

黄治勇, 牛奔, 杨军, 等. 2012. 湖北西南山地一次辐射雾和雨雾气象要素特征的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 532-540, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11031. Huang Zhiyong, Niu Ben, Yang Jun, et al. 2012. Analysis of characteristics of meteorological elements of radiation fog and rain fog in southwestern Hubei [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 532-540.

湖北西南山地一次辐射雾和雨雾气象要素特征的对比分析

黄治勇¹ 牛奔² 杨军³ 邓红²

¹ 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

² 武汉中心气象台, 武汉 430074

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 利用边界层探测、地面高空观测等资料, 对比分析了 2010 年湖北西南山地一次连续发生的辐射雾和雨雾的环流形势及地面和高空气象要素特征, 结果表明: 1) 500 hPa 阻塞高压脊和南支槽的反位相叠置有利于湖北西南山地出现雨雾天气。2) 地面水平能见度与相对湿度反相关关系非常显著; 雨雾与降水的发生、持续和结束几乎同步。3) 辐射雾时地面水平能见度与雾滴浓度反相关性比雨雾更为显著; 雾含水量越大能见度越低。4) 辐射雾发生期间有多个逆温层同时存在, 上层逆温更厚更强、下层逆温更为浅薄。雨雾发生时, 逆温层可以有 2~3 个, 逆温层底比辐射雾低层逆温层底高, 但也可能没有逆温层存在。5) 边界层风速小、对流活动弱有利山地辐射雾和雨雾的形成。地面风速很小或者静风, 是辐射雾和雨雾生成的共同条件。雨雾发生时对流活动发展的高度比辐射雾高。6) 辐射雾空气饱和层的高度低于雨雾。

关键词 辐射雾 雨雾 气象要素 逆温

文章编号 1006-9585 (2012) 05-0532-09

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11031

Analysis of Characteristics of Meteorological Elements of Radiation Fog and Rain Fog in Southwestern Hubei

HUANG Zhiyong¹, NIU Ben², YANG Jun³, and DENG Hong²

¹ Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074

² Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

³ Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The circulation conditions and characteristics of ground- and high-level meteorological elements of continuous radiation and rain types of fog in southwestern Hubei are analyzed using boundary detection and automatic ground observatory data. The following results are reported: 1) The inverse overlay of a blocking high-pressure ridge and southern trough benefited the occurrence of rain fog in southwestern Hubei. 2) The ground-level visibility and relative humidity exhibited a significant inverse relationship. Rain fog maintenance was nearly synchronous with the precipitation. 3) Ground-level visibility and cloud droplet concentration were more significant than the rain fog inverse relationship with the occurrence of radiation fog. Visibility and rain fog content also exhibited a significant inverse relationship with the occurrence of radiation fog; however, such a relationship did not exist between visibility and rain

收稿日期 2011-03-02 收到, 2012-07-29 收到修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 2009416016

作者简介 黄治勇, 男, 1969 年出生, 高级工程师, 从事灾害性天气预报方法研究。E-mail: hzyqxj@126.com

fog. Low ground-wind speed or calm wind commonly co-existed with radiation and rain types of fog. 4) The upper inversion layer was stronger, the lower inversion layer was weaker, and multi-inversion layers occurred with radiation fog. The bottom inversion layer of the rain fog was higher than that of radiation fog, although the inversion layer was not always present. However, two–three inversion layers occurred with rain fog. 5) Low boundary-layer wind speed and weak convective activity benefited both fog types occurring in mountainous regions. 6) The saturated air layer height of radiation fog was lower than that of mist.

Key words radiation fog, rain and fog, meteorological element, temperature inversion

1 引言

雾是近地层空气中悬浮着大量水滴、冰晶微粒而使水平能见度小于1 km的天气现象。中国是大雾天气高发、频发、重发的国家之一,大雾天气造成的影响也日益严重。因此,对于大雾生消机理和预报技术研究一直受到高度重视。针对雾的边界层特征及其生消机制、雾的宏微观结构与物理化学特性等方面,国内外通过外场试验开展了大规模综合研究,发现了不同地域雾的许多新特点(Pinnick et al., 1978; Fuzzi et al., 1992; 李子华等, 1999; 王凯等, 2006; 邓雪娇等, 2007; 陆春松等, 2010),对雾的认识有了很大提高。在对雾生消环流形势及能见度变化规律的统计分析中,均压型雾大多属于辐射雾类型,而锋前型雾则主要跟平流雾联系在一起(林建等, 2008),地面风速与降水等则对雾的形成、维持的影响较为复杂(闫敬华和徐建平, 2001; 王淑英等, 2003; 马雁军等, 2005)。在观测试验基础上,利用雾的数值模式,针对雾的生消、演变规律和预报方法,国内外学者开展了许多数值研究,发现雾的生消不仅与大尺度天气系统相关,而且与局地地形地貌、下垫面状况、地气交换、湍流与辐射特性及气溶胶成分等因素密切相关(Duynkerke, 1999; 黄建平等, 2000; 石春娥等, 2001; Winterrath and Bott, 2001; 周小刚等, 2004; 董剑希等, 2006; 陆春松等, 2008; 傅刚等, 2009; 何晖等, 2009; 杨军等, 2009)。

