

王婷,潘蔚娟,谌志刚,等. 珠江口持续性雾生消的环流特征和成因分析[J]. 气象,2010,36(6):13-20.

珠江口持续性雾生消的环流特征和成因分析^{*}

王 婷¹ 潘蔚娟¹ 谌志刚² 刘云香²

1 广东省气候中心, 广州 510080

2 广东省中心气象台, 广州 510080

提 要: 利用各种气象观测资料,研究了1980—2006年珠江口地区持续性雾的气候特征,并通过典型个例分析了持续性雾生消的环流特征和物理机制。主要结论有:珠江口地区持续性雾集中出现在10月至次年5月,尤其是春季出现概率最大;出现持续性雾的环流形势主要有3种:A型——低压或倒槽的东侧,B型——高压的底部或后部,C型——均压场;在持续性雾过程中,近地层暖湿平流的输入、浅层抬升、水汽弱辐合以及对流层中下部的“干暖盖”有利于饱和湿空气的凝结以及逆温层的维持,而伴随偏北风南下的干冷平流是雾消散的主要因素。

关键词: 持续性雾, 珠江口, 环流特征, 物理机制

Analysis of Circulation Characteristics and Physical Mechanism for Sustained Fog Generation and Dissipation in Pearl River Estuary Region

WANG Ting¹ PAN Weijuan¹ CHEN Zhigang² LIU Yunxiang²

1 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080

2 The Central Meteorological Observatory of Guangdong, Guangzhou 510080

Abstract: By using all the available meteorological observation data, climatic characteristics of sustained fog between 1980 and 2006 in the Pearl River Estuary Region were analyzed. Meanwhile, the circulation characteristics and physical mechanism for sustained fog generation and dissipation were studied through analysing the typical cases. The major conclusions can be drawn as follows: (1) Sustained fog in the Pearl River Estuary Region usually appears from October to May next year, especially in spring; (2) The weather situation when sustained fog happens can be divided into 3 kinds: type A, on the east of low pressure (or inverted trough); type B, in the rear(or bottom) of high pressure; and type C, in uniform pressure fields; (3) When severe sustained fog happens, the transportation of wet-warm advection, the weak lift motion and convergence of vapor flux at the surface layer and the dry-warm cap in the mid-lower troposphere are the favorable conditions for condensation of vapor and maintenance of temperature inversion, the intrusion of dry-cold advection accompanied by northerly wind is the main factor for the fog dissipation.

Key words: sustained fog, the Pearl River Estuary Region, circulation characteristics, physical mechanism

引 言

持续性雾天气所造成的能见度降低往往给船舶航行带来困难,诱发公路交通事故,妨碍飞机起降,

给人民的生产和生活带来极大干扰。加深对持续性雾天气的认识,提高其预报准确率具有重要的社会经济意义,历来受到国内外专家学者的关注。大量研究揭示了我国不同地区雾的气候特征^[1-9],吴兑等^[7],周亚军等^[8],张朝锋^[9]指出华南地区雾主要出

* 广东省2006“省科技三项”项目“珠江口海雾监测预警系统研究”资助

2008年6月26日收稿; 2009年11月25日收修定稿

第一作者:王婷,主要从事气候和数值模拟研究. Email:tingwang@grmc.gov.cn

现在春季,冬季次之,夏、秋季较少。还有一些研究分析了不同地区雾发生的环流背景和气象条件^[10-16],张燕光、郭秀英等提出了华南沿海春季雾和海雾的天气分型^[13-14],何云开等分析了南海北部近岸春季海雾的年际变化,指出海雾日数偏多年华南沿海 850 hPa 上空存在一个由南向北的暖平流^[15],万齐林等研究了南岭局地小地形背风坡的增雾作用^[16]。近年来,为了探讨雾更为细致的结构和演变,很多学者选取典型个例开展雾的诊断分析^[17-28]和数值研究^[29-31],何立富等、孙连强等、濮梅娟等、谢小敏等^[23-26]指出低层暖湿平流、近地逆温层、对流层中下部的“干暖盖”对雾的形成和发展有重要贡献,黄辉军等、吴兑等^[27-28]分析了华南不同地区雾的微观物理结构和化学成分特征,樊琦等^[30-31]通过数值模拟,探讨了珠江三角洲地区雾生消的机制和结构。基于各种研究成果,不少学者提出了雾的预报方法和系统^[13-14,24,32-33,35]。珠江口地区紧邻珠江且濒临南海,水汽丰沛,是雾多发地区,且该地区人口密集、经济发达,持续性雾天气所造成的社会经济影响相对突出,但目前有关珠江口持续性雾天气的研究还较少,对雾生消的环流特征及物理机制缺乏系统的认识。本文揭示了珠江口地区持续性雾天气的年际变化和季节分布特征,通过诊断分析有利于雾生消的海平面气压场、高低空高度场、风场、温度场、水汽及大气层结构,总结出珠江口地区出现持续性雾天气的主要环流形势有 3 种(A 型——低压或倒槽的东侧、B 型——高压的底部或后部,C 型——均压场),并选取典型个例分析了严重雾事件生消的物理机制,为持续性雾的预报提供参考。

