

我国大别山区风电场群对局地气候影响研究初探 ——以湖北大悟为例

张雪婷^{1,2} 李金鑫³ 陈正洪^{1,2} 何飞^{1,2} 崔杨^{1,2}

(1 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2 湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430205;
3 中广核新能源投资(深圳)有限公司湖北分公司, 武汉 430205)

摘要: 选取大悟县风电场群及其周边地区3个气象站1993—2016年气温、风速、降水观测资料, 采用可能受影响区和非受影响区气温差值、风速比值、降水比值法, 分别对风电场群建设前后的各气象要素进行了对比分析, 讨论了大悟县风电场群对当地气温、风速、降水的可能影响。结果表明: 风电场群建设和运行对大悟县局地气温和风速有一定影响, 其中气温明显上升, 风速有所减小, 但其影响程度小于年代际变化, 降水量则未见显著影响。由于大悟县风电场群建成时间较短, 且气象站的观测受到多种因素的影响, 因此风电场群运行造成的局地气候效应有待更长时间观测统计分析 & 更多研究方法的验证。

关键词: 局地气候影响, 风电场群, 气温, 风速, 降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.011

A Preliminary Exploration on the Influence of Wind Farms on Local Climate in Dabie Mountainous Areas in China: A Case Study of Dawu in Hubei Province

Zhang Xueting^{1,2}, Li Jinxin³, Chen Zhenghong^{1,2}, He Fei^{1,2}, Cui Yang^{1,2}

(1 Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205

2 Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, Wuhan 430205

3 CGN New Energy Investments (Shenzhen) Company Limited Hubei Branch, Wuhan 430205)

Abstract: Data of observed temperature, wind speed and precipitation from three meteorological stations in and around the Dawu wind farms from 1993 to 2016 were selected, and the temperature, wind speed and precipitation changes since the wind farms started producing energy were analyzed. The temperature, wind speed and precipitation before wind farms were operational were compared with those same factors after the wind farm became operational. The effect of the wind farm operations on regional climate was analyzed by temperature difference, wind speed ration, and precipitation ration between areas affected and unaffected by wind farm operation. The analysis showed that the local climate changed as a result of running the Dawu wind farms: temperature increased and wind speed decreased. However, the degree of influence is less than natural interdecadal variation in climate, and the wind farm operation had no significant effects on precipitation. Because the wind farms have only been operational for a short period of time, and observations from meteorological stations are subject to the impact of many factors, the local climatic effect caused by the construction of wind farms needs to be verified with observation statistics and analysis over a longer time.

Key words: local climate impact, wind farms, temperature, wind speed, precipitation

0 引言

风能是一种绿色的可再生能源, 风力发电更起到了节能减排的作用, 因此被誉为“气候变化的卫

士”^[1], 近年来在世界范围内得到规模化发展。风电开发和运行在带来积极环境效应的同时, 对生态环境甚至气候的一些不利影响越来越受到关注, 国内外也开始有了这方面的研究。

虽然风力发电不会像火力发电一样产生温室气体和其他污染气体, 但是由于风机涡轮振动、风能转化为电能, 改变了自然界原有的能源循环模式, 同时风电场的建设会改变地面的粗糙度, 从而改变陆表和大气热交换过程, 导致风电场对局地气候可能产生

收稿日期: 2018年9月20日; 修回日期: 2019年1月3日
第一作者: 张雪婷(1984—), Email: zhangxt_l_w@163.com
通信作者: 陈正洪(1964—), Email: chenzh64@126.com
资助项目: 国家重点研发计划(2018YFB1502801);
湖北省气象科技发展基金(2018Q10)

影响^[2]。大量建立在观测和数值模拟基础上的研究表明，风电场的建立和运行对局地下游气候会有明显影响，主要是造成下游风速明显减弱；同时对下游气温也有明显影响，其变暖或变冷效应取决于局地近地层大气稳定度特征^[3]。以2003—2011年期间的卫星遥感数据为基础，研究大型风电场的地表气温变化特征。与无风电场区域相比，有风电场区域的气温有一个较明显的增温趋势，且增温现象在夜间尤为显著^[4]。而风速通过风场区域后减小，存在风速损失，尤其对高空的风速影响明显，这种影响至少延伸到下风向的10 km之外^[5-6]。对于降水来说，风电场主要影响季节性降雨量，对平均降雨量的影响不显著^[7]。另外，风电场的运行通过昼夜循环还增加了空气、地表及土壤温度，且风机群形成的局地气候影响在温度和绝对湿度方面随着与风电场距离的增大成对数性减少^[8]。

