

舒海龙,马洪波,姚中道,等.科尔沁边界层风廓线雷达探测性能评估[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(6):83-88.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.06.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



科尔沁边界层风廓线雷达探测性能评估

舒海龙¹,马洪波^{2*},姚中道¹,苏雄达³,刘菲儿⁴

(1.63968 部队,吉林 白城 137001;2.吉林省气象台,吉林 长春 130062;

3.63863 部队,吉林 白城 137001;4.63853 部队,吉林 白城 137001)

摘要:利用2016—2017年科尔沁边界层风廓线雷达每6 min的风场资料评估雷达探测性能,对风廓线雷达数据获取率、风廓线雷达与气球探空探测风的相关性等进行了分析。结果表明:风廓线雷达平均数据获取率随高度的增加先增大后减小,3 000 m以下平均数据获取率都在60%以上。雷达探测数据存在日出后数据缺测率高、午后缺测率低的变化趋势。各层数据获取率与气温和比湿的相关系数分别为0.45和0.35左右。对比风廓线与常规高空探测数据发现:二者v分量的相关系数大于u分量;u分量相关系数>0.4的高度层为400~1 900 m,v分量相关系数>0.6的高度层为500~3 400 m;风廓线雷达与气球探空数据u分量相关系数随风速的增大而减小,从春季到冬季u、v分量相关系数都呈减小趋势。各个季节中风廓线雷达与气球探空数据风速平均偏差春季最小、冬季最大。

关键词:风廓线雷达;高空探测;对比分析;相关性

中图分类号:P412.25

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)06-0083-06

无人值守气象探测站是大气探测业务的发展方向,风廓线雷达以微波遥感的方式连续探测某一区域三维大气风场,是高空风连续探测的有效手段。科尔沁草原位于大兴安岭背风坡,属温带草原性气候,风廓线雷达的部署弥补了周边定时高空探测站稀少的问题,产品的有效利用将使该地区预报水平有新的提高。

从20世纪60—80年代国内外就开始利用风廓线雷达对高空风进行实时探测,此后关于风廓线雷达数据的评估等研究工作相继开展^[1-2]。在对数据获取率的评估当中南方的测站数据获取率较高。何婧等^[3]对2012—2016年南京市江宁区边界层风廓线雷达风场资料质量的评估表明四季大部分资料获取率达80%以上;董保举等^[4]对云南大理风廓线资料总的获取率进行了统计,数据获取率>80%。由

于风廓线雷达的探测机理的原因导致数据获取率随着高度的升高而降低^[5]。卢维忠等^[6]依据雷达方程分析了影响风廓线雷达最大探测高度的因素,其中大气环境因素是导致最大探测高度变化的重要因素。万蓉等^[7]分析得知风廓线雷达资料的样本数随着高度增加而减少;董保举等^[8]发现风廓线雷达在对流层低层以及边界层的探测能力要远远大于高层;吕博等^[9]发现聊城风廓线雷达夏季有效探测高度可达6 300 m、冬季仅为1 100 m左右,同时还发现大气环境的湿度条件和水平风速、风向标准差的波动是影响测风质量评估的重要因素。同时,许多学者利用不同地点、不同时间段的风廓线数据与传统气球探空进行了比较,发现风廓线雷达与气球探空资料有较好的一致性^[10-19]。

以往利用风廓线与气球探空对比研究采用的多为定时观测资料(如08、20时等),这种对比的代表性是有限的;也有研究采用短时的加密气球探空数据,这也只能代表这段时间的特征。本文利用2 a科尔沁边界层风廓线雷达探测数据,对该风廓线雷达

收稿日期:2020-08-26;修回日期:2020-10-28

作者简介:舒海龙(1982—),男(满族),工程师,主要从事天气预报技术研究工作。E-mail: shi@pku.edu.cn

通信作者:马洪波(1982—),男,高级工程师,主要从事天气预报技术研究工作。E-mail: 76310153@qq.com

的数据获取率及数据缺测影响因素进行了研究,同时以随机时刻的气球探空数据为样本对风廓线雷达与常规高空探测风的相关性等进行分析,希望更全面地了解风廓线雷达的探测性能,为更好地利用科尔沁边界层风廓线雷达数据提供有益的参考。

