

云南昆洛高速峨山段典型山地雾的诊断分析

尤 红^{1,2} 杨 明³ 郭荣芬^{1,3} 白学文²

(1. 云南大学大气科学系,昆明 650091; 2. 云南省玉溪市气象台; 3. 云南省气象台)

提 要: 利用常规观测资料和 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐 6 小时格点资料,对 2005 年 12 月 29—31 日云南昆洛高速公路峨山段一次典型的强山地雾过程进行天气动力学诊断分析,探讨了本次山地雾形成和维持的机理。结果表明:雾区上空 850~800hPa 层间存在逆温层或中性层,逆温层越强,山地雾越浓;近地层小于 $1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的微风有利于成雾;分析还指出这次强山地雾发生在久雨转晴和地面强变性冷高压西南侧的天气背景下,地面强辐射冷却效应对山地雾有触发和增强作用,地形背风坡有明显增雾作用。

关键词: 山地雾 诊断分析 辐射冷却 逆温层

Diagnostic Analysis of Typical Mountainous Fog Process in Eshan along Kunming-Daluo High Way in Yunnan

You Hong^{1,2} Yang Ming³ Guo Rongfen^{1,3} Bai Xuewen²

(1. Atmospheric Science Department of Yunnan University, Kunming 650091;
2. Meteorological Observatory of Yuxi; 3. Meteorological Observatory of Yunnan Province)

Abstract: By using the NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ grid point material and the convention observed data, a heavy fog process in the mountainous region occurred in Kunming-Daluo high way in Yunnan in the end of December 2005 was diagnostically analyzed. The result shows that this fog ever happened at the southwest side of strong cold high pressure of ground in the weather background when the continuous and incessant rain stopped and turned to clear day. The ground radiation cooling effect triggered and strengthened the mountainous region fog, and the topography leeward slope obviously strengthened the effect on the fog of mountain region. When fog formed, 850~800hPa level has an obvious inversion layer or the neutrosphere. The stronger the inversion layer, the heavier the mountainous region fog. The breeze in the surface layer is advantageous in forming the fog.

Key Words: mountainous region fog diagnostic analysis radiation cooling inversion layer

国家科技攻关计划项目:“云南雾的监测及预报预警”资助。

收稿日期:2008年2月28日; 修定稿日期:2008年5月12日

引 言

目前,随着社会经济的快速增长,云南的经济命脉高速公路网迅速发展,以高速公路为轴线的“经济走廊”显示了突出作用。云南境内的昆洛高速公路是我国联系东南亚的国际大通道。

云南是我国多雾地区之一,绝大多数属于辐射雾,而昆洛高速公路的峨山路段经常出现山地雾,尤其在大雾频发的秋冬季节更为严重。大雾致使高速公路上行驶的汽车“追尾”,屡次发生车毁人亡等交通事故,对高速公路畅通和安全运行造成了严重危害。2005年12月29—31日云南出现持续性大雾天气过程,其中昆洛高速公路峨山段连续浓雾,能见度为50~300m,局部地区不足30m。12月30日,浓雾导致该路段发生三起严重交通事故,造成7辆车严重损坏,6人受伤,道路中断近2小时,引起了社会各界广泛关注。因此,加强高速公路大雾天气过程的实时监测和机理研究,提高大雾预报和预警能力,具有很重要的现实意义。

近几年来,对于高速公路灾害性大雾的研究取得了一些成果。袁成松等开展了高速公路低能见度的预警、预报,并对沪宁高速公路大雾形成的物理过程作了分析,揭示了大雾的若干特征和形成原因,并且设计了临近预报的思路和流程^[1];万齐林等利用中尺度数值模式研究了小地形动力作用对背风坡雾有重要影响^[2];康志明等和何立富等讨论了华北平原、京津、京沈等高速公路的持续性大雾的成因,指出地表净辐射引起近地层冷却是大雾过程的触发和加强机制^[3-5];在云南,黄玉生等对西双版纳雾的化学成份和微物理结构的演变过程等作了较细致的分析^[6-7],沈鹰研究了昆明安宁市辐射雾大气的扩散参数^[8]。但至今有关云南高速公路上多发的山

