

TK-2GPS 人影探空火箭与 L 波段探空 数据差异性分析

程鹏^{1,2} 李宝梓¹ 黄颖³ 陈佩璇⁴ 陈祺¹ 罗汉¹

(1 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州 730020; 2 中国气象局云雾物理环境重点实验室, 北京 100081;

3 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000; 4 兰州区域气候中心, 兰州 730020)

摘要 开展 TK-2GPS 人影探空火箭探测数据的分析检验, 对于了解试验仪器的适用性和数据可靠性及其在人影中的应用前景非常重要。利用 TK-2GPS 人影探空火箭和 L 波段探空资料, 采用平均偏差、均方根误差和相关系数等分析方法, 对两种探空的温度、相对湿度、风向及风速等要素的差异性和变化特征进行了对比分析, 并对可能造成差异的原因进行了探讨。结果表明: 探空火箭与 L 波段探空同要素间均呈显著的正相关, 通过了 0.05 及以上显著性检验。温度、风速平均偏差和离散度较小, 相关性最好; 相对湿度的平均偏差虽大, 但相关性较好; 风向在各高度层的离散度较大。两种探空的温度、风速垂直廓线变化趋势一致性高; 相对湿度垂直廓线变化趋势存在一定差异, 前者相对湿度较后者明显偏小。随水平探测距离的增加, 探空火箭探测数据相对 L 波段探空的偏差值有所增大。通过相关分析建立的相对湿度订正方程, 能很好地对探空火箭的相对湿度进行订正。

关键词 TK-2GPS 探空火箭; L 波段探空; 人影作业; 差异性

中图分类号: P413 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200027 **文献标识码:** A

引言

中高层大气探测是开展天气气候过程监测和分析的基础, 其数据也是开展天气预报、气候评估和人工影响天气工作的重要依据^[1-3]。目前国内承担高空气象探测业务的是 L 波段高空气象探测系统(简称 L 波段探空), 能够获得精确度较高的高空温、压、湿、风等气象要素, 但探测的时间仅限于每天两次的固定时次^[4-12], 其时空分辨率较低, 远不能满足人影业务的需求。近年来, 探空火箭作为临近空间的实地探测工具, 受到各国航天技术和空间科学研究学者的重视, 在过去 40 年间取得了显著进展^[13-15], 研制和应用了不同高度种类的探空火箭, 被广泛地应用于中高层大气研究、空间天气预报等诸多领域。探空火箭是指在近地空间范围内进行环境探测、科学研究和技术试验火箭的总称^[16]; 探空火箭作为对临近空间大气环境进行原位测量的直接手段, 具有操作便捷、成本低、使用灵活等优点^[17]。

正是包括火箭探测在内的综合探测体系的逐步形成, 才形成当前对中高层大气结构过程与作用的整体性认识^[3]。

作业目标区域中大气的温、湿等物理参数及变化趋势对开展人工影响天气作业非常重要, 研究表明, 若能实时掌握这些物理参数的变化趋势, 可提高作业条件识别, 有效提高人工增雨、防雹作业的科学性和作业效果^[18-21]。人影探空火箭作为一种新型的观测设备, 能够实时采集 0~8 km 高度范围的大气物理参数, 获得人工影响天气作业需要关注的大气物理参数信息, 可有效弥补 L 波段探空时间分辨率不够的问题^[1, 22]。利用人影探空火箭探测的温湿等大气信息, 可为作业人员确定最佳催化位置提供参考依据, 指导作业人员调整作业仰角, 将催化剂播撒到最适宜高度, 对于提高防雹增雨作业的科学水平具有十分重要的意义。人影探空火箭探测性能如何, 是实际业务应用、科学研究中非常关心和需要回答的问题。近几年人影探空火箭在我国陕西、四川、

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

西北区域人工影响天气能力建设项目研究试验项目(ZQC-R18208)、中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2018Z01603)和甘肃省气象局科研项目(Ms2019-19)资助

作者简介:程鹏,男,1981生,硕士,高级工程师,主要从事云物理降水与大气遥感探测研究,Email:tfreefish@163.com

收稿日期:2020年1月22日;定稿日期:2020年7月8日

辽宁等人影业务中得到了应用并取得了较好效果^[22-24],贺文彬等^[18]对人影探空火箭数据和 L 波段探空数据进行了对比分析,结果表明两种探测方式探测数据非常一致;李金辉等^[22]对人影探空火箭的性能进行了分析,火箭探空探测的温、压、湿等要素数据能满足人影作业需求;孙宝利等^[23]利用人影探空火箭数据和雷达资料,分析并建立了人工增雨作业技术指标。

随着探空火箭在人影作业中的广泛使用,人影探空火箭采集的数据精准性及误差将会是实际业务中关注的问题。民勤地处石羊河流域下游,开展人工增雨作业,合理开发空中云水资源对缓解该区域水资源短缺问题十分重要。因此,本文利用在甘肃民勤开展的 TK-2GPS 人影探空火箭(简称探空火箭)试验所采集到的个例与 L 波段探空资料进行对比分析,以期应用人影探测火箭进行人影作业和效果评估提供参考依据。