山地多出现雨雾和雪雾共生天气,已有雾的观测试验和数值模拟研究对象大多为纯雾天气,针对山地雾和降水等共存天气的研究很少。本文选取2010年1月26~31日湖北西南地区一次连续发生的辐射雾和雨雾天气过程,利用高空和地面观测资料,研究了两种大雾形成的环流背景,对比分析了地面及高空气象要素变化特点,以加强山地雨雾天气气象要素变化规律的认识,为提高雾天气的预报

准确率提供参考。

2 观测场地及仪器介绍

本次观测采样点选在湖北宣恩县气象观测场内 [(31.0°N, 118.7°E), 海拔520 m],该地距离恩施探空观测站直线距离约30 km。采用芬兰Vaisala公司生产的系留气球探测系统 (Vaisala DigiCORA Tethersonde System) 对边界层进行温度、气压、湿度和风速风向的探测,晴天3 h观测一次,出现雾时1 h观测一次,高度控制在600~1000 m。温度、相对湿度、气压、风速、风向传感器的分辨率分别为0.1 °C、0.1%、0.1 hPa、0.1 m/s、1°。雾滴谱观测利用美国Droplet Measurement Technologies公司生产的FM-100X型雾滴谱仪,采样频率为1 Hz,粒径范围为2~50 μm,本次观测中采样高度为距地面1 m处。采用英国Biral公司生产的vpf730型能见度仪进行能见度自动观测,能见度小于1 km时,误差为±10%,大于1 km时,误差为±20%。

3 雾过程概述

本次外场观测试验时间是2010年1月1~31日,以器测能见度1 km为判断标准,26~31日共观测到6次大雾过程(见表1),其中28~31日连续出现5次大雾天气。从水平能见度上看,仅第二次雾过程最低能见度在500 m以上,其它5次雾过程中低于500 m。

从大雾出现、持续、消散时间上看,第1次和第2次大雾过程都在凌晨发生,上午逐渐消散,持续时间分别为5 h和7 h;第3次和第6次大雾过程发生在日出前后,午后结束,持续时间分别为6小时20分和8小时5分;第4次大雾发生在上半夜,第二天午后才结束,持续时间长达11小时40分;第5次大雾过程发生在傍晚,第二天凌晨结束,持续6.5 h。另外,第3~6次大雾过程之间的时间间

隔非常短,几乎连续发生,第3次与第4次大雾过程时间间隔约7 h,第4次与第5次大雾过程时间间隔为5 h,而第5次与第6次大雾过程仅间隔3.5 h,从29日07:00(北京时间,下同)至31日20:00共61 h中有约44.5 h发生了大雾天气。

表1 2010年1月26~31日雾过程起止时间

Table 1 The appearing time and finish time of fog during 26~31 Jan 2010

序号	起止时间	最低能见度/m
1	1月26日02:30至07:30	296
2	1月28日04:00至11:00	525
3	1月29日07:00至13:20	407
4	1月29日20:50至30日13:30	237
5	1月30日18:30至31日03:00	384
6	1月31日06:30至14:35	422

由于辐射冷却达到最大时多在后半夜至次日日出前,对于辐射雾而言,其成雾时的温度均低于前一日临近傍晚的定时观测即20:00地面露点温度(宋润田和孙俊廉,2000)

$$\Delta T = [T_{\min} - T_d(20)] \quad (1)$$

是否小于0来判断雾的性质,其中, $T_{\min}$ 为成雾时地面温度, $T_d(20)$ 为前一日20:00地面露点温度。计算逐日 ΔT 发现,第1次和第2次雾过程 $\Delta T \leq 0$,第3~6次过程 $\Delta T \geq 0$ 。分析逐小时地面降水和能见度的变化可知,地面降水集中时段分别为29日08:00至14:00、30日02:00至10:00、31日00:00至14:00,正好与第3~6次大雾发生和持续时间对应。由这6次大雾天气发生消散的时间、夜间辐射降温情况、能见度与地面降水天气的对应关系可知,前2次大雾为辐射雾,后4次为雨雾。

那么在2010年1月26~31日共6 d内为什么会频繁发生大雾天气呢?辐射雾和雨雾在气象要素特征上有何差异?下面先对环流形势进行分析。

4 天气形势分析

利用NCEP再分析资料计算2010年1月25日08:00至2月1日08:00 500 hPa平均高度场发现,欧亚大陆中高纬地区为“两槽一脊”形势:乌拉尔山地区阻塞高压脊、里海切断低压和东北低涡,中低纬度30°N附近环流平直,青藏高原有短波槽东移,西太平洋副热带高压脊线在15°N附近,西脊

点到达110°E。副高外围和南支槽前的西南暖湿气流与东北低涡底部分裂南下的冷空气在长江中下游一带交汇,湖北西南位于冷暖空气交汇带上,稳定的阻塞形势有利于冷暖空气的长时间对峙。

