

白水成,狄慧鸽,袁云,等. 激光雷达和微波辐射计温湿度廓线与探空数据的对比分析[J]. 陕西气象, 2024(1): 71-76.

文章编号: 1006-4354(2024)01-0071-06

激光雷达和微波辐射计温湿度廓线与探空数据的对比分析

白水成^{1,2}, 狄慧鸽³, 袁云³, 任丹阳^{1,2}, 曹梅^{1,2}

(1. 西安市大气探测中心, 西安 710016;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016;

3. 西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 基于西安泾河国家气象站 2021 年微波辐射计、西安理工大学研制的大气温湿度廓线激光雷达等设备观测数据反演计算 0~10 km 以下的温湿度, 通过与探空资料的对比分别评估了微波辐射计和激光雷达的探测性能。结果表明, 二者反演的温度均与探空数据具有较好的一致性, 激光雷达反演的温度和探空温度的相关系数为 0.997, 均方根误差在 1.5~2.5 K 之间, 微波辐射计反演的温度和探空温度的相关系数为 0.973, 均方根误差在 1.5~5.0 K 之间; 在反演相对湿度方面激光雷达优于微波辐射计, 激光雷达反演的相对湿度和探空相对湿度的相关系数为 0.964, 均方根误差在 5%~15% 之间, 微波辐射计反演的相对湿度和探空相对湿度的相关系数为 0.632, 均方根误差在 20% 左右。

关键词: 激光雷达; 微波辐射计; 探空资料; 温度廓线; 湿度廓线

中图分类号: P407.7; P414.5

文献标识码: A

温度和湿度是表征大气物理状态的两个重要参数^[1]。温湿度的变化对气候、大气动力学和热力学有显著影响^[2]。温湿度垂直廓线的获取是当代气象观测业务中的重要内容, 目前国内外主要通过释放探空气球的方式获取温湿度廓线及风场等气象要素信息, 虽然获取的探测资料精度高, 但观测次数和探测空间均有限, 并且需要耗费大量人力物力^[3]。利用遥感仪器实现大气温湿度廓线连续自动观测是科学研究和气象业务部门的方向和目标。目前可用于大气温湿度廓线遥感探测的仪器主要有被动遥感的微波辐射计和主动遥感的激光雷达^[4-6]。微波辐射计可以实现非降水天气条件下大气温湿度廓线的连续观测, 但其探测精度还需要进一步提高。温湿度激光雷达时空分辨

率高, 探测精度高。尽管设备精密昂贵, 在云、雨天激光能量衰减大, 但在科学研究中应用较多^[7-9]。目前对这两种仪器的温湿度探测能力进行系统完善评估和分析的研究较少。

本研究数据来源于西安泾河国家气象站布设的地基多通道微波辐射计和温湿度探测激光雷达。将这两种仪器的观测数据分别与泾河国家气象站的探空数据进行对比, 分析评估这两种新型遥感设备温湿度要素的探测精度。

1 观测仪器

1.1 温湿度激光雷达

西安理工大学激光雷达遥感研究中心研发了探测非降水天气条件下大气温湿度廓线的激光雷达, 设计采样时间间隔为 2 min, 空间分辨率为

收稿日期: 2022-03-04

作者简介: 白水成(1980—), 男, 汉族, 河南浚池人, 硕士, 高工, 从事大气探测方法和技术研究。

基金项目: 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2020G-18, 2022G-24); 陕西省西安市科技计划项目(20SF0015)

3.75 m。该雷达利用大气中氮气分子和氧气分子的转动拉曼谱线强度与大气温度之间的依存关系,实现大气温度廓线的探测^[10-12];利用氮气分子和水汽分子的振动拉曼散射信号实现大气中水汽廓线的探测。利用激光雷达探测数据可以直接反演得到温度廓线和水汽密度廓线,相对湿度由温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 和水汽密度 $N_{\text{H}}(\text{g}/\text{m}^3)$ 计算得到。

相对湿度是指在同一温度下,空气中的实际水汽密度 $N_{\text{H}}(z)$ 与饱和水汽密度 $S_{\text{H}}(z)$ 的比值,表示为

$$R_{\text{H}}(z) = \frac{N_{\text{H}}(z)}{S_{\text{H}}(z)} \times 100\%, \quad (1)$$