1 试验区概况、资料与方法

民勤县(101°50′~104°12′E,38°20′~39°27′N,海拔 1350 m)位于河西走廊东北部,地处石羊河流域下游(图 1),其东、西、北 3 面被腾格里、巴丹吉林两大沙漠包围。该地区属温带大陆性干旱气候区,降水稀少,多年平均降水量为 113.2 mm,年均蒸发量 2662.7 mm,年均气温 8.8 °C,光照充足,日照时数为 3137.9 h。该区域水资源严重短缺,境内沙漠、戈壁、盐碱滩地占土地面积的 94.2%^[25]。L 波段探空站位于民勤县气象局,探空火箭点位于 L 波段探空站东侧(图 1),两者直线距离相距约 30 km。

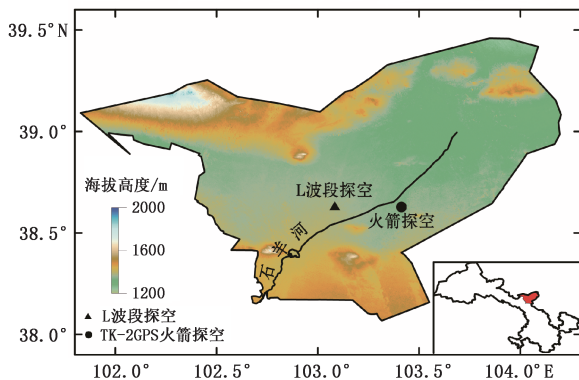


图 1 探空火箭与 L 波段探空站点分布

TK-2GPS 人影探空火箭是一种低空气象火箭

探测系统,能够实时采集 0~8 km 高度范围内的大气物理参数,包括风向、风速、气压、温度、湿度等要素;该系统主要由地面发射装置、TK-2 探空火箭、地面接收装置及数据采集处理终端等部分组成^[1,18]。其工作原理是当探测火箭发射升空到达预定高度时,探空仪弹出与箭体分离,在探空仪下落过程中进行大气探测,降落伞下降速度大概为 6 m/s,探测数据实时传回地面供接收处理^[18]。现行高空气象探测业务中探空观测采用 L 波段探空,每日探测 2 次,探测时间固定为每日 07:15 和 19:15(北京时,下同),探测高度可达 30000 m^[4-5]。与 L 波段探空固定观测时次不同的是,探空火箭可根据实际需求随时发射,能满足人影作业指挥的需求,两种探测仪器的数据间隔均为秒级。

2014 年 5 月、11 月和 2016 年 10 月,民勤县人工影响天气办公室工作人员在试验点发射了 13 枚探空火箭,开展了人影探测火箭试验。试验集中在 11:00—19:00 之间进行,探空火箭的上升高度均在 5600 m 以上。探空试验过程共采集到 13 份探空数据,完整有效数据有 10 份(表 1)。本文选取与 L 波段探空时间最接近且数据完整的探空火箭数据集,共计 6 组数据进行对比分析;所选时次 L 波段探空最大探测高度均在 25000 m 以上,数据完整有效。

表 1 民勤 TK-2GPS 人影探空火箭试验概况

火箭序号	试验日期	发射时间	最大上升高度/m	数据采集时长
1	2014-05-26*	14:06	7276.5	23 min32 s
2	2014-11-27*	17:30	7506.4	21 min54 s
3	2014-11-28*	16:17	7581.5	20 min53 s
4	2014-12-02	16:21	5822.0	15 min40 s
5	2014-12-02*	17:21	5737.7	15 min47 s
6	2014-12-03	16:26	5757.6	14 min31 s
7	2014-12-03*	17:11	5630.6	14 min56 s
8	2014-12-04*	18:06	7607.0	20 min19 s
9	2016-10-27	11:49	7801.8	21 min14 s
10	2016-10-27	14:15	5724.0	15 min59 s

注:*标注为本文研究所用个例。

L 波段探空实测资料准确客观,常用于验证其他探测仪器的准确性。为探讨探空火箭资料的可靠性,利用 L 波段探空资料,针对探空火箭资料和 L 波段探空资料的偏差值,本文选取温度、相对湿度、风向和风速等四个要素,采用平均绝对偏差(BIAS, B)、均方根误差(RMSE, R_{MSE})和相关系数(R)等直接对比分析方法进行分析,其计算公式如下:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i - t_i| \quad (1)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - t_i)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (3)$$

式中, n 为某一高度层的检验样本总数, r_i 为某一高度层探空火箭的气象要素值, t_i 为对应高度层上的 L 波段探空数据值。

2 结果分析

2.1 差异性分析

采用 L 波段探空资料为参考值, 计算与相近时次同高度的探空火箭资料的平均绝对偏差、均方根误差和相关系数, 结果如表 2 所示。从平均绝对偏差来看, 相对 L 波段探空资料, 温度、风速的偏差绝对值分别为 1.19 °C 和 2.91 m/s, 偏差较小, 相对湿度偏差绝对值达到了 10.27%, 偏差较大。温度、相对湿度、风向和风速等要素的均方根误差分别为 1.39 °C、19.5%、46.9°、3.57 m/s, 相对 L 波段探空资料, 探空火箭探测的温度、风速的离散度较小, 相对湿度和风向离散度较大。从两种探测方式同要素间的相关系数来看, 同要素相互间均呈显著的正相关, 均通过了 0.05 及以上显著性检验; 温度和风速的相关性最好, 分别达到了 1.0、0.91; 相对湿度次之, 相关系数达到了 0.67; 风向相关性略差, 相关系数为 0.18。可以看出, 两种探测方式的温度、风速平均偏差和离散度较小, 相关性达到了 0.91 以上; 相对湿度的平均偏差虽大, 但相关性较好; 风向的离散度最大, 相关性相对较差。

