文章编号:2096 – 5389(2018)05 – 0037 – 05

衡阳风变化及风能蕴藏量评估

陈　涛[1],袁智生[1],李　超[2],何炜炜[1],罗喜光[1]

(1. 湖南省衡阳市气象局,湖南　衡阳　421001;2. 湖南省气象局,湖南　长沙　410007)

摘　要:利用衡阳 9 站 1970—2016 年测风数据,通过气候倾向率分析风速年、年代际变化,M – K 检验风速突变年份,运用有效风能密度评估各区域风能蕴藏量,其结论如下:衡阳风速总体呈下降趋势,衡山减少最明显,风速减少极显著区域未出现突变;低海拔区风速集中在 0 ~ 3.4 m/s(85.8%),1991—2016 年风频两极分化,低速及高速区增多,中间出现断层。南岳山风速范围广,2005—2016 年强风频区有缺失,主风频在 3 ~ 5 区间;2010 年全面采用高灵敏度自动测风仪,低海拔区静风迅速减少;按照有效风能密度定义,南岳山风能丰富,低海拔区未达到可利用标准。

关键词:衡阳市;风向风速;风能密度;MK 突变

中图分类号:P425.4;X382　**文献标识码**:B

Research on wind variation and assessment on wind energy resource reserves in Hengyang

CHEN Tao[1], YUAN Zhisheng[1], LI Chao[2], HE Weiwei[1], LUO Xiguang[1]

(1. Hengyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Hengyang 421001, China;
2. Climate Center of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: Base on the wind measurement data from 9 Hengyang meteorological stations from 1970 to 2016, the climatic trend rate was utilized to analyze the annual change trend of wind speed, the Mann – Kendall test was employed to detect wind speed mutation years and the effective wind energy density was utilized to assess the wind energy resources reserves in each area. The results show that the overall trend of the wind speed is on the decrease, especially in Hengshan. the area where the significant change in wind speed occur is not mutated. The wind speed of low – altitude area is 0 ~ 3.4 m/s (85.8%). The frequency of wind speed was polarized from 1991 to 2016, with the number of low – speed and high – speed areas increasing and a fault occurring in the middle. The wind speed range is wider in Nanyue mountain with the frequency of wind speed from 3 to 5 m/s and a lack of strong wind frequency zone from 2005 to 2016. The static wind in low – altitude area has greatly reduced after the application of the automatic wind measuring instrument in 2010. According to the effective wind energy density standard, Nanyue mountain has an abundant wind energy reserves but the low elevation area has not reach the standard.

Key words: Hengyang city; wind direction and wind speed; wind energy density; Mann – Kendall test

1　引言

风能是太阳辐射下流动所形成的。风能与其它能源相比具有明显优势,它蕴藏量大,分布广泛,永不枯竭。自 19 世纪末丹麦研制成风力发电机以来,风力发电成为人们利用风能最常见形式。特别是近年来,全球资源环境约束加剧,气候变化日趋明显,风电越来越受到世界各国高度重视,并快速发展,使之成为世界上使用最为广泛、发展最快的可再生能源之一。中国风能利用起步晚,但近年来

收稿日期:2018 – 03 – 13

第一作者简介:陈涛(1965—),男,副高,主要从事气候预测、灾情评估工作,E – mail:mcctvy@163.com。

资助项目:湖南省气象局 2017 年短平快项目(XQKJ17B019)资助:全球气候变暖背景下衡阳风能资源评估。

发展十分迅速。风电新增装机容量占全球市场份额比重从 2000 年的 2.0% 增长至 2015 年的 48.5%，我国已成为世界上风能开发利用最活跃区域。

作为风能开发前奏，中国大陆风能资源普查已开展 3 次，分别始于 1980 年、1984 年、2004 年。衡阳首次风能普查始于 2004 年，受数据及技术条件限制，当时仅对各县市区风速最大年、最小年、平均年分析，由于逐时数据缺乏，研究方法粗犷，不能全面、深入分析衡阳风能资源状况。

