

长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征^{*}

郑向东^{**} 陈尊裕 崔宏 秦瑜 陈鲁言 郑永光 李毓湘

(中国气象科学研究院, 北京 100081; 香港理工大学土木工程系, 香港; 北京大学大气科学系, 北京 100871)

摘要 介绍分析了 2001 年 3 月 3 日~4 月 13 日浙江临安臭氧探空观测 5 km 以下臭氧垂直分布特征. 结果表明, 臭氧浓度垂直分布与湿球位温、风场有密切的关系. 臭氧浓度在 2 km 以下变化幅度很大, 明显的东风分量伴随臭氧高值. 5 km 以下臭氧垂直分布可以分为峰值型、均匀型、分层结构型、低空污染型和线性增长型 5 个基本类型. 此外, 还分析了 3 种情形下区域尺度输送对低空污染型臭氧分布的影响.

关键词 临安 低空臭氧垂直分布 污染物输送

随着长江三角洲地区经济的快速发展, 其空气质量变化也得到了关注. 为研究该地区空气质量的状况, 在能够代表该地区大气背景的站点开展观测研究是必要的. 浙江临安便是这样的站点之一, 它位于杭州西北约 50 km 的丘陵地区. 周秀骥等人^[1]在该地开展了大气痕量成分观测和研究工作; Luo 等人^[2]利用该点的观测数据并结合其他站点观测结果, 研究了稳定天气条件下中国区域性的地面臭氧污染机制, 并讨论了 NO_x 和 VOC_s 等痕量气体对臭氧的贡献; 1999~2000 年间, 通过对该地近地面连续性观测, Wang 等人^[3]分析了近地面臭氧的季节性变化及其与 NO_y , SO_2 , CO 的比率关系; Vincent 等人^[4]根据同一数据源的研究指出, 临安近地面臭氧增加常发生在春末夏初, 并与自由大气向下输送、局地光化学污染和

区域尺度的城市烟羽输送等都有关系. 最近, 综合临安和长江三角洲地区其他站点的近地面观测结果, 王会祥等人^[5]指出该地区大气痕量污染气体已具有城市型污染的特征.

虽然长江三角洲地区的地面大气污染研究已经开展了很多, 但对该地区的臭氧垂直分布状况仍了解较少. 2001 年春季, 中国气象科学研究院、北京大学和香港理工大学合作, 在临安、香港和昆明同步进行了近 1 个半月的臭氧探空观测实验, 获取了对流层臭氧及相关气象要素的一些初步观测结果^[6,7]. 本文主要分析临安从地面到 5 km 高度范围臭氧垂直分布变化的一些基本特征, 根据文献[3,4], 本文把体积混合比浓度高于 60×10^{-9} 定为临安地区春季臭氧污染的阈值, 并结合三维后向轨迹模式研究区域输送对

2003-05-21 收稿, 2004-07-22 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金项目(批准号: 49975026)、香港理工大学研究经费项目(批准号: G-T189)和香港研究基金联合会(RGC)(编号: PolyU 5048/02E)共同资助

^{**} E-mail: zhengxd@cma.gov.cn

具有明显的污染型臭氧垂直分布特征的个例影响。

1 仪器与观测

探空观测中, 应用 Vaisala 公司的电化学反应池 (ECC)6A 型臭氧探空仪和 GPS 气象探空仪分别对臭氧和气象要素进行观测. ECC6A 型臭氧探空仪在 5 km 以下的测量精度在 $\pm 1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$, 相对湿度的测量精度在 $\pm 2\%$ 左右, GPS 风速测量精度为 0.1 m/s 左右.

2001 年 2 月 21 日, 在浙江临安区域大气本底观测站 (119.75°E, 30.30°N, 134 m a.s.l) 进行了试探性的观测, 正式观测于 2001 年 3 月 3 日开始, 4 月 13 日结束. 其中 3 月 3~13 日、3 月 29 日~4 月 1 日每天进行一次探空观测; 其他日期基本上是隔一天观测一次. 准备工作严格按照操作规程进行, 没有发现异常的仪器参数变化, 保证了数据的可靠性. 探空仪在对流层的升速平均为 5~6.51 m/s, 即对流层臭氧垂直分布的有效分辨率在 50~60 m 之间. 探空仪从地面飞到 5 km 高度这一时间内, 与临安站点的水平距离在 15 km 之内.