表 2 探空火箭与同高度上 L 波段探空数据统计

要素	平均绝对偏差	均方根误差	相关系数
温度	1.19 °C	1.39 °C	1.00
相对湿度	10.8%	19.50%	0.67
风向	19.36°	46.90°	0.18
风速	2.91 m/s	3.57 m/s	0.91

2.2 不同高度的差异性分析

为进一步了解不同高度两种探测方式资料的差异性, 对所选个例样本按照高度进行了划分, 来分析

不同高度层各要素的均方根误差和相关系数。所选个例探空火箭的最大上升高度约为 300 hPa, 以探空火箭的最大高度为上限, 为便于统计分析, 进行了高度划分: 700 hPa 以下到地面为一层, 700~300 hPa 之间每 100 hPa 为间隔, 共计 5 层。从表 3 可以看出, 温度在各高度层的相关性都非常好, 呈正相关, 相关系数随高度上升而增加, 在 700 hPa 以上, 相关系数达到了 0.95 以上。各高度层均方根误差在 1~1.4 °C, 变化差异不大, 400~500 hPa 离散度最小。

表 3 探空火箭和 L 波段探空不同高度各要素间的差异性

要素	高度 hPa	均方根误差 (RMSE)	相关系数 (R)
温度	300~400	1.4 °C	0.98
	400~500	1.0 °C	1.0
	500~600	1.45 °C	0.95
	600~700	1.34 °C	0.98
	≥700	1.38 °C	0.86
相对湿度	300~400	18.2%	0.53
	400~500	17.9%	0.13
	500~600	18.3%	0.27
	600~700	17.6%	0.5
	≥700	16.9%	0.53
风向	300~400	7.4°	0.3
	400~500	12.4°	-0.18
	500~600	19.4°	0.4
	600~700	45.5°	0.4
	≥700	72.9°	-0.07
风速	300~400	5.0 m/s	0.3
	400~500	4.2 m/s	0.6
	500~600	2.5 m/s	0.5
	600~700	3.2 m/s	0.3
	≥700	2.9 m/s	0.6

相对湿度在不同的高度层均呈正相关, 相关系数在 0.13~0.53 之间, 600~400 hPa 之间相关性相对较差, 在 0.27% 以下。各高度层均方根误差虽然变化不大, 但离散度均较大, 各高度层均方根误差大于 16.9%。

风向在各高度层的相关性相对较差, 700 hPa 以下和 400~500 hPa 呈负相关, 其他高度层相关系数在 0.4 以下。各高度层的离散度较大, 特别是 600 hPa 以下, 达到了 45.5° 以上, 是各要素中离散度最大的, 均方根误差随高度上升有所降低。

风速在各高度层均呈正相关, 相关系数在 0.3~0.6 之间, 其中 400~500 hPa 和 700 hPa 以下相关性最好。各高度层离散度较小。均方根误差在 2.9~5.0 m/s 之间, 随高度上升略有增加。

整体来看,温度和风速在各高度层差异性较小,相关性较好,探空火箭对温度和风速的探测效果最好。相对湿度虽然离散度较大,但在不同的高度层均呈正相关,合理订正后可以使用。风向在各高度层的离散度较大,相关性也相对较差。

2.3 对比分析

为进一步验证探空火箭数据的可靠性,选取与 L 波段探空探测时间较为接近的个例进行数据的对比分析。L 波段探空探测时间为每日 07:15 和 19:15,选取的探空火箭试验个例时间分别为:2014 年 11 月 27 日 17:30、11 月 28 日 16:17 和 12 月 4 日 18:06。

图 2 为 2014 年 11 月 27 日探空火箭与 L 波段探空数据的气温、相对湿度、风向及风速垂直廓线对比。各要素整体变化趋势基本一致,除相对湿度廓线两者差异较大外,其余廓线差异均较小。温度廓

线中两种数据趋势变化高度相似,均随探测高度的上升温度迅速减小;探空火箭温度略小于 L 波段探空,在 750 hPa 以下更为明显,两种观测数据均在 800~850 hPa 之间出现了明显的逆温层。相对湿度廓线中两种观测数据均随探测高度的上升而减小,明显的特征是 550 hPa 以下 L 波段探空相对湿度大于探空火箭,550~300 hPa,探空火箭相对湿度大于 L 波段探空;除近地层外,相对湿度最大值出现在 700 hPa。风速廓线中两种数据风速均随探测高度上升而波动增大,700 hPa 以下,两者数据非常接近;700~500 hPa 之间,两者交替变化,500 hPa 以上,L 波段探空风速大于探空火箭风速。风向廓线中两种数据变化趋势较为一致,750 hPa 以下为西南风,750 hPa 以上两种数据均为偏西风。

