成订正效果还具有一定局限性。同时, 按《风电场风能资源评估方法 (GB/T 18710-2002)》^② 要求, 在风能资源长年代评估中, 需要借助测风塔与附近参照站观测同期的、1 日 24 h、10 min 时距各风向象限的平均风速相关曲线及两者各个风向的平均风速代数差得到, 因此今后还需要在现有研究基础上, 检测非均一性来自哪些风向的风速、研究如何订正这种非均一性, 并通过研究 1 日 3 次或 4 次 2 min 时距平均风速与 1 日 24 次 10 min 时距平均风速的关系, 客观地得到待建风场区域长年代风能资源评估结果。

参考文献 (References)

- Alexandersson H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data [J]. *Int. J. Climatol.*, 6: 661-675.
- 曹丽娟, 鞠晓慧, 刘小宁. 2010. PMFT 方法对我国年平均风速的均一性检验 [J]. *气象*, 36 (10): 52-56. Cao Lijuan, Ju Xiaohui, Liu Xiaoning. 2010. Penalized maximal F test for the homogeneity study of the annual mean wind speed over China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (10): 52-56.
- 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.
- Easterling D R, Peterson T C. 1995. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series [J]. *Int. J. Climatol.*, 15: 369-377.
- 黄嘉佑, 李庆祥. 2007. 一种诊断序列非均一性的新方法 [J]. *高原气象*, 26 (1): 62-66. Huang Jiayou, Li Qingxiang. 2007. A new diagnosis method for non-homogeneity on a series [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 62-66.
- 江志红, 黄群, 李庆祥. 2008. 近 50 年中国降水序列均一性检验与订正研究 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 67-74. Jiang Zhihong, Huang Qun, Li Qingxiang. 2008. Study of precipitation series homogeneous adjustment and their correction over China in the last 50 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 67-74.
- 李庆祥, 江志红, 黄群, 等. 2008. 长江三角洲地区降水资料的均一性检验与订正试验 [J]. *应用气象学报*, 19 (2): 219-226.
- Li Qingxiang, Jiang Zhihong, Huang Qun, et al. 2008. The ex-

① 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 2002. 建筑结构荷载规范 (GB50009-2001) [S], 109.

② 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/T18710-2002) [S], 2.

- perimental detecting and adjusting of the precipitation data homogeneity in the Yangtze Delta [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (2): 219–226.
- 刘小宁. 2000. 我国 40 年年平均风速的均一性检验 [J]. *应用气象学报*, 11 (1): 27–34. Liu Xiaoning. 2000. The homogeneity test on mean annual wind speed over China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 11 (1): 27–34.
- 刘小宁, 张洪政, 李庆祥. 2005. 不同方法计算的气温平均值差异分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (3): 345–356. Liu Xiaoning, Zhang Hongzheng, Li Qingxiang. 2005. Analyses on average temperature difference resulted from different calculation methods [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 16 (3): 345–356.
- 马开玉, 丁裕国, 屠其璞, 等. 1993. *气候统计原理与方法* [M]. 北京: 气象出版社, 31, 124, 288–291, 481–488. Ma Kaiyu, Ding Yuguo, Tu Qipu, et al. 1993. *The Principle and Methods of Climatic Statistics* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 31, 124, 288–291, 481–488.
- Peterson T C, Easterling D R, Karl T R, et al. 1998. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: A review [J]. *Int. J. Climatol.*, 18: 1493–1517.
- 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.
- 钱喜镇, 崔秀兰. 1995. 风电场选址模式化研究 [J]. *气象学报*, 53 (4): 495–503. Qian Xizhen, Cui Xiulan. 1995. The modeling study of choicing wind farm [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 53 (4): 495–503.
- 施能. 1995. *气象科研与预报中的多元分析方法* [M]. 北京: 气象出版社, 6–7. Shi Neng. 1995. *Meteorology Scientific Research and Several Variables Analysis Method for Prediction* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 6–7.
- 王颖, 刘小宁, 鞠晓慧. 2007. 自动观测与人工观测差异的初步分析 [J]. *应用气象学报*, 18 (6): 849–855. Wang Ying, Liu Xiaoning, Ju Xiaohu. 2007. Differences between automatic and manual observation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18 (6): 849–855.
- 魏风英. 2007. *现代气候统计诊断与预测技术* [M]. 北京: 气象出版社, 27–28, 32–35, 63–66. Wei Fengying. 2007. *Modern Climatic Statistical Diagnose and Forecast Technique* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 27–28, 32–35, 63–66.
- 辛渝, 赵逸舟, 毛伟峰, 等. 2011. 新疆太阳总辐射资料的均一性检验与气候学估算式的再探讨 [J]. *高原气象*, 30 (4): 878–889. Xin Yu, Zhao Yizhou, Mao Weiyi, et al. 2011. Homogeneity test of the total solar radiation data series and further research on climatological calculation over Xinjiang [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (4): 878–889.
- 么枕生, 丁裕国. 1990. *气候统计* [M]. 北京: 气象出版社, 797, 807–809. Yao Zhensheng, Ding Yuguo. 1990. *Climatic Statistics* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 797, 807–809.
- 尹嫦娥, 江志红, 吴息, 等. 2010. 空间差值检验方法在地面气象资料质量控制中的应用 [J]. *气候与环境研究*, 15 (3): 229–236. Yin Changjiao, Jiang Zhihong, Wu Xi, et al. 2010. A research on the application of spatial difference method in quality control of surface meteorological data [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (3): 229–236.
- 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 calculation of wind pressure probability for various time scales in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 42 (2): 211–218.