

王清平,张亚莉,万瑜,等.基于多源数据的北疆一次持续性浓雾天气过程的演变特征[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):83-91.
doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于多源数据的北疆一次持续性浓雾天气过程的演变特征

王清平¹,张亚莉¹,万瑜^{2*},朱雯娜¹,陈阳权¹,李静轩¹

(1.民航新疆空中交通管理局气象中心,新疆 乌鲁木齐 830016;2.新疆气象台,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:利用常规高空地面、机场跑道自动观测系统(AWOS)、微波辐射计及FY-4A新一代静止气象卫星等资料对2019年12月9—13日发生于北疆沿天山一带的一次持续性浓雾天气进行观测特征及演变分析,结果表明:(1)浓雾天气过程发生在500 hPa高空脊区控制、低层不断有暖平流东伸、地面位于蒙古冷高压后部均压场的大尺度环流背景下;(2)浓雾发生前,地面明显升温有利于地表融雪、水汽蒸发,为浓雾的形成和维持提供有利的水汽条件;浓雾维持期间,地面维持 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的弱风场、温度露点差 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、空气接近饱和、准噶尔盆地低洼地形均为浓雾维持提供有利环境条件。浓雾消散期间,风速增大,急剧降温,快速增湿,有利于雾滴凝结为米雪,使得浓雾消散;(3)Brunt-Vaisala(布伦特-维萨拉频率, N^2)指数能较好地反映浓雾期间边界层稳定度,并能提炼出相关稳定度阈值。浓雾期间相对湿度 $\geq 85\%$ 高度层主要集中在100 m以下的近地层,持续深厚的湿度层为浓雾形成和持续提供较好水汽条件,浓雾期间强逆温层顶主要维持在600 m高度,当逆温层顶高度抬升时,有利于雾滴及气溶胶粒子、水汽粒子向上扩散,能见度好转;(4)FY-4A卫星的多通道可见光及红外通道差图像能较好地监视白天及夜间浓雾的形成、维持及生消变化。

关键词:北疆沿天山一带;浓雾;AWOS;逆温层;Brunt-Vaisala指数

中图分类号:P458.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0083-09

雾是近地层空气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒,使水平能见度降到1 km以下的一种常见的天气现象。参照中国气象局2016年发布的《地面气象观测业务技术规定实用手册》,器测能见度判断雾的标准与目测有所不同,当 $500\text{ m}\leq$ 水平能见度 $<750\text{ m}$ 为雾, $50\text{ m}\leq$ 水平能见度 $<500\text{ m}$ 为浓雾,

水平能见度 $<50\text{ m}$ 为强浓雾^[1]。随着工业和科技发展,飞机、汽车等交通工具和工厂排放的各类烟尘、化合物,如 SO_2 、 NO_x 等化合物大量排放到空气中,为雾的形成提供大量凝结核,持续性浓雾对人们的生产、生活等造成较大影响。浓雾对民航、公路、海运方面的影响非常大,例如:2006年12月25日宁靖盐高速公路8辆汽车翻车追尾事故,长江水运南京段轮船重大水运事故^[2]。2009年12月1日,新疆乌奎高速路段因浓雾引起8辆车连环事故,现场多人受伤。因此研究持续浓雾发生、发展及其形成机理机制,对于提高交通气象预报准确率有非常重要的意义。

近几十年来,国内外学者对于雾的研究方法主要集中在气候统计、数值模拟及基于观测、探测资料的雾微物理结构研究^[3-9]。林建等^[10]统计我国雾时空

收稿日期:2022-10-01;修回日期:2023-09-28

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2021D01A151);国家自然科学基金(42365002);民航新疆空管局科技项目(202106)

作者简介:王清平(1985—),男,高级工程师,主要从事航空天气预报及灾害性天气研究。E-mail:wqp1001@163.com

通信作者:万瑜(1983—),女,高级工程师,主要从事天气预报及灾害性天气研究。E-mail:tc-alien@163.com

分布指出,中国大陆地区雾集中的区域主要在西南地区、汉水流域、华北平原、江淮和江南大部,其次是新疆天山以北、内蒙古东北部和黑龙江西北部及辽宁和吉林东部。国内学者对于华北平原、中国东部地区及西南地区的浓雾做了大量研究^[11-15]。赵玉广等^[11]对华北平原持续浓雾进行研究指出,太行山、燕山对冷空气的阻挡和削弱造成平原长时间静稳天气形势是浓雾维持的根本原因。刘熙明等^[12]、蔡子颖等^[13]通过铁塔对北京、天津等地浓雾的边界层内风、温、湿度等特征进行研究。不少学者对华东地区雾的爆发性特征进行过研究,濮梅娟等^[14]指出雾的爆发性增强是指雾在很短时间内(一般少于30 min)突变为强浓雾,或浓雾跃增为特强浓雾。严文莲等^[15]对江苏一次大范围爆发性浓雾研究发现,雾形成初期凝结释放潜热造成气温小幅回升,爆发性雾形成的重要原因是夜间天空云散,辐射降温增强。谭艳梅等^[16]和马禹等^[17]从统计方面对新疆区域内雾的时空分布做了一些研究,指出雾主要发生在北疆沿天山一带和伊犁河谷等地,主要发生在11月下旬—次年3月。还有学者对发生在伊犁河谷、乌鲁木齐市区的雾进行了研究^[18-20],但是对于沿天山一带大范围持续性的浓雾研究相对较少。