地雾研究甚少。

因云南省探空和地面观测资料稀疏且在滇中没有与雾相关的外场试验资料,所以采用常规观测资料和 NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 细网格逐 6 小时再分析资料,诊断 2005 年 12 月 29—31 日云南昆洛高速公路峨山段持续性大雾过程的大尺度环流条件、动力学和热力学要素场的结构特征和辐射冷却作用等,并探讨昆洛高速峨山段山地雾形成和维持的原因,分析结果可为昆洛高速公路上的大雾实时预报业务提供一定的参考依据。

1 山地雾的气候特征

云南昆洛高速公路始于昆明,止于中缅交界的打洛,呈东北—西南走向,横穿云南境内的横断山区。沿线植被丰富,山地辐射逆温显著。本文研究的昆洛高速公路峨山段是山地雾多发区域,峨山地势西北高、东南低,山地、峡谷、河流交错,地形复杂、立体气候明显。峨山至元江段海拔悬殊,如位于同一坝子内的最高点小街镇(海拔 1630m)和峨山县城(1539.8m)属亚热带气候区,而元江(海拔 400.9m)为北亚热带河谷气候。其中海拔 1120m 的化念镇与峨山测站间有多座属横断山系的高山,平均海拔高度在 1925m,是亚热带与北亚热带的气候过渡带。小街镇和化念镇相距仅十几公里,但海拔落差达 510m,两地的气候差异很大。特殊的地形及气候差异造成昆洛高速公路峨山路段多山地雾发生。统计 2001—2005 年峨山测站资料发现,每年除 5 月无雾日外,其余各月均有雾日,11 月到翌年 1 月是雾多发期,每月雾日可达半月以上,每天凌晨到上午雾最强,中午后减弱消失。年平均雾日为 72 天,由于峨山海拔高度接近 850hPa 的平均高度,故在以下分析中将峨山 850hPa 上观测资料作为地面资料使用。

山地辐射雾是由于辐射冷却作用使近地

面气层水汽凝结或凝华而形成的雾。辐射冷却达到最大多在后半夜至次日日出之前,该时段内的温度均低于头天晚上20时的地面露点温度。从2005年12月29—31日峨山山地雾过程的温度和露点温度时间变化(图1)可看到,无山地雾时 $T > T_d$,29—31日有山地雾时均为 $T < T_d$,说明该地的山地雾是辐射雾。

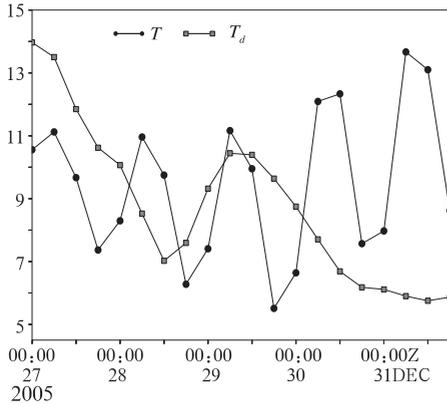


图1 2005年12月27—31日峨山站温度(T)和露点温度(T_d)的时间变化图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

2 山地雾的环流形势特征

本次强山地雾过程与大尺度环流形势特征密切相关。图2是12月29—31日大雾过程的平均环流形势场,由图可见,在500hPa上(图2a),贝加尔湖到我国北部地区为一长波脊,孟加拉湾上有平浅的南支槽,二者形成反位相叠置;西太平洋副热带高压(以下简称副高)呈带状位于南海中南部到菲律宾以东洋面上,副高脊线在 17°N 附近,西脊点在 107°E 附近。这样,副高北侧到南支槽前西南地区东部盛行一支偏西气流,这支气流促使云南上空的大气层结稳定并维持。在偏西气流的控制下,云南天气晴好。而在此之前,青藏高原上空有一西风小槽东移,小槽所携带的冷空气同南支槽前来自海洋上不同性质的偏西气流交汇,致使24—27日云南连续4

