

黑龙江省东部地区风能资源数值模拟误差分析

王庆祥, 徐永清 (黑龙江省气候中心, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要 利用 MM5 + CALMET 模型对黑龙江省东部地区 2009 年 6 月~2010 年 5 月进行风能资源数值模拟, 并与 3 座测风塔实测风速进行误差对比分析。结果表明, 在 10 m 处, 各测风塔年平均风速模拟值小于实测值, 10 m 以上, 年平均风速模拟值大于实测值; 模拟风速频率在 2~5 m/s 小于实测风速频率, 在 6~10 m/s 大于实测风速频率, >10 m/s 与实测风速频率基本相当; 模型对风向的模拟效果不如对风速的模拟效果, 虽然 70 m 高度模拟主导风向与实测风主导风向基本一致, 但模拟值与实测值相差较大; 模型对风能频率的模拟效果优于对风速频率与风向频率的模拟。

关键词 MM5; Calmet; 风能资源; 数值模拟; 误差分析; 黑龙江省东部地区

中图分类号 S213 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)13-03996-04

Analysis on Wind Energy Numerical Simulation Error in Eastern Region of Heilongjiang Province

WANG Qing-xiang et al (Heilongjiang Climate Center, Harbin, Heilongjiang 150030)

Abstract MM5/Calmet model system was used to simulate wind energy in eastern region of Heilongjiang Province during June 2009 to May 2010, and the simulated results were analyzed with the determination data from 3 anemometer towers. The results showed that: the simulated value of annual average wind speed was smaller than observed value on 10m, and was higher than observed value above 10m; the simulated frequencies of wind speed was lower than observed value between 2-5 m/s, and was higher than observed value between 6-10 m/s, and was as similar as observed value above 10m/s; The performance of simulating wind direction frequency was not as better as those of simulating wind speed frequency, the model could simulate observed dominant wind direction although the simulated value was obviously smaller than observed value; the simulation capacity on wind energy density was better than capacity on wind frequency.

Key words MM5; Calmet; Wind energy; Numerical simulation; Error analysis; Eastern region of Heilongjiang Province

我国风电总装机从 2005 年起连续 5 年以 100% 的速度增长, 到 2010 年底, 累计装机容量达 4 487.1 万 kW, 超越了美国, 跃居世界第 1 位。风电的快速发展对风能资源评估提出了更高的要求, 为了解决风能资源评估观测资料在空间分布密度和观测时间长度方面的限制, 中、小尺度数值模式在风能资源评估中的应用技术得到快速发展。近年来我国的很多科研机构开始了风能资源数值模拟研究^[1-4]。如龚强等在辽宁省风能资源普查中应用 MM5 模式模拟了辽宁省的风能资源状况^[5]。2005 年中国气象局风能太阳能资源评估中心引进了加拿大气象局风能资源数值模拟系统, 在此基础上经过本地化的改进后, 建立了中国气象局风能资源数值模式系统^[6]。

为了满足风电产业大规模开发的需要, 必须要精细化模拟评估区域性的风能资源, 大多数中尺度模式很难达到精细化模拟的需求。即使中尺度模型能够实现精细化模拟, 但对于区域性模拟需耗费大量机时, 不能满足目前风能资源评估工作的需求。因此, 需要通过动力降尺度的方法来实现风能资源精细化数值模拟, 并达到可用的精度。中尺度气象模式 MM5 被广泛应用于中尺度及区域尺度的大气环流, 适用于对空气质量、水文情况和风能资源进行数值模拟研究^[7-8]。CALMET 模块是一个风场诊断模式, 目前主要应用于大气污染扩散的研究及应用^[9]。黑龙江省东部低山丘陵地区风能资源丰富, 适宜建设大型风电场。笔者运用中尺度气象模式 MM5 结合微尺度模式 CALMET 对黑龙江省东部地区 2009 年 6 月~2010 年 5 月的风能资源进行模拟研究, 对 MM5/Calmet 模式模拟结果与黑龙江省东部 3 座 70 m 高测风