分析逐日500 hPa天气图可以发现,在90°E~100°E之间南支槽稳定少动,2010年1月25日至2月1日500 hPa环流场经历了一次阻塞形势建立—维持—崩溃的过程。1月25日20:00开始,位于欧洲中东部的高压脊边东移边加强,27日20:00(图1)到达乌拉尔山地区形成阻塞高压,其东西两侧分别有切断低涡生成。28~30日,这种“两槽一脊”形势稳定少动,31日08:00阻塞高压脊开始东移,2月2日阻塞高压崩溃。在500 hPa阻塞形势建立之前,25~27日鄂西南处于贝加尔湖东侧低压底部的偏西气流之中,700 hPa以下受反气旋环流控制。地面天气图上,湖北西南处于变性高压控制,等压线稀疏接近于均压场,风速 $<2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,以晴为主。在500 hPa阻塞形势维持至崩溃过程中,湖北西南位于700 hPa与850 hPa切变线之间。地面天气图上,冷空气经长江中下游分股南下,湖北西南处于四川盆地暖低压前部、东路冷空气后部的过渡地带,等压线稀疏,风速 $<2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,发生了连续阴雨天气。

由此可见,湖北西南不同性质大雾的环流背景有明显差异,辐射雾产生于地面变性高压控制的环流背景中,而雨雾发生在冷暖空气共同影响的背景下。那么辐射雾和雨雾在形成的物理机制上有何不同?下面从温度场、湿度场和风场等方面分别进行诊断分析。

5 诊断分析

5.1 地面要素场特征

分析地面温度随时间变化(图2)可知,2010年1月25~28日宣恩存在明显的日变化,白天最高气温在9~12℃之间,夜间最低气温在3℃左右,日较差为6~9℃,29日开始至31日,地面气温稳定在6~9℃之间,日较差仅2~3℃。可见夜间辐射降温是辐射雾形成的有利条件,而雨雾发生时辐射降温不明显。

空气湿度是雾形成与维持最重要的影响因子之一。由1月25~31日地面逐小时相对湿度和能见度的变化可知(图2),在6次雾过程中,地面相对

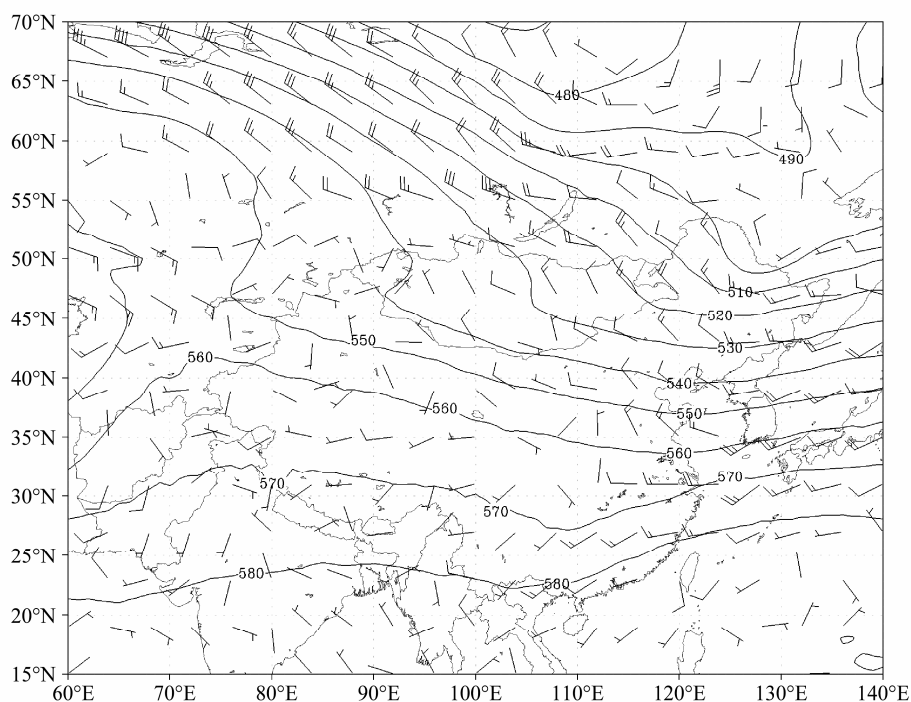


图1 2010年1月27日20:00东亚大陆NCEP 500 hPa高度场和850 hPa风场合成

Fig. 1 Composite map of NCEP 500-hPa height field and 850-hPa wind field over East Asia at 2000 LST on 27 Jan 2010