1 数据与方法

1.1 数据选取

风廓线数据采用科尔沁草原 2016—2017 年 CFL20G-UHF 型固定式边界层风廓线雷达逐 6 min 观测资料。数据的时间单位均为北京时间,测站海拔 198 m。雷达设计探测高度 3 000 m,实际探测高度可达 4 000 m。数据输出以 100 m 分层,从 100~4 000 m 共 41 层。

气球探空数据为距风廓线雷达站 500 m 左右的高空探测雷达获取,共获得气球探空数据 737 组,其中 633 组 3 000 m 以下以 100 m 分层、3 000~4 000 m 以 200 m 分层。根据探空气球的升速,上升到 10 km 高度大约需要 25 min,为了尽可能保证风廓线雷达与探空测风采样的一致^[20-21],将风廓线雷达测风数据进行 30 min 平均,同时将常规高空探测数据处理成与风廓线雷达采样高度一致的数据进行对比^[22]。

文中春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为当年 12 月一次年 2 月。

1.2 数据处理

风廓线雷达数据的处理包括:(1)剔除缺测数据和乱码;(2)将风速、风向分解为 u 分量(纬向风,向东为正)和 v 分量(经向风,向北为正);(3)根据气球探空数据查找对应时刻的风廓线数据,将该时刻前 2 次后 3 次 6 min 平均的 u 、 v 分量做平均,生成 30 min 的平均风场资料;(4)剔除一段时间内无变化的数据。

气球探空数据的处理包括:(1)剔除缺测数据和乱码;(2)将风速、风向分解为 u 、 v 分量;(3)利用高空探测软件将气球探空风数据处理成与风廓线雷达数据相同的高度。

2 风廓线雷达探测数据获取率分析

2.1 数据总体缺测率

图 1 为 2016 年 1 月—2017 年 12 月科尔沁边界层风廓线雷达每 6 min 一次探测的廓线缺测率日变化。图中每一点为一次探测的缺测率(即:数据缺测层数/总层数),填色代表该次探测廓线的整层上的数据缺测率;灰色代表该条廓线缺测率为 0%,

数据完整;红色代表该条廓线缺测率为 100%,数据不可用;白色代表设备没有开机。由于在设备改造后测试阶段(2016 年 1 月—2017 年 3 月)的反演算法问题,导致该阶段数据缺测率较高,特别是 2016 年 1—5 月数据缺测率大部分在 80%以上,2016 年 10 月—2017 年 2 月数据缺测率降低到 40%左右,2017 年 3 月之后数据缺测率明显降低、完整性较好。

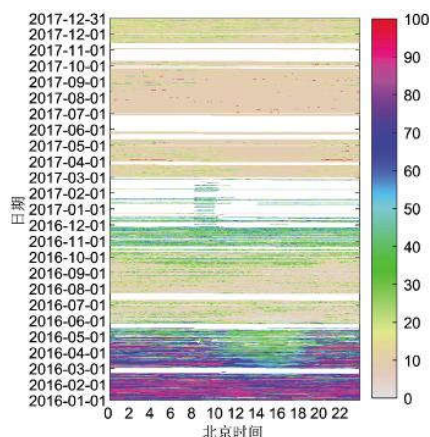


图 1 风廓线雷达每条数据缺测率日变化
(每一点为一次探测的缺测率,纵轴为每日)

2.2 数据缺测率的垂直分布和季节对比

由图 2 中可知,风廓线雷达的数据获取率随高度的增加先增大后减小。3 000 m 以下获取率随高度先增大后减小,除春季外各季节数据获取率都在 60%以上。300~3 000 m 平均数据获取率>75%,300~2 600 m 平均数据获取率在 80%以上,到 3 500 m 以上数据获取率开始迅速减小。300~700 m 各层数据获取率相近,冬季获取率略大,秋季获取率略小。