塔资料进行了详细对比分析, 评估该模式对该地区的风能资源模拟能力。

1 资料与方法

1.1 MM5/CALMET 数值模式系统及模拟方案介绍 中尺度气象模式 MM5 是美国宾夕法尼亚大学和美国国家大气研究中心联合开发的, 是一个完全可压非静力的中尺度天气数值模型, 适合于有限区域的中度数值预报模式。该模式自 20 世纪 70 年代问世以来, 经过全球各国大气物理学家的共同努力, 目前已发展成为全球最成熟的中尺度天气数值预报系统之一。CALMET 是污染气象模式 CALPUFF 的气象模块, 包括诊断风场模块和微气象模块。诊断风场模块对初始猜测风场(MM4 或 MM5 网格风场、常规监测的地面与高空气象数据)进行地形动力学、坡面流、地形阻塞效应调整, 产生第一步风场, 导入观测数据后, 并通过插值、平滑处理、垂直速度计算、辐散最小化等产生最终风场; 微气象模块根据参数化方法, 利用地表热通量、边界层高度、摩擦速度、对流速度、莫宁-一奥布霍夫长度等参数描述边界层结构。

MM5 模式采用两层嵌套, 两层区域的网格分辨率分别为 27 km × 27 km 和 9 km × 9 km, 垂直方向共分为 30 层, 模拟计算时间为 2009 年 6 月 1 日~2010 年 5 月 31 日, 逐日进行模拟计算; 再将 MM5 模式 9 km × 9 km 水平分辨率的模拟结果作为 CALMET 模式的初始场, 进行降尺度诊断计算, 得到 1 km × 1 km 水平分辨率逐时风资源分布结果; 最后将网格点上的模拟结果通过双线性内插的方法插到测风塔上。

1.2 资料选取 采用全球环流模式背景场资料 NCEP/FNL 客观分析场融合中国气象局常规探空和地面观测资料(MI-CAPS 资料)作为中尺度模式初始场(边界条件)。MM5 模式地形地表资料采用 30 s 水平分辨率的 USGS 资料。CALMET 模式地形资料采用 SRTM3 资料(3 s 分辨率, 约 90 m), Land-

use 数据采用 30 s 水平分辨率的 USGS 资料。同时,选取黑龙江省东部地区 3 座测风塔的实际测风资料。3 座测风塔共有 4 层风速观测,分别为 10、30、50、70 m,2 层风向观测,分别为 10、70 m。3 座测风塔均位于东部低山丘陵地区,具体信息如表 1 所示,因为目前风电场的主流风机轮毂高度为 70 m,所以,在此主要针对 70 m 高度的资料进行分析。

2 结果与分析

2.1 风速模拟误差分析

2.1.1 年平均风速分析。分析 2009 年 6 月 1 日~2010 年 5 月 31 日逐时模拟风速与测风塔观测风速(表 1)可见,10 m

高度 2#测风塔实测风速等于模拟风速,1、3#测风塔实测风速均大于模拟风速,因为风功率密度较小,风功率相对误差较大;10 m 以上,各测风塔均是模拟风速大于实测风速,且风速相对误差随高度增加有增大趋势,风速模拟垂直变化较大;70 m 高度,2#测风塔风速相对误差最大,为 14.0%,1#测风塔风速相对误差最小,为 6.2%;70 m 风功率相对误差较风速相对误差大,2#测风塔最大,为 23.7%,1#测风塔最小,为 9.8%。3 座测风塔中 2#测风塔模拟风速和风功率相对误差较大,1#、3#测风塔误差较小。3 座测风塔在 70 m 高度上风速相对误差平均为 10.0%,风功率相对误差平均为 16.8%。

表 1 模拟风速与实测风速值参数

塔号	高度 m	实测风速 m/s	模拟风速 m/s	实测风功率 W/m ²	模拟风功率 W/m ²	风速相对误差 %	风功率相对误差 %	经度//°E	纬度//°N	海拔 m
1#	10	4.6	4.0	123.1	81.8	13.0	33.3	130.33	46.64	335
	30	5.1	5.4	179.1	173.9	5.9	2.9			
	50	5.9	6.2	223.6	268.4	5.1	20.0			
	70	6.4	6.8	307.6	337.6	6.2	9.8			
2#	10	3.9	3.9	87.1	74.9	0	14.0	130.54	46.63	172
	30	4.8	5.3	134.3	176.6	10.4	31.5			
	50	5.3	6.1	196.8	248.5	15.1	26.3			
	70	5.7	6.5	240.3	297.2	14.0	23.7			
3#	10	4.4	4.1	125.6	90.7	6.8	27.8	130.45	46.39	212
	30	5.4	5.5	220.0	198.8	1.9	9.6			
	50	5.7	6.2	255.0	289.5	8.8	13.5			
	70	6.1	6.7	296.5	346.8	9.8	17.0			