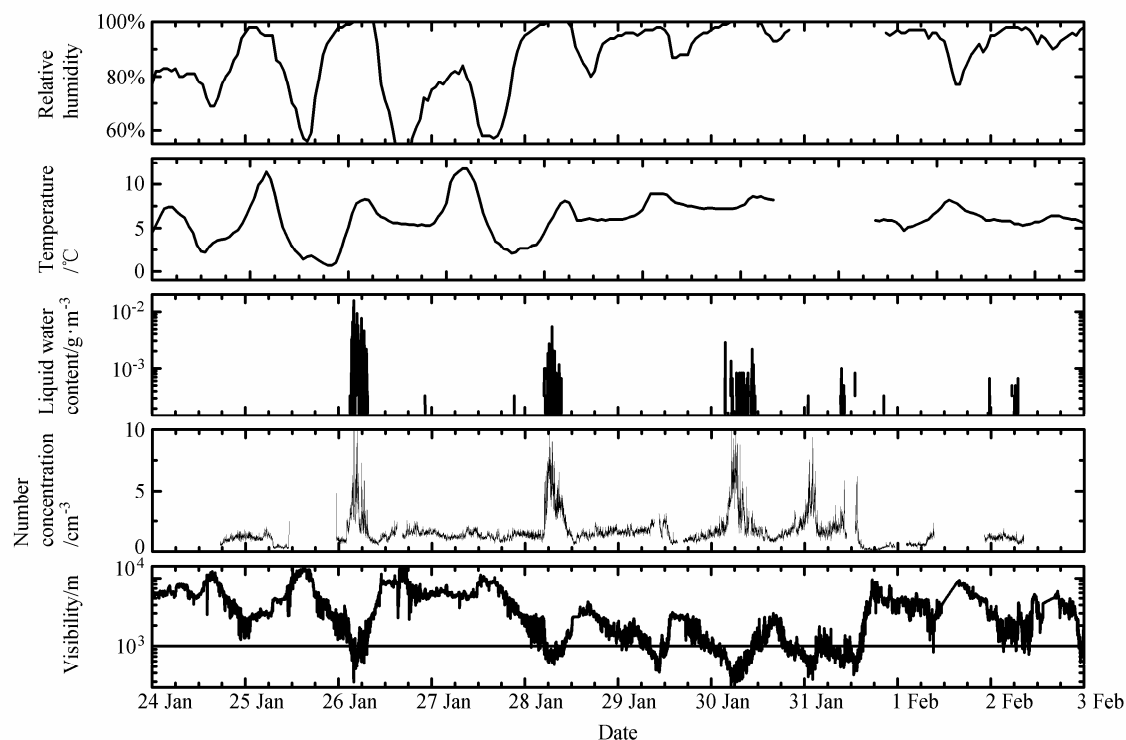


图2 2010年1月26~31日宣恩站相对湿度、温度、液水含量、雾滴数浓度、能见度随时间变化

Fig. 2 Time variations of relative humidity, temperature, liquid water content, sprayed liquid number concentration, and visibility at Xuan'en station during 26~31 Jan 2010

湿度都在90%以上,这与吴兑(2006a, 2006b)的研究结论一致,而且地面水平能见度与相对湿度呈显著的反相关关系,相关系数超过0.83。但能见度

与地面风速的关系比较复杂,二者相关系数仅为0.26,但大雾形成时地面风速通常都较弱,基本上都小于 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或为静风。

分析地面逐小时降水量和能见度的变化可知(图略),地面降水集中时段分别为 29 日 08:00 至 14:00、30 日 02:00 至 10:00、31 日 00:00 至 14:00,1 h 降水量仅 31 日 11:00 为 0.2 mm,其它各小时降水量均没超过 0.1 mm,雨雾发生和持续时间与降水有很好的对应关系。由于降水量小,没有发现能见度与降水量的直接关系。由此可见,降水蒸发增湿有利于雾的形成和维持。

从逐小时雾滴浓度和能见度的变化(图2)可知,地面水平能见度与雾滴浓度呈明显的反相关关系,而且非常显著。相比较而言,辐射雾的这种反相关关系比雨雾更为显著。从逐小时雾水含量和能见度的变化(图2)上看,雾水含量越大能见度越低。这与李宏宇等(2010)的研究结论一致。

5.2 高空温度场特征

由于宣恩气象站距离恩施探空观测站直线距离仅 30 km,本文以恩施站的高空观测资料代表宣恩(下同),分析 1 月 25~31 日每日 08:00、20:00 恩施站逆温特征发现(表 2):在辐射雾发生前(25 日 20:00、27 日 20:00),700 hPa 以下恩施上空均存在 2 个逆温层,一个位于 975~960 hPa 层间,逆温层厚度仅约 15 hPa,逆温强度很小,仅约 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。另外一个逆温层 25 日 20:00 在 750~700 hPa 层间,逆温层厚度为 50 hPa,强度为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}^{-1}$,27 日 20:00 在 850~800 hPa 层间,逆温层厚度和强度分别 50 hPa、 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。在辐射雾强盛时(26 日 08:00、28 日 08:00),同样存在 2 个逆温层。比较辐射雾发生前后的逆温层特征,发现辐射雾的强盛期较生成前逆温层低和顶的高度略有升高,逆温层厚度和强度变化不明显。

从 28 日 20:00 开始,恩施上空逆温层特征逐步发生变化。28 日 20:00,700 hPa 以下恩施上空有 3 个逆温层同时存在,分别位于 925~905 hPa、805~795 hPa 和 720~710 hPa,逆温层厚度非常浅薄,仅 10~20 hPa,逆温强度体现出低层弱、高层强的特点。29 日 08:00,仅在 950~910 hPa 层之间有逆温层,29 日 20:00 在 960~810 hPa 和 750~770 hPa 又出现 2 个浅薄的逆温层,30 日 08:00 至 31 日 20:00 在 850 hPa 附近有弱逆温层存在。