2019年12月9—13日,北疆沿天山一带的炮台、莫索湾、石河子、玛纳斯、呼图壁、昌吉、乌鲁木齐机场等地出现绵延近200 km的大范围、长时间浓雾天气,对高速公路、航空运输造成非常大的影响。仅12月10日就造成乌鲁木齐国际机场进出港航班延误、取消、备降、返航349班次,滞留旅客人数达3 130人。本文将重点研究这次大范围、长时间浓雾的特征、环流形势、边界层结构及其成因,以期提高浓雾的临近预报。

1 数据资料

由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5全球再分析数据,用于绘制形势场、水汽通量、温度平流等物理量;机场跑道自动观测系统(AWOS)提供的器测风、温度、湿度及人工观测的水平能见度等数据用于分析浓雾发生时的气象要素特征演变,时间分辨率为1 min;新疆区域10个国家级自动站,时间分辨率为1 h,包括器测风向风速、气温、湿度、能见度;微波辐射计为北京爱尔达公司提供的HTG-3型对流层微波辐射计,该仪器放置于民航新疆空中交通管理局航行管制楼楼顶,距离地面高度约20 m,最大探测高度为10 km,

包括气温、湿度、液态含水量、液态水路径等产品。温、湿度反演廓线产品时间分辨率为1 min。FY-4A卫星数据来自国家卫星气象中心网站的多通道扫描辐射仪(AGRI)的0.65、2.2、3.75、10.8 μm 图像和BTD通道差图像^[21]用于监测白天和夜间雾区的变化。

2 天气概况及环流形势

2.1 天气过程介绍

2019年12月8—14日,北疆沿天山一带出现大范围、长时间浓雾天气,局地出现强浓雾。12月8日,雾区较为分散且范围小,主要位于北疆沿天山一带的炮台、莫索湾、昌吉、玛纳斯等地。12月9日上午,雾区范围明显加大,乌苏—石河子—呼图壁—昌吉一线出现0~400 m浓雾,局地为强浓雾,雾区范围减小。9日20时—11日(北京时,下同),乌苏—石河子—呼图壁—米泉继续维持1 km以下的雾,10日08时,雾区范围达到最大,自西向东博乐—精河—乌苏—石河子—昌吉—乌鲁木齐—阜康—奇台,东西长约600 km。11—12日,沿天山一带浓雾范围明显减小。12日00时,仅乌苏—石河子—呼图壁—昌吉—米泉一带仍维持100~900 m雾及浓雾。12日12时,呼图壁—昌吉—米泉—阜康由浓雾转为雾。12日夜间,雾区主要位于米泉—阜康—昌吉一带,但浓度减弱。13日白天—14日,沿天山一带转为1~2 km的轻雾,仅乌鲁木齐机场及城北米泉附近出现小范围浓雾。

12月9—13日,乌鲁木齐机场先后出现持续性冻雾、低云、小雪及米雪等多种复杂天气。其中,持续性低云低能见度天气出现在9—12日。对民航运行造成巨大影响。从图1机场运行主跑道人工观测能见度演变可知,12月9日22:38—12日16:00,乌鲁木齐机场超过65 h能见度<800 m,突破乌鲁木齐机场1986—2015年12月主导能见度<800 m持续

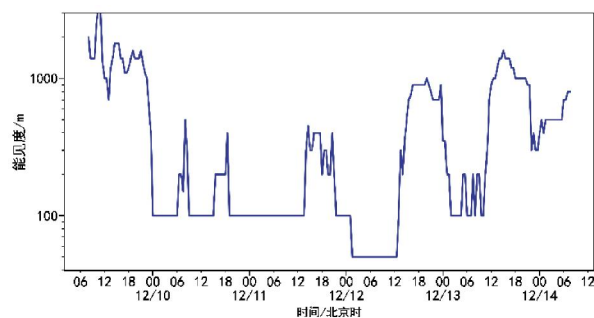


图1 2019年12月9—13日乌鲁木齐机场持续浓雾过程期间人工观测能见度

最长时间^[22]。其中 9 日 23:17—12 日 15:00 乌鲁木齐机场持续超过 63 h 人工观测主导能见度 ≤ 500 m 浓雾,其中 10 日 00:00—07:30、08:44—11 日 13:30、11 日 19:07—12 日 14:00 出现人工观测主导能见度 ≤ 200 m 的强浓雾时间超过 43 h;12 日 01:30—12:30,出现持续 11 h 人工观测主导能见度为 50 m 的特强浓雾天气。因此有必要研究雾的生成、消散规律,减小其对民航运输造成的损失。

2.2 环流形势

浓雾发生前 12 月 6—8 日,北疆沿天山一带地表升温明显,积雪融化,空中水汽明显增湿。12 月 9 日 08 时,500 hPa 欧亚中高纬度为“两槽一脊”形,高空槽分别位于里海和中国东北地区,新疆区域受暖脊控制,北疆沿天山一带上空为 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北风,850 hPa 伊犁河谷至北疆沿天山一带为东西向暖舌伴 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西北和偏北风,暖中心位于伊宁站上空,温度达 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$,沿天山一带的克拉玛依、乌鲁木齐温度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。北疆地区受高压控制,气压梯度较弱,9 日 20 时(图 2a)—11 日 08 时,高空形势较为稳定,北疆整体由西北气流控制,850 hPa 暖脊不断维持并东伸,9 日 20 时,乌鲁木齐上空温度达 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,地面形势(图 2b)维持稳定的蒙古冷高压,上游伊犁河谷有低压倒槽向北疆盆地伸展,逆温形势更加稳定。12 日 08 时,500 hPa 由脊区转为偏西气流,沿天山一带上空出现弱的风场不连续,850 hPa 暖舌西退,沿天山一带上空温度下降,为 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,地面形势图中蒙古高压稳定少动,但上游地区乌拉尔山附近有明显冷高压生成,新疆西部国境线以西地区转为高压前部低压槽并逐渐东移,13—14 日,短波槽进入北疆地区,静稳形势受到破坏,浓雾过程结束。