2.1.2 70 m 风速、风能频率分析。

2.1.2.1 1#测风塔。由图 1 可见,70 m 实测风速频率最大值出现在 6~7 m/s,均为 11.8%,模拟风速频率最大值出现在 6 m/s,为 12.8%;7 m/s 为 12.1%;实测与模拟风速频率均是主要集中在 4~8 m/s,均占总风频的 50% 以上;≤5 m/s 的区间模拟频率小于实测频率,8~9 m/s 模拟频率大于实测

频率,其他区间基本相当。风能实测频率最大值出现在 10 m/s,为 11.5%,11 m/s 次大,为 11.4%;模拟频率最大值在 9 m/s 最大,为 11.5%,10、11 m/s 均在 10.8%;模拟与实测风能均主要集中在 9~12 m/s,占 40% 以上,各风速区间模拟值与实测值差别均不大,风能频率模拟优于对风速频率的模拟。

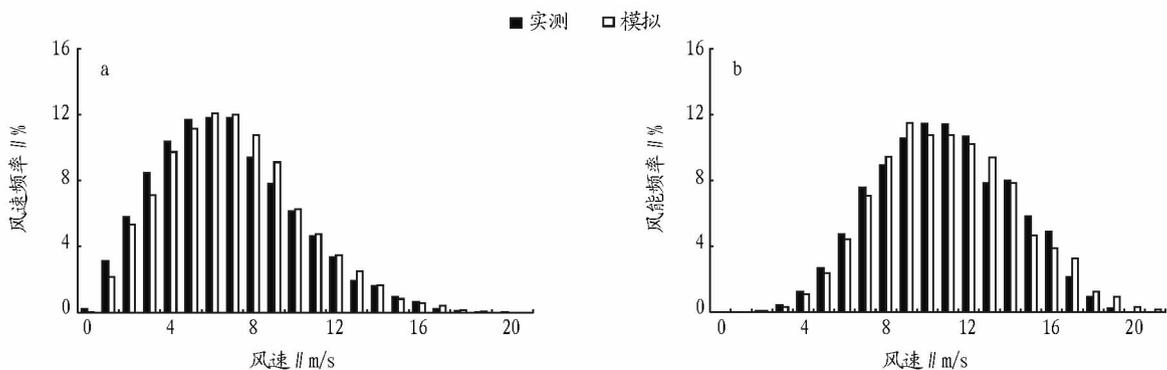


图 1 1#测风塔 70 m 模拟与实测风速(a)与风能(b)频率分布

2.1.2.2 2#测风塔。由图 2 可见,70 m 风速频率实测最大值出现在 4 m/s,达 11.9%,模拟频率最大值出现在 5 m/s,为 13.2%,4 m/s 风速频率为 11.4%;实测风速频率主要集中在 2~7 m/s,占 60% 以上,模拟风速频率主要集中在 3~8 m/s,占 60% 以上;模拟风速频率在 ≤4 m/s 区间小于实测频率,在 5~13 m/s 模拟风速频率大于实测频率。实测风能频率

最大值出现在 9 m/s,为 12.2%,模拟风能频率最大值出现在 10 m/s,为 14.7%,在 9 m/s 模拟频率为 12.0%;实测风能频率主要集中在 7~11 m/s,占 50% 以上,模拟风能频率主要集中在 8~13 m/s,占 60% 以上;模拟风能频率在 ≤9 m/s 小于实测风速频率,在 ≥10 m/s 模拟风速频率大于实测风速频率。