天出现了阴雨天气,为大雾提供了低层水汽条件。在地面形势图(图2b)上,从我国东北到华南地区为一庞大的变性冷高压控制,云南正处于该高压西南侧的晴空区中,地表辐射冷却作用强烈,其中东部地面上吹偏东风,东风气流携带的水汽,也为大雾天气形成提供了所需的水汽条件。至此,高空偏西气流、近地层偏东气流、南支槽和地面变性冷高压是本次大雾天气过程的影响天气系统。

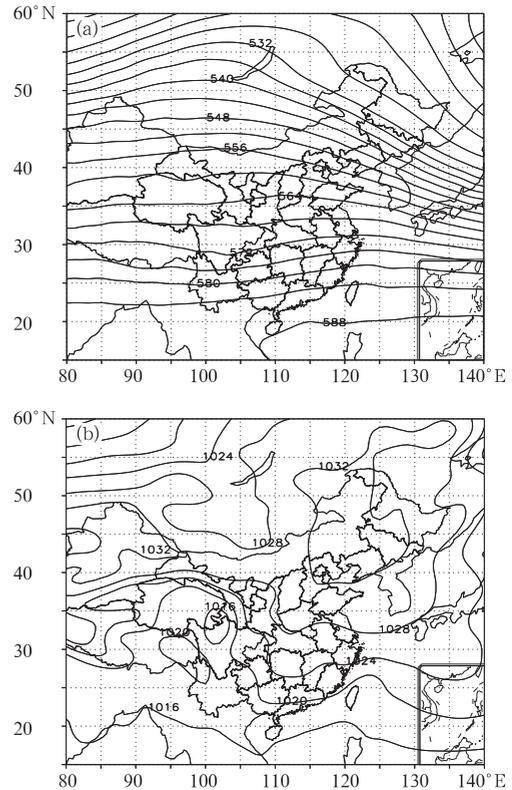


图2 2005年12月29—31日大雾过程的3天平均环流形势图
(a) 500hPa (b) 地面

3 山地雾的气象要素特征

3.1 温度场特征

昆洛高速公路山地雾的形成和维持,在雾区上空伴有逆温层结。从12月28—31日每日凌晨02时峨山站的温度垂直剖面(图3)上

可以看到,28日,700hPa以下层温度随高度上升而递减;29日,山地雾发生和31日雾减弱时,雾区上空850~800hPa层间温度随高度无变化,呈现中性层结;30日,山地雾增强阶段在雾区上空850~800hPa层间则出现强逆温

层,逆温强度达 $0.02^{\circ}\text{C}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 。由此可见,此次强山地雾过程中逆温层的强度与雾的生消及浓度有密切的关系,昆洛高速公路峨山段山地雾的逆温层位于850~800hPa层间,逆温层最强时出现的雾也最浓。