2 结果分析

2.1 总体观测结果

图 1(a) 是 2001 年 3 月 3 日~4 月 13 日 5 km 以下臭氧体积混合比浓度垂直分布随时间变化的剖面图. 从图 1(a) 可见, 3 月 3~10 日臭氧体积混合比浓度基本稳定在 $50 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$, 个别时次出现了 40×10^{-9} 的低值 (如 3 月 9 日前后); 11~13 日 2.5 km 以下的臭氧体积混合比浓度接近 70×10^{-9} ; 15 日以后出现了整个观测期间近地层臭氧的最低值; 27~31 日 5 km 以下臭氧浓度均匀地维持在 50×10^{-9} 左右, 而 29 日在 3~4.5 km 附近又增加到 $60 \times 10^{-9} \sim 70 \times 10^{-9}$; 4 月 1~7 日近地面的臭氧体积混合比浓度值为 70×10^{-9} 左右, 9 日以后降低到 50×10^{-9} 附近.

图 1(b) 显示了根据气象探空资料计算得到的 5 km 以下湿球位温的垂直分布. 湿球位温的相对高低值可以指示冷、暖锋的活动以及相应气团的垂直运动. 12 以上 (含 12) 湿球位温随时间的变化表明, 暖锋过境出现在 3 月 15~24 日与 4 月 9 日前后两个阶段,

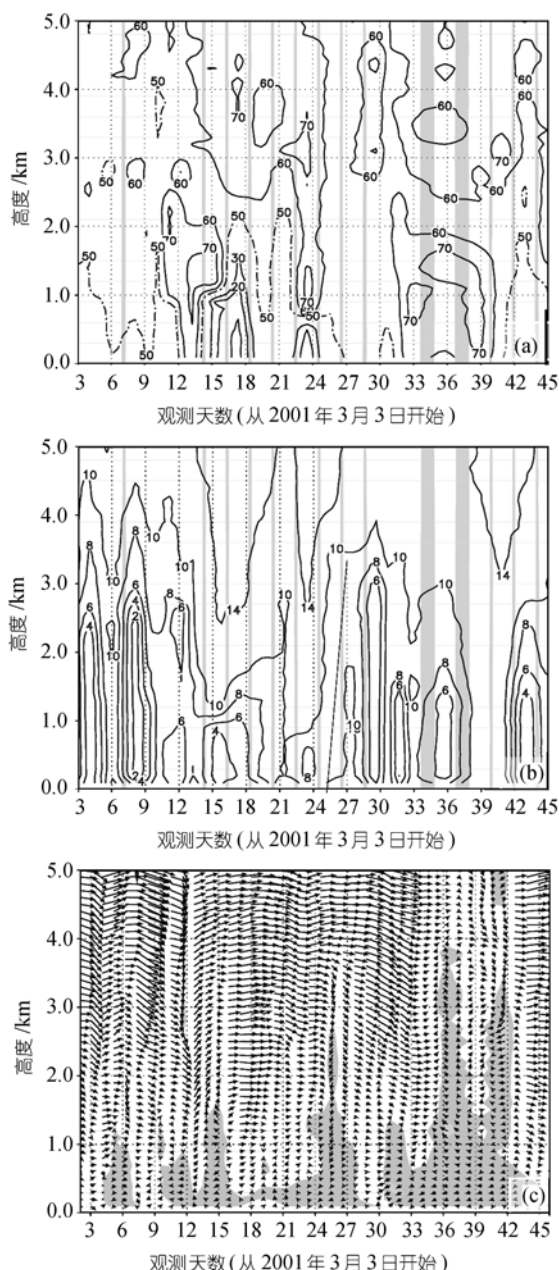


图 1 2001 年春季临安地区 5 km 以下臭氧探空观测总体结果状况

(a) 臭氧体积混合比浓度的垂直分布随时间变化剖面图, 点线代表 50×10^{-9} 以下的臭氧浓度的分布变化, 条形阴影部分代表缺测; (b) 湿球位温的垂直分布随时间变化的剖面图, 条形阴影部分代表缺测; (c) 风矢量的垂直分布随时间的变化, 图中阴影部分表示含有东风分量

在此期间, 2 km 以上的湿球位温上升. 近地面高度层中低于 4 (含 4 在内) 的湿球位温低值的变化则表明, 有 4 个冷锋过境, 分别出现在 3 月 3~5 日, 8~9 日,

15 日和 4 月 11 日. 3 月 31 日前后似乎有一冷锋过境, 但过程不是很明显. 10 的湿球位温与臭氧体积混合比浓度值为 60×10^{-9} 垂直分布随时间变化的趋势比较接近.