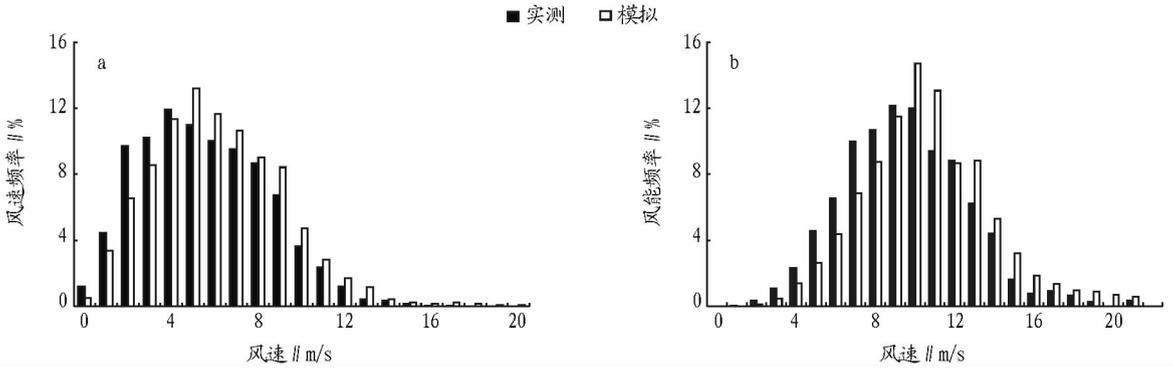


图2 2#测风塔70 m模拟与实测风速(a)与风能(b)频率分布

2.1.2.3 3#测风塔。图3显示,70 m 风速频率实测最大值出现在3 m/s,为13.4%,模拟频率最大值出现在6 m/s,为11.5%;实测风速主要集中在2~6 m/s,占60%以上,模拟风速主要集中在3~8 m/s,占50%左右;模拟风速频率在2~5

m/s 小于实测风速频率,在 ≥ 6 m/s 区间大于实测风速频率。模拟风能频率最大值出现在11 m/s,为13.2%,实测风能频率最大值出现在10 m/s,为9.6%,模拟与实测风能均主要集中在8~13 m/s,占50%以上。

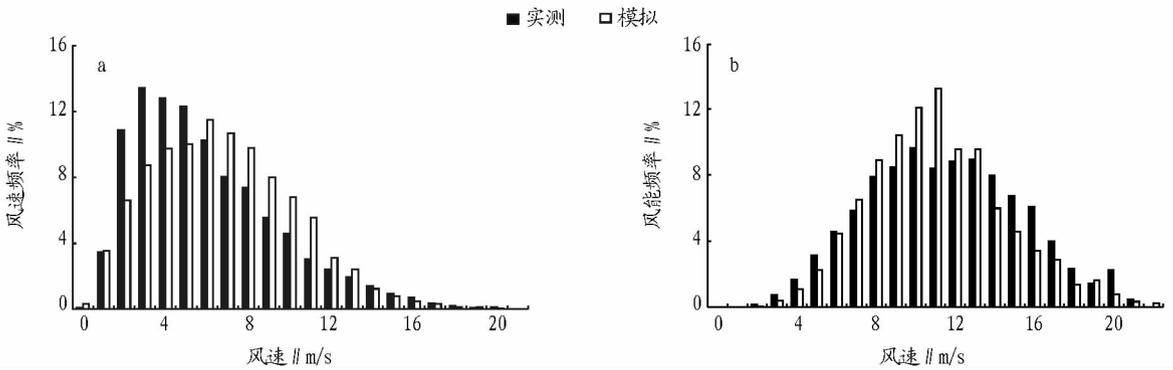


图3 3#测风塔70 m模拟与实测风速(a)与风能(b)频率分布

3座测风塔70 m 高度处,基本是模拟风速频率在2~5 m/s 小于实测风速频率,在6~10 m/s 大于实测风速频率,> 10 m/s 区间与实测风速频率基本相当,高度越高与实测风速越接近。而风速>10 m/s 区间是风机发电量最高、对风电场最重要的风速区间。各测风塔的风能频率模拟均优于对风速频率的模拟,6~10 m/s 模拟风能频率大于实测风能频率,其他区间与实测风能频率值基本一致。

