

雷连发,李成伟,白水成,等.车载微波辐射计移动大气走航观测实验及初步应用[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(5):1-9.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



车载微波辐射计移动大气走航观测实验及初步应用

雷连发^{1,2,3,4},李成伟^{5,6*},白水成⁷,姜红林¹,王振会^{3,4},卢建平^{1,2}

(1.北方天穹信息技术(西安)有限公司,陕西 西安 710100;2.西安电子工程研究所,陕西 西安 710100;

3.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心中国气象局气溶胶—云—降水重点实验室,江苏 南京 210044;4.南京信息工程大学大气物理学院,江苏 南京 210044;5.陕西省大气探测

技术保障中心,陕西 西安 710014;6.陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象实验室,

陕西 西安 710014;7.西安市大气探测中心,陕西 西安 710016)

摘要:地基多通道微波辐射计能够实现大气温湿度廓线参数的实时观测与反演,在大气探测中已经得到广泛的应用。受观测方式和数据反演算法的限制,目前主要应用于地面固定站点上空的大气参数遥感探测,无法实现大气参数的移动观测。尝试将自主研发的地基多通道微波辐射计进行改进并安装在车载平台上,对车载微波辐射计移动大气观测可行性进行了验证。实验结果表明车载微波辐射计移动观测是可行的。利用车载移动走航观测数据,对西安城市热岛效应和对流有效位能(CAPE)进行了分析。结果表明,移动走航观测能够用于观测城市热岛效应,西安中心区域比郊区温度高1.0℃左右,城市中心的大气对流有效位能比郊区高1 000~2 000 J/kg。

关键词:车载;微波辐射计;移动观测;温湿度廓线

中图分类号:P407.7

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)05-0001-09

地基多通道微波辐射计能够实时连续观测大气温湿度廓线,具有高时空分辨率的特点,它能够实时连续获得对流层大气温湿度、水汽密度、相对湿度和液态水廓线等大气参数^[1-5]。常规高空大气观测主要利用探空气球的方式,每天进行两次探空,时空分辨率较低,且存在气球路径随风漂移的现象。微波辐射计采用被动遥感探测的方式,实时连续观测顶空大气参数,具有时间分辨率高的优点。目前,微波辐射计

在很多国家和地区被应用到气象和气候监测中,已经成为大气温湿度廓线和云液水被动微波遥感探测的重要设备,尤其在中尺度天气过程的观测中更具优势^[4-9]。在常规大气温湿度廓线探测的基础上,微波辐射计观测资料正在被研究同化到数值模式中提高数值预报效果,初步研究显示预报效果能够得到一定的改善^[10]。此外,微波辐射计还被应用到人工引雷闪电通道的微波热辐射效应和太阳微波辐射观测中,这是一些新的拓展观测与应用^[11-17]。

现有微波辐射计是专门为大气探测设计的,通常都是固定在地面进行定点观测。对于像青藏高原等特殊地区气象精细化观测以及天气过程的针对性移动跟踪观测中也存在许多困难,固定站观测的实用性就很难满足要求。随着科技的发展,为了满足移动观测的需求,可以在汽车、舰船、火车和飞机等移动平台上安装微波辐射计进行业务化观测,为数值

收稿日期:2022-04-30;修回日期:2022-06-27

基金项目:国家自然科学基金(41675028);陕西省自然科学基金研究计划(2020JM-718);西安市科技计划项目(20SF0015);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象实验室重点项目(2020G-2);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介:雷连发(1985—),男,高级工程师,主要从事大气微波遥感技术研究。E-mail: leilianfa_2006@163.com

通信作者:李成伟(1981—),男,高级工程师,主要从事大气探测技术研究。E-mail: lcwingshappy@163.com

预报提供实时的大气移动观测资料具有重要意义。未来如果利用公路或者铁路,将微波辐射计安装在汽车或者高铁上开展大气移动剖面观测,对天气预报将有划时代的意义。此外,陆地仅占全球面积的29%,海洋占有71%的地球表面,海洋对大气的影响相当重要。但是在海上很难建设固定的探空站或者微波辐射计进行定点长期观测,海上船载移动观测就显得格外重要。然而,目前对微波辐射计的移动走航大气探测及数据反演方法的研究较少^[2]。

移动走航观测中微波辐射计处于运动中,移动观测路线上大气背景条件、海拔和地形地貌等随气候带的不同而发生变化。相比固定站站点观测对仪器自身、移动承载平台、观测方式及数据反演算法等提出了新的要求。例如仪器自身和车载平台应该具备好的稳定性和抗震能力。由于移动观测中平台处于运动中,这就要求采样速度快,尽量减小移动观测带来的误差。此外,数据反演算法也需要进行相应的改进,微波辐射计固定站观测数据反演主要应用的是神经网络算法,它依赖当地的历史探空资料,数据训练与当地的海拔和气候等相关联。在移动观测中,这种单一的神经网络已经不适用移动观测的特殊环境^[2],为了开展微波辐射计移动观测,需要对移动观测数据反演方法进行深入研究和实验。

基于车载移动平台观测特殊需求,尝试利用车载平台在西安绕城高速公路上进行微波辐射计移动走航观测实验和应用研究,通过实验和数据分析解车载微波辐射计移动观测的特点,为微波辐射计移动走航大气观测、数据反演和应用、系统改进和验证提供支持,为未来在更多的移动平台上应用奠定基础。