湖北省地处我国中部，从2013年开始风电场数量迅速增多，截至2017年底已建成、在建、待建的风电场装机容量已达1000万 kW，并形成北部桐柏山大别山一线（随州至麻城）、中部襄荆通道（襄阳至荆门）、西南利川齐岳山高山、鄂东低山丘陵湖区（黄冈东部、黄石、咸宁）等风电场群，各自总装机容量已（将）超百万千瓦。以地处北部丘陵山区的大悟县为例，恰好位于我国中、高纬度南北气流通道中，风能资源丰富，近年风电场数量和风机台数快速增加，已建成风电场9个、投运风机231台，这些风电场对局地气候影响如何，各方均高度关注，当地居民质疑是否由于风电场的大量开发导致极端高温、暴雨山洪灾害加重。研究大悟县风电场群对气候的可能影响在我国中南部丘陵山区具有较好代表性。因此本研究旨在通过可能受影响区（后简称影响区）和非受影响区（后简称非影响区）风电场群建成前后气象参数差（比）值的进一步对比和分析，揭示风电场群对局地气候的可能影响，满足当地居民、政府以及企业等的强烈需求，并为今后提出趋利避害措施提供科学依据。

1 资料与方法

本文采用了大悟县风电场群周边3个国家气象站，即大悟、红安、黄陂气象站的气温、风速、降水资料进行分析（图1、表1）。其中红安、黄陂气象站周边没有建成的风电场，且上述地区的主导风向为偏北风，综合考虑位置和风向，上述两站未受到大悟县风电场群的影响，因此将红安、黄陂两地作为非影响区，而大悟周边尤其是北边逐步建成多个风电场，因此将其作为影响区。大悟已建成风电场基本情况如表2所

示。其中黄陂站距离大悟稍远，作为参考站。3个气象站点的基本情况如下：大悟气象站建站以来，迁站2次，分别在1978、2017年，其观测环境发生了较大变化（超高建筑），导致平均风速呈显著减小趋势，特别是2007年。红安气象站分别在1959、1980年迁过2次站，2005年之后，由于建筑遮挡，风速下降严重。黄陂气象站建站至今未曾迁站，观测环境较好，测风资料比较完整。

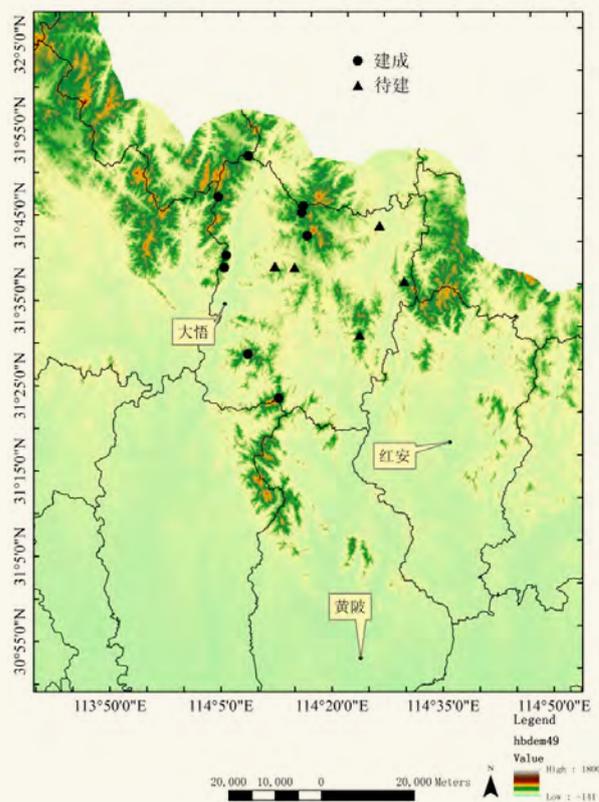


图1 风电场及周边气象站位置示意图

Fig.1 Map of meteorological stations around the Dawu wind farms

表1 大悟县风电场群周边国家气象站分布情况

Table 1 The distribution of meteorological stations around the Dawu wind farms

站名	纬度/°N	经度/°E	高度/m	与风电场群相对位置
红安	31°17'	114°37'	74.3	30.4~75.7 km, 位于风电场群东南边
黄陂	30°52'	114°24'	31.4	58.3~111.9 km, 位于风电场群东南偏南边
大悟	31°34'	114°07'	74.9	8.5~32.5 km, 位于风电场群之间