饱和水汽密度 $S_{\text{H}}(z)$ 计算公式为

$$S_{\text{H}}(t) = 2.17e(t)/(t+273.15), \quad (2)$$

其中 $e(t)$ 是饱和水汽压。

大气温度 t 下的水面饱和水汽压或者冰面饱和水汽压可利用 Tetens 经验公式计算得到,即

$$e(t) = \begin{cases} 6.1078 \exp\left(\frac{17.2693t}{(t+237.3)}\right) & \text{水面} \\ 6.1078 \exp\left(\frac{21.8746t}{(t+265.5)}\right) & \text{冰面} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 微波辐射计

微波辐射计是一种被动遥感设备^[13-14],它顶部的天线可接收来自特定波段的辐射亮度,根据大气辐射传输原理可计算出大气温度、相对湿度、水汽密度、液态水廓线等。泾河国家气象站布设的 MWP967KV 型地基多通道微波辐射计,标定时间间隔 2 min,通过多重定标来确保亮温观测精度。利用人工神经网络实现了地面上空 0~10 km 范围内温湿度探测,其时间采样间隔为 2 min,空间采样间隔 0~0.5 km 为 50 m,0.5~2.0 km 为 100 m,2.0~10.0 km 为 250 m。

1.3 L 波段高空气象探测系统

L 波段高空气象探测系统由 GTS1 型数字式电子探空仪配合 GFE(L) 型高空气象探测雷达工作,用于大气中的温度、气压、湿度和风速风向探测。探空仪的采样周期为 1.2 s,升速在 400 m/min 左右,在北京时每天的 07:15 和 19:15 各获取一次资料^[15-16]。

2 数据与方法

基于西安泾河国家气象站 2021 年获取的非

降水时段的探空雷达、微波辐射计、激光雷达观测数据进行分析。以探空观测值作为参考,统计微波辐射、激光雷达的相对湿度和温度的偏差及均方根误差,并分析原因。计算公式为

$$E = S_0 - S_d, \quad (4)$$

$$E_{\text{M}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_0 - S_d}{n}, \quad (5)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_0 - S_d)^2}{n}} \quad (6)$$

式中, E 为偏差, S_0 为探空数据测量值, S_d 为微波辐射计或激光雷达探测值, E_{M} 为平均偏差, E_{RMS} 为均方根误差, n 为样本个数。其中探空探测的温度是摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$,微波辐射计和激光雷达探测的温度是开尔文温度 $T(\text{K})$,本文统一将摄氏温度换算成开尔文温度,二者的换算关系为

$$T = t + 273.15. \quad (7)$$

3 结果分析

3.1 微波辐射计与探空数据对比

选择晴天、雾霾天、云天三种不同天气条件下微波辐射计探测的温湿度气象要素与探空数据进行对比分析,对微波辐射计的探测性能和精度进行评估。其中雾霾天是根据泾河站的大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 小时质量浓度 $\geq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 来筛选,云天是根据布设在泾河站的云雷达观测到云的情况统计。

图 1 是微波辐射计和探空雷达探测到的数据在垂直高度上温度廓线对比结果。由图可知两者的探测结果整体较为贴合,探空观测廓线的细节更为丰富,微波辐射计观测数据廓线更接近线性。由图 1a、图 1b、图 1c、图 1d、图 1f 的探空温度廓线可知,0~1 km 都出现逆温现象且厚度较薄,而微波辐射计数据由于空间分辨率较探空数据低,基本无法表征逆温现象,因此微波辐射计在逆温层反演方面不具备优势。

图 2 是上述三种天气情况下同时段,微波辐射计和探空雷达探测的相对湿度在垂直高度上的变化趋势。从两者的廓线对比可知,微波辐射计探测的相对湿度与探空探测结果在整体上趋势一致,但在 3~5 km(图 2a)和 2~3 km(图 2e)范围,微波辐射计探测的相对湿度变化趋势与探空结果相反。