大量研究表明，影响近地层风能蕴藏最直接与关键因素是下垫面的人为改变[1~4]。经济高速发展，城市化进程加剧、农田开垦、植被破坏等人为因素使土地利用发生了显著变化。近十几年来，衡阳大规模基础设施建设迅速铺开，城镇化率由 2005 年的 33.8% 上升到 2016 年的 51.1%。张涛涛[5]研究发现，气温与风能密度之间有极显著负相关，20 世纪 90 年代中后期，衡阳气温发生突变，这些变化势必影响衡阳风能资源蕴藏，这也是再次研究衡阳风能状况的原因之一。

2　资料与方法

2.1　资料来源

分析资料来源于衡阳 9 个国家气象站，其中南岳山站是我国为数不多有长时间持续观测高海拔站，其高度接近对流层自由大气底部（1 266 m）[6]。作为风景区，下垫面人为改变甚少。其它测站海拔不高（简称低海拔区），其中衡山站最低（63.3 m），祁东站最高（151.6 m）。

测风仪是气象观测仪器中型号变化较多的，其改变对风记录影响大，为了资料均一性，仅对 1970—2016 年采用 EL 型测风仪获取数据分析。衡阳自 2000 年代中期开始，陆续用自动观风仪替代人工观测，自 2010 年 1 月 1 日起，全面采用自动观测数据。受资料限制，风速及出现频率统计以逐日 02 时、08 时、14 时、20 时记录为基础。风能密度计算需 24 时数据，分析时段仅能选 2010—2016 年。气候值统计参照国家气候中心规定为 1981—2010 年平均，2010 年代统计时段为 2011—2016 年。

2.2　分析方法

2.2.1　风向频率　根据风向观测资料，按 16 个方位加静风统计时段各风向出现数与总次数的百分比。

2.2.2　风速频率　以 1 m/s 为一个风速区间单元，统计各区间出现频率。风速区是中间值，0 区代表 0 ~0.4 m/s 范围风速，1 间代表 0.5 ~1.4 m/s 范围风速，以此类推。

2.2.3　平均（有效）风能密度：

平均风能（功率）密度：$D_{WP}=\frac{1}{2n_i}\sum_{i=1}^{n}(\rho\cdot v_i^3)$

其中 ρ 表示空气密度，v_i^3 为小时风速（m/s）立方值，D_{WP} 中的 ρ 必须是当地各月平均空气密度值（取决于当地月平均气温、月平均气压、月平均水汽压），$\rho=\frac{1.276}{1+0.00366t}\left(\frac{p-0.378e}{1000}\right)$，$p$ 为平均大气压（hPa），e 为平均水汽压（hPa），t 为平均气温（℃）。

2.2.4　突变分析　突变分析采用非参数检验 Mann－Kendall（简称 MK），方法介绍略。

3　分析结果

3.1　年风速及突变

衡阳各区域风速存在差异（表 1），南岳山海拔高，平均风速最大（5.7 m/s），历年最大风速 7.3 m/s（1970 年），最小 4.6 m/s（1999 年）。在低海拔区，衡山风速最大（2.3 m/s），祁东最小（1.1 m/s）。历年最大 3.3 m/s（衡山，1974 年），最小 0.6 m/s（祁东，多年）。

衡阳风速气候倾向率均为负（表 1），表明自 1970 年以来，其风速呈减少趋势，衡山风速减少最明显，每 10 a 减少 0.368 m/s，其次是南岳山，每 10a 减少 0.367 m/s。相关系数显著性检验：衡山、衡东、衡阳县、南岳山通过置信水平 99.9%，祁东为 99.0%，衡阳市、衡南为 90.0%，常宁、耒阳未通过置信水平 90.0% 检验。

表 1　1970—2016 年衡阳平均风速、气候倾向率、突变年份

Tab. **1**　The average wind speed, climate trend rate and mutation year of Hengyang from **1970** to **2016**

区域	衡山	衡东	衡阳县	衡阳市	衡南	祁东	常宁	耒阳	南岳山
平均风速（m/s）	2.3	1.8	2.1	1.8	1.8	1.1	1.9	2.0	5.7
气候倾向率（v/10 a）	－0.368	－0.347	－0.215	－0.045	－0.130	－0.101	－0.018	－0.035	－0.367
趋势系数	0.884***	0.866***	0.710***	0.257*	0.324*	0.432**	0.146	0.124	0.738***
突变年份	无突变	无突变	无突变	2002	1979	1986	2008	1974	无突变

