

微波辐射计资料在乌鲁木齐机场持续浓雾天气中的试验应用

王春红 王清平 谭艳梅 朱雯娜 韩磊
(民航新疆空中交通管理局气象中心, 乌鲁木齐 830016)

摘要: 利用HTG-3型微波辐射计在乌鲁木齐机场进行试验验证期间获得的数据资料, 采集了2016年10月—2017年1月出现的多个持续浓雾天气个例进行分析, 结果表明: 1) 微波辐射计可以实时监测边界层温湿条件演变, 有效弥补常规探空资料时间分辨率低的问题, 可以在监测持续浓雾演变, 研究持续浓雾的形成发展机制, 提高临近预报能力上发挥有效作用; 2) 综合水汽含量 (IWV) 能够反映空中水汽消长情况。持续浓雾多是水汽缓慢耗散的过程。液态水路径 (LWP) 的增长波动变化与持续浓雾的生成变化有一定的对应; 3) 持续浓雾时地面到500~1000 m多为相对湿度95%以上高湿高饱和状态; 4) 贴地逆温的建立或加强是持续浓雾形成的关键。

关键词: 微波辐射计, 持续浓雾, 高湿高饱和, 贴地逆温

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.04.004

Application of Microwave Radiometer Data in Continuous Dense Fog at Urumqi Airport

Wang Chunhong, Wang Qingping, Tan Yanmei, Zhu Wenna, Han Lei
(Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi 830016)

Abstract: In this paper, several cases of continuous dense fog were analyzed from October 2016 to March 2017, using the HTG-3 microwave radiometer installed at Urumqi Airport. Results show that: 1) Microwave radiometer can monitor the variations of boundary layer air temperature and humidity in real time with high temporal resolution. 2) Integrated Water Vapor (IWV) can reflect the growth and decline of water vapor in the air, and the continuous dense fog is mostly a slow process of water vapor dissipation. The increase and fluctuation of Liquid Water Path (LWP) correspond to the generation and dissipation of dense fog. 3) In the cases of continuous dense fog, below the height of 500-1000 m, the air is nearly saturated, and the relative humidity is almost higher than 95%. 4) The establishment or enhancement of the ground temperature inversion is the key factor to the formation of continuous dense fog.

Keywords: microwave radiometer, continuous dense fog, high humidity high saturation, ground temperature inversion

0 引言

大雾天气严重影响乌鲁木齐机场冬季航班的正常运行。大雾的预报是航空气象服务保障的重点和难点问题, 但民航气象服务机构现有的技术手段尚无法实现对大雾的全方位立体监测, 对预报服务的支持能力有限。

近年来, 微波辐射计已经越来越多地应用于低云雾等的研究及实际业务应用^[1-5]。其测量原理是根

据大气对于不同频率微波频段辐射吸收的差异, 在典型的微波V波段大气氧气窗口 (51~59 GHz) 和微波K波段大气水汽窗口 (22~31 GHz) 内选择合适的频率, 进行大气亮温观测, 反演获得对流层大气温度、湿度廓线、大气柱积分水汽量、大气柱积分云水含水量等信息。赵金霞等^[1]利用微波辐射计观测资料, 对16次天津大雾典型个例的发生、维持及消散时近地层温湿结构特点进行了分析。刘建忠等^[2]用常规观测资料、微波辐射计和风廓线仪等资料对北京地区一次典型雾日进行了边界层特性的分析, 指出微波辐射计反演产品可以清楚地看出高低空湿度的配置以及雾维持的机理。Ware等^[3]研究2001年2月16日科罗拉多州Boulder市的一次上坡雾过程, 发现微波辐射计可以清晰地反映雾的温、湿度结构和液态水含量的垂直结

收稿日期: 2019年2月11日; 修回日期: 2019年7月27日
第一作者: 王春红 (1971—), Email: 2036447935@qq.com
资助信息: 国家自然科学基金项目 (41575011); 民航新疆空中交通管理局科技项目“乌鲁木齐机场大雾天气的中尺度配置及多种探测资料综合应用研究”