计算影响区与非影响区各自代表气象站同年的气温差值 (ΔT_1)、风速比值 (rV_1)、降水量比值 (rR_1)，再分别求取风电场建成后 (3 a、2 a) 与前 (20 a、10 a、5 a) ΔT_1 的差值 (ΔT_{2-3a} 、 ΔT_{2-2a})、 rV_1 的比值 (rV_{2-3a} 、 rV_{2-2a})、 rR_1 的比值 (rR_{2-3a} 、 rR_{2-2a})，从而剔除了大气候背景下气温、风速、降水量波动或

表2 大悟、红安、黄陂风电场建设情况 (含建成、在建、待建风电场)

Table 2 Construction of wind farms in Dawu, Hongan and Huangpi (including wind farms which are built, currently being built, or to be built)

所属地区	风电场名称	当前状态	装机容量/ 万kW	并网发电 时间	风机 台数	面积 /km ²	风机轮毂 高度/m
大悟县	风电场1	建成	2.2	2015.05	11	10	80/85
	风电场2	建成	3.0	2009.12	40	20.3	60
	风电场3	建成	9.6	2016.05	48	30	85
	风电场4	建成	4.8	2014.12	24	14.7	80
	风电场5	建成	2.2	2014.12	11		80
	风电场6	建成	3.6	2015.10	18	15	80
	风电场7	建成	4.8	2014.05	24	26.7	80
	风电场8	建成	4.8	2013.12	24	11	80
	风电场9	建成	4.96	2013.06	31	15	80
	风电场10	待建	6.4	/	/	/	/
	风电场11	待建	3.6	/	/	/	/
	风电场12	待建	3	/	/	/	/
	风电场13	待建	5	/	/	/	/
	风电场14	待建	7	/	/	/	/
红安县	风电场15	在建	4.6	/	/	/	/
黄陂区	风电场16	待建	4.95	/	/	/	/

趋势变化,可揭示出大悟县风电场群对当地气温、风速、降水的可能影响。

其中,

$$\Delta T_1 = T_{\text{大悟}} - T_{\text{红安}}, \quad (1)$$

$$rV_1 = V_{\text{大悟}} / V_{\text{黄陂}}, \quad (2)$$

$$rR_1 = R_{\text{大悟}} / R_{\text{红安}}, \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = \Delta T_{1\text{后}} - \Delta T_{1\text{前}}, \quad (4)$$

$$rV_2 = rV_{1\text{后}} / rV_{1\text{前}}, \quad (5)$$

$$rR_2 = rR_{1\text{后}} / rR_{1\text{前}}, \quad (6)$$

式中, T 为平均气温, V 为平均风速, R 为降水量, 后为2014—2016年(3 a)或2015—2016年(2 a), 前为1993—2012年(20 a)或2003—2012年(10 a)或2008—2012年(5 a)。

由于各站点资料时间长度不同,因此年际变化的分析采用1993—2016年的资料,近20、10、5年平均分别采用1993—2012、2003—2012、2008—2012年的资料,风电场陆续建成对局地气候影响的分析分别采用2014—2016年(建成后3年)、2015—2016年(建成后2年)资料同近20、10、5年平均值作对比。其中,大悟县风电场集中式的建设于2013年开始,同年共有2个风电场开始运行,并网发电时间分别为6、12月,因此不能确定2013年是否受到风电场群的影响,所以分析时暂不采用2013年的资料。

最后采用滑动 t -检验来判断气温差值、风速和降水比值序列的突变点,验证大悟县风电场群对当地气

温、风速、降水影响程度的显著性。

2 风电场群对气温的影响研究

2.1 风电场群周边气温变化特征

影响区(大悟站)、非影响区(红安站)1993—2016年累年平均气温分别为16.2、16.4 °C,其中,影响区平均气温在15.1(1993年)~17.0 °C(2016年)变化,非影响区平均气温在15.2(1993年)~17.2 °C(2007年)变化。1993—2016年影响、非影响区平均气温年际变化均略有上升,上升速率分别为0.43、0.35 °C/10 a。其中风电场群建成前(20 a),影响区与非影响区平均气温的年际变化基本一致,且均呈上升趋势,上升速率均为0.3 °C/10 a。除2014—2016年外,非影响区的平均气温均大于影响区(图2)。