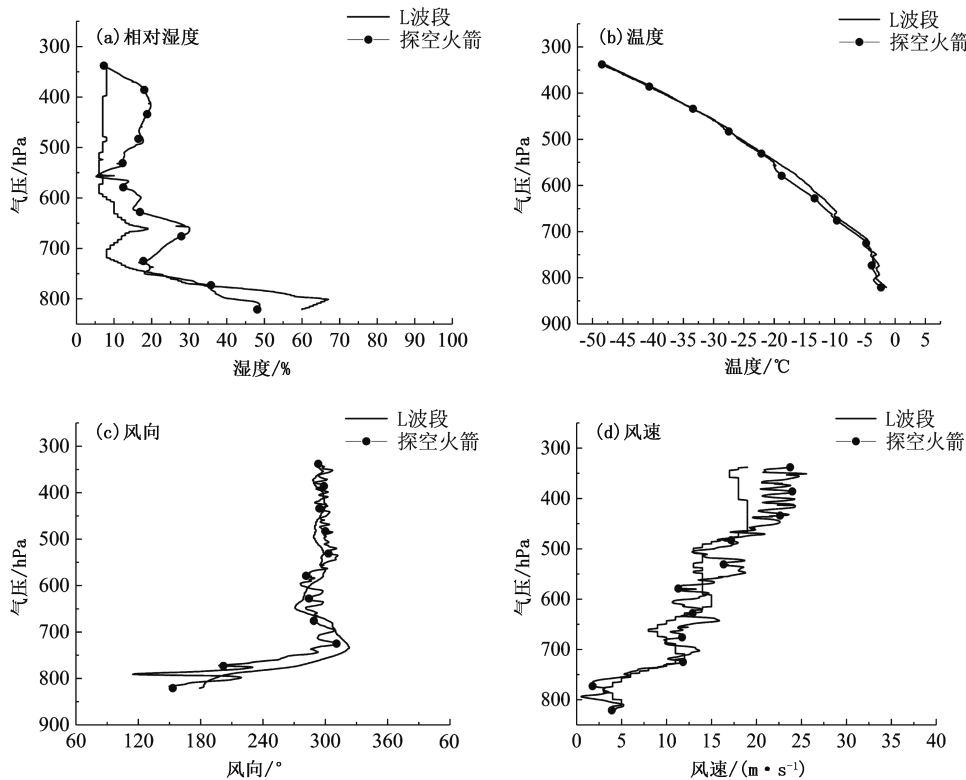


图 2 2014 年 11 月 27 日探空火箭与 L 波段探空相对湿度、温度、风向、风速垂直廓线对比

图 3 为 2014 年 11 月 28 日探空火箭数据与 L 波段探空数据的气温、相对湿度、风向及风速垂直廓线对比。由图可知,温度廓线中,300 hPa 以下两种数据均随探测高度的增加而迅速降低,300 hPa 以上 L 波段探空数据出现逆温层。相对湿度廓线中,700 hPa 以下两种数据均随探测高度增加而迅速减

小;700~500 hPa 两种数据趋势有一定差异,其中 L 波段探空数据相对湿度随探测高度增加变化不大(10%左右),而探空火箭数据则呈现出迅速增加后又迅速减小的趋势;500~300 hPa 两种数据趋势一致,均随探测高度增加迅速增大后减小,但探空火箭数据减小速度快,两种观测数据均在 450 hPa 附近

出现了相对湿度最大值。风速廓线中,两者交替变化特征明显,600 hPa 以下,L 波段探空数据随探测高度先减小后增大,而探空火箭数据则随探测高度增加;600 hPa 以上,L 波段探空数据随探测高度先减小后增大,而探空火箭数据则随探测高度先增大

后减小;在 700~550 hPa 之间,两者变化趋势较为一致。风向廓线中,两种数据在 600 hPa 以上变化趋势基本一致,均为偏西风;600 hPa 以下风向变化略有差异。