注：* * * 通过 99.9% 显著性检验、* * 通过 99.0% 显著性检验、* 通过 90.0% 显著性检验

对变化趋势进行 M－K 突变检验,衡山、衡东、衡阳县、南岳山风速减小趋势未发生突变,衡阳市、衡南、祁东、常宁、耒阳突变点在 2002 年、1979 年、1986 年、2008 年、1974 年。

3.2　风速年代际变化

分别统计南岳山、低海拔区年代际风速距平,南岳山 1970—2010 年代距平分别为 1.0 m/s、0.5 m/s、－0.4 m/s、－0.2 m/s、－0.1 m/s,1970、1980 年代正距平,1990—2010 年代负距平,90 年代负距平最大。低海拔区 1990—2010 年代距平分别为 0.6 m/s、0.3 m/s、－0.1 m/s、－0.2 m/s、0.2 m/s,1970 年代最大,2000 年代最小,2010 年代正距平,较 2000 年代偏大 0.4 m/s。

不少学者研究结果显示[7－10],受测站环境变化及下垫面改变影响,风速减少趋势明显。衡阳低海拔区 1970—2000 年代都遵循这一变化规律,但 2010 年代不降反增。统计各区域静风频率发现(图 1),低海拔区静风频率 2002 年最高(38.1%),2009、2010 年迅速减少,分别为 19.9%、5.4%,之后维持偏低水平。分析发现,静风频率减少与测风仪更换密切相关,测站将 EL 型电接风向风速计更换为风杯式遥测风向风速传感器后,静风概率明显减少。衡阳仪器更换始于 2003 年,开始仅个别站更换,2009 年大量更换,2010 年全面采用自动站数据。南岳山 2004 年正式采用自动站数据,其静风频率由 2003 年 7.5% 下降到 2004 年 2.3%,其后一直维持较低水平。统计发现,自动站平均风速较同期人工站偏大 0.4 m/s[11],其原因是自动测风仪更灵敏,其启动风速为 0.3 m/s,而人工站要 1.5 m/s[12]。

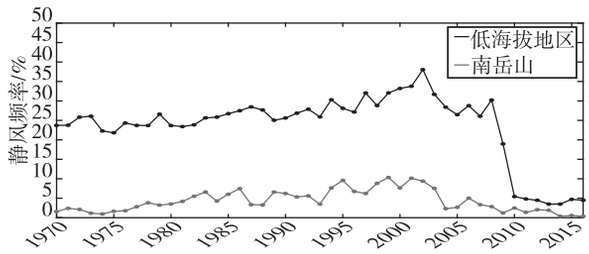

图 1　南岳山及低海拔区历年静风频率/%

Fig. 1　Annual static wind frequency in Nanyue mountain and low elevation area

低海拔区受测站环境改变影响,风速减少,但更换高灵敏度仪器后,静风频率速减,平均风速增大。南岳山更换仪器也存在这种情况,由于其风速大,静风原本就少,影响有限。此外,南岳山观测环境保护较好,下垫面人为改变不大,能真实反映气候变暖背景下风蕴藏量变化情况。

3.3　风速频率

3.3.1　风速频率年变化　表 2 为南岳山及低海拔区不同区间风速发生频率。南岳山风速范围广,在 0～23 区(0～23.5 m/s)均存在一定比例。频率在 10% 以上有 3、4、5 区(2.5～5.4 m/s),最多是 4 区(3.5～4.4 m/s)有 12.7%,24 区以上(≥23.5 m/s)出现频率不足 0.05%。低海拔站风区范围窄,最大是 1 区(0.5～1.4 m/s),频率为 24.3%,其次是 0 区(0～0.4 m/s),频率为 24.2%,0～3 区(0～3.4 m/s)累计频率为 85.8%,风速在 11.5 m/s 以上(≥12 间)出现频率不到 0.05%。

表 2　南岳山及低海拔区风速频率/%

Tab. 2　Wind speed frequency in Nanyue mountain and low altitude area

区域/风速段	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
低海拔区域	24.2	24.3	22.6	14.8	7.0	3.7	1.8	0.9	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
南岳山	4.5	4.6	9.5	12.6	12.7	12.5	9.7	8.2	6.6	4.1	3.9	2.5	2.1	1.4	1.2	1.3	0.7	0.6	0.5	0.2	0.3	0.1	0.1	0.1