比较辐射雾和雨雾的逆温层特征可知,辐射雾期间逆温层体现出上下两个逆温层同时存在、上层逆温更厚更强、下层逆温更为浅薄的特征,在雨雾形成初期,逆温层可以有 2~3 个,但是逆温层厚

度明显变小、强度逐步减弱,在雨雾持续阶段,近地层浅薄逆温层消失,在 850 hPa 附近有浅薄的弱逆温层。另外,辐射雾发生时低层逆温层底比雨雾的更低。

表 2 2010 年 1 月 26~31 日恩施站逆温层厚度及逆温强度
Table 2 Thickness and inversion intensity of temperature inversion layers at Xuan'en station during 26-31 Jan 2010

时间	逆温层	逆温层 厚度/hPa	逆温强度/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}^{-1}$
1 月 25 日 20:00	975~960 hPa	15	0.07
	750~700 hPa	50	0.12
1 月 26 日 08:00	970~930 hPa	40	0.025
	770~730 hPa	40	0.175
1 月 27 日 20:00	975~960 hPa	15	0.07
	850~800 hPa	50	0.12
1 月 28 日 08:00	975~900 hPa	75	0.1
	730~790 hPa	60	0.117
1 月 28 日 20:00	925~905 hPa	20	0.05
	805~795 hPa	10	0.3
	720~710 hPa	10	0.4
1 月 29 日 08:00	950~910 hPa	40	0.05
1 月 29 日 20:00	960~810 hPa	50	0.067
	750~770 hPa	20	0.15
1 月 30 日 08:00	850~820 hPa	30	0.033
1 月 31 日 08:00	810~780 hPa	30	0.067

5.3 高空湿度场特征

由 NCEP 再分析资料制作的 2010 年 1 月 25 日 20:00 至 31 日 20:00 宣恩站相对湿度的时间变化(如图 3 所示)可见,在第 1 次辐射雾发生期间(25 日 20:00 至 26 日 08:00),1000 hPa 以上相对湿度均小于 50%,700 hPa 以下层体现出“上干下湿”特征。27 日 08:00,相对湿度有一个明显增大的过程,1000~400 hPa 相对湿度均超过 90%,这是由于 27 日 08:00 500 hPa 有低槽过境,西南气流的加强导致水汽增多而造成。由于整层水汽含量大,天空云量多,这也是 27 日没有出现大雾的原因之一。28 日,随着 850 hPa 和 700 hPa 切变线南压,宣恩上空相对湿度再次下降,最大相对湿度出现在 850 hPa 约为 70%,700 hPa 以下层也体现出“上干下湿”特征。29 日 08:00 开始,随着低层切变线北抬,西南暖湿气流发展,宣恩上空相对湿度逐渐增加,30~31 日相对湿度超过 90%的层次逐步向上发展至 700~600 hPa 附近,500 hPa 相对湿度高达 70%~90%,700 hPa 以下层体现出“整层均湿”特征。

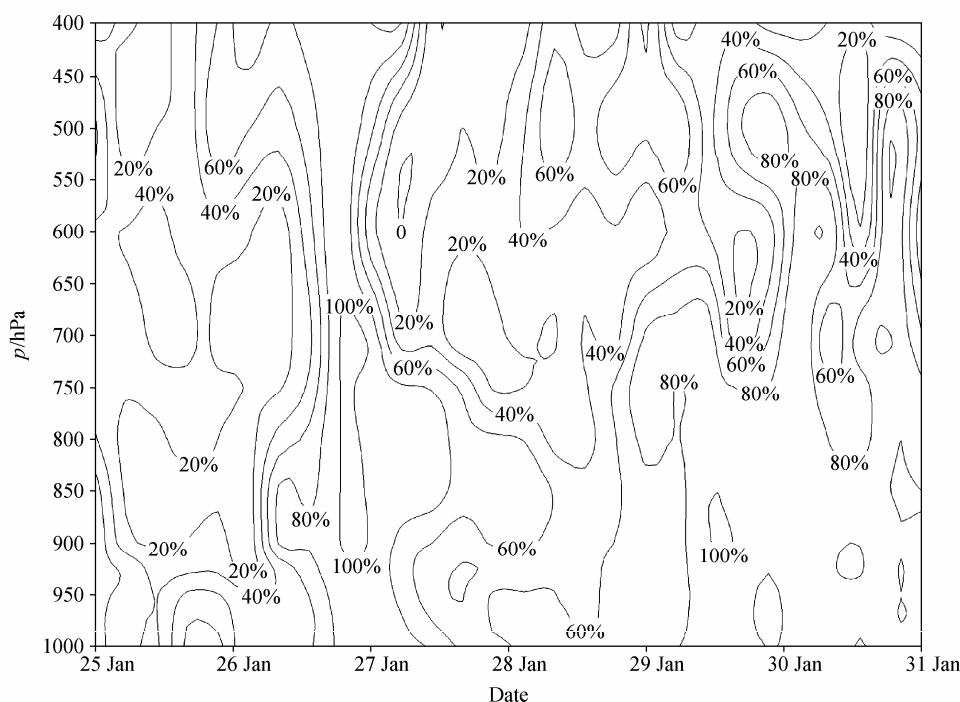


图3 2010年1月25日20:00至31日20:00 宣恩站相对湿度时间变化

Fig. 3 Time variation of relative humidity at Xuan'en station from 2000 LST on 25 Jan to 2000 LST on 31 Jan