1 车载微波辐射计观测系统

1.1 微波辐射计的组成及功能

为满足移动观测的实际需要,本研究对MWP967KV型地基多通道微波辐射计进行改装,将其安装到车载平台上进行工作。改装后的微波辐射计便于移动,能够实现野外移动观测。

车载微波辐射计整体系统包括微波辐射计主机系统、稳定支架、载运平台、车载计算机、卫星定位模块、线路和供电系统等。运载平台选用民用皮卡车,微波辐射计改装后固定在货箱内。供电系统采用发电机,微波辐射计控制计算机位于车内通过线路与外部辐射计主机连接。为实时记录观测位置,辐射计内置卫星定位模块,实时记录移动路线和数据观测

位置。

车载微波辐射计主机工作频段与地基相同,该辐射计工作频段在K波段(22~31 GHz)和V波段(51~59 GHz)。在移动中实时观测路径上大气在K和V波段的辐射亮温反演大气温度、水汽密度、相对湿度和液态水廓线等大气参数^[1,3]。微波辐射计自带温湿压等传感器,实时采集移动路径上的大气温湿压等参数。此外,还配备了红外辐射观测仪,移动过程中红外观测仪实时观测天空和云的红外辐射温度,观测移动路径上天气和云的变化。

1.2 车载微波辐射计观测过程中的约束关系

车载移动走航观测过程中,车速是必须考虑的重要因素。由于辐射计观测中需要一定的积分时间,移动观测结果是否满足一定空间代表性的问题非常重要。辐射计空间分辨率 L 与天线波束宽度 φ 和观测高度 H 有关,可定义为波束能代表的水平距离,即:

$$L \approx \varphi H. \quad (1)$$

车载平台在移动的过程中,设 v 为辐射计移动的速度即平台速度, t 为辐射计的时间分辨率,即观测可用于反演一次大气层结的一组亮温数据所用的时间,由辐射计的积分时间和采样方式决定,因此可以定义移动走航观测移动速度与时间的约束关系:

$$tv = L(1 - \gamma). \quad (2)$$

式中: γ 为波束重叠度,代表相邻采样波束的重叠比例。如图1所示,在 t 时段内,天线从位置 S_1 移动到 S_2 ,平台移动距离 $\Delta S = S_1 - S_2$,在高度 H 上的重叠度为 γ ,则有:

当 $\gamma = 1$ 时,为全重叠,表示天线没有移动,两次观测的亮温来自于同一位置。

当 $\gamma > 0$ 时,为有重叠采样, $L > \Delta S$,表示天线移动较慢。

当 $\gamma = 0$ 时,为临界状态,表示 $L = \Delta S$,天线移动速度达到采样的上限。由此确定的天线移动速度可

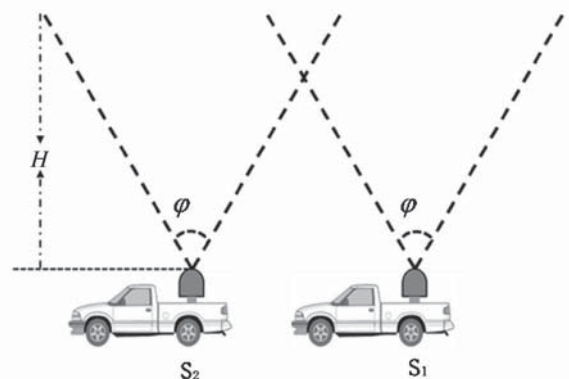


图1 走航观测空间关系示意图

称为平台临界速度。

当 $\gamma < 0$ 时, 为无重叠采样或欠采样, 表示 $L < \Delta S$, 平台的移动距离大于 L , 采集的一组亮温数据来自不同的波束空间。

移动走航观测过程中平台移动速度不能过快, 且采样速度不能太慢。当然, 平台移动速度和采样时间间隔还受到气象参数时空变化的影响。若需观测的天气系统移动缓慢, 天气参数水平方向梯度变化较小, 则 L 的取值可以大一些, 对应于辐射计的系统设计来说天线波束宽度设计就可以大一些, 这样可以减小天线尺寸、降低成本等。在现有辐射计天线系统已经固定的情况下, 可以选择平台移动速度快一些或采样速度慢一些, 这样就可以忽略由于欠采样引起的影响。对于给定的辐射计, 由于 L 与 H 成正比, 两次采样时间间隔内移动距离越近高空重叠度越高。所以, 在移动走航探测中以大气低层(如边界层)探测为主的移动走航观测, 平台应移动慢一些, 而以高层大气探测为主时可适当移动快一些。

目前, 微波辐射计设计的波束宽度 $\varphi < 5^\circ$ (约 0.09 rad), 探测反演高度为 $10\,000 \text{ m}$, 则计算得到 $L \approx 900 \text{ m}$ 。

根据平台移动速度和采样时间的关系可以得到, 当辐射计采样时间 $t=60 \text{ s}$ 时, 平台移动临界速度 v 为:

$$v = \frac{L}{t} = \frac{900 \text{ m}}{60 \text{ s}} = 15 \text{ m/s} = 54 \text{ km/h} . \quad (3)$$

当 $t=30 \text{ s}$ 时, 平台移动临界速度 v 为:

$$v = \frac{L}{t} = \frac{900 \text{ m}}{30 \text{ s}} = 30 \text{ m/s} = 108 \text{ km/h} . \quad (4)$$