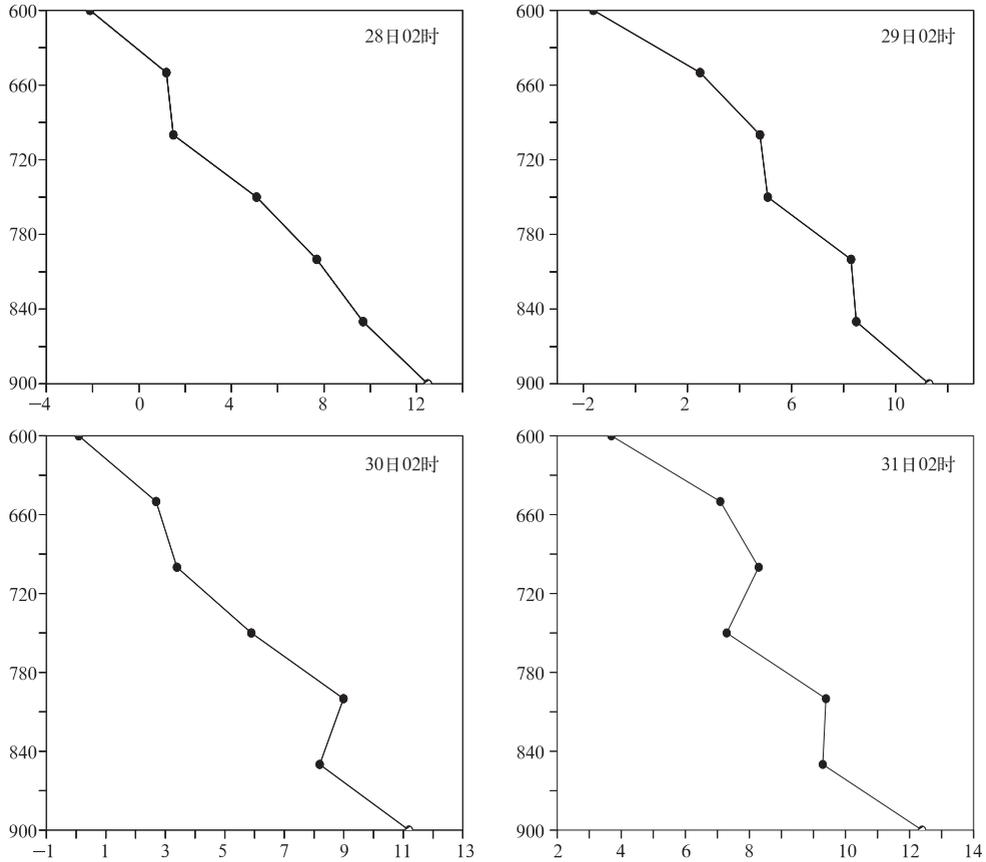


图3 2005年12月28—31日逐日02时峨山站的温度垂直剖面图(单位:°C)

3.2 湿度场特征

图4是大雾期间峨山站的相对湿度(a)和温度露点差(b)时间变化图。在图中峨山路段山地雾发生时,近地层的相对湿度都在80%以上,750hPa以上层的相对湿度迅速减小,700~400hPa上相对湿度一般在10%~30%之间徘徊,与上述干燥的偏西气流相对应,850hPa上的温度露点差在 5°C 以下。其中29日,峨山地面到750hPa相对湿度达90%以上,湿层厚度大,850hPa上温度露点

差在 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 之间;30日,峨山地面到800hPa相对湿度达90%以上,但湿层厚度较小,850hPa上温度露点差减小为 1°C ;31日,峨山雾区上空相对湿度只有80%左右,湿层厚度很小,850hPa上温度露点差迅速增大到 4.6°C 。与山地雾实况对应比较,山地雾过程中30日雾最浓,29日次之,31日为轻雾。30日凌晨逆温强度最大,阻止了湿层向上发展,使湿层厚度变小,其间的空气接近饱和,导致当日凌晨到上午能见度最小,山地雾最浓。

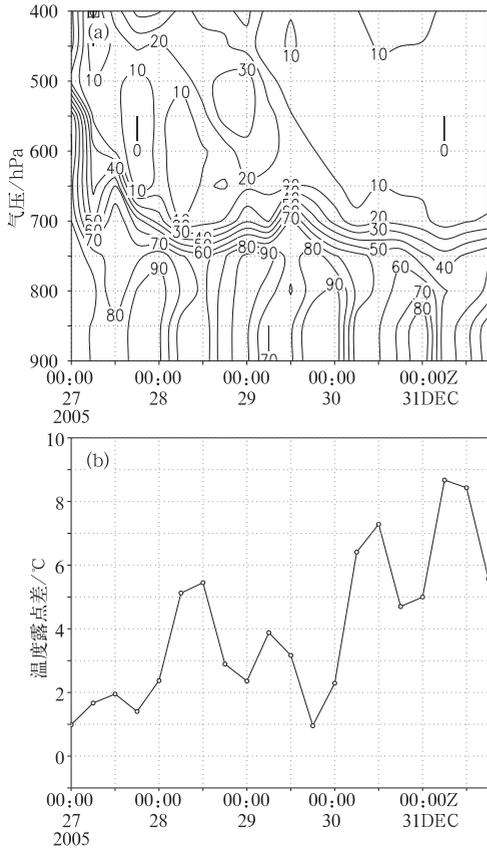


图 4 峨山站的相对湿度(a)和温度露点差(b)的时间变化图(单位:°C)