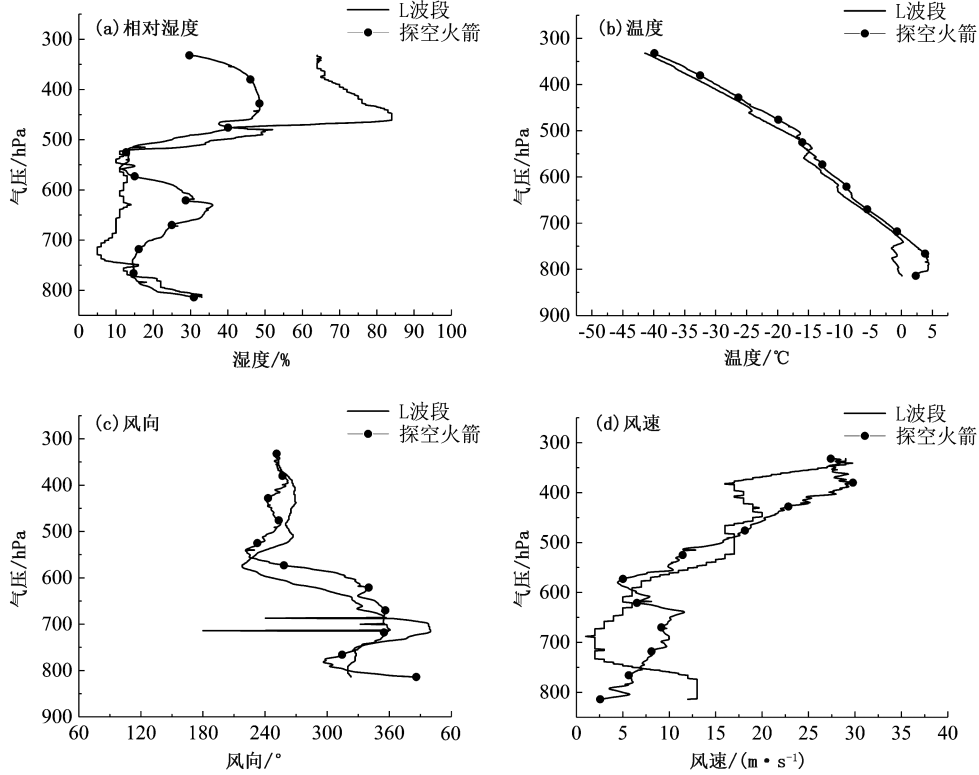


图 3 2014 年 11 月 28 日探空火箭与 L 波段探空相对湿度、温度、风向、风速垂直廓线对比

图 4 为 2014 年 12 月 4 日探空火箭数据与 L 波段探空数据的气温、相对湿度、风向及风速垂直廓线对比。图中两种数据的温度、风向及风速廓线变化趋势较为一致,且差异较小。温度廓线中两种数据变化趋势一致性高,地面至 300 hPa 均呈减小趋势,L 波段探空数据略大。相对湿度廓线中,两者在 750 hPa 以下和 500 hPa 以上,变化趋势一致。800~700 hPa 之间两种数据均呈减小趋势;700~600 hPa 之间,探空火箭数据逐渐增大,L 波段探空数据先减小后增大;600 hPa 以上,探空火箭和 L 波段探空数据均呈波动增加趋势,相对湿度最大值均出现在 400 hPa 附近。风向廓线中两种数据趋势变化较为一致,800 hPa 以下均为偏南风,800 hPa 以上主要为偏北风。风速廓线中两种数据的变化趋势也较为一致,均呈增大趋势,风速大小交替变化。

2.4 偏差原因分析

两种不同的探测仪器其探测结果势必会存在一定差异,究其原因,主要有:①探测原理的不同。L 波段探空随气球的上升开始探测,是自下而上的探测;而探空火箭正好相反,当火箭上升到最大高度后开始下落时探测,是从上而下的探测。②探测时间的差异。两种探测方式最接近的个例在时间上相差 15 min 左右,大部分个例相差近 2 h 以上,大气的温、湿各要素随时间变化明显,不同的时间气象要素必然存在差异。③仪器自身造成的差异。探空火箭和探空气球所携带的是不同厂家型号的温、湿传感器,不同厂家的仪器之间,在探测精度方面也会存在一定差异。除这些客观因素外,探测距离及环境风场也会对探测结果造成差异。两种仪器虽布设在同一气候区域,但直线距离达 30 km,水平探测距离上