3 浓雾期间地面气象要素特征

雾区的生消演变与地面要素的变化关系密切,为分析浓雾过程中地面要素的变化情况,本文选取代表准噶尔盆地中部的莫索湾、蔡家湖站和代表盆地南缘的石河子、乌鲁木齐机场站进行雾期间站点要素变化的研究。

雾前期,12 月 8 日,北疆沿天山一带晴天少云,位于准噶尔盆地中部的莫索湾站温度(图 3a)较低,全天温度为 $-17\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$,风向主要以西南风为主,风速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,出现能见度为 1 km 左右的轻雾;蔡家湖站(图 3b)日变化较明显,在 $-16\sim -4\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 $0\sim 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,以轻雾天气为主,能见度为 $1\sim 3\text{ km}$;盆地南缘的石河子站(图 3c)温度相对高一些,为 $-13\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$,风速为 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,能见度为 $1\sim 3\text{ km}$;距离城市较近且位于准噶尔盆地南缘的乌鲁木齐机场站温度(图 3d)维持在 $-8\sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $70\%\sim 85\%$ 。8 日 16 时—9 日凌晨,各站先后出现降温,降温有利于水汽饱和,相对湿度进一步增大,莫索湾(图 3a)、石河子站(图 3c)出现雾转浓雾、短时特强浓雾,两站最低能见度为 0 m,而蔡家湖(图 3b)、机场(图 3d)短暂出现雾。9 日 15 时—10 日凌晨,蔡家湖、机场快速降温,降温幅度分别为 -5.7 和 $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,很快出现雾,而莫索湾、石河子站全天温度变化幅度较小,仅为 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,雾维持。

雾维持过程中,10—12 日莫索湾、蔡家湖、石河子风速维持 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,温度日变化非常小,但均呈现波动式下降,维持在 $-15\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T-T_d\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明近地层非常稳定、水汽充足,乌鲁木齐机场由于处于城市边缘,温度较其他 3 站偏高 $3\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度维持在 90% 以上,风速维持 $1\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,主要原因是城市下垫面建筑不平坦,建筑物的扰流作用使得风速脉

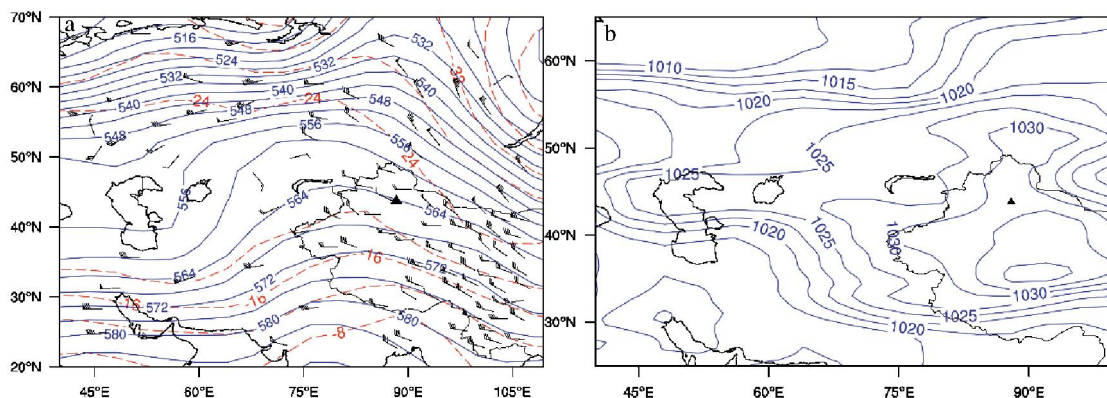


图 2 2019 年 12 月 9 日 500 hPa 高空形势场(a,高度场单位:dagpm;温度单位: $^{\circ}\text{C}$)和地面海平面气压场(b,单位:hPa)
(黑三角为乌鲁木齐机场)

动相对较明显,且脉动引起的湍流混合作用有利于浓雾的维持。

雾消散期,由于天气系统的影响,11日,莫索湾站温度不断下降,由于降温冷凝作用,13—14时,莫索湾站出现小雪,16时,该站温度急剧下降,由 -12°C 下降至22时的 -16°C ,能见度迅速好转;石河子站自11日18时开始温度持续缓慢下降,至13日10时温度降至最低,为 -13°C ,风速为 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向主要在西南风、偏西风和偏北风中波动,此后能见度逐渐上升至1 km以上;蔡家湖站12日18时风速加大至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度逐渐下降,能见度上升至1 km以上,乌鲁木齐机场站好转最晚,13日17时,受天气系统影响,风速加大至 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时机场出现短暂米雪,有利于水汽凝结耗散,能见度上升至1 km以上,由于天气系统来临,破坏北疆沿天山一带逆温层,浓雾过程结束。

综上所述,浓雾维持期间,地面风速维持 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的微风及静风,温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,温度日变化非常小,盆地中部站点由于地势开阔,下垫面平坦,

风速较城市站点小。消散期间,风速增大,温度急剧下降,有利于增湿,雾滴凝结为米雪,能见度转好。

4 边界层特征分析

大气逆温层是雾形成、维持和发展的重要条件之一。由于新疆区域探空站相隔较远,北疆地区仅乌鲁木齐和克拉玛依站有探空资料,两站之间相距300 km,且乌鲁木齐探空站位于市区,市区海拔高度较机场高300 m,无法代表此次浓雾期间边界层特征,机场位于此次雾区南缘,具有较好的代表性,下文使用乌鲁木齐机场微波辐射计反演的 Brunt-Vaisala(布伦特-维萨拉频率,以下简称 N^2)指数来分析浓雾期间的边界层稳定度^[23-24],同时使用微波辐射计探测的温度、湿度廓线分析逆温层变化情况。