构。新疆地区气象工作者利用微波辐射计对乌鲁木齐水汽日变化及暴雨天气进行研究分析，但在雾的监测预报方面开展的工作不多^[6-9]。

为提升低云雾的监测预报能力，2016年10月起，新疆空管局在乌鲁木齐机场开展了微波辐射计试验验证工作。使用设备为HTG-3型，安装在航管楼楼顶。

本文将乌鲁木齐机场大雾持续2 h（含）以上，主导能见度 ≤ 500 m且跑道主降方向跑道视程（RVR） ≤ 550 m的情况定义为“持续浓雾”。采集2016年10月—2017年1月间出现的持续浓雾个例，利用微波辐射计资料进行分析研究，目的在于了解持续浓雾天气边界层大气的温湿结构特点，评估微波辐射计产品在乌鲁木齐持续浓雾监测方面的作用和能力。

1 持续浓雾个例概况

2016年11月—2017年1月，乌鲁木齐机场频繁出现大雾天气，共采集到持续浓雾个例10个。就其天气形势而言，可分为宽广脊区型（5例），脊前型（3例）和西风带波动型（2例）这3类，基本情况见表1。

表1 2016—2017年持续浓雾个例基本情况
Table 1 Continuous dense fog cases of 2016–2017

个例	持续浓雾时间段/UTC	持续时间/h	天气分型
1	2016年11月27日22:00—11月28日00:30	2.5	脊前型
2	2016年11月28日10:30—11月29日05:00	18.5	宽广脊区型
3	2016年12月2日00:30—12月2日03:30	3	脊前型
4	2016年12月7日15:30—12月7日17:30	2	西风带波动型
5	2016年12月8日22:00—12月9日03:00	5	宽广脊区型
6	2016年12月9日07:00—12月9日14:00	7	宽广脊区型
7	2016年12月11日21:00—12月12日06:30	9.5	宽广脊区型
8	2016年12月21日17:00—12月21日19:00	2	脊前型
9	2016年12月31日14:30—2017年1月1日02:00	11.5	宽广脊区型
10	2017年1月1日21:30—1月2日00:00	2.5	西风带波动型

不同天气类型的持续浓雾天气表现不同。脊前型和西风带波动型的持续浓雾维持时间短，生消相对迅速；脊区型持续浓雾维持时间较长。

2 持续浓雾边界层温湿条件特征

2.1 大气水汽条件分析

微波辐射计产品中，综合水汽含量（IWV）和液态水路径（LWP）是测量产品，分别反映大气柱中总的水汽含量水平和液态水含量，液态水廓线（LPR）是反演产品，反映的是大气中液态水的空间分布情况。由于过冷水在气温 -10°C 以下存在概率相对较小，微波辐射计几乎探测不到，因此对于液态水的分析仅选择气温高于 -10°C 的个例。

持续浓雾天气的IWV数值范围为 $3\sim 15\text{ kg/m}^2$ ，

以 $5\sim 10\text{ kg/m}^2$ 居多，且多表现为IWV逐渐减少的趋势。仅有2016年12月6—7日1例表现为增加趋势（图1a~1b），经分析发现是地面融雪增湿使IWV从6日的 10 kg/m^2 增长到7日的 13 kg/m^2 左右。另外，有的个例在IWV逐渐减少过程中会出现间断的IWV增长情况，分析发现这种增长是与地面降水的出现有所对应的。如2016年12月8—9日的两次持续浓雾，8日22时—9日03时（世界时，下同）的持续浓雾过程中IWV是缓降的，而9日07—14时的持续浓雾过程中，IWV先是缓降，在11时前后IWV又开始出现增长（图1c~1d），观测实况是11:30—15:00持续浓雾中伴随有小雪出现。上述分析表明：大雾过程基本是空中水汽缓慢耗散的过程，降水和地面融雪增湿则可以带来空中水汽的增长。