图 1(c) 给出的是风矢量垂直分布随时间的变化. 从图 1(c) 可以看出, 临安地区春季风速垂直分布随高度有很大的变化. 3 月上旬表现为随着高度增加而逐渐加强的西北(或西南)急流特征. 这种急流分布与高空 400~200 hPa 东亚地区春季两股强大的急流汇合是一致的^[2]. 在这种情况下, 5 km 以下对应臭氧浓度比较低, 很少超过 60×10^{-9} (图 1(a)), 具有春季臭氧垂直分布的背景特征. 整个观测期间, 当近地面高度层出现持续的东风分量时, 臭氧浓度明显上升. 4 月 1 日(第 33 天)~4 月 7 日(第 40 天), 5 km 以下的风速变化比较小, 为典型的稳定天气, 在这种情况下, 5 km 以下的臭氧出现了明显的高值.

2.2 5 km 以下臭氧垂直分布的基本类型

根据 27 次臭氧探空所得的臭氧廓线特征, 结合位温、比湿、风场等要素的垂直变化, 把 5 km 以下的臭氧垂直分布分成几个类型. 在分类过程中, 将位温的垂直分布变化作为判断近地面边界层热力结构的重要依据. 因为受下垫面热力的驱动, 位温在近地面层随高度没有明显变化, 表明边界层处于均匀对流混合状态; 而当位温随高度明显增加时, 则意味着边界层趋于稳定.

(1) 峰值型 该类型指的是在晴天边界层混合层顶附近臭氧浓度出现峰值现象, 其值比其他高度要高 $5 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 左右. 图 2(a) 给出了这种分布类型的个例. 从图 2(a) 可以看出, 3 月 4 日 2 km 以下位温变化很小, 代表了热力驱动下对流混合层高度范围. 风向切变出现在 1.5 km 以下, 由 SW 扇区向 NW 扇区转变; 风速的变化主要是在 1 km 附近. 太阳辐射加热了下垫面和近地面大气, 产生对流并使气团充分混合, 形成对流混合层, 并在混合层顶附近形成逆温层. 对流混合把近地面包括水汽和臭氧在内的污染物向上输送, 但受逆温层阻挡, 上升的气团在逆温层附近扩散减弱, 臭氧在此富集并导致其浓度出现峰值现象. 与此类型比较接近的有 3 月 8, 12, 21, 29

日以及 4 月 4 和 9 日.

(2) 均匀型 该类型主要出现在有云、边界层对流混合比较弱的天气条件. 这种类型分布有两种情况: (1) 从地面向上高度很低的混合层内, 臭氧浓度呈近似线性增加到某一高度后基本保持不变, 见 3 月 5 日的典型个例(图 2(b)); (2) 从地面到 5 km 左右臭氧浓度分布变化相对较小, 仅在逆温层附近有 $3 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-9}$ 的变化(图 2(c)).

在 3 月 5 日的个例中, 臭氧浓度从地面 40×10^{-9} 增加到 0.8 km 附近的 60×10^{-9} 后便稳定下来. 从位温垂直分布可以看出, 近地面混合层高度约 0.5 km, 对应几乎是静风状态. 从比湿分布可以看出, 近地面混合层湿度递减率比较小; 4 km 以上有云存在, 有效地阻止了太阳辐射加热地面, 从而未能形成类似于图 2(a) 那样较强的混合层. 最靠近地面层的臭氧受到沉降和化学反应的影响, 浓度降低. 静风状态也抑制了外来臭氧补充, 因而近地面高度范围内臭氧浓度较低. 与 3 月 5 日类型比较接近的有 3 月 3, 19, 25, 30 日和 4 月 13 日.