3.3.2　风速频率历年变化　图 2 为南岳山、低海拔区 1970—2016 年各区间风速频率分布(简称风频)。南岳山风频变化分为 3 段(图 2a):1970—1989 年段,0 区间风频较其它时段少,0～25 区间风频均有存在,主要风速在 0～11 区间,频率在 4% 以上,23 区间以上强风频均匀分布;1990—2004 年段,主风频在 3～7 区间,频率在 10%～16% 左右,0～1 区间风频是 3 段中偏高的,1992—1993 年,24～25 区间风频缺失;2005—2016 年段,强风频(23～25 区间)有较多缺失,低风频(0～1 区间)略有增大,主风频在 1～7 区间。

低海拔区风频变化(图 2b)较南岳山明显不同,高速区呈离散型结构,主风频在 6 区间以下,且随时间推移向低速区聚集。风频可分为两阶段:1970—1990 年段,各区间风频均匀,连续性好,0～18 区间断层较少;1991 年—2016 年段,风频逐渐两极分化,低速及高速区增多,12～17 区出现断层且逐步扩大,2015 年后达到最大。在高风速区,风频呈间断性,无规律可循,随机性大,这或许与气候变暖极端事件频发有关。低风频增大也可分为两部分,1991—2008 年,主要受观测环境影响,低风频呈渐进性增多。2008 年后,受观测环境及测风仪改变影响,低速风频进一步增多,等值线密集。

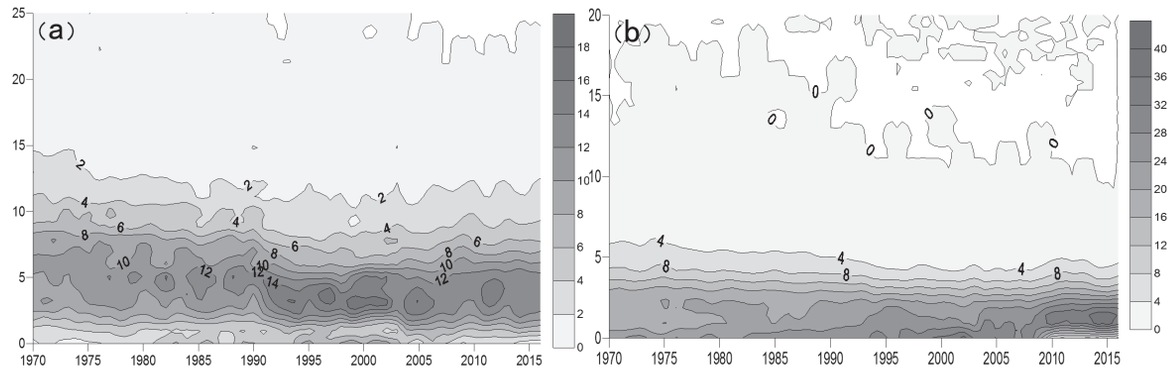

图 2　1970—2016 年 南岳山(a)及低海拔区(b)各区间风速频率分布

Fig. 2　The wind speed distribution of Nanyue mountain (2a) and low－elevation area (2b) from 1970 to 2016

3.4　风向频率

表 3 是南岳山及低海拔区平均风向频率。低海拔区平均静风出现频率为 23.6%，占总风向频率近四成，其次是 N 向风，出现频率为 15.9%。偏北风(N、NNE、NNW)累计出现频率为 33.5%，偏南风(S、SSE、SSW)出现频率次之(11.7%)，偏东风、偏西风各为 7.7%、6.4%。南岳山受海拔高度影响，静风频率明显较少(4.3%)，其单向风频率最多为 N 风(13.8%)，偏北风、偏南风频率为 28.0%、19.0%。

表 3　1970—2016 年南岳山、低海拔区风向频率/%

Tab. **3**　The frequency of wind direction in Nanyue mountain and low altitude area from **1970** to **2016**