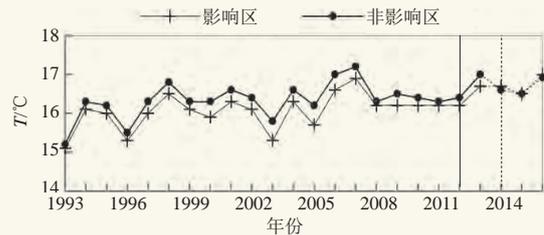


图2 影响、非影响区(1993—2016年)平均气温年际变化
Fig. 2 Interannual change in temperature average at the affected and unaffected areas during 1993—2016

计算影响与非影响两个区域的气温差值,即 ΔT_1 ,其历年变化曲线如图3所示。可以看出, ΔT_1 在2014年以后突然增大,由1993—2013年的负值变为正值,平均 ΔT_1 为0.06 °C,比1993—2012年的 ΔT_1 (-0.27 °C)增大了0.33 °C。由于气温差值已经排除了大气候背景下气温受气候变化的影响,可以近似认为这种影响与非影响区平均气温差值突然增大是由于风机涡轮作用混合了上下层空气导致的风电场局地气候效应造成的^[9],总体表现为增温。

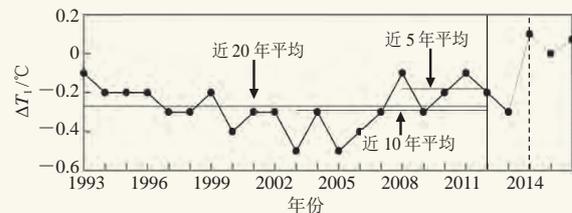


图3 影响、非影响区(1993—2016年)平均气温差值年际变化
Fig. 3 Interannual variation of ΔT_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

2.2 风电场群建成后气温的变化特征

为了讨论风电场群对近3年和近2年周边气温的影

响, 将2014—2016、2015—2016年气温与常年气温进行对比分析。表3分别计算了近20、10、5年四季及年的 ΔT_1 与近3、2年四季及年的 ΔT_1 。

表3 影响区与非影响区气温差值比较 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Table 3 Comparison of ΔT_1 between the affected and unaffected areas (unit: $^{\circ}\text{C}$)

时段	1993—2012年	2003—2012年	2008—2012年	2014—2016年	2015—2016年	
ΔT_1	春	-0.04	-0.01	0.00	0.20	0.05
	夏	-0.19	-0.29	-0.19	0.10	0.06
	秋	-0.46	-0.46	-0.30	-0.15	-0.08
	冬	-0.38	-0.36	-0.25	0.05	0.06
	年	-0.27	-0.29	-0.18	0.06	0.04
ΔT_{2-3a}	春	0.24	0.21	0.20		
	夏	0.30	0.39	0.30		
	秋	0.31	0.31	0.15		
	冬	0.43	0.41	0.30		
	年	0.33	0.35	0.24		
ΔT_{2-2a}	春	0.09	0.06	0.05		
	夏	0.25	0.34	0.25		
	秋	0.38	0.38	0.22		
	冬	0.44	0.42	0.31		
	年	0.31	0.33	0.22		

计算结果显示, 常年四季及年的 ΔT_1 基本为负值, 在 $-0.46 \sim 0.00$ $^{\circ}\text{C}$, 近3年四季及年的 ΔT_1 在 $-0.15 \sim 0.20$ $^{\circ}\text{C}$, 比常年增大 $0.15 \sim 0.43$ $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 夏季和冬季增大 0.30 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 春季和秋季增大 0.15 $^{\circ}\text{C}$ 以上。近2年四季及年的 ΔT_1 在 $-0.08 \sim 0.06$ $^{\circ}\text{C}$, 比常年增大 $0.05 \sim 0.44$ $^{\circ}\text{C}$ 。其中, 冬季增大 0.31 $^{\circ}\text{C}$ 以上, 春季未超过 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。可见, 建风电场后, 四季及年的 ΔT_1 比建风电场前有所增大, 春季增大较少, 冬季增大较多, 且近2年的春夏气温变化较近3年的春夏气温变化略微偏小, 秋季略微偏大, 但从全年来看两者区别不大。