4.1 层结稳定度

由图4a可知,12月8日, N^2 整体 $<8\times 10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 。9日08—14时, N^2 明显加大, $N^2>12\times 10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 的高度达250 m, N^2 最大值为 $20\times 10^{-4}\text{ s}^{-2}$, $N^2>8\times 10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 的高度维持在250~350 m,层结稳定度明显较8日稳定。9

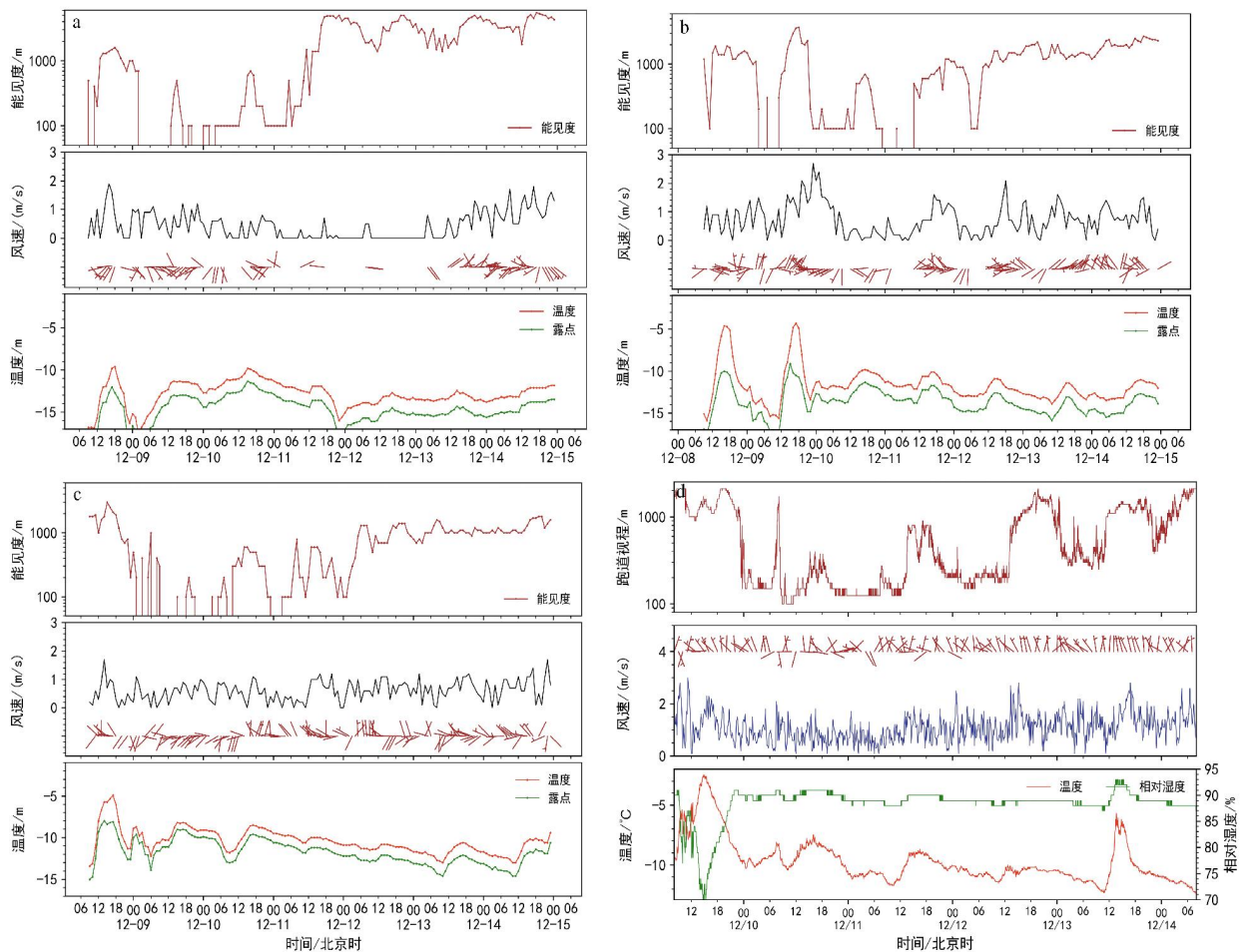


图3 各站点气象要素变化

(a为莫索湾站,b为蔡家湖站,c为石河子,d为乌鲁木齐机场)

日 20 时层结稳定高度继续增高, $N^2 > 8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 的高度维持在 350~500 m, 近地层 100 m 以下层结稳定度更好, 10—11 日 14 时, $N^2 > 8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 的高度维持在 350~450 m, 且 10 日 20 时—11 日 14 时, N^2 维持在 $16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 及以上, 最高达 20×10^{-4} , $N^2 > 12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 的高度达到 300 m, $N^2 > 16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 的高度达到 150 m, N^2 于 11 日 09 时达到最大, 为 $24 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 。10 日 20 时—12 日 14 时, $N^2 > 12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 的高度达到 300 m, 机场地面实况显示维持 50~100 m 的浓雾。12 日 14—20 时, 150 m 出现 $N^2 > 6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 此时近地层有弱冷空气侵入, 地面实况显示能见度上升, 最高达到 1 000 m, 20 时边界层温度继续加强, 13 日 07—12 时, $N^2 > 12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 高度达 250 m, 机场再次出现 100~300 m 的浓雾。12 时, 近地层再次出现 $N^2 > 6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 高度层, 说明天气系统开始影响机场, 此后能见度好转至 1 km 以上。 $N^2 > 8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 在浓雾期间主要维持在 400~500 m 高度。 $N^2 > 12 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 在浓雾期间主要维持在 200~250 m 高度。当 $N^2 < 8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 出现在 200 m 以下时, 稳定度降低, 有利于雾好转, 地面浓雾期间, $N^2 > 16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$ 主要集中在 100 m 以下近地层。 N^2 指数在浓雾期间的稳定度阈值主要有 8×10^{-4} 、 12×10^{-4} 、 $16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$, 这些阈值可以在预报业务中尝试应用。