风 向	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	C
低海拔区	15.9	7.4	5.7	2.9	2.5	2.3	3.3	4.0	4.4	3.3	2.6	1.8	2.2	2.4	5.4	10.2	23.6
南岳山	13.8	7.7	7.2	4.9	4.9	3.6	3.5	3.8	5.6	9.6	13.3	4.9	1.6	1.2	3.3	6.5	4.3

3.5　风能密度

风能密度是描述某地风能开发潜力的物理量，它描述空气在单位时间内以一定速度流过单位面积产生的动能，是风能资源开发重要指标。

3.5.1　平均风能密度　衡阳低海拔区平均风能密度为 7.3 W/m^2，最高的是衡阳县(12.7 W/m^2)，其次是衡南(11.6 W/m^2)，祁东由于静风频率偏多(41.7%)，其平均风能密度仅有 2.3 W/m^2。南岳山由于地势高，风速较大，平均风能密度为 227.9 W/m^2。

3.5.2　有效风能密度　表 4 为衡阳各区域逐月、年均有效风能密度，按照湖南省有效风能密度区划标准，低海拔区均为风能贫乏区(<50 W/m^2)。年有效风能密度最大是耒阳(35.7 W/m^2)，祁东最少(21.0 W/m^2)。从月际间变化看，也未达到风能可利用要求。月有效风能密度最大为 48.3 W/m^2，2 月出现在衡阳县，最小为 16.2 W/m^2，7 月出现在衡山。南岳山年均有效风能密度达到丰富标准(273.4 W/m^2)，其 1—7 月有效风能密度均在 200 W/m^{2}以上，其中 2 月达到 489.1 W/m^2；8、11、12 月为风能较丰富时期；9、10 月为风能可利用时段。南岳山风能蕴藏量丰富，全年各时段均满足风力发电要求。

表 4　衡阳各区域有效风能密度(W/m^2)

Tab. **4**　Effective wind energy density in various regions of Hengyang (unit: W/m^2)

区域/月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
衡山县	34.0	35.4	34.8	30.0	25.0	16.4	16.2	17.8	24.1	23.7	28.2	31.2	26.4
衡东县	29.3	29.7	28.8	27.1	22.1	19.9	18.1	16.0	19.8	19.3	22.2	24.5	23.1
衡阳县	43.5	48.3	46.0	41.5	30.7	21.7	20.4	22.5	33.0	32.8	38.2	38.6	34.8
衡阳市	27.5	32.4	28.5	25.4	20.8	18.7	19.5	19.7	22.5	21.8	22.2	24.6	23.6
衡南县	40.8	41.4	35.4	39.2	29.1	22.7	24.8	22.7	24.9	24.8	27.8	31.8	30.5
祁东县	23.3	27.9	23.7	23.3	22.6	16.7	16.6	17.4	18.8	17.5	20.3	23.6	21.0
常宁市	32.7	35.0	35.3	31.4	26.0	24.5	22.8	24.6	23.5	25.4	24.9	28.9	27.9
耒阳市	44.6	48.0	45.4	45.7	30.7	25.8	27.4	23.5	28.4	33.3	31.5	44.7	35.7
南岳区	299.8	489.1	346.2	368.3	284.6	338.3	396.2	172.8	114.1	118.4	164.8	188.6	273.4

图 3 为南岳山、低海拔区月平均风能密度曲线。低海拔区(图 3a)2 月最大(37.3 W/m^2),之后总体呈减少,6—8 月是有效风能密度较少时段,8 月为全年最少(20.5 W/m^2),之后又逐步增大,全年呈正弦型波动变化。南岳山月风能密度有两个高点(图 3b),分别在 2 月(489.1 W/m^2)、7 月(396.2 W/m^2),9—10 月是风能密度较少时段,9 月为全年最小(114.1 W/m^2),其年变化呈波浪型下降。

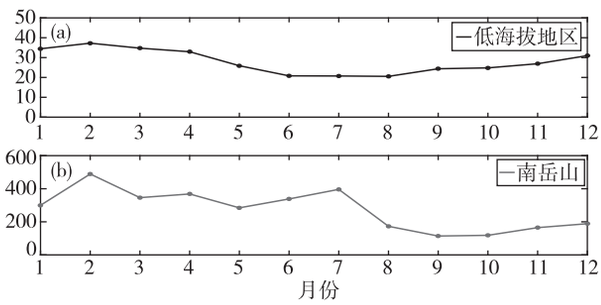

图 3　低海拔区(a)、南岳山(b)有效风能密度月变化

Fig. 3　Monthly variation of effective wind energy density in low - elevation area (a) and Nanyue mountain (b)