3 风电场群对风速的影响研究

3.1 大悟站平均风速的订正

调查表明, 20世纪80年代末以来, 全国城市化加剧, 至90年代初中期, 许多气象站所在地由原来的远郊区变为近郊区, 四周盖起了楼房, 一些观测场环境遭到严重破坏, 观测到的风速逐步甚至急剧减小。其中, 大悟气象站(影响区)建站以来, 观测环境发生了较大变化, 导致平均风速呈现显著减小趋势, 特别是2007年, 观测场周围有住户强行超高建房, 进一步破坏了探测环境(年平均风速已经由60年代的 $3 \sim 4$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至2007—2011年的 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下)。红安气象站(非影响区)于2005年修建了新的办公楼, 观测站受到遮挡, 导致2005年之后风速明显下降。而同为非影响区的黄

陂气象站建站至今未曾迁站, 观测场环境较好, 因此在风的分析中采用黄陂作为非影响区。而为了撇除地面观测站受周边环境等变化而造成的风速减少, 我们对大悟站进行订正(由于大悟站1978年迁站, 因此1978年之前的风速不采用)。

由于黄陂气象站周围环境变化不大, 且年平均风速变化比较平缓, 因此认为黄陂气象站风速的变化为自然变化, 以此对大悟气象站由于测风环境引起的风速减小进行订正。大悟和黄陂气象站年平均风速1990—2006年比2007—2016年分别减少 0.70 、 0.07 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。黄陂和大悟气象站地理位置较为接近, 因此可初步认为在大气背景风速受气候变化影响的变量是相等的, 1990—2006年两站环境均无明显变化, 因此以此时间段为基准, 将两站1990—2006年较2007—2016年的平均年平均风速变化做差值, 即 $0.70 - 0.07 = 0.63$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 可认为该值排除了自然因素(气候变化), 为2007—2016年间人为因素的影响量, 将 0.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 加到大悟气象站2007—2016年逐年平均风速实测值上便得到了自然条件下的逐年平均风速值。订正后的1990—2016年逐年平均风速变化曲线见图4。

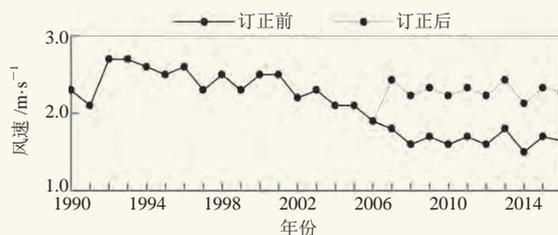


图4 大悟气象站(1990—2016年)平均风速年际变化
Fig. 4 Interannual changes in mean wind velocity of Dawu Meteorological Station during 1990—2016

3.2 风电场群周边风速变化特征

影响区、非影响区1993—2016年累年平均风速分别为 2.3 、 1.9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中, 影响区平均风速在 1.9 (2006年) ~ 2.7 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1993年)变化, 非影响区平均风速在 $1.7 \sim 2.1$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化。1993—2016年影响、非影响区平均风速年际变化均呈下降趋势, 下降速率分别为 0.143 、 0.067 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10$ a。其中风电场群建成前(20 a), 影响区与非影响区平均风速的年际变化基本一致, 且均呈下降趋势, 下降速率均为 0.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}/10$ a (图5)。

图6给出影响区与非影响区的年平均风速比值(rV_1)历年变化曲线。可以看出, rV_1 呈波动性变化, 各年在 $1.1 \sim 1.5$, 2014—2016年的 rV_1 值在1993—2016年所有值中偏小, 但总体来看其变化还是位于年

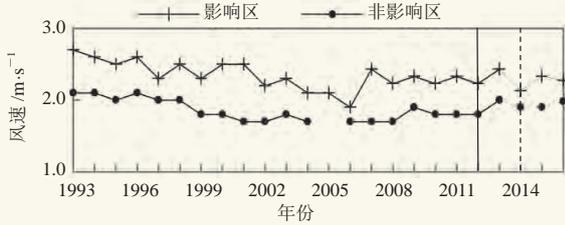


图5 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均风速年际变化
Fig. 5 Interannual changes in mean wind velocity at affected and unaffected areas during 1993—2016

际变化周期中。其中，2005年黄陂站风速缺测。

3.3 风电场群建成后风速的变化特征

表4分别计算了近20、10、5年的 rV_1 与2014—2016、2015—2016年的 rV_1 ，并进行了对比。

表4 影响区与非影响区风速比值比较
Table 4 Compare of rV_1 between the affected area and non-affected area