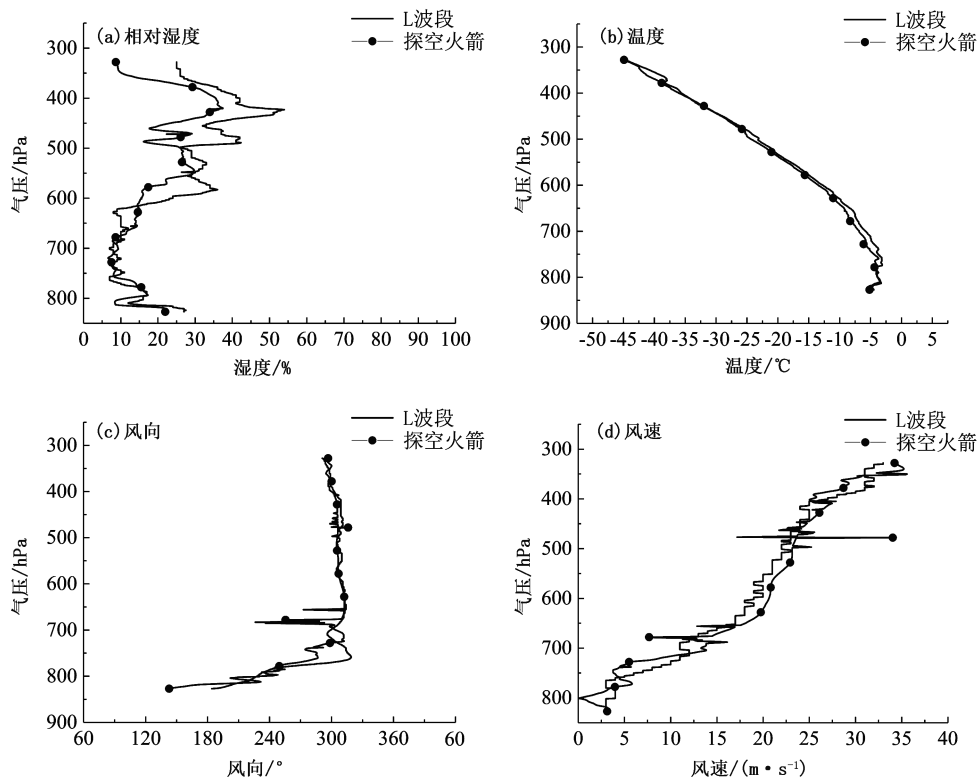


图 4 2014 年 12 月 4 日探空火箭与 L 波段探空相对湿度、温度、风向、风速垂直廓线对比

的差异也会产生一定的数据差异。为进一步探讨分析探测距离和环境风场对探空火箭探测结果造成的影响,计算了两种探测方式同一气压高度上的水平距离和平均偏差,平均偏差是探空火箭同 L 波段探空数据的差值。图 5 是各要素平均偏差随探测高度和水平距离的变化,由图 5 中可以看出,不同要素平均偏差受探测高度和水平距离的影响特征不同。气温平均偏差在高层(750 hPa 以上)随水平距离增加(图 5a),平均偏差增大,平均偏差的最大值达到了 2.5 °C;在低层(750 hPa 以下)随水平距离增加偏差减小。相对湿度平均偏差在 850 hPa 以上受水平距离影响不大(图 5b),在 800~850 hPa 之间相对湿度随水平距离增加平均偏差增大。风速的平均偏差范围在 0~3.5 m/s 之间(图 5c),随水平距离增加偏差略有增加。风向的相对偏差在 850 hPa 以上受水平距离影响不大(图 5d),850 hPa 以下,相对偏差随水平距离增加而增大。环境风场对气温和相对湿度的探测结果有一定的影响,随风速增大,相对湿度和温度的偏差增大;风向对相对湿度和温度的影响规律不明显。可以看出,气温偏差受水平距离的增加偏差值增大,平均偏差最大值为 2.5 °C;相对湿度

和风向在近地层,随水平距离增加偏差值增大,但在 700 hPa 以上平均偏差基本稳定;风速随水平距离增加,偏差值略有增加。由于水平探测距离的增大,对探空火箭探测结果造成了一定的数据偏差,对于人影野外作业需要,温度、风速、风向的偏差值是可以接受的;为了更好在科研业务中应用,探空火箭探测的相对湿度需要进行订正,以提高其数据的可用性。

2.5 相对湿度订正

由前面分析可知,探空火箭相对湿度虽然平均偏差大,但与 L 波段探空的相关性较好,相关系数达到了 0.67。相对湿度表示空气中的绝对湿度与同温度下的饱和绝对湿度的比值,是人工影响天气作业非常重要的一项指标,通过拟合 L 波段探空相对湿度来订正探空火箭的探测结果。通过相关分析,建立的相对湿度订正拟合方程为:

$$R_H = 2.565 + 1.116R_{HT} \quad (4)$$

式(4)中, R_H 为订正后的探空火箭相对湿度, R_{HT} 为订正前的探空火箭相对湿度。拟合方程的 R^2 值为 0.71,通过了 0.01 显著性水平的检验。采取纳什效率系数法^[26]对建立的模型进行率定,纳什效率系数