1 资料与方法

根据《地面观测规范》规定,雾是大量微小水滴悬浮空中,常呈乳白色,使水平能见度小于 1.0 km 的天气现象。本文的雾日统计以地面观测记录为准,即 20:00 至翌日 20:00 出现雾则计为 1 个雾日,并定义 3 个以上代表站有雾出现,且雾持续 3 天以上的雾过程为珠江口持续性雾。同时,为严格区分雾与霾,本文按照相对湿度大于 90% 的判据^[34]对入选雾过程进行了核实。本文所选取的代表站为珠江口及其附近地区的中山、深圳、斗门、顺德、番禺、上川岛等 19 站。研究所使用的资料包括:珠江口 19 个代表站的逐日天气现象、能见度、湿度、风等逐日常规地面观测资料、清远站的探空资料及 NCEP/

NCAR 全球逐日再分析资料,资料起止时间为 1980—2006 年。

2 持续性雾的气候统计特征

按照文中持续性雾的定义,统计出 1980—2006 年间,珠江口地区共出现持续性雾 73 次,平均每年 2.7 次。持续性雾的年际变化较大,最多的年份有 5 次,最少的年份仅 1 次,20 世纪 80 年代呈明显的减少趋势,20 世纪 90 年代后呈增加趋势(图 1)。一年中,持续性雾主要出现在 10 月至次年 5 月(图 2),其中,春季(主要是 3、4 月)出现持续性雾天气的概率最大,占全年的 46%;其次是冬季,出现概率达 37%;秋季较少,出现概率仅 16%;6—9 月还未出现过持续性雾天气。

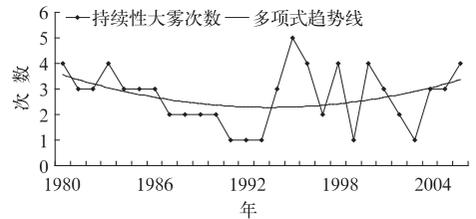


图 1 1980—2006 年间珠江口地区逐年出现的持续性雾次数
Fig. 1 Time series of sustained fog happening in the Pearl River Estuary Region during 1980 to 2006

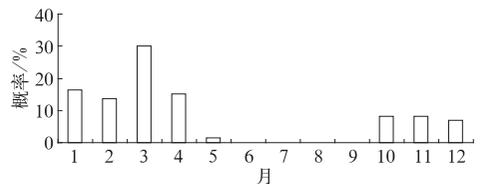


图 2 珠江口地区各月出现持续性雾天气的概率

Fig. 2 Monthly probability of sustained fog in the Pearl River Estuary Region

3 出现持续性雾的环流分型

珠江口地区出现持续雾时的地面天气形势可分为 3 类:A 型——低压或倒槽的东侧,B 型——高压底部或后部,C 型——均压场。其中,A 型发生频率最高,达 49%,主要出现在 3—4 月,以 3 月最多,雾持续时数很长,出雾时段主要是凌晨至上午和傍晚;

B 型出现频率达 25%，主要在 1—3 月，雾持续时数也较长，出雾时段与 A 型类似；C 型出现频率为 26%，主要在 10—12 月，雾持续时数不长，出雾时段在凌晨和上午。

3.1 A 型——低压或倒槽的东侧

春季，海平面气压场上，冷高压减弱入海，中心在长江口以东的洋面上，广西、贵州境内有一个弱低压(倒槽)，广东处于入海高压的后部和低压(倒槽)的东侧(图 3a)，受其影响，珠江口地区低层(1000 hPa)吹偏南风，将暖湿空气从南海输送到珠江口附近，易发生平流雾。之后，随着海上高压的减弱远离和低压(倒槽)的发展东移，珠江口的偏南风加强，暖湿空气的输送也加强，雾进一步发展。后期北方冷

高压脊南压(图 3b)，干冷空气从中路或东路入侵，雾逐渐消散，或是当低压(槽)东移后如珠江口的南风风速过大，也不利于雾的发展。另外，在雾发展的整个过程中，850 hPa 风场上广东受西南气流控制，大风中心位于两广交界处，有时可达到低空急流的强度，珠江口地区位于大风中心的右前方，存在风速的反气旋性切变，为负涡度区控制，层结稳定。500 hPa 上，雾发生时，中低纬的西风气流较平直，有时会有弱的槽脊波动，但整个环流形势稳定。A 型环流与张朝锋^[9]、张燕光^[13]、郭秀英等^[14]提出的入海高压后部型有相似之处，但如仅处于入海高压的后部，珠江口近地层受东北偏东风控制，很难有持续雾发生，只有当广东西侧的低压发展东移，近地层转为偏南风时，雾才会发展加强。