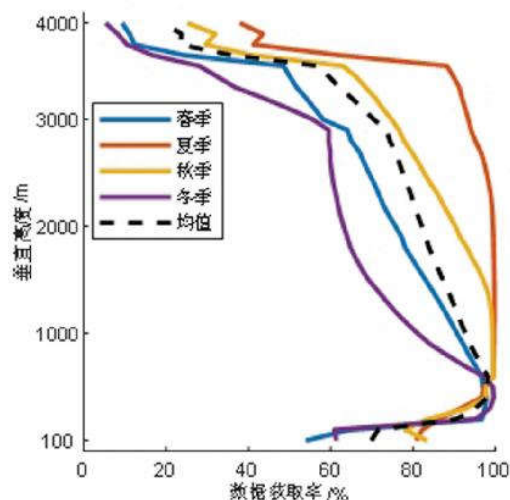


图 2 风廓线雷达各季节数据获取率

700 m 以上夏季获取率最大,冬季数据获取率最小,700~3 500 m 夏季数据获取率>90%,700~3 000 m 冬季数据获取率>60%。综合 2 a 数据,设备在冬春两季 3 000 m 以下数据完整性较强,夏秋两季 3 600 m 以上数据完整性较强。

2.3 数据缺测率日变化

从风廓线雷达各层数据获取率日变化图(图 3)中可以看出,数据获取率随高度的增加先增大后减小。3 500 m 以下数据获取率都在 50%以上,数据获取率随高度增加逐渐减小;3 600 m 以上数据缺测率迅速减小。各层中 600~3 500 m 获取率日变化较为明显,呈现出一种日出后获取率低、午后高的趋势。获取率最小值一般出现在 06—08 时、最大值出现在 16 时左右。主要是由于风廓线雷达探测主要依靠大气中的湍流运动导致的折射率在时间上和空间上不均匀分布。大气折射率起伏越大,湍流运动越剧烈则回波信号越强,雷达作用距离就越大。由大气折射率方程可知,大气折射指数随着气温的增加、气压和水汽压的减小而减小,随着气温的减小、气压和水汽压的增加而增加。随着太阳辐射的增加,地表温度上升,地面向上辐射增大,边界层气温的升高,大气中的湍流活动加强,使得雷达的数据获取率增加^[6]。

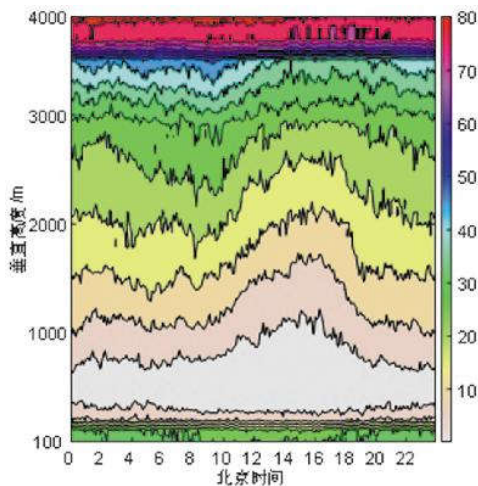


图 3 风廓线雷达数据获取率日变化

2.4 数据获取率相关因素分析

为了探讨风廓线雷达数据缺测的相关因素,利用风廓线雷达和气球探空数据进行了风廓线雷达数据获取率与常规探测气象要素之间的相关性分析(图 4)。通过计算相对湿度、风速与数据获取率之间的相关系数,发现两个要素与数据获取率没有显著

的相关性。

利用相对湿度求取比湿,分析比湿与数据获取率之间的相关性,计算得出的相关系数均已通过 0.01 的显著性检验。从图 4 可知,2 800 m 以下比湿与数据获取率的相关系数都在 0.35 以上,2 500~2 900 m 二者相关系数>0.4,3 000 m 以上二者相关系数逐渐减小。同时,3 000 m 以下数据获取率与气温的相关系数维持在 0.45 左右,3 000 m 以上二者相关系数逐渐减小(图 3,图 4)。