3.3 风场特征

山地雾区峨山站的风场时间垂直剖面如图 5 所示,在山地雾产生和持续期间,雾区的

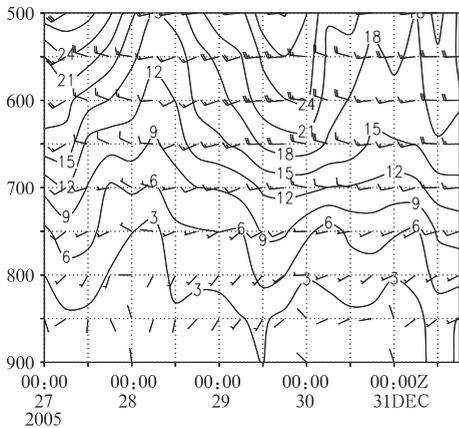


图 5 2005 年 12 月 27—31 日峨山站风场时间垂直剖面(单位: $m \cdot s^{-1}$)

边界层盛行西南风或偏南风,风速为 $0 \sim 1 m \cdot s^{-1}$,800hPa 向上风速随高度逐渐增大,风向转为西风或西偏北风。这样近地层微风能使辐射冷却作用扩散到适当高度,也能使水汽垂直输送到一定高度,利于形成一定厚度的雾。若风力过大,乱流混合层厚,会导致近地层降温缓慢,水汽大量上传,不利于雾的形成。31 日中午以后,峨山近地面层附近的风速开始明显增大,风速达 $3 \sim 6 m \cdot s^{-1}$,是山地雾过程消散的动力因子。

4 山地雾的天气动力学诊断分析

4.1 辐射冷却作用

4.1.1 温度日较差变化

分析峨山站的地面温度日较差时间变化(图略)发现,这次强山地雾过程之前连续四天阴雨天气期间,每天的温度日较差变化较小,平均值为 $5.7^{\circ}C$ 。28 日雾过程开始之前,云南转为高空槽后干燥的偏西气流控制后,天气转晴,峨山的温度日较差明显增大到 $11.8^{\circ}C$ 。山地雾发生和维持的 29—30 日温度日较差在 $14^{\circ}C$ 左右。揭示了此间地面有效辐射强,辐射冷却作用大,有利于水汽凝结形成雾和逆温层的形成。31 日,温度日较差升高到 $17.5^{\circ}C$,由于连续 3 天下午的强阳光照射,使得近地层的水汽大量蒸发,尽管低层辐射冷却作用很强,但成雾的水汽条件已不具备,雾减弱并消散了。温度日较差的时间变化不仅反映地面辐射冷却对此次强山地雾过程具有明显的触发机制,而且也说明近地层水汽是成雾的必要条件。

4.1.2 地表热通量

为了进一步说明地面辐射冷却作用对成雾的重要作用,我们利用地表热平衡方程:

$$G = \theta_g - I_{\lambda} + I_{\nu} - L_o E - H$$

计算了本次山地雾过程发生时每天凌晨

02—08 时的 6 小时地表热通量 G 。式中 θ_g 为地面吸收的短波辐射, I_A 为地表向上的长波辐射能量, I_V 是到达植被顶端的大气向下长波通量, L_0 为汽化潜热 ($L_0 \approx 2.5 \times 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$), E 为水汽通量, H 为地表指向大气的感热通量。当 $G < 0$ 时为地表由辐射交换获