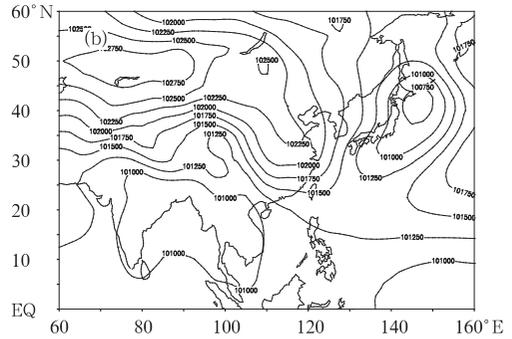
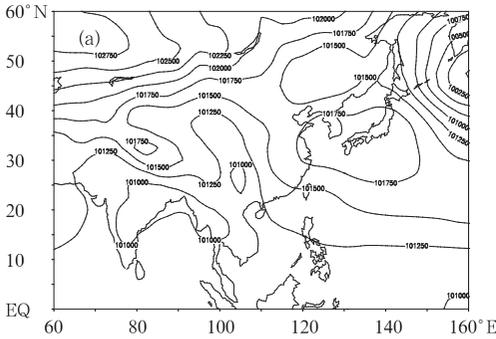


图 3 A 型海平面气压场合成图 (a)雾发生时；(b)雾消散时

Fig. 3 Sea level pressure of type-A during fog generation (a) and fog dissipation (b)

3.2 B 型——高压的底部或后部

冬春季，海平面气压场上，北方冷高压中心在贝加尔湖附近，向南伸展成西北至东南走向或南北向的高压脊，1020 hPa 线通常在 25°N 以北，珠江口地区位于高压脊的底部或后部，西侧有一个倒槽

(图 4a)，低层(1000 hPa)吹偏东风或偏南风，偏东(偏南)气流将暖湿空气从西太平洋(南海)输送到珠江口附近，暖湿气流经过较冷的陆面，加上大气层结稳定，易发生平流雾。后期，北方冷高压主体南压，1020 hPa 线越过 25°N 以南(图 4b)，珠江口地区低层转为偏北风或东北风，干冷空气使得雾消散。另

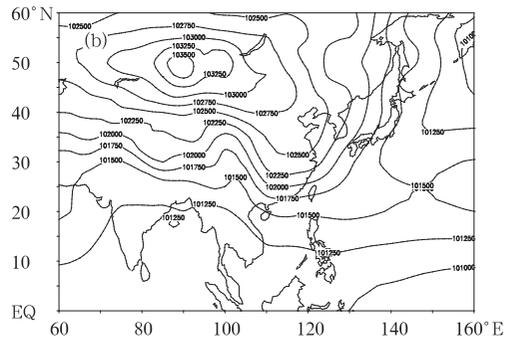
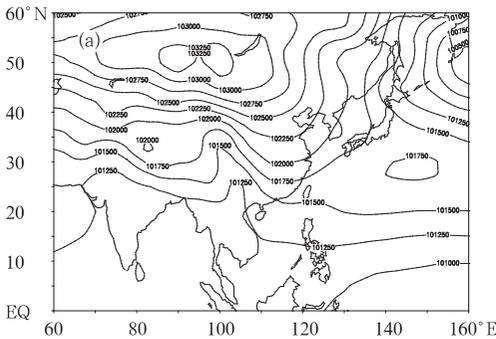
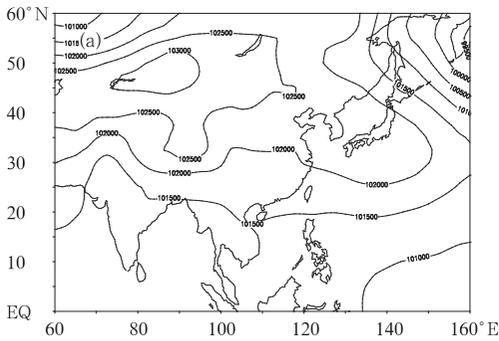


图 4 B 型海平面气压场合成图 (a)雾发生时；(b)雾消散时

Fig. 4 Sea level pressure of type-B during fog generation (a) and fog dissipation (b)

外,与 A 型类似,850 hPa 珠江口地区也是位于西南低空急流中心的右前方,为负涡度区控制。500 hPa 环流稳定,中纬呈纬向型环流形势。

另外,在 A 型发展的后期,如果北方有新的冷高压南压,但冷空气移动速度较慢,天气形势由 A 型向 B 型转变;而在 B 型发展的后期,如冷高压不强,没有南下到广东而是从长江口以北减弱入海,广东西侧的低压槽东移,天气形势会由 B 型向 A 型转变。当 A、B 型环流紧连着发生时,常造成持续时间较长的严重雾过程。



3.3 C 型——均压场

冬季,海平面气压场上,北方冷高压位置偏北,广东境内等压线稀疏(图 5a),基本上是均压场,珠江口地区低层(1000 hPa)吹弱的偏北风,没有明显的暖湿空气输送,水汽条件不如 A、B 型充沛,但大气层结非常稳定,雾主要出现在凌晨和清晨且持续时间不长,可能是由辐射降温所引起,即辐射雾。后期,北方干冷空气快速南下(图 5b),雾逐渐减弱消失。C 型雾发生期间,850 hPa 广东上空是一个反气