由以上分析可以得出: 湖北西南山地辐射雾发生期间, 1000 hPa 以上层空气相对湿度一般不超过 50%, 700 hPa 以下层有“上干下湿”特征; 雨雾发生时, 大气上空接近饱和的高度可以到达 700 hPa 或 500 hPa, 即饱和层的厚度加大, 体现整层均湿的特征。李宏宇等(2010)认为这可能是降水粒子在地面附近气层蒸发的影响。

5.4 高空风场特征

由恩施站垂直风场时间变化(图4)可知, 1000 hPa 和 925 hPa 风速均维持在 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 850 hPa 风速一般为 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 这种近地层微风能使水汽垂直输送到一定高度, 有利于形成一定厚度的雾。分析垂直方向风速的变化发现, 25 日 20:00 至 31 日 20:00 850~1000 hPa 垂直风切变很小, 仅为 $0\sim 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 700~1000 hPa 垂直风切变仅 25 日 20:00、27 日 20:00 为 $0\sim 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其它时间一般为 $12\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 说明恩施上空大气的对流活动主要发生在 850 hPa 以上, 850 hPa 以下大气相对比较稳定。比较垂直风切变接近于 0 的厚度, 第 1 次和第 2 次大雾过程发生前, 垂直风切变接近于零的高度达到 700 hPa, 而其它几次大雾过程垂直风切变接近于 0 的高度为 850 hPa, 说明辐射雾过程大气更为稳定。而 26 日 20:00 850 hPa 和 700 hPa 风速激增, 乱流混合层增厚, 导致近地层降温缓慢, 水汽大量上传,

是 27 日没有出现大雾的原因之一。

从风向随高度变化上看, 在辐射雾过程发生前(25 日 20:00 和 27 日 20:00), 700 hPa 以下风随高度升高逆时针旋转, 700~400 hPa 风随高度升高顺时针旋转, 在雨雾过程发生前(28~31 日 08:00、20:00), 400 hPa 以下风随高度升高顺时针旋转。这说明辐射雾发生前低层有冷平流、中层有暖平流, 低层冷平流的作用有利于近地层辐射降温, 而雨雾过程低层到中层有暖平流。

分析垂直速度的时间变化发现(图5), 此次连续大雾期间, 宣恩上空垂直速度大多接近于 0, 这是因为 500 hPa 环流平直, 低层切变线偏南, 动力条件弱造成的。而 27 日和 31 日有明显低槽过境, 导致宣恩上空出现上升运动, 此时 700 hPa 切变线位于宣恩南侧, 所以上升运动最大值均在 700 hPa 附近。由此可见, 这次连续大雾过程中, 辐射雾和雨雾发生时, 上升运动均不明显。

6 结论

本文通过对比分析 2010 年 1 月 26~31 日湖北西南地区连续发生的辐射雾和雨雾的环流形势及地面和高空气象要素特征, 得到如下结果:

(1) 500 hPa 阻塞高压脊和南支槽的反位相叠

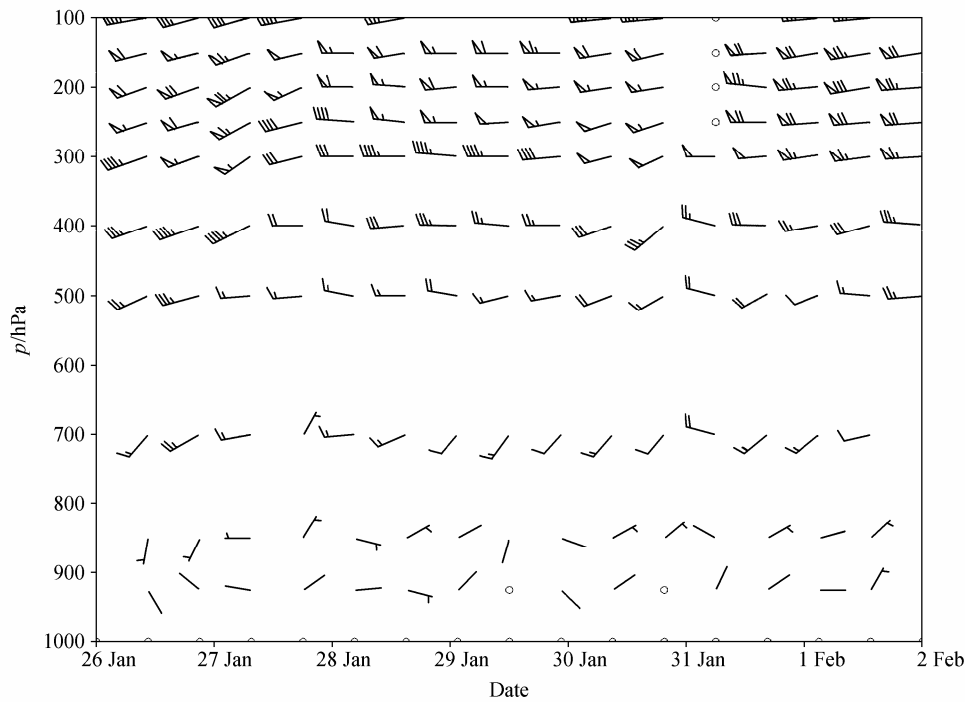


图4 2010年1月25日20:00至31日20:00恩施站高空风时间变化
Fig. 4 Time variation of upper wind at Enshi station from 2000 LST on 25 Jan to 2000 LST on 31 Jan

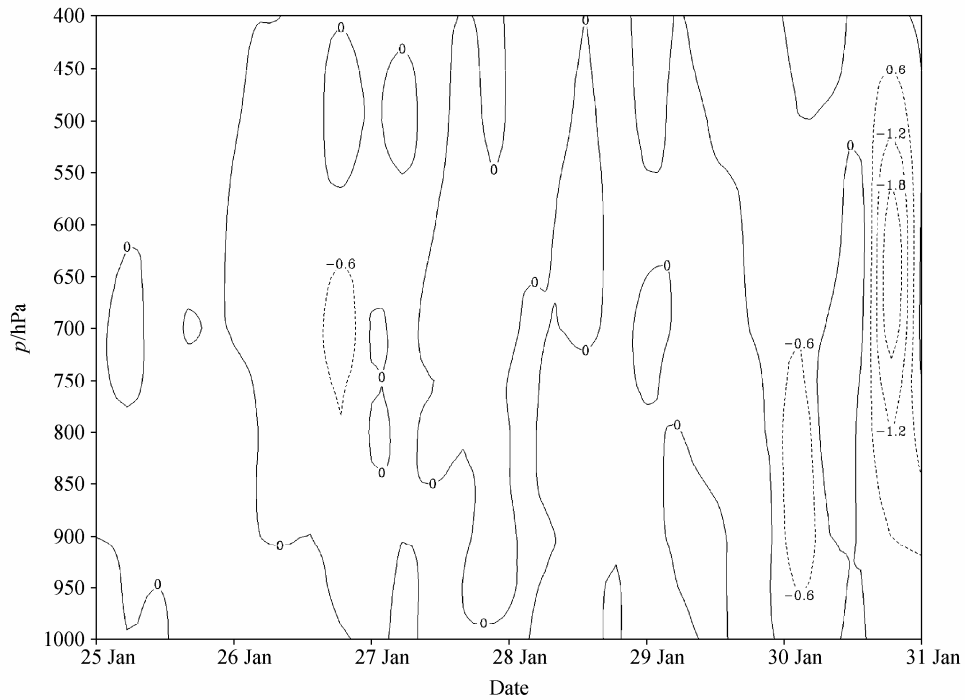


图5 2010年1月25日20:00至31日20:00宣恩站垂直速度的时间变化
Fig. 5 Time variation of vertical speed at Xuan'en station from 2000 LST on 25 Jan to 2000 LST on 31 Jan 2010

置有利于湖北西南地区出现连续大雾天气的环流形势背景，而在这种反位相叠置形成之前和之后，湖北西南大雾的性质有明显差异，前者受地面变性高压控制以辐射雾为主，后者受冷暖空气共同影响

雨雾共同发生。

(2) 地面水平能见度与相对湿度反相关关系非常显著；雨雾与降水的发生、持续和结束几乎同步；地面水平能见度与雾滴浓度也呈明显的反相关关

系, 辐射雾的这种反相关关系比雨雾更为显著; 辐射雾的雾水含量与能见度呈显著的反相关, 但雨雾却不存在这种相关性。地面风速很小或者静风, 是辐射雾和雨雾生成的共同条件。

(3) 辐射雾发生期间在 950 hPa 和 700 hPa 附近共有 2 个逆温层同时存在, 上层逆温更厚更强、下层逆温更为浅薄。雨雾发生时, 逆温层可以有 2~3 个, 低层逆温层底比辐射雾高, 但也可能没有逆温层存在。

(4) 边界层风速小、对流活动弱有利山地辐射雾和雨雾的形成。辐射雾发生时, 与 1000 hPa 间垂直风切变接近于 0 的高度可达 700 hPa; 雨雾发生时, 与 1000 hPa 间垂直风切变接近于 0 的高度为 850 hPa。辐射雾发生时, 低层有冷平流、中层有暖平流, 而雨雾发生在一致的暖平流场中。

(5) 辐射雾空气饱和层的高度低于雨雾, 前者一般在 850 hPa 及以下, 后者可到达 700 hPa 或 500 hPa。

参考文献 (References)