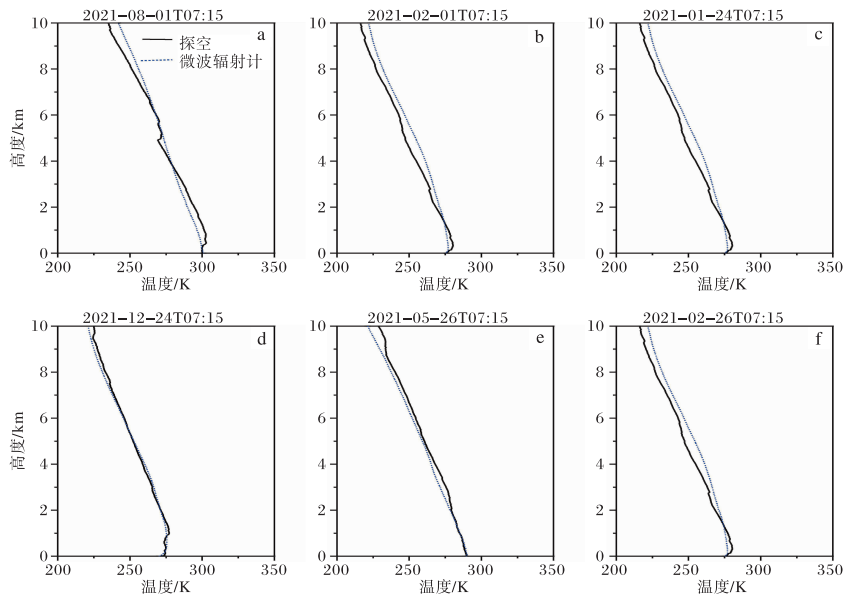


图1 泾河国家气象站微波辐射计和探空雷达晴天(a,b)、雾霾天(c,d)、云天(e,f)温度廓线对比

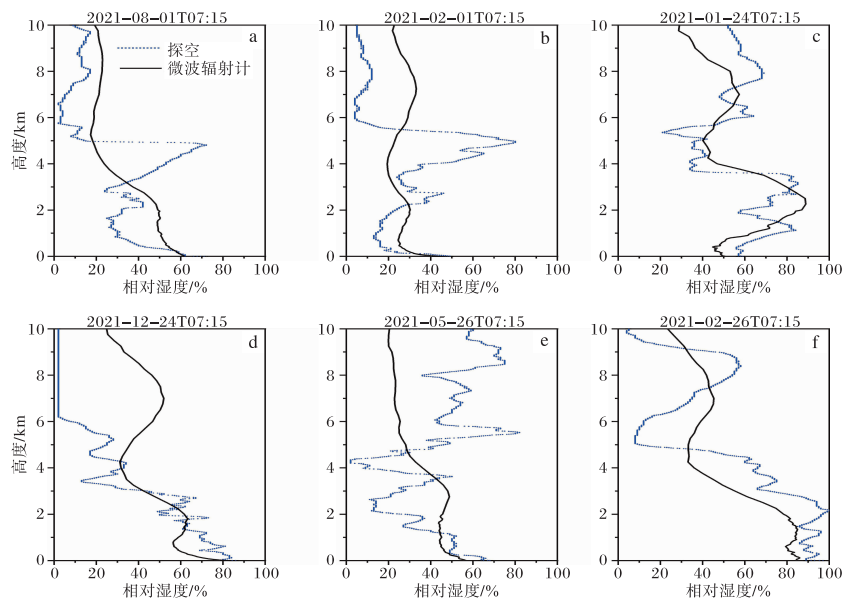


图2 泾河国家气象站微波辐射计和探空雷达晴天(a,b)、雾霾天(c,d)、云天(e,f)相对湿度廓线对比

3.2 激光雷达与探空数据对比

图3为激光雷达和探空雷达晴天和雾霾天探测的大气温度在垂直高度上的变化。由于激光在云中衰减严重,通常情况下无法穿透较厚的云层,所以没有选择云天。由图可知激光雷达和探空温度变化趋势较为一致,数值大小较为贴合。如图3b,在2 km左右探空显示出现逆温现象,激光雷达亦探测到该逆温层。

图4为激光雷达和探空雷达晴天和雾霾天探测的相对湿度在垂直高度上的变化。从观测结果可知:激光雷达实现了垂直高度上6 km范围内的相对湿度探测。通过对探空相对湿度和激光雷达相对湿度结果对比发现,两者变化趋势较为一致,数值较为契合。0.3~4 km范围内的偏差较小,随着探测高度增加,激光雷达的能量衰减,探测的灵敏度和信噪比均降低,所以数据的偏差也增大。