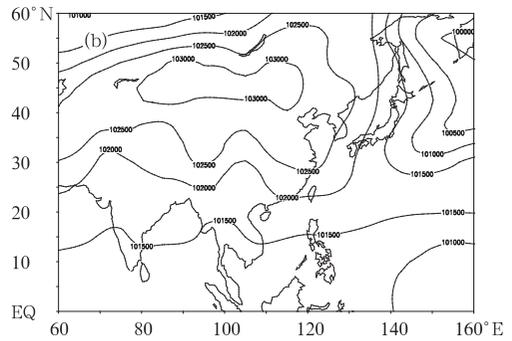


图 5 C 型海平面气压合成图 (a)雾发生时; (b)雾减弱时

Fig. 5 Sea level pressure of type-C during fog generation (a) and fog dissipation (b)

旋性环流,500 hPa 受副热带高压或弱脊控制。

4 典型个例分析

危害较重的持续雾往往发生在 A、B 型环流相继出现的情况下,其持续时间较长且影响范围广。2005 年 2 月 23—26 日,珠江口地区发生一次严重雾过程,持续时间长达 4 天,最小能见度不足 100 m。受其影响,24 日发生多起客轮就地抛锚事件,广州 15 条轮(车)渡航线停航,25 日广深高速公路及邻近的 107 国道上出现长达几十千米的堵车长龙。雾前期属于 A 型环流,后期由 A 型向 B 型转变。本文通过对此典型个例的分析,初步探讨严重雾事件发生发展的物理机制。

4.1 雾演变过程和环流特征

2005 年 2 月 22 日,海平面气压场上,冷高压入海减弱,中心在 140°E 附近,广东西侧是一个低压倒槽,珠江口以西地区近地层(1000 hPa)受入海高压影响吹东北风,以东地区受西面倒槽影响吹东南风(图 6a),广东大部地区有轻雾出现(图 7a)。23 日,

入海高压东撤,西侧的倒槽东移并加强为闭合的低压中心,珠江口地区位于低压东侧,近地层吹偏南风(图 6b),珠江口以西出现大范围能见度小于 1 km 的雾天气(图 7b)。24 日,随着低压的进一步发展东移,珠江口地区的偏南风加强(图略),雾区向东扩展(图略)。25 日,北方又有冷空气从中路南下,大陆冷高压向南伸展成西北至东南走向的高压脊,1020 hPa 线在 25°N 以北,广东处于高压脊底部,其西侧的低压向南收缩,天气形势由 A 型向 B 型转变,珠江口近地层吹偏东风,其以北是偏北风,以南是偏南风(图 6c),冷暖空气交汇使雾天气继续维持,雾区由北向南收缩(图 7c)。26—27 日,随着冷空气进一步南下,1020 hPa 线越过 25°N,珠江口近地层转吹偏北风(图 6d),雾消散(图 7d)。雾强度存在明显的日变化(图 8),午夜 2 时至上午 8 时,雾发展加强,能见度低于 1 km,相对湿度在 95% 左右,而中午前后至夜晚,雾减弱,能见度上升而相对湿度降低,表现出明显的辐射雾特征,且期间珠江口大部地区温度日较差在 5 °C 以上,说明雾是由夜晚辐射降温而形成。但在雾形成后,是近地层持续的暖湿平流使得雾得以维持,因此这是一次平流辐射雾。