- 邓雪娇, 吴兑, 唐浩华, 等. 2007. 南岭山地一次锋面浓雾过程的边界层结构分析 [J]. 高原气象, 26 (4): 881-889. Deng Xuejiao, Wu Dui, Tang Haohua, et al. 2007. Analyses on boundary layer structure of a frontal heavy fog process in Nanling mountain area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (4): 881-889.
- Duynkerke P G. 1999. Turbulence, radiation and fog in Dutch stable boundary layers [J]. Bound.-Layer Meteor., 90 (3): 447-477.
- 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 2006. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 175-184. Dong Jianxi, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2006. Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 175-184.
- 傅刚, 李晓岚, 魏娜. 2009. 大气能见度研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 39 (5): 855-862. Fu Gang, Li Xiaolan, Wei Na. 2009. Review on the atmospheric visibility research [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 39 (5): 855-862.
- Fuzzi S, Facchini M C, Lind J A, et al. 1992. The Po valley fog experiment 1989: An overview [J]. Tellus, 44 (5): 448-468.
- 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 2009. 北京一次大雾天气边界层结构特征及消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174-1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 33 (6): 1174-1186.
- 黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (6): 821-834. Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 24 (6): 821-834.
- 李宏宇, 胡朝霞, 魏香. 2010. 雨雾、雪雾共生天气气象要素分析 [J]. 大气科学, 34 (4): 843-852. Li Hongyu, Hu Zhaoxia, Wei Xiang. 2010. Analysis of meteorological elements in rain/snow fogs [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 34 (4): 843-852.
- 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等. 1999. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征 [J]. 气象学报, 57 (5): 622-631. Li Zihua, Huang Jianping, Zhou Yuquan, et al. 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (5): 622-631.
- 林建, 杨贵名, 毛冬艳. 2008. 我国大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, 13 (2): 171-181. Lin Jian, Yang Guiming, Mao Dongyan. 2008. Spatial and temporal characteristics of fog in China and associated circulation patterns [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 171-181.
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 2008. 南京冬季平流雾的消机制及边界层结构观测分析 [J]. 南京气象学院学报, 31 (4): 520-529. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2008. An observational study on physical mechanism and boundary layer structure of winter advection fog in Nanjing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (4): 520-529.
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 2010. 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, 34 (4): 681-690. Lu Chunsong, Niu Shengjie, Yang Jun, et al. 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 681-690.
- 马雁军, 左洪超, 张云海, 等. 2005. 辽宁中部城市群大气能见度变化趋势及影响因子分析 [J]. 高原气象, 24 (4): 623-628. Ma Yanjun, Zuo Hongchao, Zhang Yunhai, et al. 2005. Analyses on variation trends of atmospheric visibility and its effect factor in multi-cities in central Liaoning [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (4): 623-628.
- Pinnick R G, Holthjelle D I, Fernandez G, et al. 1978. Vertical structure in atmospheric fog and haze and its effects on visible and infrared extinction [J]. J. Atmos. Sci., 35: 2020-2032.
- 石春娥, 姚克亚, 马力. 2001. 气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 485-492. Shi Chun'e, Yao Keya, Ma Li. 2001. Numerical studies of effects of aerosols on urban fog [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 485-492.
- 宋润田, 孙俊康. 2000. 冷雾的边界层温湿层结特征 [J]. 气象, 26 (1): 43-45. Song Runtian, Sun Junlian. 2000. Boundary layer temperature and humidity stratification of cold fog [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (1): 43-45.
- 王凯, 张宏升, 王强, 等. 2006. 北方地区春冬季雾天边界层结构及其演变规律的对比研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), (1): 55-60. Wang Kai, Zhang Hongsheng, Wang Qiang, et al. 2006. Study on the structure and evolution of atmospheric boundary layer of frontal fogs in spring and winter at southern suburb of Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), (1): 55-60.
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. 气象科技, 31 (2): 109-114. Wang Shuying, Zhang

- Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (2): 109-114.
- Winterrath T, Bott A. 2001. CHEMIFOG—A model to simulate radiation fogs and their interaction with vegetation and chemistry [J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 1 (5-6): 373-380.
- 吴兑. 2006a. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义 [J]. 广东气象, (1): 9-13. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), (1): 9-13.
- 吴兑. 2006b. 再论都市霾与雾的区别 [J]. 气象, 32 (4): 9-15. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (4): 9-15.
- 闫敬华, 徐建平. 2001. 华南地区降水与雾的关系初探 [J]. 广东气象, (2): 19-21. Yan Jinghua, Xu Jianping. 2001. A study on the relationship between fog and rainfall over South China [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), (2): 19-21.
- 杨军, 谢玉静, 石春娥, 等. 2009. 南京冬季辐射雾和平流辐射雾的化学特征差异 [J]. 大气科学学报, 32 (6): 776-782. Yang Jun, Xie Yujing, Shi Chun'e, et al. 2009. Differences in ion compositions of winter fogwater between radiation and advection radiation fog episodes in Nanjing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (6): 776-782.
- 周小刚, 王强, 邓北胜, 等. 2004. 北京市一次大雾过程边界层结构的模拟研究 [J]. 气象学报, 62 (4): 468-475. Zhou Xiaogang, Wang Qiang, Deng Beisheng, et al. 2004. Numerical simulation on the boundary layer structure during a heavy fog process over Beijing metropolitan area [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (4): 468-475.