持续浓雾阶段LWP的“出现—增长/波动—减小”过程与持续浓雾的“出现—维持—结束”有一定的对应。LWP峰值范围约为 $100\sim 400\text{ g/m}^2$ ，峰值阶段往往也是持续浓雾较稳定和RVR较为恶劣的时段，但LWP的数值变化范围与持续浓雾中能见度的关系并不确定。分析发现：持续浓雾结束迅速转为轻雾天气时，LWP一般表现为迅速减小至消失。如2016年12月31日14:30—2017年1月1日02:00的持续浓雾过程，在持续浓雾的初生阶段，LWP迅速增长，在稳定维持阶段，LWP出现峰值并有一定的波动，在结束阶段，LWP呈直线下降直至消失（图2a, 2b）。持续浓雾结束后继续维持大雾或低云飘雪时，LWP还会继续存在。如2016年11月28日10:30—29日05:00的持续浓雾过程，LWP在持续浓雾结束前后减少消失，但很快随着低云飘雪的出现又继续出现（图2c~2d）。

LPR的出现与LWP有很好的对应性，最大值 $0.4\sim 0.5\text{ g/m}^3$ 。经与人工观测的云高云状实况对照，发现多数情况下LPR出现的高度明显较实际云高偏高，仅有个别个例的部分时段，LPR高度可与实况中的低云相对应（图略）。

2.2 湿度条件特征

微波辐射计产品中，绝对湿度和相对湿度廓线是反演产品，分别反映绝对湿度和相对湿度在垂直空间的分布和演变情况。

绝对湿度的演变趋势与IWV基本一致。空间分布为从地面向空中逐渐减小，变化平缓，在持续浓雾过程中多呈缓慢减少趋势，数值范围为 $2\sim 8\text{ g/m}^3$ 。地面融雪增湿导致的水汽增加，表现为绝对湿度从地面向空中的扩展和增加（图略）。

相对湿度的空间分布也是从低层向高空减小的，

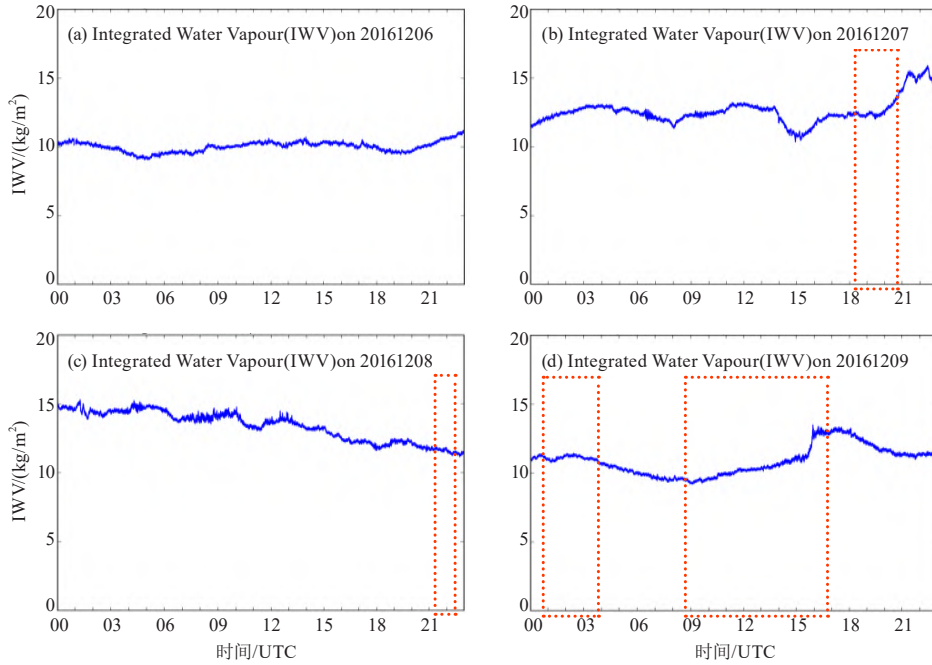


图1 综合水汽含量 (IWV) 时间演变特征
 Fig. 1 Integrated Water Vapor (IWV) time evolution characteristics