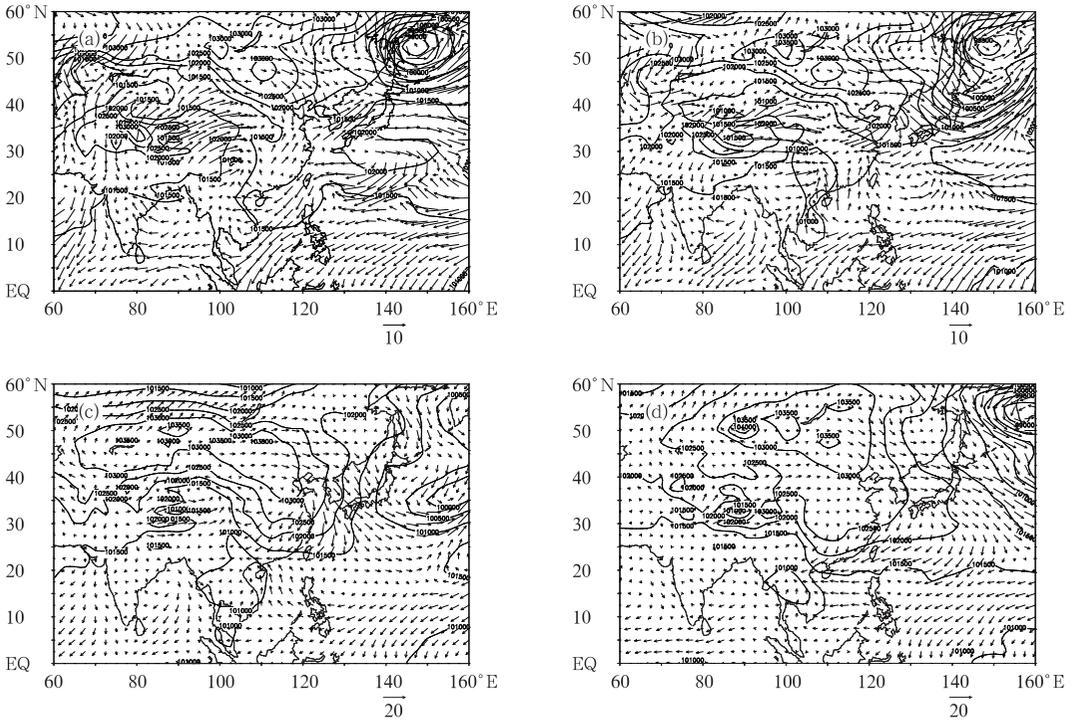


图 6 2005 年 2 月 22 日(a),23 日(b),25 日(c),27 日(d)日平均海平面气压场和 1000 hPa 风场

Fig. 6 Daily mean sea level pressure and 1000 hPa wind fields on (a) 22, (b) 23, (c) 25, and (d) 27 February 2005

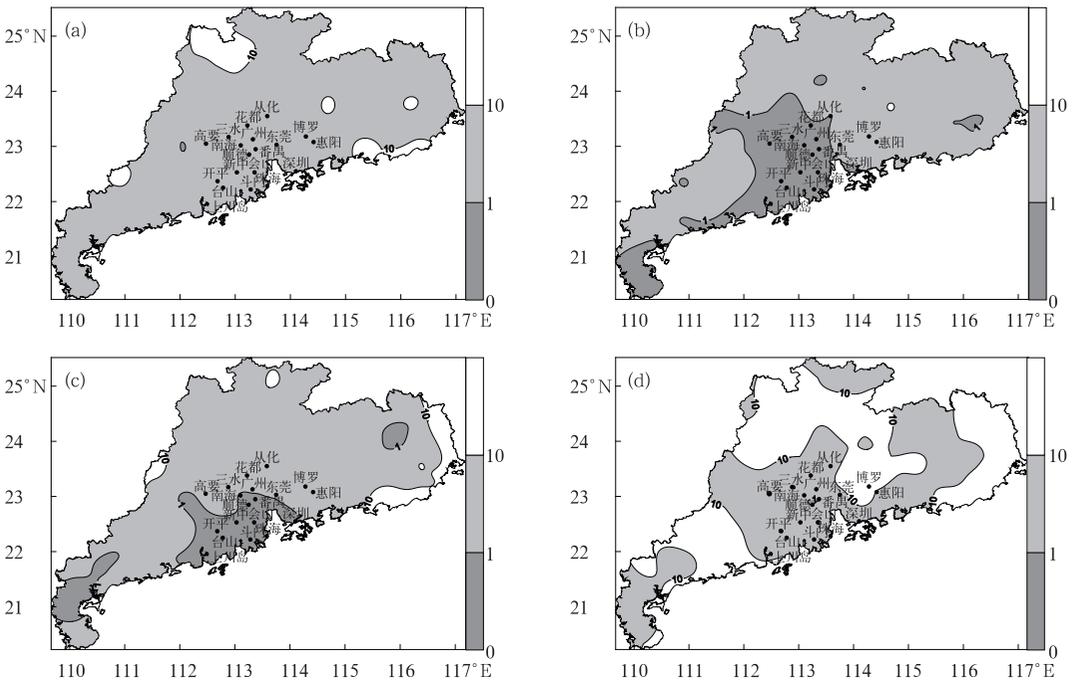


图 7 广东省 2005 年 2 月 22 日(a), 23 日(b), 25 日(c), 27 日(d) 00 时(世界时)能见度分布

Fig. 7 Visibility distribution in Guangdong Province at (a) 0000 UTC 22, (b) 0000 UTC 23, (c) 0000 UTC 25, and (d) 0000 UTC 27 February 2005

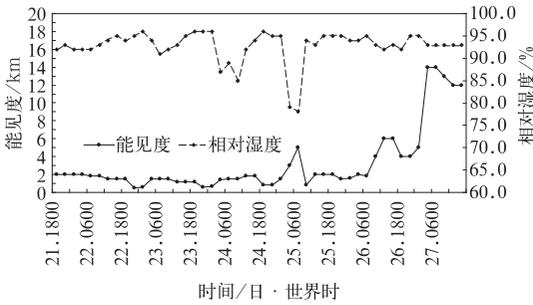


图 8 2005 年 2 月 22—27 日广州站
能见度和相对湿度变化

Fig. 8 Variations of visibility and humidity in
Guangzhou from 22 to 27 February 2005