时段	rV_1	rV_{2-3a}	rV_{2-2a}
1993—2012年	1.27	0.91	0.93
2003—2012年	1.26	0.92	0.94
2008—2012年	1.26	0.92	0.94
2014—2016年	1.16		
2015—2016年	1.19		

计算结果显示，常年 rV_1 在1.26~1.27，近3年的 rV_1 为1.16，近2年的 rV_1 为1.19。而 rV_{2-3a} 和 rV_{2-2a} 分别在0.91~0.92和0.93~0.94。可见， rV_1 在大悟县风电场群并网发电前后有略微差异，风速比建风电场前减小，且近2年的风速变化较近3年的风速变化略微偏小。

4 风电场群对降水的影响研究

4.1 风电场群周边气温变化特征

影响区、非影响区1993—2016年累年平均降水量分别为1091.6、1174.5 mm。其中，影响区平均降水量在567.6 (2011年)~1744.7 mm (2016年)变化，非影响区平均降水量在694.7 (2011年)~1857.6 mm (2016年)变化。风电场群建成前 (20 a)，影响区与非影响区降水量的年际变化基本一致，且均呈下降趋势。2014—2016年影响、非影响区平均降水量年际变化呈上升趋势，且影响区2016年降水量为1961年以来最大值 (图7)。

图8给出影响区与非影响区的年降水量比值 (rR_1) 的历年变化曲线。可以看出， rR_1 总体上有微弱的下降趋势，2014—2016年的 rR_1 值均小于1，但与前期相比，该段比值的变化仍位于年际变化周期中。由于降水量比值已经排除了大气候背景下降水受气候变化的影响，可以近似认为大悟县风电场群对降水的

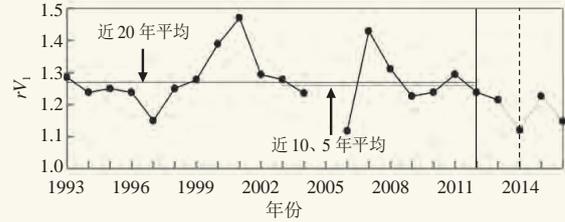


图6 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均风速比值年际变化
Fig. 6 Interannual change of rV_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

影响不大。

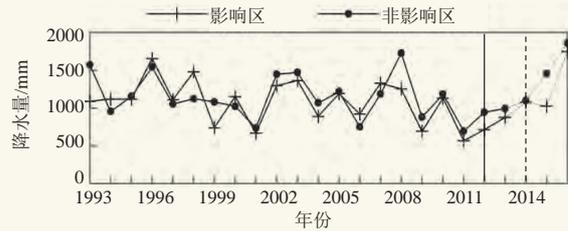


图7 影响、非影响区 (1993—2016年) 降水量年际变化
Fig. 7 Interannual change of precipitation at affected and unaffected areas during 1993—2016

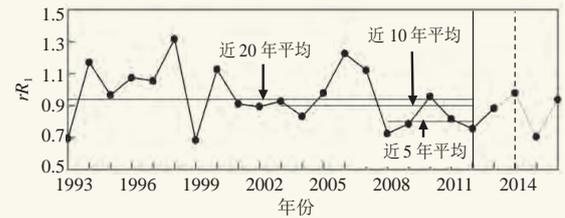


图8 影响、非影响区 (1993—2016年) 平均降水量比值年际变化
Fig. 8 Interannual change of rR_1 between the affected and unaffected areas during 1993—2016

4.2 风电场群建成后降水的变化特征

表5分别计算了近20、10、5年的 rR_1 与2014—2016、2015—2016年的 rR_1 ，并进行了比较分析。

计算结果显示，常年 rR_1 在0.80~0.94，近3年 rR_1 为0.87，近2年 rR_1 为0.84。可见，近3年及近2年的降水量比值均在常年降水量比值范围内， rR_{2-3a} 和 rR_{2-2a} 分别在0.93~1.09和0.89~1.04，且在1上下浮动。可见， rR_1 在大悟县风电场群并网发电前后仅有略微差异，风

表5 影响区与非影响区降水量比值比较
Table 5 Comparison of rR_1 between the affected and unaffected areas

时段	rR_1	rR_{2-3a}	rR_{2-2a}
1993—2012年	0.94	0.93	0.89
2003—2012年	0.90	0.97	0.93
2008—2012年	0.80	1.09	1.04
2014—2016年	0.87		
2015—2016年	0.84		