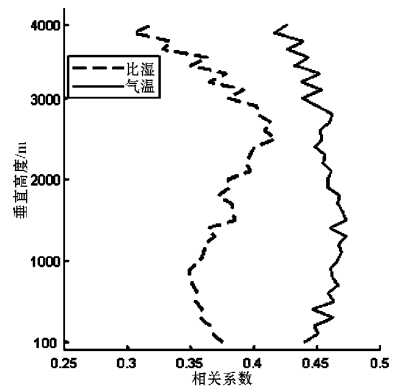


图 4 风廓线雷达各层数据获取率与比湿和气温的相关性

从以上分析看出,数据获取率的大小与比湿和气温具有一定的相关性。同时,对数据获取率的大小与相对湿度和风速的相关性进行了分析,并没有发现显著的相关性。

将风廓线雷达数据按季节分组,然后将气球探空数据中的气温按照对应风廓线雷达数据获取和缺测进行分组,利用箱线图(图 5)分析各季节数据获取与否同气温的关系。在箱线图中,箱子中间的条线代表了数据的中位数,箱子的上下底分别是数据的上四分位数和下四分位数,这意味着箱体包含了 50% 的数据。因此,箱子的高度在一定程度上反映了数据的波动程度。上下边缘则代表了该组数据的最大值和最小值,箱子外部的一些点可以理解为数据中的“异常值”。

由图 5 可知,各种情况中气温分布较为均匀,各季节中数据已获取的比缺测的气温中位数都高;春季和秋季气温变化较大,数据已获取比缺测的整体气温明显偏高,且数据离散程度较大;冬季和夏季气温变化较小,数据获取比缺测的整体气温偏高不明显,但数据离散程度相对数据缺测的情况较小。

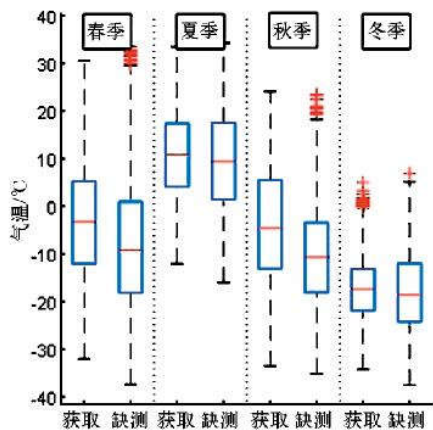


图5 风廓线雷达各季节数据获取率与气温的关系

3 风廓线雷达与气球探空数据对比分析

3.1 高空风场总体对比

图6是气球探空数据与对应的风廓线雷达 u 、 v 分量对比的散点分布,对比的数据个数为15 669对。其中, u 分量的相关系数为0.37、 v 分量的相关系数为0.69。图中 u 分量风正值比例占优,反映了本地边界层纬向风以偏西风为主的特点。分别对 u 、 v 分量进行一阶拟合(图中灰色直线),拟合线斜率分别为0.52、0.83,且与 $y=x$ 的交点接近原点。拟合分析表明风廓线雷达探测数据对 u 、 v 分量的反演特征与常规高空探测并不是一致的,在负值区(即东风和南风分量)比常规高空探测大,在正值区(即西风 and 北风分量)比常规高空探测小。

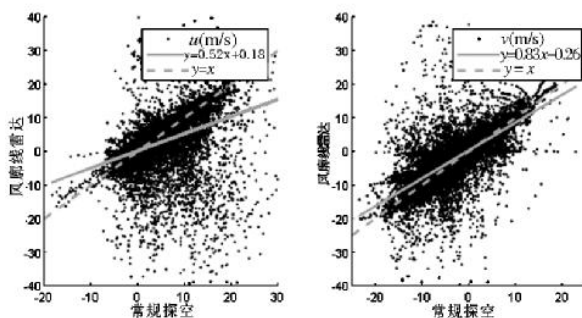


图6 风廓线雷达水平风与气球探空数据散点

风廓线与高空探测水平风的各层相关性随高度的升高呈先增大后减小的趋势(图7)。200 m以下二者相关系数 <0.2 。随着高度的增加,到1 000 m左右相关系数达到最大值, u 分量相关系数最大值为0.83(900 m), v 分量相关系数最大值为0.92(1 100 m)。 u 分量相关系数在400~1 900 m >0.4 ,500~1 300 m >0.6 ;其中3 000、3 900和4 000 m高度上相关系数