与 3 月 6 日个例比较接近的有 3 月 9, 10 和 27 日. 这种类型与边界层热力结构有着密切的联系. 从图 2(c) 可以看出, 3 月 6 日近地面对流混合强度有所增加, 使得混合层内的臭氧浓度分布比较均匀, 但由于高云的存在(比湿显示云在 4.5 km 以上), 对流混合不足以强到把近地层气团向上输送到逆温层高度, 导致臭氧富集现象. 在最靠近地面的高度层, 臭氧浓度也不象 3 月 5 日接近静风状态下出现较大的梯度变化, 这可能是 NE 扇区平流输送的结果.

(3) 分层结构型 这种类型分布的特征是低空臭氧浓度和气象要素的垂直分布都有明显的分层现象. 以 3 月 15 日为例(图 2(d)), 臭氧、位温和比湿在 0.8 km 以下很低, 但在此高度以上有限范围内发生了急剧的变化: 臭氧从 22×10^{-9} 上升到 70×10^{-9} 以上, 为典型的污染型气团. 这种分层结构在风场垂直分布中也比较明显. 在 3 月 15 日的个例中, 近地面层内以 NEE 扇区的风为主, 而在此高度以上风向由 SE 向 SW 扇区转换. 显然, 有不同气流在同一地点上空但不同的高度层相遇. 这种分布类型在 27 次观测中仅出现在 3 月 11 日, 15 和 23 日, 其中以 3 月 15, 23 日