电场群形成的局地气候对降水量的影响并不明显。

5 突变检验

为了验证大悟县风电场群对当地气温、风速、降水影响程度的显著性。采用滑动 t -检验来判断气温差值、风速和降水比值序列的突变点。

经过计算发现,气温差值序列于2013年通过0.001显著性水平,可见气温差值在2013年后发生了明显的突变。风速比值序列于2012年通过0.05显著性水平,可见风速比值在2012年后发生了突变。而大悟县风电场群从2009年开始建设,并于2014年大规模建成,因此风电场群的运行对当地气温的影响明显,对风速也有较小影响。而降水比值序列在2009年之后并未发生突变,说明风电场群的运行对降水的影响不太明显。

6 结论与讨论

本文以大悟县风电场群为研究对象,对比分析了风电场群影响区和非影响区的站点在风电场群运行前后气温、降水、风速要素的变化,具体结果如下。

1) 大悟县风电场群形成的局地气候对气温造成了影响,总体表现为增温。其中, ΔT_1 序列从2014年突然增大,比常年 ΔT_1 增大0.24℃以上,可见大悟县风电场陆续投入运行后,影响区气温明显升高,春季增温较小,冬季增温较大,且近2年的春夏气温变化较近3年的春夏气温变化略微偏小,秋季略微偏大,但从全年来看两者区别不大。

2) 大悟县风电场群形成的局地气候对风速有一定影响,总体表现为风速减小。其中, rV_1 序列在2014年以后略有减小,与常年 rV_1 的比值,即 rV_2 在0.91~0.94,可见大悟县风电场陆续投入运行后,影响区风速有略微减小趋势。但是,风速在风电场群影响期(后3年)的波动未超出其年代际变化。

3) 大悟县风电场群形成的局地气候对降水量的影响不大。近3、2年 rR_1 与常年 rR_1 的比值,即 rR_2 在0.89~1.09,且近3、2年的 rR_1 在常年 rR_1 的范围内,可见风电场群影响期的变化位于年际变化周期中,因此风电场群的运行对其影响不太明显。

与目前国内外相关的研究(主要采用数值模拟或

在现场进行观测的方法)相比,本文采用了国家气象站资料进行分析,其研究地点仅涉及单点,造成了一定局限性。如涉及风电场附近有实际观测的研究,其研究时间多为风电场运行后五至几十年,本文仅采用大悟县风电场群运行后3年时间的观测资料与历史气候值作对比分析,时间略短。另外,气象站的观测还受到多种因素的影响,尤其是周边环境及仪器设备的维护和更换,分析方法也较为简单,因此对风电场群建设造成的局地气候效应有待更长时间观测统计分析 & 更多研究方法的验证。

由于大悟县的主要产业是农林牧渔业,受到城市化的影响较小,因此文章未考虑排放、城市化等因素的影响。未来随着城市的逐渐发展应适当考虑这些因素的影响。

参考文献

- [1] Leung D Y C, Yang Y. Wind energy development and its environmental impact: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(1): 1031-1039.
- [2] Xia G, Zhou L M, Freedman J M, et al. A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field campaign. *Climate Dynamics*, 2016, 46: 2179-2196.
- [3] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 风电场对气候变化影响研究进展. *气候变化研究进展*, 2011, 7(6): 400-406.
- [3] Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y. Advances in assessment on impacts of wind farms upon climate change. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(6): 400-406.
- [4] Zhou L M, Tian Y H, Roy S B. Impacts of wind farms on land surface temperature. *Nature Climate Change*, 2012: 539-543.
- [5] 刘磊, 高晓清, 陈伯龙, 等. 大规模风电场建成后对风能资源影响的研究. *高原气象*, 2012, 31(4): 1139-1144.
- [5] Liu L, Gao X Q, Chen B L, et al. Preliminary estimates of wind energy resources deficit in large wind farm. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(4): 1139-1144.
- [6] Frandsen S T, Jorgensen H E, Barthelmie R, et al. The making of a second generation wind farm efficiency model complex. *Wind Energy*, 2009, 12: 445-458.
- [7] Fiedler B H, Bukovsky M S. The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 1-6.
- [8] Armstrong A, Burton R R, Lee S E, et al. Ground-level climate at a peatland wind farm in Scotland is affected by wind turbine operation. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (4): 044024.
- [9] Roy S B, Traiteur J J. Impacts of wind farms on surface air temperature. *PNAS*, 2010, 107 (42): 17899-17904.