4　结论及讨论

通过对衡阳 9 个观测点 1970—2016 年风资料统计,分析近 47 a 来衡阳不同区域风向、风速频率,变化趋势及突变情况,从风能密度计算各区域风能蕴藏量,探讨 2010 年后低海拔区风速异常原因,其结论如下:

①近 47 a 衡阳风速呈减少变化,部分低海拔区减少速度甚至超过南岳山。衡山减速最快,每 10 a 减少 0.368 m/s,常宁、耒阳减速偏小。信度检验结果是:减速快的衡山、南岳山、衡东、衡阳县通过了置信水平 99.9% 检验,为极显著性减少,但常宁、耒阳减速变化未通过置信水平 90.0% 检验。衡山、衡东、衡阳县、南岳山减小趋势未发生突变,耒阳、衡南、祁东、衡阳市、常宁风速突变分别在 1974 年、1979 年、1986 年、2002 年、2008 年。

②低海拔区风速集中在 0 ~ 3.4 m/s(85.8%),0.5 ~ 1.4 m/s(1 区)出现最多(24.3%);南岳山风速区间跨度比较大,0 ~ 23 区间均存在一定比例,4 区(3.5 ~ 4.4 m/s)出现频率最大(12.7%)。南岳山历年风频变化分为三段,其中 2005—2016 年强风频(23 ~ 25 区间)有较多缺失。低海拔区风频分为两阶段,随时间推移向低速区聚集,1991—2016 年风频两极分化,低速及高速区增多,中间断层扩大。

③低海拔区静风风频最大(23.6%),其次是 N 向风(15.9%),2010 年代后,全面采用自动测风仪,灵敏度增加致使静风风频迅速减少。南岳山 N 向风频最大(13.8%),静风风频为 4.3%。

④参考有效风能密度标准,南岳山年风能丰富(273.4 W/m^2),其中 1—7 月风能丰富,8、11、12 月较丰富,9、10 月风能可利用。低海拔区有效风能密度 27.9 W/m^2,未达到可利用标准,2 月风能密度最大(34.7 W/m^2),9 月最小(24.4 W/m^2),但这与有效风能小时数结论存在一定差异。

参考文献

[1] 李艳,王元, 储惠芸,等. 中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响[J]. 科学通报,2008,53(21):2 646 - 2 653.

[2] 刘静,俞炳丰,姜盈霓,乌峭岭地区风速数据分析及风能密度计算[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(5):10 - 13.

[3] 郑祚芳,高华,刘伟东. 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,2014,35(5):338 - 345.

[4] 王毅荣,林纾,李青春,等. 河西走廊风能变化及储量[J]. 气象科技,2007,35(4):558 - 562.

[5] 张涛涛,延军平,李双双. 气候变化对晋西北地区风能资源的影响[J]. 干旱气象,2012,30(2):202 - 206.

[6] 陈涛,叶成志,陈德桥,等. 近 58 a 南岳高山气温变化特征及与低海拔地区对比[J]. 气象科技,2013,41(4):713 - 719.

[7] 王艳姣,周晓兰,倪绍祥,等. 近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析[J]. 南京气象学院学报,2003,26(2):28 - 235.

[8] 江滢,罗勇,赵宗慈. 近 50 a 我国风向变化特征[J]. 应用气象学报,2008,19(6):666 - 672.

[9] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近 50 a 中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):942 - 956.

[10] 郑礼新,张少丽,陈德龙,等. 台湾海峡西岸地面风气候变化分析[J]. 台湾海峡,2009,28(4):569 - 576.

[11] 尹宪志,郭爱民,卢会云,等. CAWS 型自动站与人工观测风速记录的对比分析[J]. 干旱气象,2006,24(1):57 - 59.

[12] 程爱珍,丘平珠,韦华红,等. 人工站与自动站风的自动观测资料差异分析[J]. 气象研究与应用,2010,31(4):82 - 85.