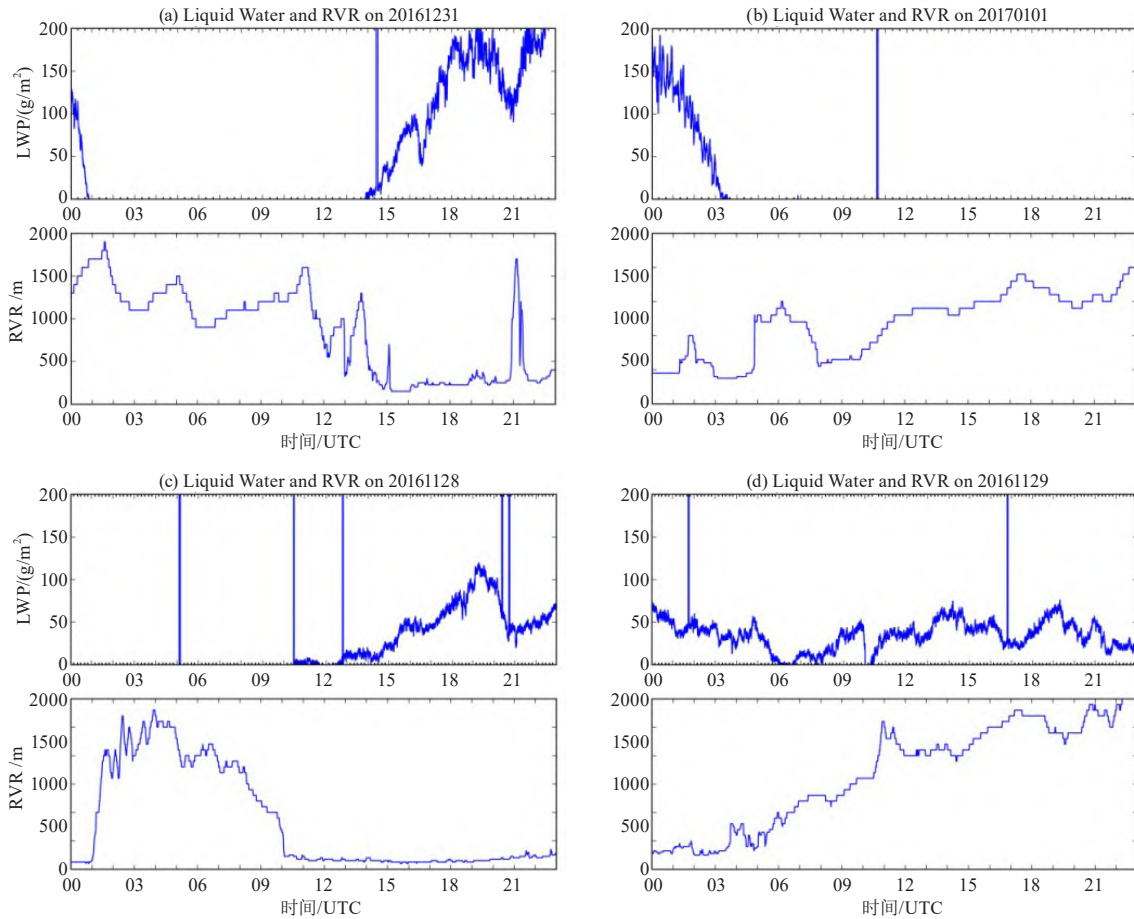


图2 LWP时间演变特征及其与RVR演变的关系
 Fig. 2 LWP time evolution characteristics and the relationship with RVR

但其变化特征较绝对湿度显著而丰富。持续浓雾天气出现时,地面至500~1000 m高度多为相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿高饱和状态。持续浓雾迅速出现,即爆发性发展^[10-11]的情况下,要么表现为近地层0~500 m快速增湿达到相对湿度 $\geq 95\%$,要么表现为空中高湿高饱和层的快速接地。如2016年12月8日22时—9日03时持续浓雾过程,能见度在22时前后突降,表现为雾的爆发性发展,而这一时间段500 m以下的相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿高饱和层也是突然出现的(图3a)。2016年11月