2.2 风向模拟误差分析

2.2.1 1#测风塔。由图4可见,70 m 实测主导风向为SSW、S,分别占22.7%和13.4%,此外NNE所占比例也比较高,为7.8%;模拟主导风向为W,占11.75%,其次为SSW,占11.2%。实测风能频率主要集中在SSW、S,分别占21.9%、12.9%,NNE所占比例为8.6%;模拟风能频率主要集中在W~S,最大值为SSW风向,为14.1%,在实测风能另一个集

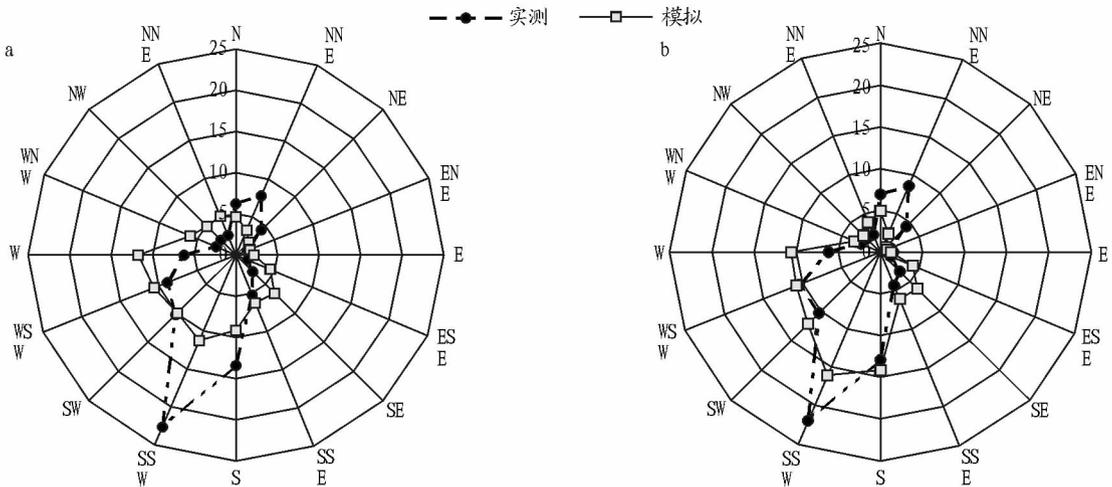


图4 1#测风塔70 m模拟与实测风向(a)与风能(b)玫瑰图

中区域 NNE、N 方向,模拟值较小。

2.2.2 2#测风塔。经分析(图 5),70 m 实测主导风向为 SW,占 24.8%,其次为 WSW,占 14.2%;模拟主导风向也为 SW,占 13.8%,其次为 SSW,占 11.3%,WSW 风向占 9.5%。

实测风能频率主要集中在 SW,占 38.2%,其次为 WSW,占 22.3%,2 个风向之和占总风能的 60% 以上;模拟风能频率主要集中在 SW,占 16.7%,在 SSE ~ SW 风向,风能频率均在 10% 以上,WSW 风向仅占 8.3%。