在汽车上, 采样时间间隔在 60 s 以内都能满足具有一定重叠度的要求。以上计算过程还可应用到船载、高铁和飞机等平台, 经过估算在船载平台上微波辐射计采样时间在 50 s 以内能够满足要求, 在高铁上采样时间需要 $< 10 \text{ s}$, 而飞机则需要 $< 5 \text{ s}$ 以内完成。

微波辐射计目前的设计包含两种工作模式, 一种是混频检波, 一种是直接检波。混频检波可以有很多的观测通道, 观测频率可以根据需要进行选择, 但是一次只采集一个通道的信息, 需要串行采样完成所有频率的观测采样。直接检波模式下观测通道完全固定, 目前的辐射计在 K 和 V 波段分别设计了 8 个通道, 采样的时候是并行同时采样, 采样时间短、速度快。在车载、船载以及普通火车上串行和并行体制采样基本都能满足要求, 但对于高铁和飞机等高

速移动的平台串行采样受到积分时间和通道数的限制难以确保具有一定重叠度的采样, 未来在高铁和飞机等高速移动平台上安装微波辐射计进行移动观测, 需要更快的采样速率, 两种微波辐射计并行将会更加合适。

1.3 车载微波辐射计的安装与标定

对微波辐射计进行精确定标是对大气辐射亮温准确测量的基础, 微波辐射计的定标是指标定微波辐射计输出电压与输入噪声温度之间定量关系的过程。定标是利用微波辐射计进行大气温湿度廓线观测的重要前提, 定标精度的高低直接影响微波辐射计对大气亮温测量的准确度, 进而影响其对大气状态参数的反演精度。

车载微波辐射计标定与地基微波辐射计相同, 主要采用液氮定标、热源定标、噪声源定标和天空倾斜定标(Tipping curve 定标)多种方式综合定标来确保观测精度^[18]。对于固定站一般要求半年到一年进行一次液氮定标, 实现系统参数的校准。但对于车载观测, 由于移动观测过程中会存在颠簸, 可能会引起系统参数的变化。为了确保辐射计的观测精度, 需要在实验前进行液氮定标, 确保设备具有足够的观测精度。

在液氮定标、噪声源定标和热源等定标基础之上还需要更为细致的定标, 即 Tipping 定标。Tipping 定标是地基微波辐射计一种重要标定方法, 在晴天条件下假设大气均匀分层, 通过在不同仰角上扫描天空各个方向的辐射亮温, 利用两侧大气条件对称性的特点来进行标定^[18-20]。在移动观测过程中, Tipping 标定中对行进方向两侧扫描并标定, 就会受到颠簸及行进路线两旁的树木、房屋建筑和山体等影响, 很难满足 Tipping 标定中两侧扫描数据对称性的要求(图 2a)。因此, 辐射计安装方向要与汽车前进方向垂直, 天线扫描方向为车的前后方向(图 2b), 通过实验, 这种安装方式会最大程度地减少道路两侧树木和房屋建筑的影响。如果未来应用在海上移动平台, 这限制可不考虑。

2 观测实验

2.1 实验概况

实验选择在西安绕城高速公路(全长约 88 km)进行, 高速道路相对平坦且为环形道路, 距离两侧建筑较远, 两侧遮挡较少, 有利于实验进行。通过对地基微波辐射计进行改装将其安装在车载平台, 经过前期的多次静态和动态实验验证, 由西安高新

立交进入西安绕城高速公路顺时针沿绕城高速进行了连续的跑车实验。车载移动观测需要车上配备发电机或者移动电源,本次实验配备了发电机,可满足辐射计连续 10 h 以上的供电需求,观测数据可通过网络实时远程传输。根据平台移动速度和辐射计采样时间的约束关系,将数据采样间隔设置为 30 s,平台平均行驶速度约为 40~60 km/h,确保了观测过程中具有足够的采样重叠度。实验车辆在西安绕城高速公路上连续行驶观测了两圈,用时约 190 min,实验路线及装车结果如图 3 所示。

数据反演采用 BP 人工神经网络算法,神经网络训练利用西安泾河探空站 (108.97°E, 34.43°N) 2012—2019 年的历史探空资料作为训练样本进行网络训练,反演得到的温湿度空间分布(图 4)。车辆行驶一圈后得到了沿行驶路径的温湿度垂直空间剖面,可以清楚地看到不同位置的垂直温度和湿度分布情况。这对大气环境监测、天气状态分析提供有意义的观测资料。

大气温湿度廓线资料可以用来研究大气垂直分层结构,对数值预报模式有重要意义。常规探测都是在地面建立探空站利用气球携带传感器进行探测,难以实现特定路径上空的大气温湿度廓线的探

测。传统微波辐射计在固定站观测只能获取该点上空大气温湿度的时间剖面而无法获得空间剖面。通过车载微波辐射计移动走航观测可实现大气温湿度时空剖面的探测,为特殊环境或天气系统跟踪探测等提供了可能。

在数据处理过程中还需要进一步进行数据质量控制,由于车载移动观测过程中会遇到树木、桥梁和隧道等其他建筑在上空遮挡观测,对观测造成影响,这些数据需要剔除。剔除过程中可以设定阈值进行剔除,由于 K 波段以及 V 波段的低频观测亮温较小,且所有通道亮温有频谱特征,观测上空被遮挡时观测亮温会明显增大并接近环境温度,利用这个明显的差异通过设定阈值的方法可剔除观测误差。