27日22:00—28日00:30持续浓雾过程,能见度在22时突降,也具有爆发性发展的特点,在这一时间段原来空中200~1000 m的相对湿度90%~95%的高湿高饱和层突然向下接地了(图3b)。而在持续浓雾的维持过程中,雾体向空中发展时,会出现接地高湿高饱和层向空中增厚的现象,如2016年12月9日07—14时持续浓雾过程,在09—12时,相对湿度 $\geq 95\%$ 的接地高湿高饱和层突然出现向上的发展,由原来的400 m高度向上发展到1000 m左右(图3c)。

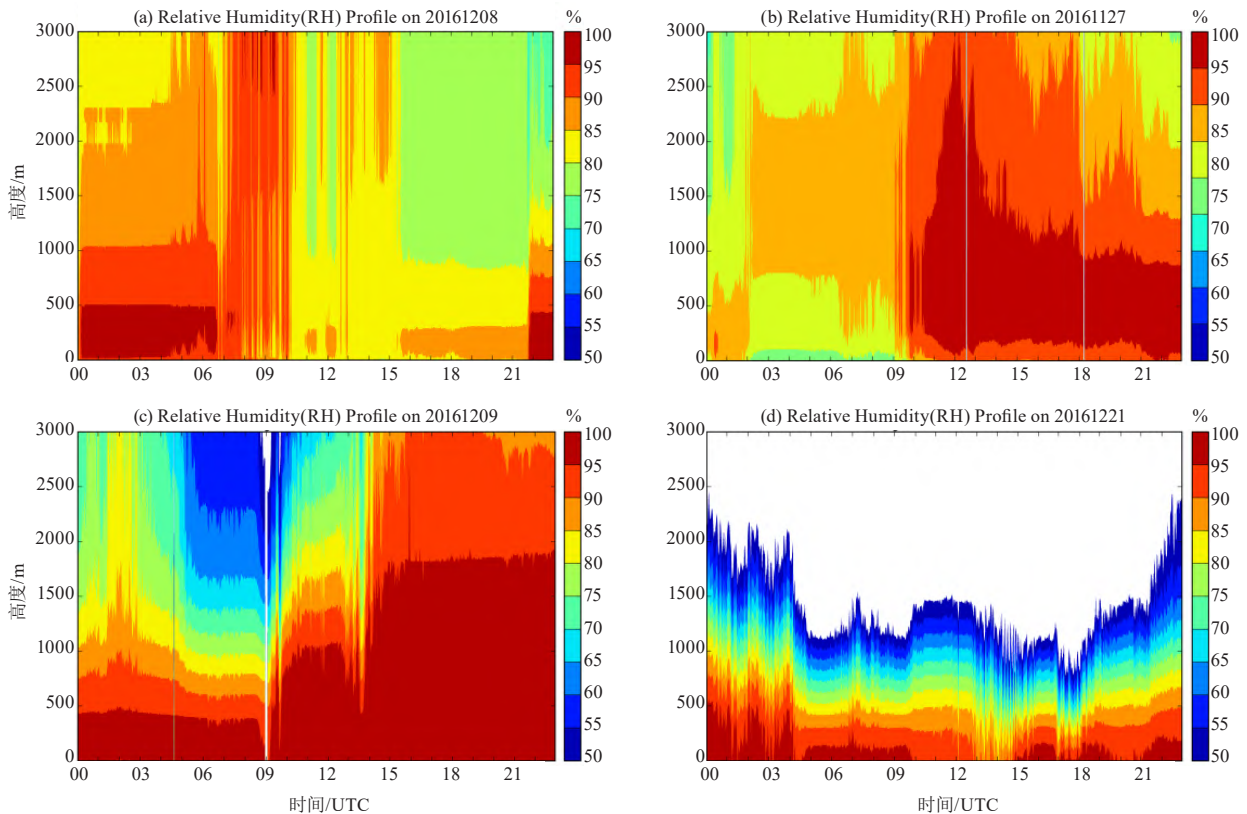


图3 边界层相对湿度(RH)时间-空间特征

Fig. 3 Time-height section of the boundary layer relative humidity (RH)