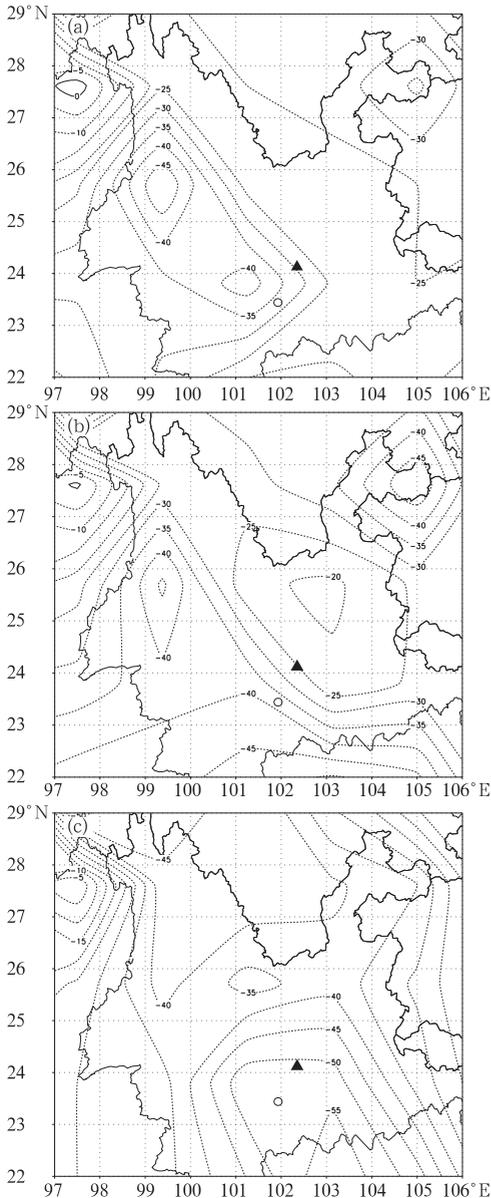


图 6 大雾过程中的地表热通量
单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 图中标注为昆洛高速路经的峨山▲、元江○ (a) 29 日凌晨(02—08 时); (b) 30 日凌晨(02—08 时); (c) 31 日凌晨(02—08 时)

得热量, 即地表对大气具有辐射冷却效应, 其值越小表明地面辐射冷却作用越大。图 6 是 12 月 29—31 日每日凌晨的 02—08 时的 6 小时地表热通量分布图。由图可见, 29、30 日凌晨峨山的地表热通量在 $-25 \sim -30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 峨山路段大雾天气下的最小能见度分别为 100m 和 200m; 而元江站地表热通量在 $-30 \sim -40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 这里的天气晴好, 能见度分别为 15~20km 和 12~18km。31 日两站的 G 值迅速减小到 $-50 \sim -55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 峨山出现了最小能见度为 300m 的大雾、元江则为轻雾。由此可见, 地表热通量值的大小与山地雾的强弱关系密切, 在 31 日地表热通量值达最大, 地表对大气的辐射冷却效应最大但此时雾区上空相对湿度只有 80% 左右, 湿层厚度很小, 故山地辐射雾减弱消散。这与大雾过程中温度日较差变化的结果相一致, 表征地面辐射冷却效应的地表热通量是山地雾重要的触发和加强因子。

4.2 稳定层结的建立和维持

昆洛高速公路的山地雾气象要素场特征分析表明, 山地雾过程中雾区上空大气层结稳定并具有逆温的特征。下面从动力学和热力学因子来分析此次山地雾上空的对流稳定层建立和维持之原因。

图 7 是 12 月 30 日 08 时山地雾最强时昆洛高速公路上的昆明、峨山、元江和宁洱的涡度、散度、水汽通量和垂直速度的垂直剖面图。从涡度垂直剖面图(图 7a)上可知, 昆洛高速公路的多发山地雾路段近地层东侧和南侧层为正涡度区, 正涡度区从昆明到峨山方向向高层伸展, 当到高速路段西南方向的元江站时, 该正涡度区已抵达 400hPa 层上, 从昆明近地层至 400hPa 层均为正涡度区。表明雾区的东侧和南侧高空有来自东南方向的暖湿气流向山地雾发生区输送。而昆洛高速

路段对流层高层则对应着负涡度区,中心值为 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,位于昆明和峨山的 300hPa 上,路段西南方向的宁洱高层的负涡度区明显向中层伸展至 700hPa 上,反映了大雾过程中云南高层偏西气流向下传送;散度垂直剖面图(图 7b)显示,山地雾期间,昆洛高速公路段 600hPa 以下层均为正散度区, $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 中心在峨山站的近地层到 750hPa 之间,表明山地雾区低层有弱辐散下沉运动。600~300hPa 层是负散度区,说明对流层中高层有辐合上升运动。600hPa 以下层的辐散下沉运动引起该层气温升高,对流层中层的辐合上升运动使该层气温下降,600hPa 以