4.2 温湿层结特征

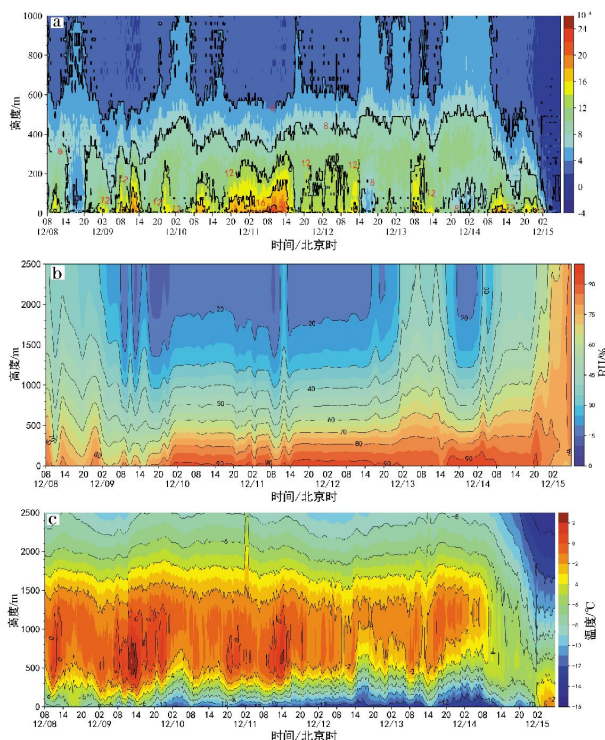


图 4 微波辐射计反演的 Brunt-Vaisala 指数(a)、相对湿度(b)和温度(c)时间序列廓线

由图 4b 可知, 浓雾发生前, 12 月 8 日, 500 m 以下湿度 $> 75\%$ 厚度层变化起伏较大, 9 日, 白天机场上空相对湿度较小, 50 m 以下近地层湿度仅为 $64\% \sim 80\%$ (图 5a), 20 时, 100 m 以下湿度维持在 85% , 夜间随着地面辐射降温的影响, 相对湿度快速增大至 90% 以上。9 日 23—24 时, 雾发生时段, 50 m 以下近地层相对湿度由 87% 快速上升至 94% (图 5a), 10—11 日, 水汽主要聚集在 400 m 以下, 相对湿度 $> 85\%$, 11 日 14:00, 50 m 以下近地层湿度逐渐增大, 由 92% 上升至 19:30 的 96% , 湿度达到最大。13 日 02—14 时, 整层湿度进一步加大, 相对湿度 $\geq 70\%$ 的高度层在 13 日 08 时达到 600 m (图 5a)。14 时近地层相对湿度降至最低, 为 70% , 此后受天气系统的影响, 尽管湿度再次加大, 但逆温层减弱抬高, 浓雾消散转为轻雾。

浓雾发生前, 12 月 8 日, 逆温层顶主要位于 1 000 m, 温度最高为 1°C (图 4c), 9 日 08—14 时, 逆温强度进一步加强, 逆温层顶降至 600 m, 逆温层顶最高温度上升至 2°C 左右 (图 5b)。9 日 20 时, 随着辐射降温, 近地层温度快速下降。23—24 时, 雾发生期间近地层温度下降至 -12°C , 空中温度也有所下降, 逆温层厚度由日间 600 m 增加至 1 200 m。10 日 20 时—11 日 14 时, 逆温层高度继续下降, 维持在 600 m 左右, 逆温层强度加强。12 日 14 时, 逆

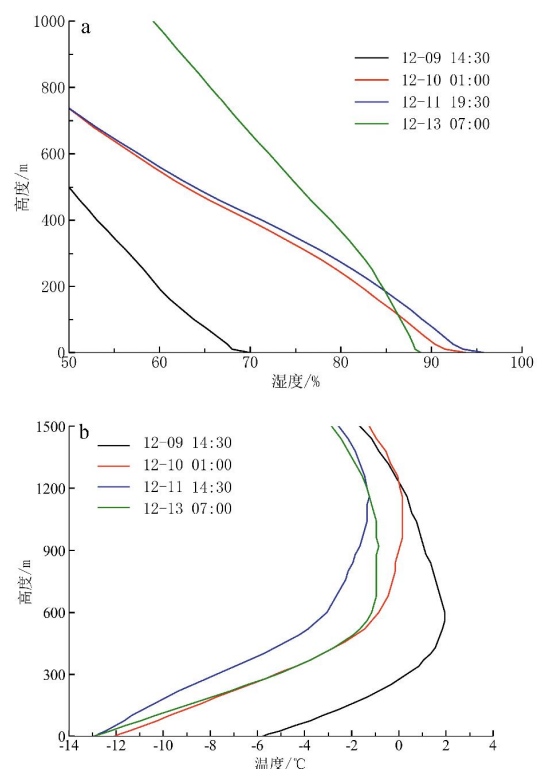


图 5 微波辐射计反演的湿度(a)和温度(b)廓线

层高度抬升,逆温层顶再次达到 1 200 m 左右,地面受偏北风影响,温度降低(图 3d)。逆温层的抬升有利于雾滴气溶胶粒子向上扩散。12 日夜间—13 日 14 时,由于边界层稳定度再次加强(图 4a),逆温层强度再次加强,逆温层顶下降至 600 m 左右,机场再次出现浓雾,13 日 14 时,受天气系统影响,逆温层减弱抬升。