不同天气类型的持续浓雾,边界层相对湿度场各有特点。

1) 脊前型,高湿高饱和层向低层甚至地面下压和集中是其显著特点。相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿高饱和层一般压得很低,只有从地面到空中200~400 m,有的个例甚至仅在近地层100 m以内,而空中1000~1500 m以上基本上是干区(相对湿度 $< 50\%$)。如2016年12月21日17—19时持续浓雾过程,相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿高饱和层基本在100~200 m高度以下,1000 m以上为干区(图3d)。

2) 西风带波动或宽广脊区型,3000 m以下为深厚湿层,持续浓雾出现阶段1000 m以下为相对湿度

$\geq 95\%$ 高湿高饱和层。相对湿度场也可以间接反映出西风带波动的强弱及其对雾的影响程度。波动较弱无法影响到地面时,1000 m以上表现为相对湿度的干湿交替波动,500 m以下保持相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿高饱和状态;当波动可以影响到500 m以下时,即使近地面湿层还未被全部破坏,持续浓雾也将趋于结束(图略)。

2.3 温度层结特征

微波辐射计产品中,温度廓线是反演产品,反映的是气温在垂直空间的分布及演变情况。

持续浓雾都是在逆温层结条件下出现的。不同个例的逆温结构、逆温强弱差异较大。总体来

看, 逆温的结构有贴地和悬垂两种, 逆温层顶高度 200~1200 m, 大部分在 500~800 m; 逆温层上下温差 3~14℃, 逆温强度 0.1~2.5℃/100m。逆温层顶越低, 越强, 雾中能能见度越差。

持续浓雾的出现与逆温的建立或加强关系密切。贴地逆温的形成建立或加强是持续浓雾出现的关键。而贴地逆温的显著减弱, 或者贴地逆温转变为悬垂逆温或近等温层结时, 持续浓雾过程将近结束。如 2016 年 11 月 28 日 10:30—29 日 05:00 持续浓雾过程, 28 日 09—10 时贴地逆温建立, 持续浓雾紧接着出现, 29 日 05 时之后, 近地面 200 m 以下变为近等温层结, 原来的贴地逆温逐渐演变成为悬垂逆温, 持续浓雾逐渐结束 (图 4a~4b)。

持续浓雾的维持, 有赖于逆温层的维持或加强。中低空增暖, 地表降温, 或两者兼而有之都会使得逆温层加强。如 2016 年 12 月 9 日 07—14 时持续浓雾过程, 由于空中 500~1200 m 的显著增温, 逆温在午间 06—09 时加强 (图 4c)。

温度廓线不仅能监测边界层的稳定程度, 还可以间接反映空中波动对低层层结的影响程度, 有助于预报员分析预判持续浓雾的生消变化。空中波动造成明显的低层降温时, 会使原有的逆温层减弱或消失, 有利于持续浓雾的减弱和结束。如 2016 年 12 月 7 日 15:30—17:30 的持续浓雾过程, 受空中波动影响, 17—21 时前后, 逆温层结被破坏, 持续浓雾结束 (图 4d)。如果空中波动对低层温度场没有实质性影响, 逆温层结就会维持, 持续浓雾也将持续 (图略)。

不同天气类型的持续浓雾, 逆温层结各有特点: 脊前或西风带波动型, 逆温层顶基本保持稳定, 多在 600~800 m, 少变化。宽广脊区型, 逆温层顶会出现压低或抬升的变化, 范围多在 500~1200 m。宽广脊区型、西风带波动和脊前型持续浓雾的逆温层顶高度是依次降低的, 脊前型的逆温层顶高有时仅 100 m 左右; 而逆温强度则表现为宽广脊区型、西风带波动型、脊前型依次增强。