未通过0.01显著性检验。 v 分量相关系数在400~3 800 m >0.4 ,500~3 400 m >0.6 ,700~2 300 m >0.8 。

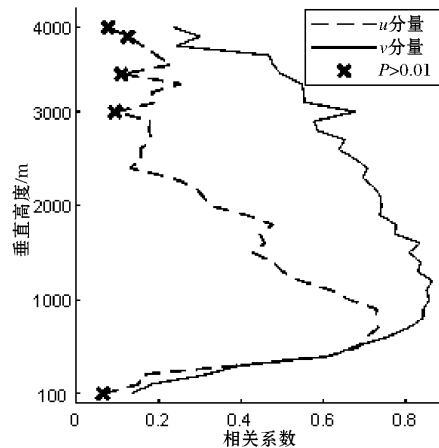


图7 风廓线雷达水平风与气球探空数据相关性
(×为未通过0.01的显著性检验)

3.2 按风速分组对比分析

为了对比不同水平风速条件下风廓线雷达与常规高空探测之间的差异,按照常规高空探测的水平风速进行风速分段分析。将气球探空数据按水平风速分为 <5 m/s、5~10 m/s、10~15 m/s和15 m/s以上4个风速段,4个风速段的样本数随着风速的增大而减少。在各风速段中 u 分量的相关系数都在0.3以下,15 m/s以上的 u 分量未通过0.01显著性检验;而各风速段中 v 分量的相关系数都在0.3以上, v 分量15 m/s以上的相关系数达到0.79。 u 分量随着风速增大整体相关系数呈下降趋势, v 分量随着风速增大整体相关系数呈增大趋势(图8)。

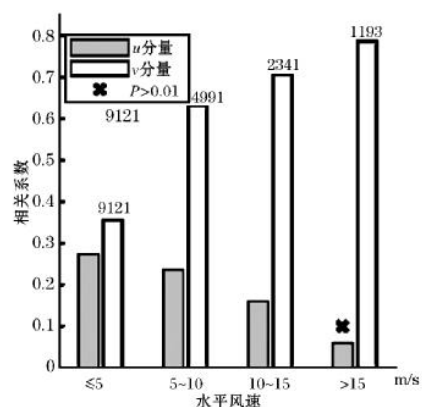


图8 风廓线雷达水平风与气球探空数据相关性按风速分组对比

(灰色为水平风 u 分量,白色为水平风 v 分量;柱状图上的数字为样本数;图中×为没有通过0.01显著性检验)

3.3 按季节分组数据对比分析

为了对比不同季节风廓线雷达与常规高空探测之间的相关程度,按季节对二者相关性进行了分析,4个季节中春季样本数最多,冬季样本数最少。 u 、 v 分量的相关系数从春季到冬季呈下降趋势。春季 u 、 v 分量相关系数分别为0.72和0.81,冬季 u 、 v 分量相关系数分别为0.1和0.3,所有相关性都通过了0.01显著性检验。同时, v 分量的相关系数在各个季节都高于 u 分量(图9)。

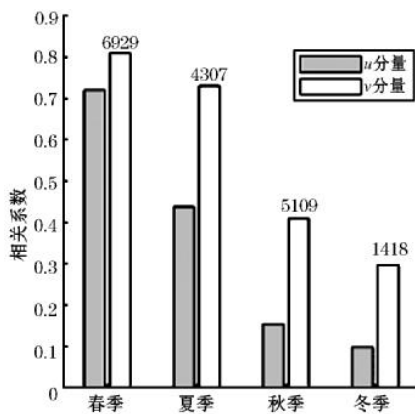


图9 风廓线雷达水平风与气球探空数据相关性按季节分组对比

(灰色为水平风 u 分量,灰色为水平风 v 分量,图中所有相关性都通过了0.01显著性检验;柱状图上的数字为样本数)