2.2 实验环境数据分析

微波辐射计上自带了气温、相对湿度、气压、天空红外和卫星定位传感器,可实时测量辐射计所处环境的温、湿、压和天空红外辐射温度等。为减小振动,车速保持在 80 km/h 以内,全程车速变化如图 5a 所示。全程海拔最高点 484 m,位于东南方,最低 338 m 在正北方,全程海拔变化如图 5f 所示。跑车过程中大气相对湿度在 15%~20% 左右(图 5c),根据天空红外辐射温度可以看出天气为部分区域有

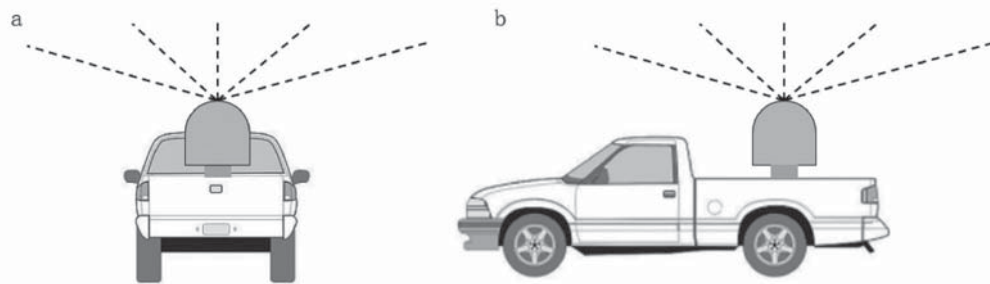


图 2 车载微波辐射计安装示意图

(a 天线扫描行进路线两侧不利于 Tipping 定标, b 天线扫描车的前后方向有利于 Tipping 定标)

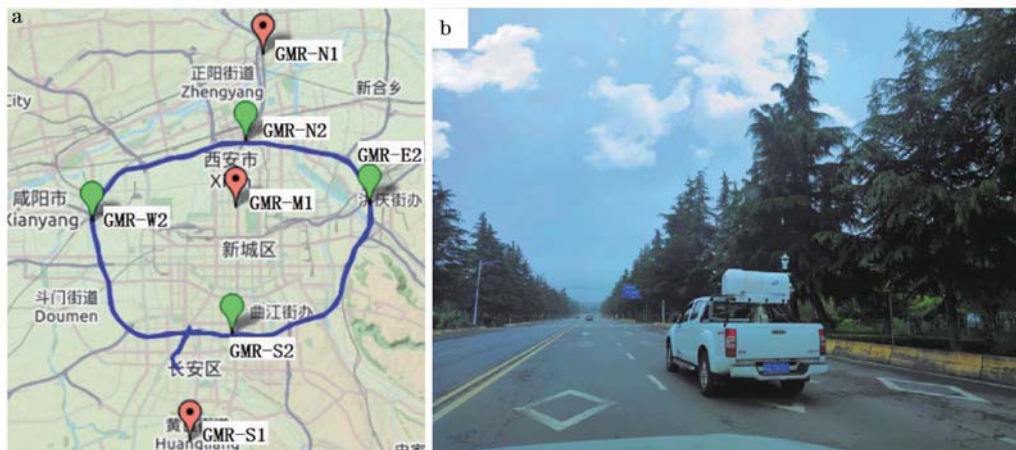


图 3 实验路线(a)和车载微波辐射计(b)

(红色点为固定的观测站;绿色点为车载移动观测点)

云,即图 5e 中天空红外辐射温度增大的时刻。

在第二圈开始后,即 14:37—14:43 和 15:08—15:18 出现交通拥堵,车速降至 10 km/h 以下,这时对应采集的环境气温有约 1.0 °C 的升高,随着车速增大,气温随之下降,这主要是由于拥堵后,汽车的反射和热辐射造成局部环境气温升高(图 5a、5b)。

2.3 廓线数据分析

为了分析温湿度廓线数据的探测效果,通常使用探空资料作为参考依据,但是探空数据每天仅有早晚 08 时各一次,数据量有限,很难满足实验要求。因此,在实验期间没有探空资料情况下,利用再分析资料作为参考数据对车载微波辐射计观测资料进行对比分析。再分析资料选取欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的 ERA5 气候再分析数据集,该数据集提供的数据包括各种大气参数估计(如不同高度上的气温、湿度、气压和风)和地表参数估计(如降水、海冰、土壤湿度和地表气温)。数据时间分辨率为 1 h,空间分辨率可达 0.25°,可满足应用需求。

实验期间共有 3 组 ERA5 再分析资料与本次实验同时刻,分别是 14:00,15:00 和 16:00。与车载辐射计同时间探测数据进行对比,对比过程中选择该时刻微波辐射计观测反演的大气温湿度廓线与 ERA5 资料进行对比,水汽密度通过温湿度廓线进行计算得到,结果如图 6 所示。车载辐射计探测结果与 ERA5 再分析资料一致性较好,温度廓线误差最小,湿度廓线在低空较为一致,反演的最大湿度层两者高度略有差异,辐射计反演的相对湿度廓线最大值高度相比 ERA5 略低一些。中低空辐射计反演观测的资料与 ERA5 有一些区别,近地面两者差异最明显,这可能是再分析资料分辨率为 0.25°代表了一定区域内状态,而辐射计探测为观测点的大气参数,具有一定差距。