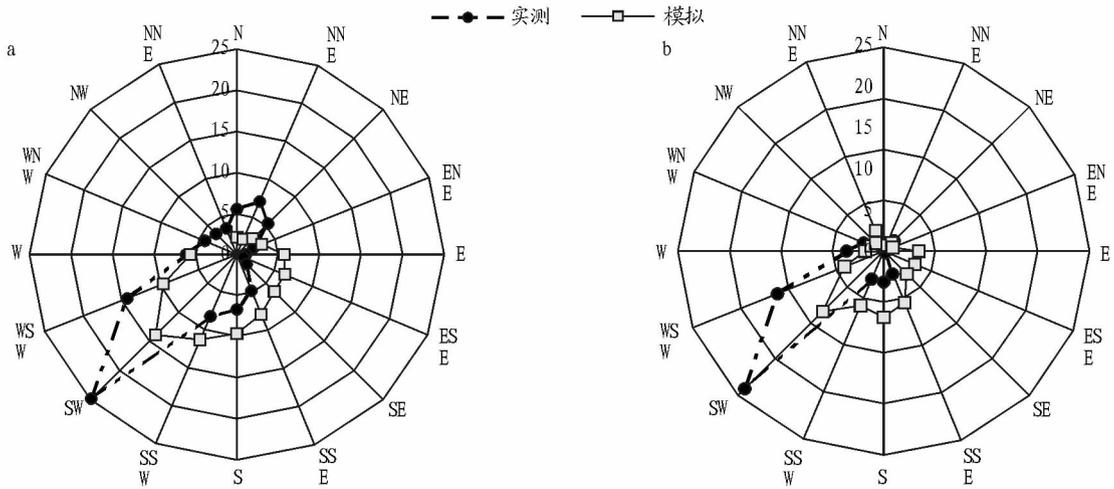


图 5 2#测风塔 70 m 模拟与实测风向(a)与风能(b)玫瑰图

2.2.3 3#测风塔。由图 6 可见,70 m 实测主导风向为 W,占 26.8%,其次为 WSW,占 13.2%;模拟主导风向也为 W,占 15.4%,其次为 WNW,占 12.6%。实测风能频率在 W 最大,

为 38.8%,其次为 WSW,占 32.4%;模拟风能频率也是在 W 最大,为 20.6%,其次为 WNW,占 17.2%。

3 座测风塔的实测主导风向非常明显,主导风向的数值

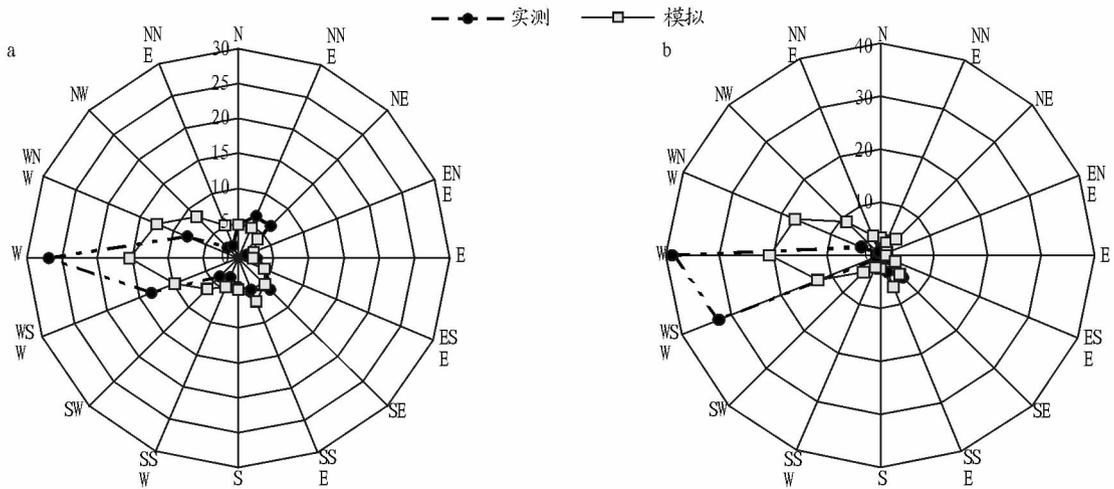


图 6 3#测风塔 70 m 模拟与实测风向(a)与风能(b)玫瑰图

均在 20% 以上。MM5 + CALMET 模型对风向的模拟结果表明,模型可以准确地模拟出各测风塔的主导风向,但数值较实测风向数值小得多,仅为实测主导风向值的 50% 左右,该模型在对风向模拟中,各风向数值较实测值趋于平均,与实际风向差异较大。风能频率模拟优于风向频率模拟,最大值风向一致性较高,但模拟频率值较实测频率值偏小较为明显。

3 结论

利用 MM5 + CALMET 模型对黑龙江省东部地区 2009 年 6 月 ~2010 年 5 月的风能资源进行数值模拟误差分析,结果表明,模拟年平均风速除 10 m 外,均大于实测风速,且风速相对误差随高度增加有增大趋势,风速模拟垂直变化较大,