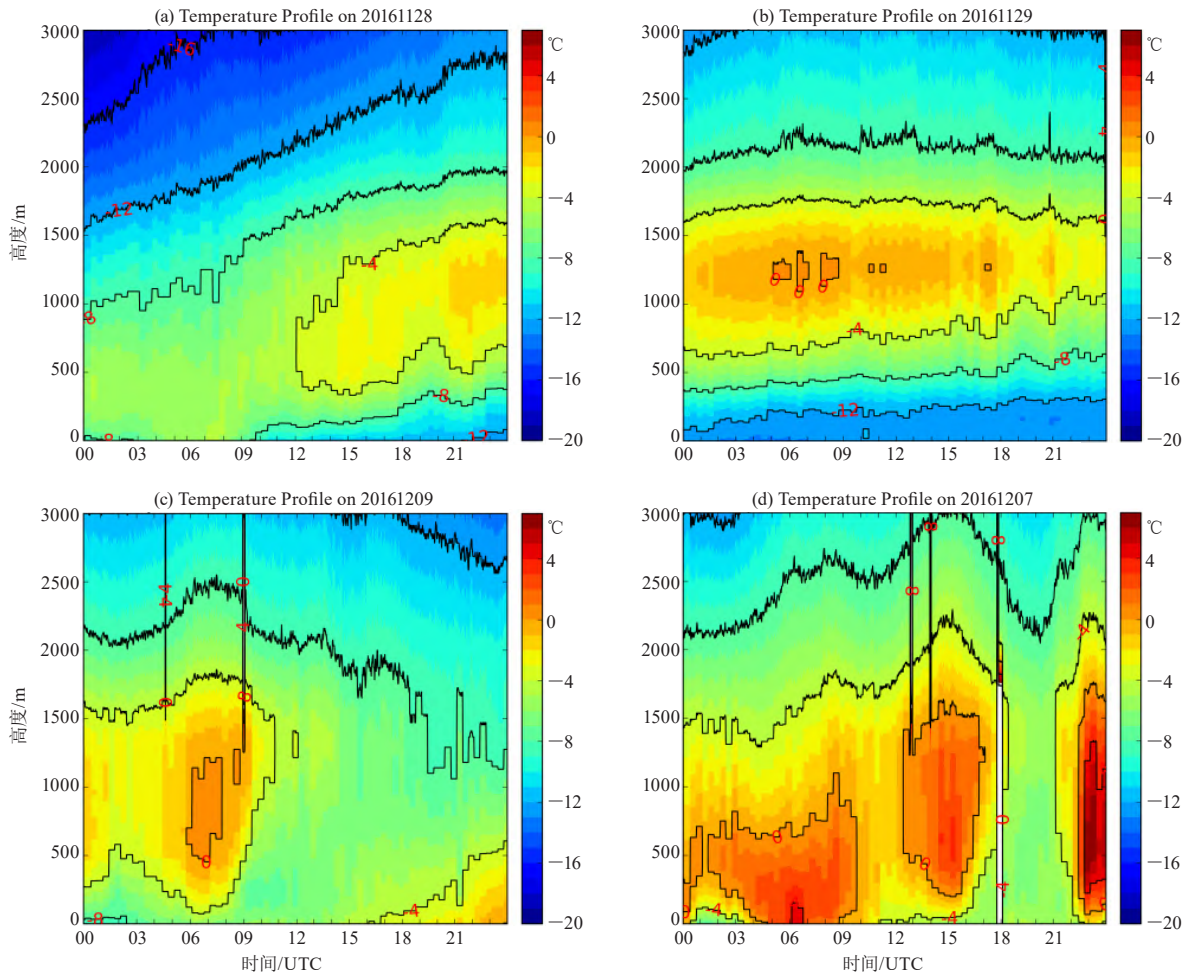


图4 边界层温度层结时间-高度图

Fig. 4 Time-height section of the boundary layer temperature stratification

3 结论和讨论

1) 微波辐射计能实时监测大气水汽条件、温度层结演变,有效弥补常规探空时间分辨率低的问题。可以在监测持续浓雾演变,研究持续浓雾的形成和发展机制,提高临近预报能力上发挥有效作用。