4.2 雾生消的动力和热力结构特征

图 9a 是 23 日 00 时(世界时)清远站的 $T-\ln p$

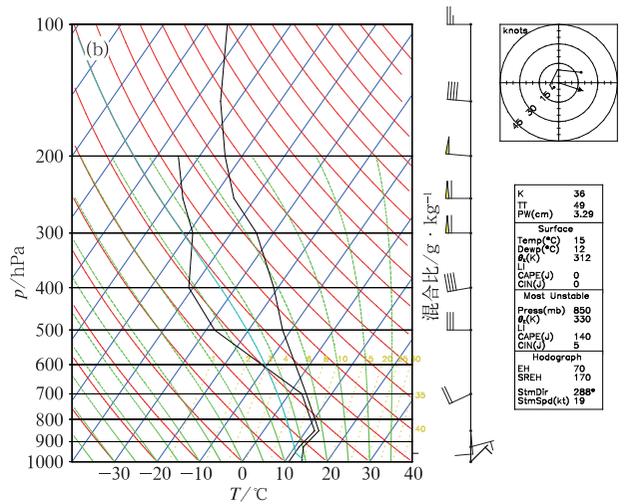
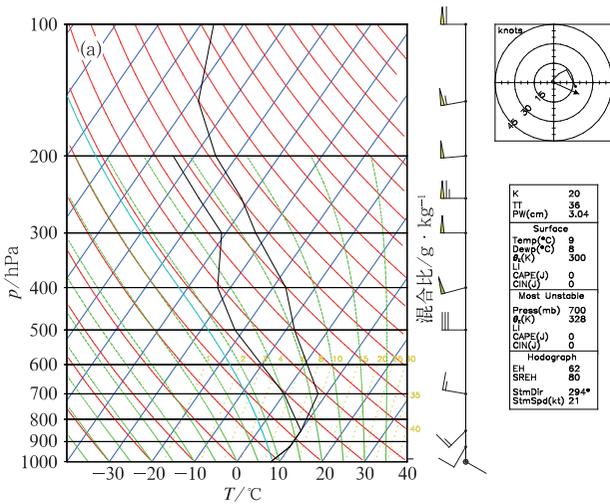


图 9 清远站 2005 年 2 月 23 日 08 时(a)和 26 日 08 时(b) $T-\ln p$ 图

Fig. 9 $T-\ln p$ chart in Qingyuan Station at (a) 0000 UTC 23 and (b) 0000 UTC 26 February 2005

4.3 雾生消的物理机制

图 10 是珠江口区域平均的温度平流和湿度平流随高度和时间的变化,由此可见:雾发展前期(22—24 日),由于珠江口处于低压东侧,近地层以偏南风为主,偏南气流将南海的暖湿空气源源不断输送到珠江口,使该地区近地层存有明显的暖平流(图 10a)和湿平流(图 10b),为雾的发生发展提供有利的水汽和热力条件。同时,由于珠江口处于 700 hPa 暖脊区的前部和 850 hPa 西南气流中的暖平流区前部,使该地区的对流层中低层也有较强的暖平流(图 10a),与暖平流相对应的是干平流(图 10b)。对流层中低层的增温减湿会形成一种“干暖盖”,在其作用下,近地层空气趋向更加潮湿,而其上面空气趋向更加干暖,气层变得更加稳定,有利于雾的维持

图,可以看出:雾发展时,不稳定能量面积为负,地面到 700 hPa 的 θ_e 随高度递增,对流有效位能为 0,对流层低层有明显的逆温现象,说明雾发生时大气层结比较稳定。另外,近地层温度露点差很小,水汽基本处于饱和状态,925 hPa 以上温度露点差明显加大。风场上,近地层吹东南风,925 和 850 hPa 吹西南风,700 hPa 吹西北偏西风,风向随高度的增加呈顺时针旋转,存在暖平流。雾减弱后(图 9b),负的不稳定能量面积减小,近地层(900 hPa 以下)的逆温现象也减弱,表明雾减弱后大气层结虽仍然稳定,但稳定度有所减弱。同时,近地层的温度露点差明显加大,风向随高度的增加仍然存在顺时针旋转。

和发展^[24]。另外,此期间珠江口地区近地层大部分时间存在较弱的上升运动(图 11a),垂直速度为 $0 \sim -0.08 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,同时还存在着弱的水汽辐合(图 11b)。近地层的浅层抬升有利于饱和湿空气的凝结以及逆温层的维持^[23],水汽的弱辐合有利于雾在垂直方向上的发展。

雾发展后期(25 日),珠江口地区处于高压脊底部,近地层以偏东风为主,但其以南地区仍是偏南风。近地层的暖湿平流有所减弱,但仍存在弱的水汽辐合和浅层上升,对流层中下部仍有“干暖盖”,使得雾继续维持。

雾减弱消散阶段(26—27 日),由于冷高压脊进一步南扩,珠江口地区近地层转为偏北风。北方干冷空气的入侵使得该地区近地层转为冷平流(图 10a)和干平流(图 10b),并出现了下沉运动,近地层