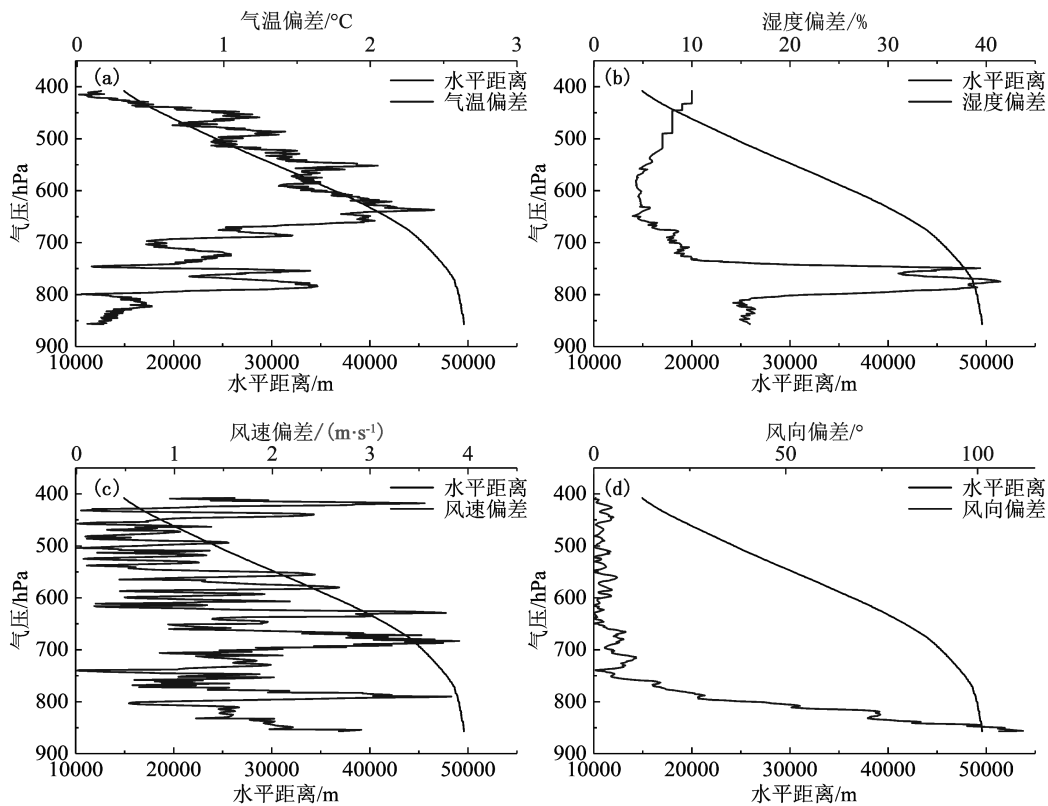


图 5 探空火箭与 L 波段探空数据相对湿度、温度、风向、风速平均偏差随水平距离、探测高度的变化

为 0.5,说明订正后的相对湿度与 L 波段探空的相对湿度吻合程度较好。图 6 为用拟合方程(4)对 2014 年 11 月 27 日、11 月 28 日和 12 月 4 日 3 次探空火箭试验相对湿度进行订正后的结果,由图可以看出,进行订正后偏差有了明显下降,和 L 波段探空的相对湿度一致性有了很大提升。拟合方程对探空火箭相对湿度的订正是有效的。

3 结论

通过对 TK-2GPS 人影探空火箭和 L 波段探空各要素、不同高度层的均方根误差、变化特征进行对比分析后,得出以下结论:

(1)两种探测方式同要素间均呈显著的正相关,并通过了 0.05 显著性水平的检验;温度、风速和相对湿度的相关性较好,分别达到了 1.0、0.91 和 0.67;风向相关性略差,相关系数为 0.18。温度、风速平均偏差和离散度较小,探测效果最好;相对湿度的平均绝对偏差虽大,但相关性较好;风向的离散度最大,相关性相对较差。

(2)从同要素不同高度的对比分析来看,温度和

风速在各高度层相关性较好,离散度较小;相对湿度在不同高度层均呈正相关,各高度层离散度在 16.9%~18.3%之间;风向在各高度层的离散度较大,相关性也较差。

(3)从各要素的垂直廓线对比分析来看,温度和风速廓线的变化趋势一致性很高,且数据差异较小,对大气温度和风速的测量比较准确;相对湿度廓线的变化趋势存在一定差异,前者相对湿度较后者明显偏小;风向廓线在 700 hPa 以上一致性较高,数据差异较小,700 hPa 以下一致性较低,数据差异较大。

(4)水平探测距离对探空火箭的探测结果造成了一定的数据偏差,气温偏差随水平距离增加而增大,相对湿度和风向在近地层随水平距离增加偏差增大,风速随水平距离增加偏差略有增加。探空火箭探测的温度、风速、风向能够满足人影野外作业需求,而相对湿度则需要进行订正,以提高其可用性。通过相关分析建立的拟合方程对探空火箭相对湿度进行订正后,数据质量有明显提升。