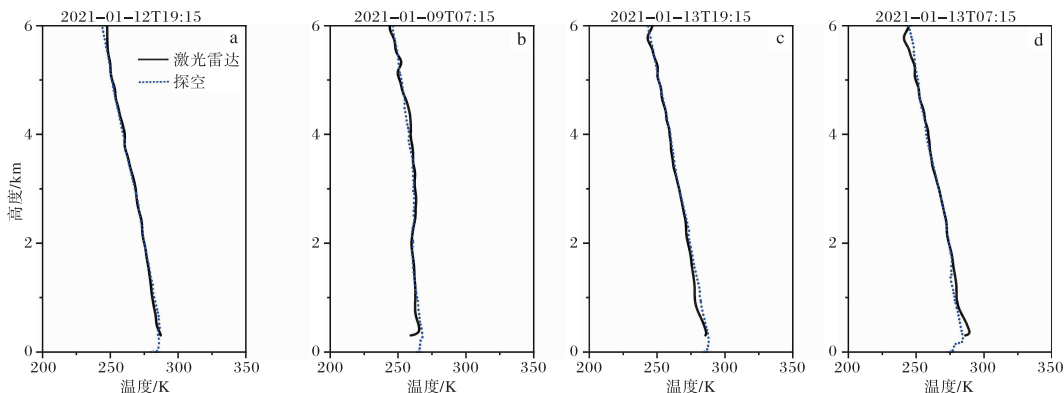


图3 泾河国家气象站激光雷达和探空雷达晴天(a、b)、雾霾天(c、d)温度廓线对比

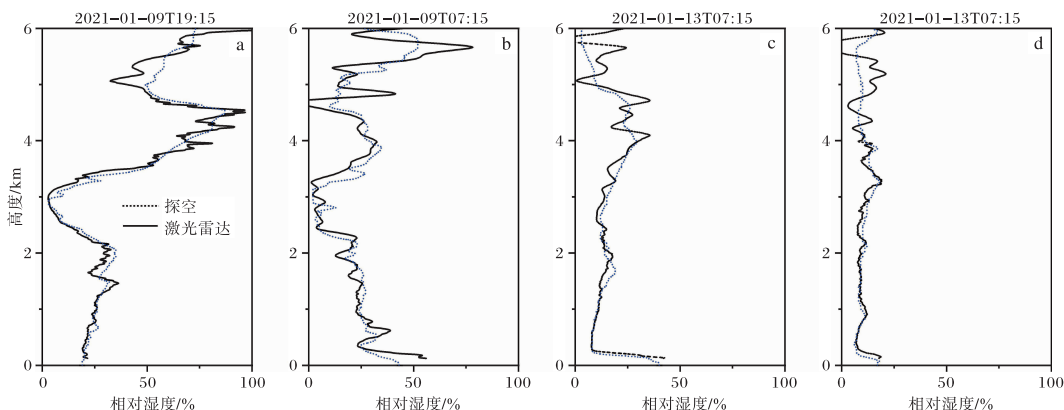


图4 泾河国家气象站激光雷达与探空雷达晴天(a、b)、雾霾天(c、d)相对湿度廓线对比

3.3 偏差及均方根误差

对2021年泾河国家气象站的微波辐射计和激光雷达整体探测性能进行分析与评估。首先提取2021年全年微波辐射计和同时段探空观测数据(共335 d),通过对微波辐射计探测数据进行插值,将两者的空间分辨率进行统一,计算0~10 km高度范围内温度、相对湿度在各个探测高度的分布,其中平均偏差分布如图5所示,均方根误差如图6所示。

从温度平均偏差(图5a)随高度的变化可知,在整个探测范围内,微波辐射计相对探空温度的平均偏差较小,约0.5 K,除低层和高层外,1.5~8 km探空平均温度高于微波辐射计平均温度,5 km左右偏差最大。从相对湿度(图5b)随高度的变化可知,微波辐射计相对探空的相对湿度偏差大致在±5%之内,0~1 km探空平均相对湿度低于微波辐射计平均相对湿度,且随高度增加偏差逐渐减小,1~8 km,探空平均相对湿度高于微波辐射计平均相对湿度。