2.4 城市大气环境观测与应用

实验过程中西安市还有另外 3 台同型号固定站的微波辐射计也在观测,从南到北布设有 3 个固定站点(位置:GMR-S1,GMR-M1 和 GMR-N1),同时

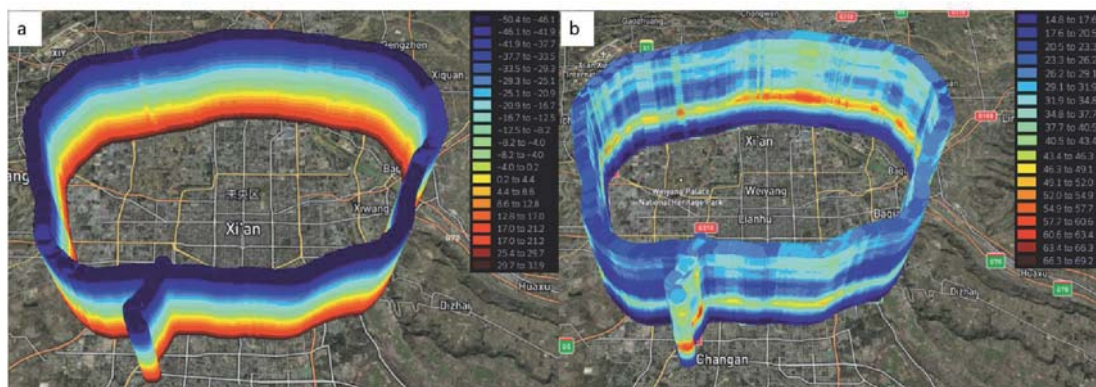


图 4 温湿度廓线的时空分布

(a 为温度剖面,b 为相对湿度剖面)

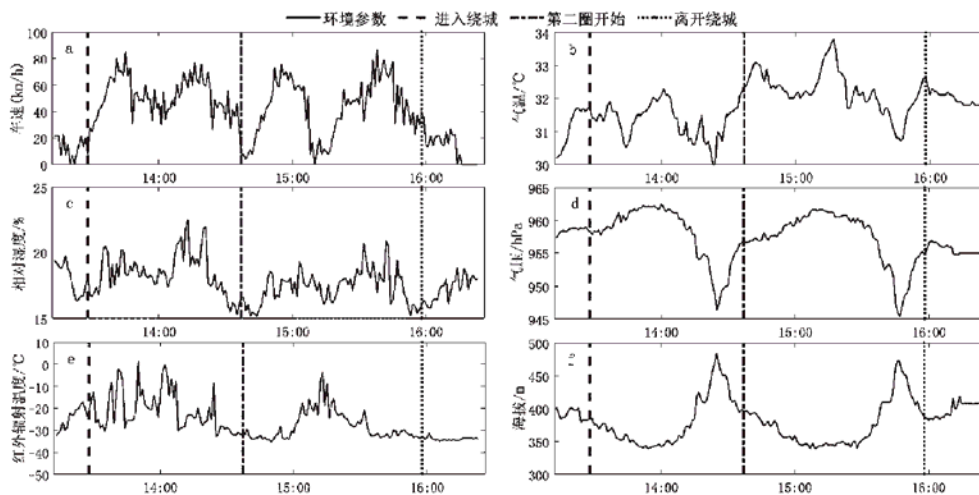


图 5 实验过程中环境参数随时间变化

(a 为车速,b 为气温,c 为相对湿度,d 为气压,e 为红外辐射温度,f 为海拔高度)

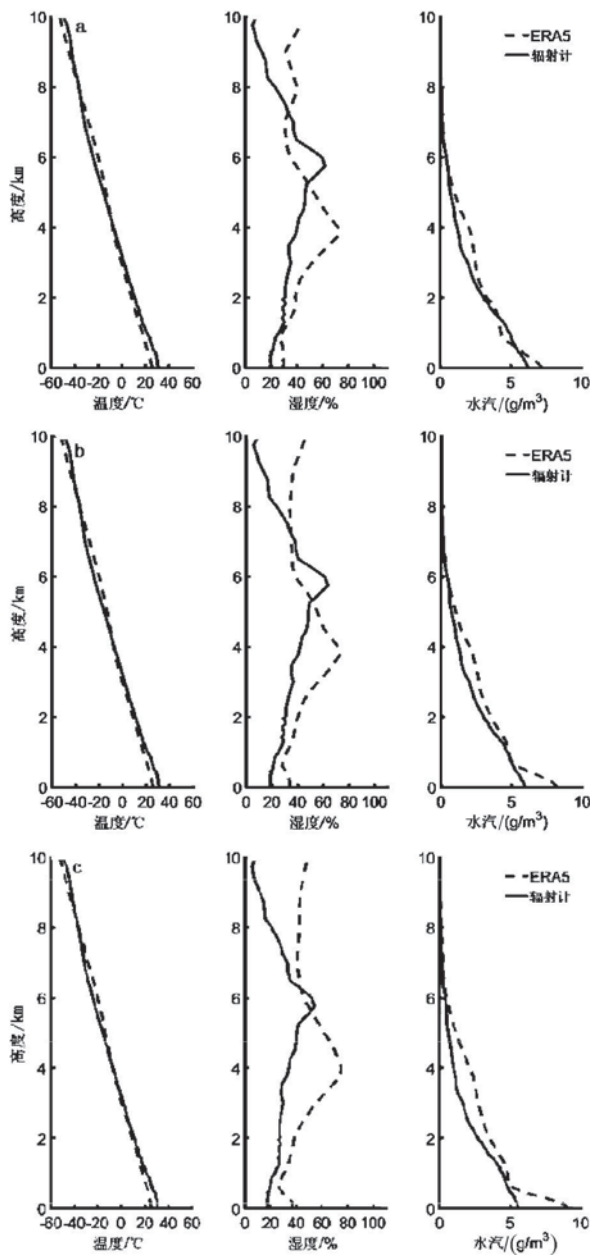


图6 利用探空训练反演的温湿度廓线与
ERA5 再分析资料的对比
(a 为 14:00, b 为 15:00, c 为 16:00)