下层空气下沉增温过程持续到一定程度后,就使该层形成逆温层。同时 600hPa 以下层的辐散下沉运动阻止了近地层辐射蒸发的水汽向对流层中层输送,有利于近地层水汽的聚积和湿度增大。当湿层达到一定厚度后,能见度变小,雾的浓度变大;从水汽通量垂直剖面图(图 7c)可见,此次强山地雾过程在近地层到 650hPa 层为水汽通量大值区,特别是峨山的值在 $2.5 \sim 5.0 \text{ g} \cdot \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$ 之间,最强中心在 750hPa 上。这与图 6a 中的雾区东侧、南侧东风回流相对应。近地层充足的水汽条件和稳定逆温层使 30 日的雾最强。

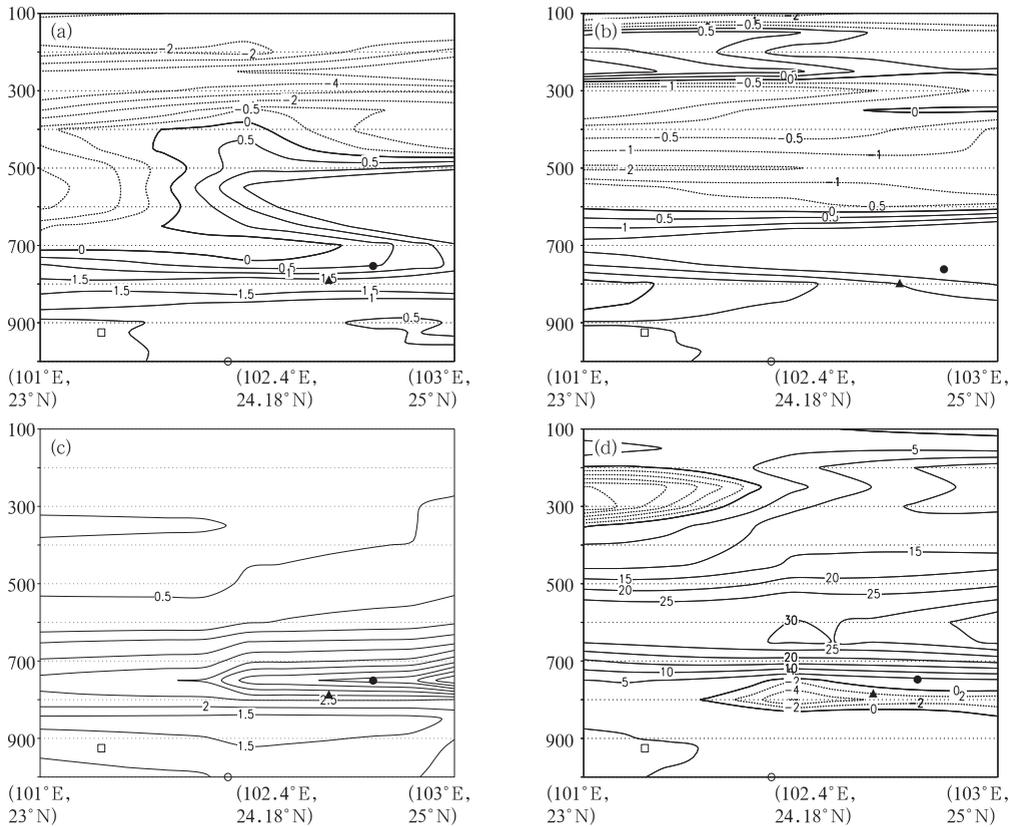


图 7 2005 年 12 月 30 日昆洛高速公路的昆明●、峨山▲、元江□、宁洱□的大气动力和动力特征垂直剖面
 (a) 涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}) (b) 散度(单位: 10^{-5} s^{-1}) (c) 水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{ cm}^{-1} \cdot \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$)
 (d) 垂直速度(单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{ s}^{-1}$)