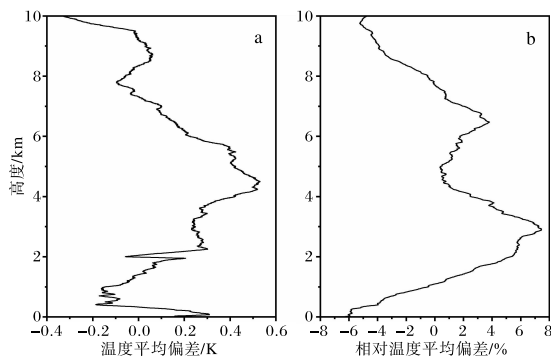


图5 泾河国家气象站微波辐射计与探空数据平均偏差(a 温度;b 相对湿度)

从温度的均方根误差(图6a)随高度的变化可知,在10 km的探测范围内,微波辐射计温度的均方根误差随高度逐渐增大,最小1.5 K,最大超过5.0 K。从相对湿度的均方根误差(图6b)随高度的变化可知,0~6 km微波辐射计相对湿度的均方根误差从10%逐渐增大到25%左右,6~10 km保持在25%左右。

将微波辐射计反演的温度和相对湿度与探空数据进行相关性分析,微波辐射计反演的温度和

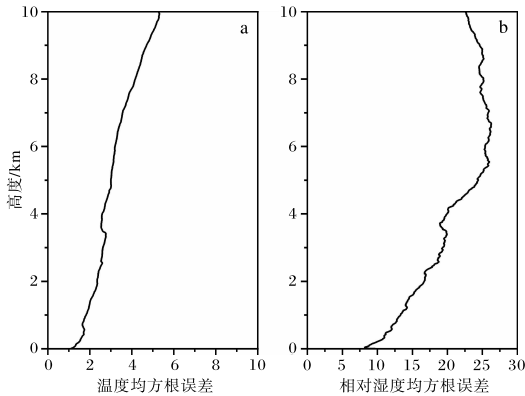


图6 泾河国家气象站微波辐射计与探空数据均方根误差(a 温度;b 相对湿度)

探空温度相关性系数为 0.973,相对湿度相关性系数为 0.632,说明微波辐射计在大气温度探测方面具有优势,相对湿度的探测精度还需进一步提高。

获取激光雷达工作同时段的探空数据共 186 组,通过插值将两者的空间分辨率进行统一。计算 0~6 km 高度范围内温度、相对湿度随探测高度变化。平均偏差分布如图 7 所示,均方根误差如图 8 所示。

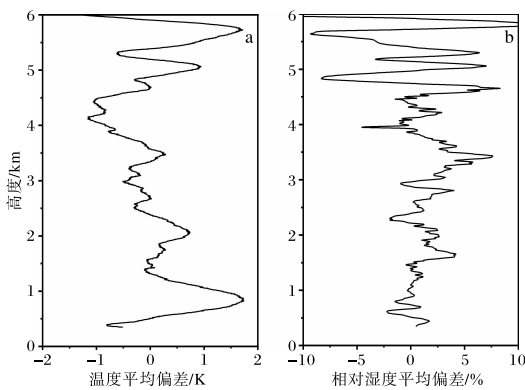


图7 泾河国家气象站激光雷达与探空数据平均偏差(a 温度;b 相对湿度)

从温度平均偏差(图 7a)随高度的变化可知:0.3 km 以下受盲区影响,数据失真;0.3~0.8 km、5~6 km 范围内,温度平均偏差较大,超过 1.0 K;在 0.8~5 km 范围内,温度平均偏差相对较小,不超过 1.0 K。从相对湿度的平均偏差(图 7b)随高度的变化可知:在 0.3~4.5 km 范围内,相对湿度的平均偏差基本在 5%以内;4.5~6 km 范围内,相对湿度平均偏差较大,部分超过了 5%。

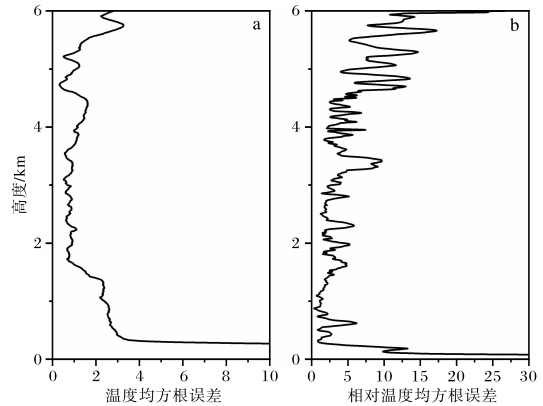


图8 泾河国家气象站激光雷达与探空数据均方根误差(a 温度;b 相对湿度)