为了对比不同季节风廓线雷达与常规高空探测之间的差异,对各个季节风廓线雷达与常规高空探测平均风速的平均偏差、偏差标准差及平均垂直廓线进行了分析。由图10可知,春季风廓线雷达平均风速随高度的变化与气球探空风速的一致性较好,在1000~3700 m,两者的平均偏差接近于0,两者偏差的标准差在900~1800 m高度上都<3 m/s;夏季风廓线雷达平均风速整体比气球探空偏大,两者平均偏差在400~2400 m为2 m/s左右,偏差的标准差在500~3000 m高度上基本都<4 m/s;秋季风廓线雷达平均风速与气球探空平均风速在400~1100 m高度上一致性较好,1100 m以上风廓线测风比气球探空风速随高度变大;冬季风廓线雷达平均风速与气球探空平均风速差别较大,200 m以下及1000 m以上平均风速风廓线雷达都比气球探空大。除春季外,各季节风廓线平均风速都比气球探空大,春季二者一致性最好;夏秋季300 m以下二者相差较大,风廓线平均风速都比气球探空整体偏大;冬季二者一致性较差。

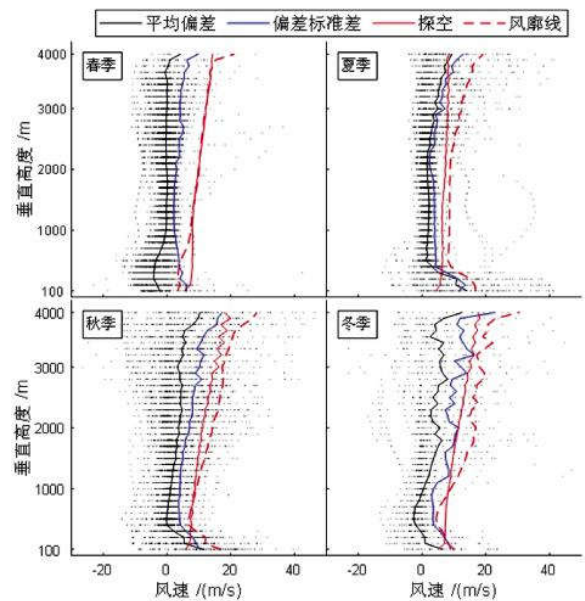


图10 风廓线雷达水平风与气球探空数据各季节平均偏差与偏差标准差对比

4 结论

利用2 a科尔沁边界层风廓线雷达探测资料和700余组气球探空数据对风廓线雷达的数据获取率及高空风探测性能进行了评估对比。

(1)发现风廓线雷达全年平均数据获取率随高度的增加先增大后减小,3000 m以下全年平均数据获取率都在60%以上,其中夏季获取率最大,冬季最小。数据获取率存在日出后数据缺测率高,午后缺测率低的变化趋势。各层数据获取率与气温的相关系数为0.45左右、与比湿的相关系数为0.35左右。数据已获取的比缺测的数据对应的气球探空气温普遍偏高。

(2)对比风廓线与常规高空探测数据发现,二者 v 分量的相关系数大于 u 分量。400~1900 m, u 分量相关系数为0.4以上,500~3400 m, v 分量相关系数为0.6以上。风廓线雷达与气球探空数据相关系数中, u 分量相关系数随风速的增大而减小, u 分量相关系数<0.3; v 分量随风速的增大而增大, v 分量相关系数>0.35。从春季到冬季 u 、 v 分量相关系数都呈减小趋势,春季 u 、 v 分量相关系数>0.7,冬季 u 分量相关系数<0.2, v 分量相关系数>0.3。各个季节中春季风速平均偏差最小、冬季最大。

参考文献:

- [1] HARDY K R, OTTERSTEN H. Radar Investigations of Convective Patterns in the Clear Atmosphere [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1969, 26(4): 656-