水汽饱和度减小,逆温现象减弱。同时,由于冷空气对暖湿空气的抬升作用,对流层中下部出现较强的

增温增湿,大气层结的稳定度减弱,珠江口地区出现了较明显的雨水,雾天气结束。

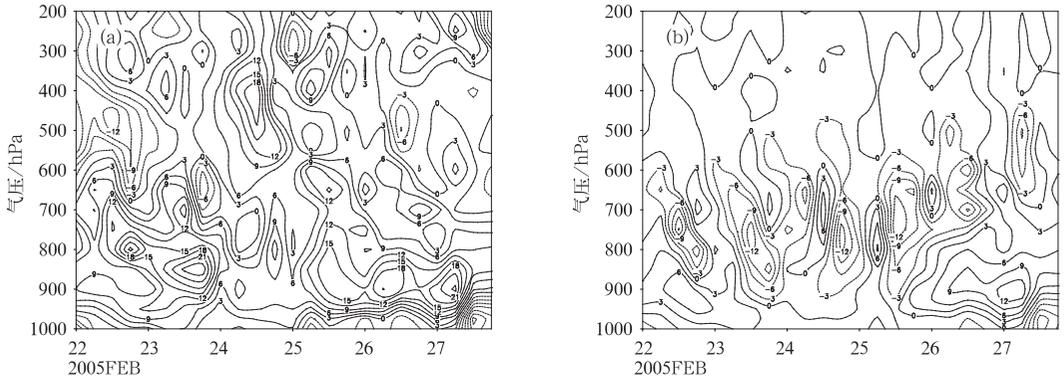


图 10 2005 年 2 月 22—27 日珠江口区域平均(22°~23°N、113°~114°E)的温度平流(a,单位:10⁻⁵ °C · s⁻¹)和湿度平流(b,单位:10⁻⁸ kg · kg⁻¹ · s⁻¹)随高度和时间变化
Fig. 10 Time-height cross section of (a) temperature advection (units: 10⁻⁵ °C · s⁻¹) and (b) humidity advection (units: 10⁻⁸ kg · kg⁻¹ · s⁻¹) averaged over domain (22°—23°N, 113°—114°E) in the vicinity of the Pearl River Estuary Region during 22—27 February 2005

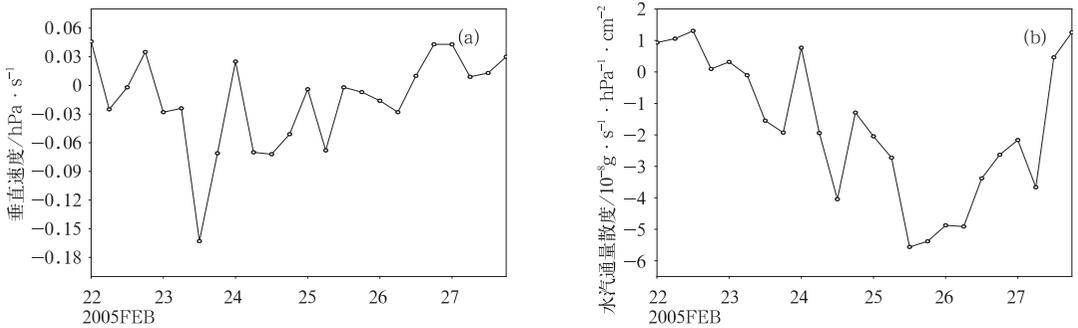


图 11 2005 年 2 月 22—27 日 1000 hPa 珠江口区域平均(22°~23°N、113°~114°E)的垂直速度(a,单位:hPa · s⁻¹)和水汽通量散度(b,单位:10⁻⁸ g · s⁻¹ · hPa⁻¹ · cm⁻²)随时间变化
Fig. 11 The time evolution of (a) vertical velocity(units: hPa · s⁻¹), and (b) vapor flux divergence (units: 10⁻⁸ g · s⁻¹ · hPa⁻¹ · cm⁻²) averaged over domain (22°—23°N, 113°—114°E) at 1000 hPa in the vicinity of the Pearl River Estuary Region during 22—27 February 2005

5 小 结

(1) 珠江口地区持续性雾集中出现在 10 月至次年 5 月,尤其是春季出现概率最大。持续性雾的年际变化较大,20 世纪 90 年代以前呈减少趋势,20 世纪 90 年代后呈增加趋势。

(2) 出现持续性雾的环流形势可分为 3 种:A 型——低压或倒槽的东侧,近地层偏南风输送南海的暖湿空气到珠江口形成平流雾;B 型——高压的底部或后部,近地层偏东风输送西太平洋暖湿空气

到珠江口形成平流雾;C 型——均压场,近地层没有明显暖湿空气输送,层结稳定形成辐射雾。后期,北方干冷空气南下,或是西边低压槽东移使得珠江口地区的偏南风风速过大,促使雾消散。