2) 综合水汽含量(IWV)和绝对湿度能实时监测空中水汽条件变化,反映出降雪、地面融雪等带来的空中水汽消长情况。持续浓雾过程多是水汽逐渐缓慢耗散的过程,IWV和绝对湿度数值范围分别为 $3\sim 15\text{ kg/m}^2$ 和 $2\sim 8\text{ g/m}^3$ 。但IWV和绝对湿度演变稳定平缓,很少有具有指示意义的特异变化,很难作为持续浓雾生消和变化的关键判据。

3) 液态水路径(LWP)的“出现—增长/波动—减小”过程与持续浓雾的“出现—维持—结束”有一定的对应,峰值范围约为 $100\sim 400\text{ g/m}^2$,峰值阶段往往也是持续浓雾较稳定和RVR较为恶劣的时段。但LWP的数值变化范围与持续浓雾中能见度的关系不确定;而且在融雪增湿与降雪情况下,LWP的数值大于持续浓雾时的数值。在持续浓雾的监测和预报中LWP有一定的参考作用,而LPR基本不具备可参考性。

4) 微波辐射计资料能揭示持续浓雾时边界层温湿结构的连续演变特征。温湿条件的关键变化还可以作为预报持续浓雾生消的参考指标。持续浓雾天气出现时,地面到 $500\sim 1000\text{ m}$ 高度到多为相对湿度 $\geq 95\%$ 的高湿状态。空中相对湿度 $\geq 95\%$ 高湿高饱和层的快速接地,或者近地层 $0\sim 500\text{ m}$ 快速增湿至 95% 以上,

往往指示了持续浓雾的“爆发性”形成。持续浓雾的生消演变与逆温层变化关系密切,贴地逆温的形成建立或加强是持续浓雾形成的关键。

5) 微波辐射计在乌鲁木齐国际机场尚属试验验证阶段。本文重在探讨微波辐射计在乌鲁木齐机场持续浓雾中的表现,分析讨论的个例数量有限,所有的分析和结论有待于在今后的工作中进行不断的验证和修正。对于持续浓雾边界层温湿结构的成因和机制,将另文探讨和研究。

参考文献

- [1] 赵金霞,范苏丹,朱晓晶.微波辐射计资料在大雾预报预警中的应用.沙漠与绿洲气象,2015,9(3): 31-35.
- [2] 刘建忠,张蕾,杨道侠.雾日期间边界层特性分析.干旱气象,2010,28(1): 41-48.
- [3] Ware R, Carpenter R, Gulder J, et al. A multichannel radiometric profiler of temperature, humidity, and cloud liquid. Radio Science, 2003, 38(4): 8079.
- [4] 吴长刚,王洪芳,张文军.地基多通道微波辐射计在航空气象中的应用探讨.第28届中国气象学会年会 S1第四届气象综合探测技术研讨会,2011.
- [5] 郭丽君,郭学良.利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究.气象学报,2015,73(2): 368-381.
- [6] 姚作新,吕鸣,贺晓东,等.MP-3000A型地基微波辐射计在乌鲁木齐探空站的辅助性探测研究.沙漠与绿洲气象,2011,5(1): 38-43.
- [7] 杨莲梅,李霞,赵玲,等.MP-3000A型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用.干旱气象,2013,31(3): 570-578.
- [8] 王健,吕新生,赵克明,等.地基微波辐射计对乌鲁木齐暴雨天气过程的观测分析.沙漠与绿洲气象,2012,6(3): 45-49.
- [9] 王健,崔彩霞,刘惠云.基于微波辐射计的乌鲁木齐水汽日变化初步分析.沙漠与绿洲气象,2011,5(6): 22-26.
- [10] 李子华,黄建平.辐射雾发展的爆发性特征.大气科学,1999,23(5): 621-631.
- [11] 吴彬贵,马翠平,蔡子颖,等.辐射雾局地性增强原因探讨.高原气象,2014,33(5): 1393-1402.