- 665.
- [2] 吕达仁,王普才,邱金桓,等.大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾[J].大气科学,2003,27(4):552-566.
- [3] 何婧,卢楚翰,谢韶青,等.南京风廓线雷达测量性能评估及应用初探[J].气象科学,2018,38(3):406-415.
- [4] 董保举,张晔,徐安伦.高原地区风廓线雷达资料评估[J].气象科技,2009,37(5):580-583.
- [5] 张培昌,王振会.大气微波遥感基础[M].北京:气象出版社,1995.
- [6] 卢维忠,何海余,莫海全,等.影响风廓线雷达最大探测高度的因素及机理分析[J].气象水文海洋仪器,2009,26(4):15-18.
- [7] 万蓉,周志敏,崔春光,等.风廓线雷达资料与探空资料的对比分析[J].暴雨灾害,2011,30(2):130-136.
- [8] 董保举,张晔,徐安伦,等.风廓线雷达测风和气球测风资料对比分析[J].云南大学学报(自然科学版),2011(S1):18-25.
- [9] 吕博,纪凡华,孙青然,等.边界层风廓线雷达测风精度分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(1):101-106.
- [10] 刘凡,杨莲梅.伊犁河谷初冬降水条件下风廓线雷达评估分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(5):34-40.
- [11] 罗红艳,杨红龙,卢超,等.深圳风廓线雷达与气象梯度塔对风速观测的对比分析[J].广东气象,2017,39(6):72-76.
- [12] 李霞,王磊,任泉.乌鲁木齐风廓线雷达探测能力评估[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(1):9-18.
- [13] 曲巧娜,盛春岩,孙青,等.风廓线雷达与L波段探空雷达测风资料的对比[J].干旱气象,2016,34(6):1078-1086.
- [14] 袁阅,杨本湘,张滢,等.西昌发射场L波段雷达、风廓线雷达与GPS测风对比分析[J].高原山地气象研究,2018,38(2):84-89.
- [15] 张寅,樊超,赵娜,等.长安风廓线雷达测风资料的可靠性验证[J].干旱气象,2017,35(3):507-515.
- [16] 齐佳慧,郝巨飞,耿飞.CFL-06型风廓线雷达与L波段探空雷达测风对比分析[J].气象与环境科学,2019,42(2):135-143.
- [17] 陈添宇,陈跃,陈乾.风廓线雷达资料的误差及对祁连山地形云风场监测的初步分析[J].干旱气象,2011,29(4):416-422.
- [18] 王栋成,邱粲,董旭光,等.济南边界层风廓线雷达与L波段雷达大风探空测风对比[J].气象,2019,45(8):1169-1180.
- [19] 孙旭映,韩晖,段海霞,等.风廓线仪与气球测风资料的对比分析[J].干旱气象,2008(3):48-52.
- [20] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus:a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Commun Assoc Comp March,1981,24(6):381-395.
- [21] STRAUCH R G,MERRITT D A,Moran K P,等. The Colorado Wind - Profiling Network [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology,1988,1(1):37-49.
- [22] 李伟,刘凤琴,徐磊,等.L波段高空气象探测系统软件[J].气象科技,2008(2):237-239.

Assessing the Performance of Wind Profile Radar in Horqin Grassland

SHU Hailong¹, MA Hongbo², YAO Zhongdao¹, SU Xiongda³, LIU Feier⁴

(1.63968 Unit of PLA, Baicheng 137001, China;

2.Jilin Provincial Meteorological Observatory, Changchun 130062, China;

3.63863 Unit of PLA, Baicheng 137001, China; 4.63853 Unit of PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract The detection performance of wind profiler radar (WPR) was evaluated based on the wind field data of the boundary layer WPR in Horqin, which was conducted every 6 minutes from 2016 to 2017. We analyzed the data acquisition rate of the WPR and the correlation between the WPR and the radiosound wind. The average data acquisition rate of below 3 000 m is above 60%. The radar detection data has a tendency of high data loss rate after sunrise and low loss rate in the afternoon. The correlation coefficient between the data acquisition rate of each layer and the temperature is about 0.45, and the correlation coefficient with the specific humidity is about 0.35. Comparing the WPR with radiosound data, we found that the correlation coefficient of the v component is greater than that of the u component.

Key words wind profile radar; radiosound; comparing and analyzing; correlation