(3) A、B 型环流相继出现时会引发严重的雾事件。近地层暖湿平流的输入、浅层抬升、水汽弱辐合以及对流层中下部的“干暖盖”有利于饱和湿空气的凝结和逆温层的维持,是雾形成和维持的物理机制,而伴随偏北风南下的干冷平流是雾消散的主要因素。

参考文献

- [1] 李子华. 中国近 40 年来的雾研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-623.
- [2] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥. 我国雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 220-230.
- [3] 向波, 刘德, 廖代强. 重庆雾的特点及其变化分析[J]. 气象, 2003, 29(2): 48-52.
- [4] 郑玉萍, 李景林. 乌鲁木齐近 31 年雾天气气候特征分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 22-28.
- [5] 张宗灏, 王咏青. 鲁西南雾的统计特征[J]. 气象, 2007, 33(11): 82-86.
- [6] 张颀, 冯建设. 济青高速公路大雾天气气候特征及其影响[J]. 气象, 2005, 31(2): 70-73.
- [7] 吴兑, 赵博, 邓雪娇, 等. 南岭山地高速公路雾区恶劣能见度研究[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 649-654.
- [8] 周亚军, 刘燕. 广州市雾与霾的天气和气候特征[J]. 广东气象, 2008, 30(2): 16-18.
- [9] 张朝锋. 粤东海区海雾的气候特征分析[J]. 广东气象, 2002, 2: 20-21.
- [10] 常军, 黄玉超, 李素萍, 等. 河南省雾的时空分布特征及 500hPa 环流特点分析[J]. 气象, 2007, 33(6): 83-87.
- [11] 黄培强, 王伟民, 魏阳春. 芜湖地区持续性雾的特征研究[J]. 气象科学, 2000, 20(4): 494-502.
- [12] 毛冬艳, 杨贵名. 华北平原雾发生的气象条件[J]. 气象, 2006, 32(1): 78-83.
- [13] 张燕光. 华南沿海春季雾的分析和预报[J]. 气象, 1999, 25(2): 53-55.
- [14] 郭秀英, 糜若夫, 谢炯光. 华南沿海春季海雾与天气型关系的统计分析及预报[J]. 广东气象, 1991, 1: 25-27.
- [15] 何云开, 黄健, 贺志刚, 等. 南海北部近岸春季海雾的年际变化[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(5): 6-11.
- [16] 万齐林, 吴兑, 叶燕强. 南岭局地小地形背风坡增雾作用的分析[J]. 高原气象, 2004, 23(5): 709-713.
- [17] 钟加杰, 刘峰. 华南春季一次锋面雾的边界层特征[J]. 广东气象, 2000, 1: 2-4.
- [18] 宋润田, 孙俊廉. 冷雾的边界层温湿层结特征[J]. 气象, 2000, 26(1): 43-45.
- [19] 江玉华, 王强, 王正兴, 等. 一次平流辐射雾的边界层特征及雾水离子组分研究[J]. 气象, 2009, 35(2): 19-28.
- [20] 屈凤秋, 刘寿东, 易燕明, 等. 一次华南海雾过程的观测分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(5): 490-496.
- [21] 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.
- [22] 康志明, 尤红, 郭文华, 等. 2004 年冬季华北平原持续雾天气的诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(12): 51-56.
- [23] 何立富, 李峰, 李泽椿. 华北平原一次持续性雾过程的动力和热力特征[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 160-168.
- [24] 孙连强, 柳淑萍, 高松影, 等. 丹东附近海域海雾产生的条件及天气学预报方法[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 25-28.
- [25] 濮梅娟, 张国正, 严文莲, 等. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(6): 776-783.
- [26] 谢小敏, 刘敏. 深圳一次罕见连续雾天气的特点及成因[J]. 广东气象, 2006, 2: 30-32.
- [27] 黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 茂名地区海雾的微物理结构特征[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 17-23.
- [28] 吴兑. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 476-485.
- [29] 周小刚, 王强, 邓北胜, 等. 北京市一次雾过程边界层结构的模拟研究[J]. 气象学报, 2004, 62(4): 468-475.
- [30] Fan Qi, Wang Anyu, Fan Shaojia, Numerical Experiment Research of a Marine Fog Event in the Pearl River Estuary Region[J]. Acta Meteor Sinica, 2005, 19(2): 231-240.
- [31] 樊琦, 吴兑, 范绍佳, 等. 广州地区冬季一次雾的三维数值模拟研究[J]. 中山大学学报, 2003, 42(1): 83-86.
- [32] 吴洪, 柳崇健, 邵洁, 等. 北京地区雾形成的分析和预报[J]. 应用气象学报, 2000, 11(1): 123-127.
- [33] 吴兑, 邓雪娇, 游积平, 等. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统[J]. 热带气象学报, 2006, 22(5): 417-422.
- [34] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-15.
- [35] 田华, 王亚伟. 京津塘高速公路雾气候特征与气象条件分析[J]. 气象, 2008, 34(1): 66-77.