70 m 高度上风速相对误差平均为 10%,风功率相对误差平均为 16.8%;风速频率模拟中,模型对风速 > 10 m/s 区间具有较强的模拟能力;风能频率模拟优于风速频率模拟,与实测风能频率分布基本一致;对风向频率的模拟,模型能较好地模拟出主导风向的分布,但主导风向的数值明显小于实测主导风向的数值,模拟风能频率与实测值的分布风向比较一致。该模型对黑龙江省东部地区 70 m 高度(目前主流风机的轮毂高度)的风速、风向具有较强的模拟能力,尤其是对风电场最重要的 > 10 m/s 风速区间、主导风向模拟能力更强。该模型可以模拟出黑龙江省东部地区风能资源的基本特征,

(下转第 4009 页)

发现在雷暴日数偏多的 20 世纪 60 年代,降水量偏多、气温偏低;之后随着气温升高,降水量减少,雷暴日数也减少;但从 2000 年以后,虽然降水量有增有减,但雷暴日数减少最多,同时也是增温最明显的时期,气温升高对雷暴减少的影响更加明显。

2.4 雷暴初、终日和初终间日数的变化 由表 3 可知,1964~2013 年天水市平均雷暴初日为 4 月 21 日,初雷暴日最早出现在 2 月 22 日(秦安 1979 年);平均雷暴终日为 9 月 25 日,终雷暴日最晚出现在 11 月 29 日(清水、张家川 2011 年);天水市平均雷暴初终日数为 157 d,最多为武山 177 d,最少为麦积 132 d。通过对天水市 1964~2013 年雷暴初终日数变化趋势的分析发现,清水、张家川雷暴初终日数没有明显变化;甘谷、武山、麦积雷暴初终日数有延长的变化趋势,其延长趋势为 1.4~2.6 d/10a;秦州、秦安雷暴初终日数有缩短的变化趋势,其缩短趋势为 1.1~4.4 d/10a;7 站平均而言,天水市 50 年雷暴初终日数总体变化趋势基本不变。

表 3 1964~2013 年天水市各地雷暴平均初、终日期及初终日数对比

县区	平均初日	最早初日	平均终日	最晚终日	平均初终日数//d
秦州	05-05	03-19(2012)	09-25	10-30(1985)	144
麦积	04-30	03-15(1976)	09-08	10-30(1999)	132
秦安	04-08	02-22(1979)	09-12	11-03(1964)	158
甘谷	04-14	03-18(2012)	09-26	11-04(1968)	166
武山	04-08	03-03(1998)	10-01	11-16(2002)	177
清水	04-28	03-19(1981)	10-06	11-29(2011)	162
张家川	04-26	03-21(2009)	10-05	11-29(2011)	163
全市平均	04-21	03-18(2012)	09-25	11-29(2011)	157

3 小结

(1) 天水市各站年平均雷暴日数在 13.7~26.6 d,全市平均为 19.7 d;全市最多、最少年雷暴日数分别为 45 和 4 d,平均最多、最少年雷暴日数分别为 32.4 和 7.7 d。不同年份各站雷暴日数变化较大,其变化幅度在 4~45 d,平均变幅为 18~35 d,其 7 站平均差值为 24.7 d。

(2) 天水市雷暴日的月变化呈单峰型。主汛期(4~9 月)雷暴出现日数占全年雷暴总日数的 96%,其中主峰集中在 5~8 月,平均每月约为 3.6~4.8 d,占全年雷暴总日数的 81%。月变化和季节变化与降水量变化趋势基本一致。

(3) 天水市平均雷暴初日为 4 月下旬,初雷暴日最早出

现在 2 月 22 日;平均雷暴终日为 9 月下旬,终雷暴日最晚出现在 11 月 29 日;天水市平均雷暴初终日数为 157 d,最多为武山 177 d,最少为麦积 132 d。

(4) 天水市各地雷暴出现日数与地域(海拔)的关系非常大,自西南向东北方向逐渐增多,与海拔高度呈明显的正相关。东北部海拔最高的张家川县是年雷暴日数最多的地方,年平均雷暴日数达 26.6 d;西南部海拔较低的秦州、麦积两区雷暴日数分别仅为 13.7 和 15.2 d。

(5) 近 50 年来天水平均雷暴日数总体呈下降趋势,但雷暴日数的减少并不能说明单个雷暴日中雷暴次数的减少和单个雷暴强度的下降,更不能由此得出雷暴造成的灾害损失也相应减少的结论,因为雷暴造成的损失不仅与雷暴特性密切相关,还与地区经济发展程度、城市现代化程度、防雷减灾意识和措施等密切相关^[16-17]。雷暴活动对社会经济发展和人民生命财产安全还存在严重的威胁,因此防雷减灾安全研究工作仍需持续。