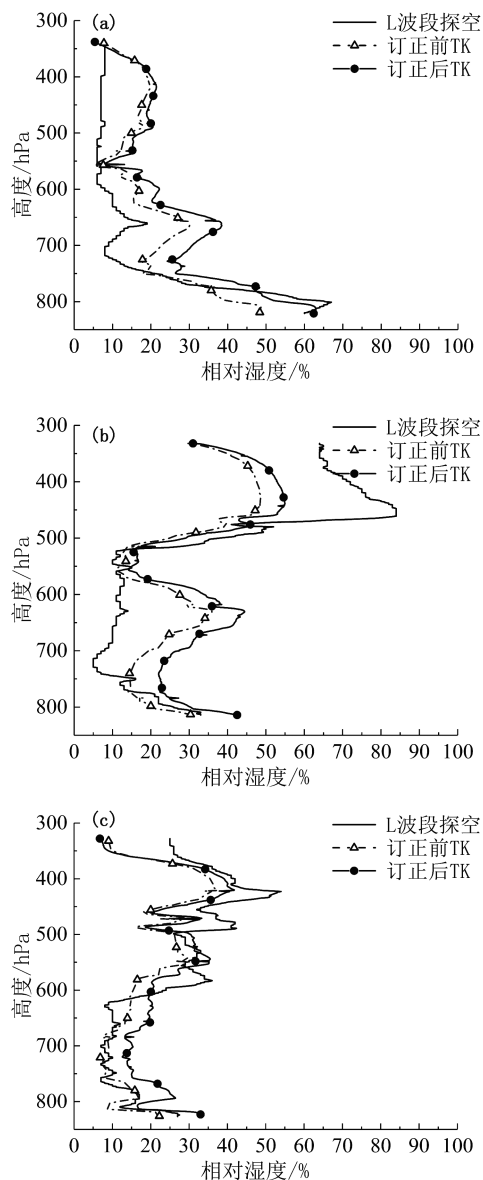


图 6 2014 年订正后的探空火箭与 L 波段探空相对湿度垂直廓线对比:(a)11 月 27 日,(b)11 月 28 日,(c)12 月 4 日

参考文献

- [1] 张元, 刘东升, 王维佳, 等. TK-2GPS 人影火箭探空数据与 L 波段探空数据对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(1): 91-95.
- [2] 姚霁, 郑国光. 气象探空测风软件系统标准化研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 88-93.
- [3] 张晓芳, 严卫. 中高层大气探测技术的研究进展[J]. 气象科学, 2007, 27(4): 318-323.
- [4] 张立功, 陈志斌, 王勇, 等. L 波段雷达-电子探空仪系统对比观测分析[J]. 气象科技, 2007, 35(1): 123-125.
- [5] 陶士伟, 陈晓红, 龚建东. L 波段探空仪温度资料误差分析[J]. 气象, 2006, 32(10): 46-51.
- [6] 杨湘婧, 徐祥德, 陈宏尧, 等. L 波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象, 2011, 37(12): 1504-1510.
- [7] 李增志, 黄峰, 朱福荫, 等. 超声风速温度仪的误差分析与检定方法研究[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(1): 58-59.
- [8] 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.
- [9] 董德保, 张统明, 芮斌. 风廓线雷达大气风场观测误差分析[J]. 气象科技, 2014, 42(1): 48-53.
- [10] 王荣基, 李君. L 波段高空气象探测系统气压、高度观测数据分析[J]. 气象科技, 2009, 37(1): 106-109.
- [11] 段婧, 楼小凤, 卢广献, 等. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象, 2017, 43(12): 112-121.
- [12] 邵洋, 刘伟, 孟旭, 等. 人工影响天气作业装备研发和应用进展[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 649-658.
- [13] 姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2009, 27(23): 103-112.
- [14] 史东波, 韦峰, 张宇, 等. 子午工程气象火箭探空仪及其探测结果[J]. 空间科学学报, 2011, 31(4): 492-497.
- [15] 陈广南, 张为华. 气象探测火箭发射用软件射表[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 25-28.
- [16] 雷宁, 单建胜. 深空探测火箭的发展及应用[J]. 固体火箭技术, 1999, 22(3): 1-5.
- [17] 冯超, 邵胜利, 王芳栋, 等. 探空火箭在临近空间气象保障中的应用研究[J]. 测控技术, 2018, 37(5): 16-19.
- [18] 贺文彬, 罗俊颖, 王鹏, 等. 基于固体火箭和 GPS 测风技术的中低空气象探测系统关键技术研发与应用[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(4): 423-429.
- [19] 陈少琴, 叶德彪, 林长城. 福建周宁水库地面暖云人工增雨作业效果分析[J]. 气象科技, 2015, 43(2): 338-342.
- [20] 陈羿辰, 张龙斌, 金永利, 等. 利用双线偏振雷达分析人工防雹作业效果[J]. 气象科技, 2016, 44(3): 479-488.
- [21] 王俊, 张洪生, 王庆, 等. 利用激光雨滴谱仪检验消(减)雨作业效果[J]. 气象科技, 2010, 38(增刊 1): 46-50.
- [22] 李金辉, 贺文彬, 罗俊颖, 等. TK-2 气象探测火箭的应用研究[C]//第 28 届中国气象学会年会 S9 大气物理学与大气环境, 2011.
- [23] 孙宝利, 翟晴飞, 孙可, 等. TK-2 气象探测火箭在阜新人工增雨中的应用[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(5): 77-78.
- [24] 敖雪, 翟晴飞, 翟涛, 等. 气象探测火箭系统在辽宁人工增雨中的应用[C]//全国云降水与人工影响天气科学会议, 2014.
- [25] 常兆丰, 朱淑娟, 杜娟, 等. 民勤绿洲边缘积沙带形成的环境条件[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1330-1336.
- [26] 赵沛, 程伍群, 庞立军, 等. 基于 SWMM 的透水铺装系统的水文效应研究[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1): 35-37.

Analysis of Difference between Observations by TK-2GPS Sounding Rocket and L-Band Sounding Radar

CHENG Peng^{1,2} LI Baozi¹ HUANG Ying³ CHEN Peixuan⁴ CHEN Qi¹ LUO Han¹

(1 Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020; 2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081; 3 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

4 Lanzhou Regional Climate Center, Lanzhou 730020)

Abstract: It is very important to analyze and test the data of the TK-2GPS sounding rocket for understanding the applicability and the data reliability of the test instrument and its application prospects in weather modification. Based on the analysis methods of average deviation (BIAS), root mean square error (RMSE), and correlation coefficient, using the TK-2GPS sounding rocket and L-band sounding radar data, the differences and variation characteristics of the sounding data such as temperature, relative humidity, wind direction and wind speed are compared and analyzed, and the possible causes of the differences are discussed. The results show that the TK-2 GPS sounding rocket and the L-band sounding have significant positive correlations with the same elements, and passed the significance test of 0.05 and above. Analyses of the differences between the two sounding data reveal that the average deviation and dispersion of temperature and wind speed are small; although the average deviation of relative humidity is large, correlation is good; the dispersion of wind direction at each level is large, and the correlation is poor. The vertical profiles of temperature and wind speed of the two soundings are highly consistent. The vertical profile of relative humidity is significantly different at low altitudes and more consistent at higher altitudes; the relative humidity at low altitudes is greater than that at high altitudes. The difference trend in wind profiles is just the opposite of relative humidity profiles. With the increase of horizontal detection distance, the deviation of each element of sounding rocket from L-band sounding increases. The correction equation of relative humidity is established by correlation analysis. It can correct the relative humidity of sounding rockets very well.

Keywords: TK-2 GPS sounding rocket; L-band sounding radar; weather modification operation; difference