从穿过峨山路段的纬向二维流场垂直剖

面(图略)可见,雾区上空的 750hPa 以上层

为平直的偏西气流区,峨山近地面附近的气流有弱发散特征。对应在垂直速度剖面图(图 7d)上,峨山 750hPa 到近地层有弱上升运动区,500~700hPa 层间是较强的下沉运动区,强中心在 600hPa 附近。这揭示了对流层中、高层平直的偏西气流及对应较强下沉运动致使雾区上空稳定层结建立和维持。下沉运动使峨山雾区上空的气流增温,而偏西气流下的晴好天气造成夜间地面强烈辐射冷却,它们共同作用导致低层内逆温层结的建立和加强。逆温层的存在同时又抑制了近地层的水汽向上扩散,使得近地层水汽增大,促进雾的发展。

4.3 地形背风坡的增雾作用

昆洛高速公路的山地雾多发地段峨山县城西面有多座横断山系南北走向的高山,其中有代表性是他达莫山(海拔 1925m)和大滩秃山(海拔 2006m),大滩秃山位于峨山县城西南方 6 km。县城南部到石屏县有多座东西走向高山,此次强山地雾过程中峨山测站雾区的边界层盛行西南风或西南偏西风,风速为 $0\sim 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这些高山正好坐落在山地雾多发地峨山县的西面、西南面和南面,这样峨山县即处于他达莫山、大滩秃山和县城南部高山的背风坡中,峨山站三天大雾天气的最小能见度分别为 100m、200m 和 300m。峨山站常年盛行西南风,雾日又明显多于昆洛高速公路所经其余 3 站。这反映了地形背风坡对路段中峨山山地雾有明显的增幅作用。

5 小 结

(1) 贝加尔湖到我国北部的长波脊与南支槽形成反位相叠置是云南昆洛高速公路强山地雾过程的环流形势背景,高空偏西气流、近地层偏东气流、南支槽和地面变性冷高压

是山地雾的影响天气系统。阴雨天气和低层东风回流为大雾过程提供了水汽输送条件。

(2) 山地雾产生在大气稳定层结中,雾区上空 850~800hPa 层间有逆温或中性层结,逆温层越强,山地雾越浓。雾区近地层弱辐散下沉气流有利于逆温层结形成和水汽聚积。

(3) 温度日较差和地表热通量的辐射冷却作用对山地雾有重要的触发和增强作用,地形背风坡对山地雾有明显的增幅作用。

(4) 昆洛高速公路山地雾近地层正涡度区从昆明到峨山方向向高层伸展,雾区东侧和南侧的暖湿气流向山地雾区的上空输送。高层负涡度区明显地向中层伸展到 700hPa 上,是高层偏西气流下传的结果。山地雾区 600hPa 以下层有弱辐散下沉运动,使得近地层气温升高,形成逆温层,阻止了近地层的水汽向中层输送,有利于近地层水汽聚积和湿度增大。中高层偏西气流有利于雾区上空稳定层结建立和维持。近地面弱辐散下沉增温,而偏西气流下的晴好天气造成夜间地面强烈辐射冷却导致近地层逆温层建立和加强。

参考文献

- [1] 袁成松,卞光辉,冯民学,等.高速公路上低能见度的监测与预报[J].气象,2003,29(11):36-40.
- [2] 万齐林,吴兑,叶燕强.南岭局地小地形雾背风坡增雾作用的分析[J].高原气象,2004,23(5):709-713.
- [3] 康志明,尤红,郭文华,等.2004年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析[J].气象,2005,31(12):51-56.
- [4] 何立富,陈涛,毛卫星.华北平原一次持续性大雾过程的成因分析[J].热带气象学报,2006,22(4):340-350.
- [5] 王丽荣,连志鸾.河北省中南部一次大雾天气过程分析[J].气象,2005,31(4):65-68.
- [6] 朱彬,黄玉生.西双版纳城、郊雾水化学组成分析[J].环境科学学报,2000,20(3):316-321.
- [7] 黄玉生,黄玉仁,李子华,等.西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程[J].气象学报,2000,58(6):715-725.
- [8] 沈鹰.云南安宁市辐射雾大气扩散参数研究[J].气象,1997,23(7):29-31.