选取移动观测路线上东南西北 4 个观测点 (位置: GMR-N2, GMR-E2, GMR-S2, GMR-W2) 资料对比分析, 形成对城市中心和四周的综合观测对比, 位置分布如图 3a 所示。

车载微波辐射计沿绕城高速共行驶两圈, 分别得到两组数据, 选取了不同位置的 7 个站点数据分别从南到北, 从东到西进行了对比, 得到了温度和相对湿度的空间分布变化, 如图 7 和图 8 所示。

从温度来看, 城市热岛效应明显, 位于城市中心的站点 (GMR-M1) 的温度明显高于周围的其他 6 个

观测点。距离中心位置越远, 温度相对就越低, 例如最南端 (GMR-S1) 和北端 (GMR-N1) 2 个固定站距离中心点距离最远, 与中心点的温度相差超过 1 °C。位于车辆行进路线上的 4 个采集点距离中心点较近, 与中心点温度差异较小。相对湿度则是城市中心较小, 远离城市中心相对湿度变大, 郊区与城市中心相对湿度最大差异超过 10%。南侧更靠近秦岭山区, 因此南侧温度略低一些, 相对湿度略高一些。东侧紧邻灞河, 东西温度差异不明显, 东部相对湿度则略大一些。

从观测结果来看, 城市热岛效应明显, 由于城市中心区域近地面气温高, 大气会进行上升运动, 对流能量较强, 大气状态最不稳定。通常可以利用大气对流有效位能 (CAPE) 来衡量分析大气的对流能量和不稳定度^[21]。CAPE 可以利用探空资料进行计算, 每天早晚仅有 2 次, 探空时间分辨率低, 难以满足使用要求。微波辐射计能够提供实时大气温湿度廓线, 这些数据可用于 CAPE 值的实时计算, 具有高时间分辨率特点, 为研究大气 CAPE 值提供了很好的资

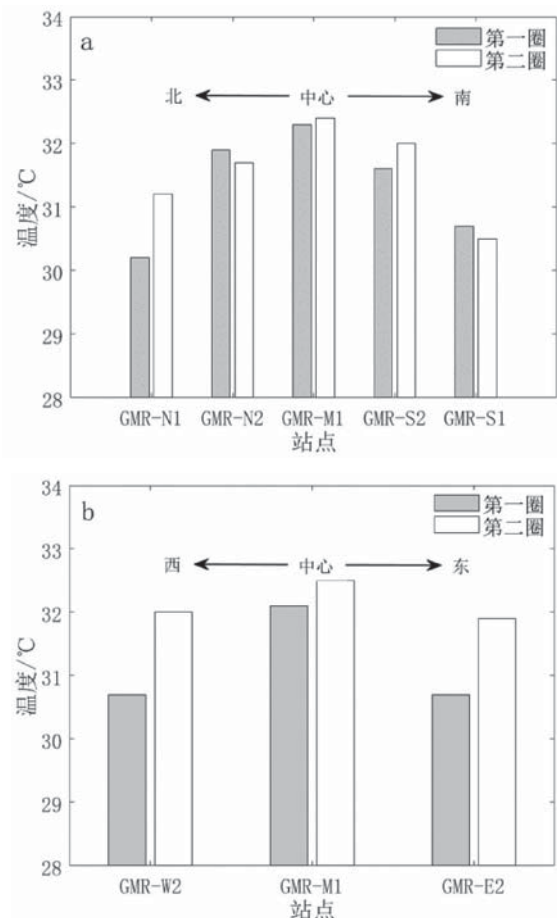


图7 沿城市东西和南北方向温度对比
(a 为从南到北, b 为从东到西)

料^[17,21]。因此,利用微波辐射计观测的温湿度廓线计算各个观测点的 $CAPE$ 值,研究城市区域不同位置的大气状态(图9)。

城市中心大气对流有效位能明显高于城市周边区域,差异可达1 000~2 000 J/kg。由于强的对流作用,城市中心气流上升会与周围地区形成气压差异,周围地区近地面大气向城市中心辐合。城市“热岛”中心区域上升气流比郊区强,由于热岛效应的存在,城市中心大气对流作用强,当大气环流的影响较弱且城市水汽和凝结核较丰富时,有利于对流雨的形成。

3 结论

车载微波辐射计因其在观测方式 and 应用需求上具有特殊的优势,为了验证车载微波辐射计观测方法及应用的可行性,本文对地基微波辐射计进行了改装并安装到车载平台上进行实验,验证了车载观测方案的可行性,为移动探测奠定了基础。结合观测

实验本文得到以下结论:

(1)微波辐射计在车载平台上安装方向会影响到辐射计的观测和标定,为了减少道路两侧树木、建筑和山体等的影响,安装时需要保持辐射计天线扫描方向为车辆行进的前后方向,避免扫描道路两侧。移动观测过程中还需要考虑道路颠簸等带来的影响。

(2)移动观测过程中要考虑平台移动速度和微波辐射计采样时间间隔之间的关系,根据不同的移动平台选择合适的采样时间间隔。

(3)在城市道路进行移动观测过程中,由于堵车等很多车辆拥挤在一起,车辆的热辐射和反射等造成环境气象数据的变化,会对观测带来一定的影响。

(4)车载平台能够实现对天气系统、城市气象环境等的移动观测,能够实现大气状态的跟踪观测。经过在西安连续的环形路线观测和数据分析,发现城市热岛效应明显,城市中心大气对流有效位能明显高于城市周边区域,这对城市区域大气参数的移动

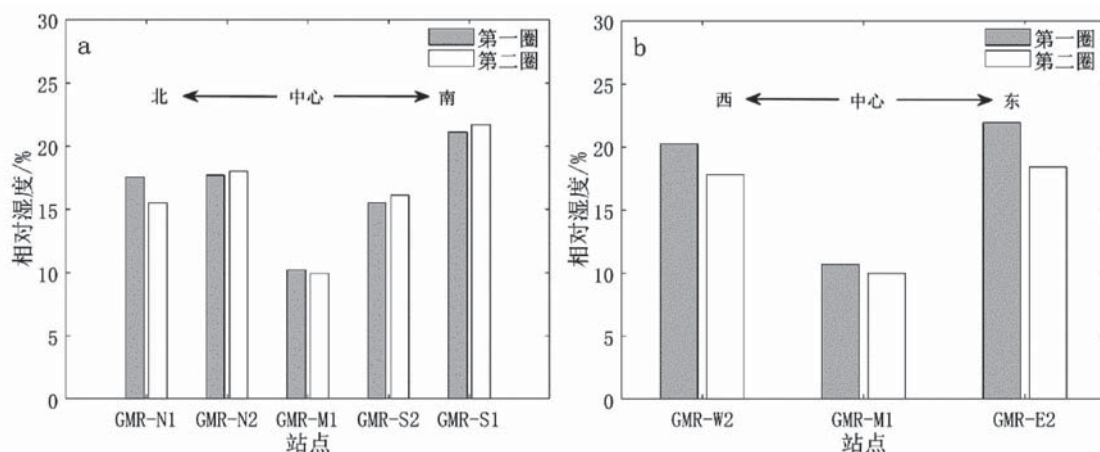


图8 沿城市东西和南北方向相对湿度对比

(a 为从南到北, b 为从东到西)

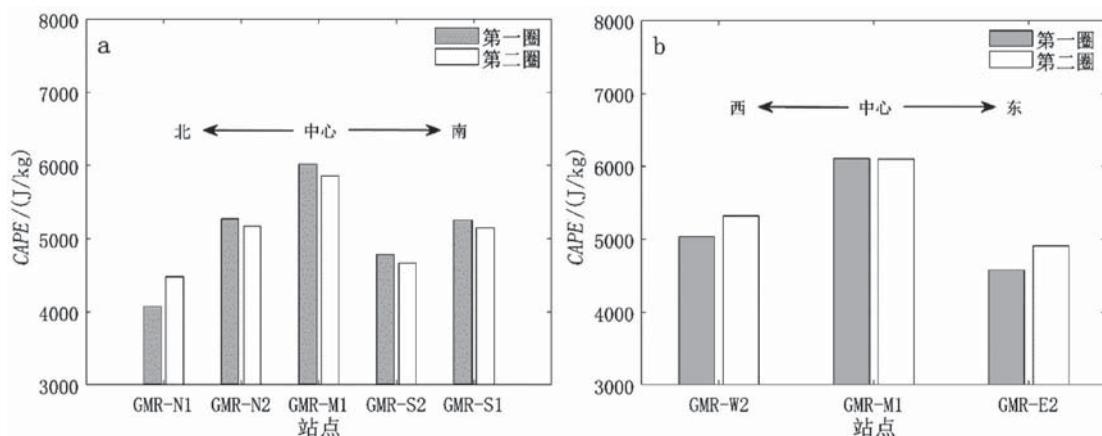


图9 沿城市东西和南北向 $CAPE$ 对比

(a 为沿城市南北方向; b 为沿城市东西方向)

探测有重要意义。

(5)移动平台观测的数据反演方法是一项重点研究内容,在本次实验中地势平台可不考虑海拔高度变化的影响。未来在高原和山区等复杂地形中开展移动观测,反演过程必须考虑海拔高度变化对反演算法的要求,这将是本研究后期实验和重点研究方向。此外,受到实验和设备条件限制,本实验天少对走航观测过程中平台姿态信息的获取,在实验路线上选择较为平坦的路面,忽略了平台倾斜对观测带来的影响,通过这次验证,未来实验将增加惯均系统实时获取平台姿态信息,在特殊路段实验,研究平台倾斜对观测的影响,开展姿态订正研究。

参考文献:

- [1] 雷连发,卢建平,朱建,等.多通道地基微波辐射计大气遥感[J].遥感学报,2014,18(1):186-191.
- [2] 李秀镇,李木,王力群,等.同海区大气条件对船载微波辐射计反演结果的影响[J].海洋市沼通报,2017(2):23-30.
- [3] 卢建平,黄建平,郭学良,等.探测大气温湿廓线的35通道微波辐射计设计原理与特点[J].气象科技,2014,42(2):193-197.
- [4] 朱雯种,王清平,王春红,等.微波辐射计在秀镇木群机场浓雾监测中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(5):23-31.
- [5] XU G R, XI B K, ZHANG W G, et al. Comparison of atmospheric profiles between microwave radiometer retrievals and radiosonde soundings [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120, doi:10.1002/2015JD023438.
- [6] 侯叶叶,月红全,球,松.地基微波辐射计反演水汽密度廓线精度分析[J].气象科技,2016,44(5):702-721.
- [7] 郑通通.MWP967KV型地基微波辐射计反演道够的质量评估[J].高原山地气象研究,2019,39(2):82-86.
- [8] 连廓,王线飞,具有,等.基于MWP967KV辐射计的微波辐射反演方法研究[J].气象水文海洋仪器,2019,36(2):38-44.
- [9] 月有辨,月东升,郭点它,等.国道MWP967KV型地基微波辐射计探测精度[J].应用气象学报,2019,30(6):731-744.
- [10] Olivier Caumont, Domenico Cimini, Ulrich Löhnert, et al. Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142, doi:org/10.1002/qj.2860.
- [11] WANG Z H, LI Q, HU F C, et al. Remote sensing of lightning by a ground-based microwave radiometer [J]. Atmospheric Research, 2014, 150: 143-150.
- [12] JIANG S L, PAN Y, LEI L F, et al. Remote sensing of the lightning heating effect duration with ground-based microwave radiometer [J]. Atmospheric Research, 2018, 205: 26-32.
- [13] JIANG S L, WANG Z H, LIU C, et al. Analysis and practice for observing artificially triggered lightning with a ground-based microwave radiometer [J]. Atmospheric Research, 2021, 264: 105851.
- [14] JIANG S L, WANG Z H, LEI L F, et al. Preliminary study on the relationship between the brightness temperature pulses observed with a ground-based microwave radiometer and the lightning current integral values [J]. Atmospheric Research, 2020, 245: 105072.
- [15] LEI L F, WANG Z H, QIN J, et al. Feasibility for Operationally Monitoring Ground-Based Multichannel Microwave Radiometer by Using Solar Observations [J]. Atmosphere, 2021, 12: 447.
- [16] LEI L F, WANG Z H, MA Y Y, et al. Measurement of Solar Absolute Brightness Temperature Using a Ground-Based Multichannel Microwave Radiometer [J]. Remote Sensing, 2021, 13: 2968.
- [17] PAN Y, ZHANG S, LI Q, et al. Analysis of convective instability data derived from a ground-based microwave radiometer before triggering operations for artificial lightning [J]. Atmospheric Research, 2020, 243: 105005.
- [18] HAN Y, WESTWATER E R. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1260-1276.
- [19] 李获得,层天汽,密建成,等.基于车载微波辐射计的地面观测实验方法[J].上海航天,2018,35(2),81-90.
- [20] 液等,层少汽,液立新,等.车载多频率微波辐射计与观测数据应用[J].遥感技术与应用,2015,30(5):1012-1020.
- [21] 参静,。文常,周天规.基于地基微波辐射计资料对成都探流机场两次雷雨过程的分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):61-67.

Vehicle-mounted Microwave Radiometer Mobile Atmospheric Observation Experiment and Preliminary Application

LEI Lianfa^{1,2,3,4}, LI Chengwei^{5,6}, BAI Shuicheng⁷, JIANG Honglin¹, WANG Zhenhui^{3,4},
LU Jianping^{1,2}

(1.North Sky-Dome Information Technology (Xi'an) CO.,LTD,Xi'an 710100,China;

2.Xi'an Electronic Engineering Research Institute,Xi'an 710100,China;

3.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
CMA Key Laboratory of Aerosol-Cloud-Precipitation,Nanjing University of
Information Science & Technology,Nanjing 210044,China;

4.School of Atmospheric Physics,Nanjing University of Information Science &
Technology,Nanjing 210044,China;

5.Shaanxi Provincial Atmospheric Observation Technical Support Center,Xi'an 710016,China;

6.Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for The Qinling Mountains and
Loess Plateau,Shaanxi Meteorological Bureau,Xi'an 710016,China;

7.Xi'an Meteorological Observation Center,Xi'an 710016,China)

Abstract Ground-based multichannel microwave radiometer (GMR) can be used to observe and retrieve atmospheric temperature and humidity profiles, it has been widely used in atmospheric observation. However, due to the limitation of the observation mode and data retrieve method, GMR is only used for the atmospheric observation at a fixed station, it cannot be used for the mobile observation for atmosphere. In order to observe the atmosphere profiles by using the vehicle-mounted GMR, an independently developed GMR is improved and installed on the vehicle platform, the feasibility of mobile atmospheric observation technology is studied by using the vehicle-mounted GMR. The results show that the mobile observation technology is feasible by using the vehicle-mounted GMR. In addition, the vehicle-mounted observation data is used to analyze the urban heat island and convective available potential energy (CAPE) at Xi'an, China. The results show that the urban heat island effect could be observed by mobile observation. The temperature in the central of Xi'an is about 1 °C higher than that in the suburbs, and the CAPE is also 1 000~2 000 J/kg higher than that in the suburbs.

Key words vehicle-mounted; microwave radiometer; mobile observation; temperature and humidity profiles