综上,Brunt-Vaisala 指数能较好地反映浓雾期间边界层稳定度,浓雾期间的稳定度阈值主要有 $N^2 > (8 \times 10^{-4}, 12 \times 10^{-4}, 16 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2})$ 。雾期间相对湿度 $\geq 85\%$ 高湿区主要集中在 100 m 以下近地层,持续深厚的湿度层为雾的形成和持续提供较好水汽条件,浓雾期间强逆温层顶主要维持在 600 m 高度,当逆温层顶高度抬升时,有利于雾滴粒子向上扩散,能见度好转。

5 FY-4A 卫星观测分析

新疆区域广阔,地面能见度观测站仅有 105 个,

北疆沿天山一带仅有十余个站点,而 FY-4A 卫星作为我国新一代静止气象卫星,其在业务中对雾的监测有较好效果,因此本文利用 FY-4A 卫星资料分析浓雾发生、发展及其演变。

浓雾过程前期,12 月 9 日白天,北疆沿天山一带的雾区主要集中在乌苏—石河子北部的炮台—莫索湾一线和呼图壁—昌吉—乌鲁木齐机场—蔡家湖一带。15:30, FY-4A 卫星 1.61 μm 可见光通道中雾区色调明显较地面区域偏亮(图 6a),而呼图壁—昌吉—米泉一带为轻雾。9 日 18:30, FY-4A 卫星 10.8~3.725 μm (Ch12-Ch08) 通道差图像(图 6b)中, BT D 10.8~3.725 μm (以下简称“亮温差”) $> 4 \text{ K}$ 区域位于塔城地区沙湾县南部境内—莫索湾—炮台—石河子南部—昌吉州西部一线,机场及乌鲁木齐地区亮温差为 0~2 K,此时雾区范围相对较小,随着日落气温逐渐下降,雾区范围快速加大。21:30, 奇台 q 附近亮温差逐渐加大且亮温差 $> 2 \text{ K}$ 区域范围逐渐加大(图 6c),夜间范围进一步加大(图 6d)。