图 8a 为激光雷达与探空温度的均方根误差。0.3 km 以下受盲区影响,数据失真;0.3~1.5 km、5.5~6 km 之间均方根误差为 2.5 K 左右;1.5~5 km 之间约为 1.5 K。图 8b 为激光雷达与探空相对湿度的均方根误差。0.3 km 以下受盲区影响,数据失真;0.3~3.3 km、3.7~4.5 km 小于 5%;3.3~3.7 km 在 10%左右;4.5~6 km 在 10%~15%之间。

将激光雷达反演的温度和相对湿度与探空数据进行相关性分析,激光雷达反演的温度和探空温度相关性系数为 0.997,相对湿度相关性系数为 0.964,两者相关性均较高。

4 结论

本文利用西安泾河国家气象站 2021 年 0~10 km 高度的探空探测的温度和相对湿度数据,分别与同址的微波辐射计、温湿度激光雷达反演的温湿度数据进行对比分析,评估了微波辐射计和激光雷达反演温湿度要素的准确性,得到结论如下。

(1)微波辐射计、激光雷达反演的温度和探空温度之间均具有较好的一致性,在垂直高度细节信息探测方面,激光雷达优于微波辐射计。激光雷达反演的温度和探空温度的相关系数为 0.997,均方根误差在 1.5~2.5 K 之间;微波辐射计反演的温度和探空温度的相关系数为 0.973,均方根误差在 1.5~5 K 之间。

(2)激光雷达与探空相对湿度的一致性优于微波辐射计和探空相对湿度之间的一致性,激光

雷达反演的相对湿度和探空相对湿度的相关系数为 0.964,均方根误差在 5%~15%之间,微波辐射计反演的相对湿度和探空相对湿度的相关系数为 0.632,均方根误差为 20%左右。

参考文献:

- [1] 徐梓翔. 云天高精度大气温湿度廓线的反演及应用[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [2] SINKEVICH A A, LAWSON R P. A survey of temperature measurements in convective clouds [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(7): 1133-1145.
- [3] LIOU K N. Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: A global perspective [J]. Monthly Weather Review, 1986, 114(6): 1167-1199.
- [4] 赵美艳, 余君, 蒋镇. MP-3000A 型微波辐射计气温、湿度的适用性评估[J]. 气象科技进展, 2021, 11(2): 46-51.
- [5] 王志诚, 张东明, 王聆勤, 等. 杭州地区地基微波辐射计反演水汽特征的比对分析[J]. 浙江气象, 2021, 42(3): 34-39.
- [6] 张天虎. 基于地基微波辐射计数据的大气温湿度廓线反演算法研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
- [7] 田晓敏, 刘东, 徐继伟, 等. 大气探测激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(5): 321-341.
- [8] 吕达仁, 林海. 雷达和微波辐射计测雨特性比较及其联合应用[J]. 大气科学, 1980, 4(1): 30-39.
- [9] 王云, 王振会, 李青, 等. 基于一维变分算法的地基微波辐射计遥感大气温湿度廓线研究[J]. 气象学报, 2014, 72(3): 570-582.
- [10] 王玉峰, 高飞, 朱承炫, 等. 对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的拉曼激光雷达系统[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 378-387.
- [11] 张钰星. 多波段拉曼激光雷达大气气溶胶光学参量的精细探测技术研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [12] 王国英. 拉曼激光雷达结合微波辐射计的高精度大气温湿度廓线算法研究[D]. 西安:西安理工大学, 2020.
- [13] 王旗, 王周翔, 于翠红. MWP967KV 型地基微波辐射计与探空观测数据对比分析[J]. 现代农业科技, 2017(7): 211-213.
- [14] 曹梅, 王斌, 杨珍, 等. 地基微波辐射计与探空数据对比分析[J]. 陕西气象, 2021(5): 47-54.
- [15] 王瑾, 张镭, 杜韬, 等. 探空和毫米波云雷达探测云高一致性的时空匹配原则研究[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1-19.
- [16] 周毓荃, 欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象, 2010, 36(11): 50-58.