参考文献

- [1] 陈渭民. 雷电学原理[M]. 北京:气象出版社,2006:380-381.
- [2] 徐祥德,汤绪,徐大海. 城市化环境气象学引论[M]. 北京:气象出版社,2002:100-120.
- [3] 易燕明,杨兆礼,万齐林. 雷电灾害对珠江三角洲区域经济发展的影响[J]. 资源科学,2005,27(1):65-69.
- [4] 郑国光. 新时期我国防雷减灾工作的形势和任务之研究[J]. 江西气象科技,2001,24(2):1-3.
- [5] 张锐,冯旭宇,刘晓东. 内蒙古河套地区雷暴气候特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(3):84-87.
- [6] 韦丹,肖稳安,陈红兵. 河南省 46 年雷暴的时空变化特征分析[J]. 安徽农业科学,2010,38(29):16362-16364.
- [7] 王学良,王海军,李卫红. 近 45 年湖北省雷电日数的时空变化特征分析[J]. 暴雨灾害,2007,26(1):83-87.
- [8] 王万满,赵年武. 近 54 年青海省共和地区雷暴气候特征分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(7):4259-4262.
- [9] 冯旭宇,薛胜军,巴特尔. 高纬高原雷暴气候特征及变化规律[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(6):176-181.
- [10] 张敏峰,冯霞. 我国雷暴天气的气候特征[J]. 热带气象学报,1998,14(2):156-162.
- [11] 林建,曲晓波. 中国雷电事件的时空分布特征[J]. 气象,2008,34(11):23-30.
- [12] 杨晓玲,余龙,杨金虎,等. 武威市雷暴气候特征及预报方法研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(36):20956-20959.
- [13] 冯建英,陈佩璇,梁东升. 西北地区雷暴的气候特征及其变化规律[J]. 甘肃科学学报,2007,19(3):71-74.
- [14] 蔡新玲,刘宇,康岚,等. 陕西省雷暴的气候特征[J]. 高原气象,2004,23(1):47-49.
- [15] 裴永成,南洲. 陇中地区雷电的基本特征[J]. 干旱气象,2006,24(S1):69-71.
- [16] 张景平,任国新,乔艳君. 甘肃省雷电活动及雷灾预防措施[J]. 甘肃气象,2003,21(2):34-36.
- [17] 李亚丽,杜继稳,鲁渊平,等. 陕西雷暴灾害及时空分布特征[J]. 灾害学,2005,20(3):99-102.
- [18] 气象科技,2001,29(3):54-57.
- [19] 龚强,袁国恩,张云秋,等. MM5 模式在风能资源普查中的应用试验[J]. 资源科学,2006,28(1):145-149.
- [20] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气象学报,2007,65(5):708-707.
- [21] 周荣卫,何晓凤,朱蓉. MM5/CALMET 模式系统在风能资源评估中的应用[J]. 自然资源学报,2010,25(12):2101-2113.
- [22] 成驰,杨宏青,袁业畅,等. 基于数值模拟的湖北省风能资源储量估算[J]. 安徽农业科学,2011,39(12):7374-7377.
- [23] 马明亮,张加昆,魏鸿业,等. 基于 CALMET 对复杂地形下风场的模拟研究[J]. 环境科技,2011,20(4):181-184.

(上接第 3999 页)

可以利用其进行风能资源评估等工作。

参考文献

- [1] 毛慧琴,宋莉莉,黄浩辉,等. 广东省风能资源区划研究[J]. 自然资源学报,2005,20(5):679-683.
- [2] 陈双溪,袁秋生,曾辉,等. 鄱阳湖区风能资源储量及分布研究[J]. 气象与减灾研究,2006,29(1):1-6.
- [3] 钱莉,杨永龙,杨晓玲,等. 河西走廊东部风能资源分布特征及开发利用[J]. 气象科技,2009,37(2):198-204.
- [4] 杨振斌,薛桁,袁春红,等. 用于风电场选址的风能资源评估软件[J].