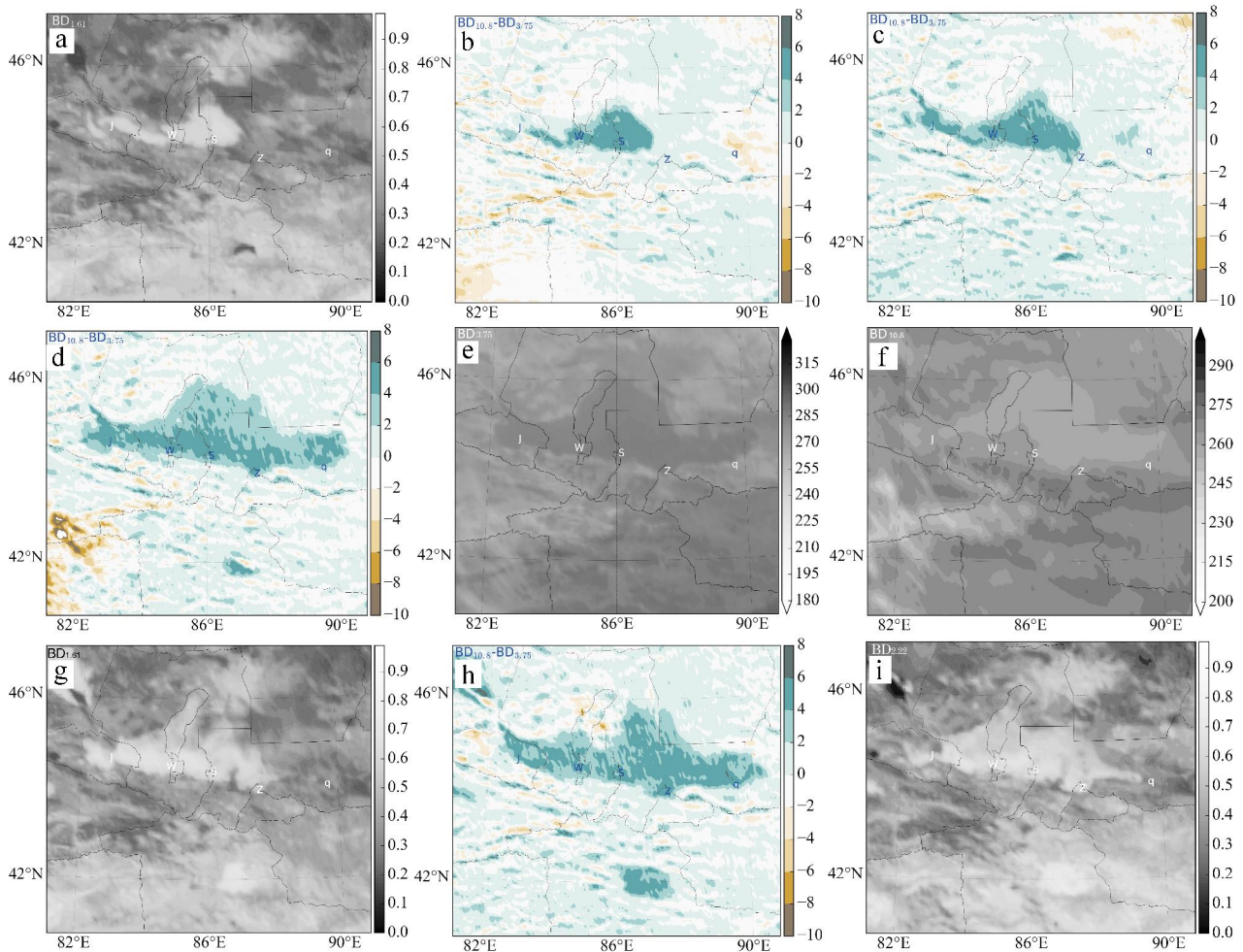


图 6 浓雾期间的 FY-4A 卫星多通道图像

(a~c 分别为 9 日 14:30、18:30、21:30, d 为 10 日 08:30, e, f 为 10 日 11:30, g 为 11 日 14:30, h, i 分别为 12 日 02:00、14:30)

浓雾过程持续中,12月10日11:30,3.75 μm 短波红外图中由于受太阳短波辐射和地面长波辐射共同影响,雾区整体呈现“灰黑色”,在新疆西部地区可见丝缕状卷云(图6e)。红外云图10.8 μm 通道图像(图6f)中,雾区温度整体较其他区域偏低,雾顶温度为260~265 K,乌苏—石河子—乌鲁木齐一线雾顶温度为265 K,准噶尔盆地中部雾顶温度为260 K,这主要是由于“冷湖效应”引起^[25]。12月10日白天,随着温度升高,北疆沿天山一带东部的阜康—奇台一线雾有消散,乌苏—石河子—乌鲁木齐机场一线雾区范围较稳定,雾顶光滑,14:30,FY-4A 可见光2.2 μm 图中,雾区自北疆西部边境博乐市—精河—乌苏—石河子—呼图壁—乌鲁木齐机场东西长达400 km(图6g)。雾区中西部边界清晰,说明雾层较厚,日变化升温对雾消散影响不大,而雾区东部雾边界开始模糊,且呼图壁—乌鲁木齐机场—米泉一线雾主体与中西部分离,实况显示精河—乌苏—石河子和呼图壁—昌吉—机场一线出现两个能见度<1 km的中心。18:00,地表长波辐射逐渐加强,沿天山一带气温下降,有利于雾滴凝结,雾区范围加大,浓度加强。12日02:30(图6h),雾区为精河—乌苏—石河子—乌鲁木齐机场—奇台一线,绵延近500 km,强浓雾区域为乌苏—石河子—呼图壁—乌鲁木齐机场一线,局地能见度为100 m。12日11:00,随着温度升高,沿天山一带能见度上升至1~4 km,乌鲁木齐机场、米泉仍维持浓雾。从白天可见光1.61和2.2 μm 通道(图6i)可知,沿天山一带的雾区东部有向南移动的趋势,造成12日白天乌鲁木齐机场持续出现影响飞机起降的强浓雾,能见度长时间维持在100 m。

12月13日,随着环流形势的变化,出现冷空气短波扰动,沿天山一带维持轻雾,可见光卫星云图中云系纹理不均匀,可以看到丝缕状结构,红外云图上云顶温度不均匀,有明显的温度梯度,浓雾过程结束。

综上所述,FY-4A 卫星对于监测浓雾有较好的帮助,其中白天浓雾监测可以使用0.65、1.6、2.2和3.75 μm 通道,对于浓雾的分布、雾顶纹理、雾层厚度有较好的定性监测,但0.65、1.6、2.2 μm 通道为可见光波段,夜间无法使用。对于夜间,仅能使用3.75、10.8 μm 红外通道,结合10.8 μm 短波红外和10.8~3.75 μm 通道差图像效果更佳,在业务中推荐使用。

6 结论

通过分析浓雾发生的环流背景、要素特征、边界

层结构及FY-4A 卫星云图监测雾区演变,得出以下结论:

(1)浓雾天气过程是在500 hPa 高空脊区控制、中低层不断有暖平流东伸、850 hPa 温度达0℃及以上,地面位于蒙古冷高压后部均压场的静稳环流背景下产生的。

(2)浓雾发生前,地面明显升温,有利于地表融雪,为浓雾的形成和维持提供有利的水汽条件。地面弱风场、饱和暖湿空气使得水汽不易耗散,准噶尔盆地低洼地形及“冷湖效应”配合静稳的天气形势有利于浓雾长时间维持。浓雾维持期间,地面维持 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右的微风及静风,温度露点差 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度日变化非常小,准噶尔盆地中部站点由于地势开阔,下垫面平坦,风速较城市站点小。浓雾消散期间,风速增大,温度急剧下降,有利于增湿,雾滴粒子凝结为米雪,使得能见度转好。

(3)Brunt-Vaisala 指数能较好地反映浓雾期间边界层稳定度,其稳定度阈值主要有 8×10^{-4} 、 12×10^{-4} 、 $16\times 10^{-4}\text{ s}^{-2}$ 。雾期间相对湿度 $\geq 85\%$ 的高湿区主要集中在100 m以下的近地层,持续深厚的高湿区为雾的形成和持续提供了较好的水汽条件,浓雾期间强逆温层顶主要维持在600 m高度,当逆温层顶高度抬升时,有利于雾滴粒子向上扩散,能见度好转。

(4)FY-4A 卫星的多通道可见光及红外通道差图像能较好的监视白天及夜间浓雾的形成、维持及生消变化,对短时临近预报有较好的帮助。

参考文献:

- [1] 中国气象局气象探测中心.地面气象观测业务技术规定实用手册[M].北京:气象出版社,2016.
- [2] 严文莲,朱承瑛,朱毓颖,等.江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J].气象,2018,44(7):892-901.
- [3] 王博妮,徐芬,田小毅,等.我国近年雾研究方法及其研究热带综述[J].气象科技,2014,42(1):23-30.
- [4] 包云轩,丁秋冀,袁成松,等.沪宁高速公路一次复杂性浓雾过程的数值模拟试验[J].大气科学,2013,37(1):124-136.
- [5] 李永平,刘晓波,葛伟强,等.一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法[J].应用气象学报,2012,23(3):340-347.
- [6] 陆春松,牛生杰,杨军,等.南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析[J].大气科学,2010,34(4):681-690.
- [7] 方莎莎,陆鹏程,廖可文,等.基于微波辐射计资料对武汉市冬季典型浓雾个例的探测分析[J].气象与环境科学,2020,43(4):81-87.
- [8] 王丽娟,王俊超,何明琼,等.基于微波辐射资料的一次高

- 速公路段强浓雾过程监测分析[J].暴雨灾害,2018,37(4):330-336.
- [9] 黄继雄,张庆红.首都机场浓雾中的能见度突发性振荡及其演变规律[J].暴雨灾害,2014,33(3):208-216.
- [10] 林建,杨贵名,毛冬艳.我国浓雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J].气候与环境研究,2008,13(2):171-181.
- [11] 赵玉广,李江波,李青青.华北平原 3 次持续性浓雾过程的特征及成因分析[J].气象,2015,41(4):427-437.
- [12] 刘熙明,胡非,邹海波,等.北京地区一次典型浓雾天气过程的边界层特征 Fenix[J].高原气象,2010,29(5):1174-1182.
- [13] 蔡子颖,韩素芹,吴彬贵,等.天津一次雾过程的边界层特征研究[J].气象,2012,38(9):1103-1109.
- [12] 钱玮,宗晨,袁成松,等.江苏地区夏季一次辐射雾的数值模拟及生消机理分析[J].气象科学,2020,40(2):220-231.
- [13] 梁绵,杨军,王巍巍,等.雨后两次强浓雾的爆发性增强过程[J].气象科学,2019,39(2):153-163.
- [14] 濮梅娟,马明明,张雪蓉,等.江苏连续三次区域性浓雾形成过程的机理分析[J].气象科学,2018,38(2):139-148.
- [15] 严文莲,朱承瑛,朱毓颖,等.江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J].气象,2018,44(7):892-901.
- [16] 谭艳梅,王旭,马禹.新疆雾天气的分析[J].新疆气象,2002,25(2):9-10.
- [17] 马禹,任宜勇,陈春艳,等.40 年来新疆雾的演变特征及浓雾天气过程分析[J].干旱区地理,2005,28(4):474-478.
- [18] 王春红,谭艳梅,王清平,等.乌鲁木齐机场持续浓雾天气垂直风场特征分析[J].干旱气象,2021,39(3):457-465.
- [19] 王清平,朱蕾,黄海波,等.乌鲁木齐国际机场一次高影响浓雾的成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):46-51.
- [20] 万瑜,曹兴,窦新英,等.2011 年 12 月乌鲁木齐市一次浓雾天气成因[J].干旱气象,2013,31(2):383-389.
- [21] 王清平,朱雯娜,王勇,等.FY-4A 资料在乌鲁木齐机场浓雾天气监测中的初步应用[J].气象,2021,47(5):627-637.
- [22] 朱雯娜,黄海波,杜安妮,等.乌鲁木齐国际机场气候志(1986—2015)[M].乌鲁木齐:民航航空管局,2019.
- [23] 卢冰,史永强,王光辉,等.新疆克拉玛依强下坡风暴的机理研究[J].气象学报,2014,72(6):1218-1230.
- [24] LI Xia, XIA Xiangao, ZHONG Shiyuan, et al. Shallow foehn on the northern leeside of Tianshan Mountain and its influence on atmospheric boundary layer over Urumqi China - A climatological study[J]. Atmos Res, 2020, 240 (2020):1-17.
- [25] 奥银焕,陈玉春,吕世华,等.准噶尔盆地冬季一个例低空风、温、湿场的数值模拟[J].高原气象,2005,24(2):160-166.

Evolutionary Characteristics of a Persistent Dense Fog Episode in Northern Leaside of Tianshan Mountains based on Multi-source Data

WANG Qingping¹, ZHANG Yali¹, WAN Yu², ZHU Wenna¹, CHEN Yangquan¹, LI Jingxuan¹
(1.Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, CAAC, Urumqi 830016, China;
2.Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, China)

Abstract The persistent dense fog episode that occurred from December 9 to 13, 2019 in the northern regions of Xinjiang along the Tianshan Mountains was analyzed based on routine meteorological data, automated weather observing system(AWOS) data, and microwave radiometer data. The results showed that: (1)The occurrence of the dense fog episode coincided with the dominance of an upper ridge system in the region, accompanied by a persistent eastward extension of warm advection at lower levels and uniform surface pressure behind the cold high-pressure system in Mongolia. (2) The melting snow, which was the result of surface temperature rising in the days before the dense fog episode, provided favorable conditions for the formation of dense fog. The combination of weak winds, abundant saturated moist air near the surface, the stable stratification, and the low-lying topography of the Junggar Basin made it difficult for dense fog to dissipate. (3)Near-surface radiation cooling was conducive to the maintenance and strengthening of the inversion layer beneficial to the dense fog. (4) The multi-channel visible and infrared channel difference images of the FY-4A satellite could monitor the formation, maintenance and dissipating of dense fog during the day and night.

Key words Northern leaside of Tianshan Mountains;dense fog;AWOS;inversion layer;Brunt-Vaisala frequency