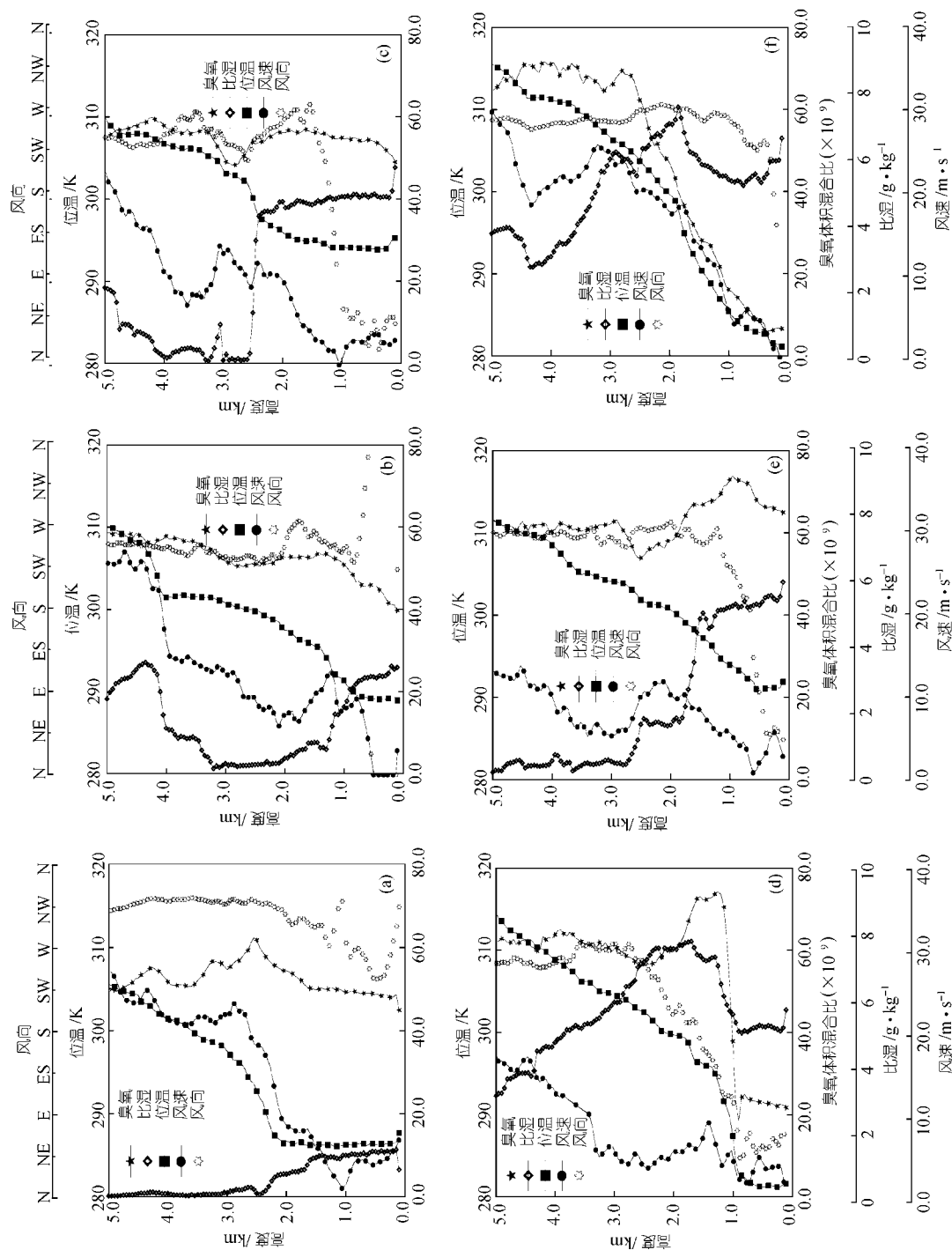


图 2 5 km 以下臭氧浓度垂直分布的 5 种类型

(a) 峰值型(3月4日); (b) 均匀型(第二种情况, 3月6日); (c) 均匀型(第一种情况, 3月5日); (d) 垂直分层型(3月15日);

(e) 低空污染型(4月1日); (f) 线性增长型(3月17日)

最为显著. 分层结构型也具有前面描述的峰值廓线特征, 但不同的是前者发生在西风控制下的晴朗低湿度天气条件下, 而分层结构型主要发生在东风或东南风控制下的高湿度天气里.

(4) 低空污染型 这种分布是近地面边界层内出现明显臭氧污染现象, 浓度值基本上超过了地面观测所设置的 60×10^{-9} 的标准. 低空污染型的臭氧分布与稳定的天气条件有关. 观测期间, 有两个阶段出现了这种类型的分布, 一次是 3 月 12~13 日, 另一次是 4 月 1~7 日. 前者持续时间比较短, 而后者持续了近一周. 典型的分布个例见图 2(e). 从图 2(e) 中可以看出, 边界层高度很低, 几乎在 0.5 km 以下, 热力驱动的对流混合状态不明显. 低空主导风向是 NE, 风速很小, 比湿在 1.5 km 以下超过了 4 g/kg.

(5) 线性增长型 这种类型分布的主要特征是臭氧浓度从近地面 10×10^{-9} 以下低值随高度几乎呈线性上升, 到一定高度后出现相对稳定的分布. 这种分布出现在雨天, 在观测期间仅两次, 分别是 2 月 21 日和 3 月 17 日(图 2(f)). 在这种情况下, 边界层的动力、热力垂直结构不是很明显, 靠近地面的大气处于稳定状态, 位温、臭氧浓度随高度的变化趋势基本一致. 降水和低空积雨云的存在是该类型出现的主要天气特征. 从图 2(f) 比湿分布可以看出, 3 km 以下几乎被云覆盖.

类型的划分主要是从有限的观测数据资料来反映低空臭氧垂直分布的一些状况. 由于样本个数少, 上述类型的划分可能存在统计上的不稳定性. 另外, 由于划分是根据主观判断臭氧和气象要素的垂直廓线的分布状况来确定的, 当臭氧具有多个类型的特征时, 也给划分带来困难. 譬如, 4 月 1 日的观测结果(图 2(e))可以归为单一峰值型, 但从近地面层臭氧浓度超过 60×10^{-9} 以及混合层高度比较低的特点来看, 这种分布也包含了明显的污染性特征. 总的来说, 低空臭氧垂直分布类型变化与气象要素有着紧密的联系. 从上述分类也可以看出, 均匀型、低空污染型和峰值型出现的比例大, 具有一定的统计意义, 而其他

的类型所占的比例相对较小.

2.3 区域输送与低空污染型臭氧的垂直分布

近地面臭氧污染是空气质量研究的一个重要内容, 臭氧和其他空气污染物跨区域输送也一直很受重视. Cox 等人^[8]注意到英国的近地面臭氧污染与来自欧洲大陆的气团远输送有着密切的关系. Parrish 等人^[9,10]指出在距北美洲下风向 1500 km 处和 3000 km 的北大西洋的偏僻海岛上观测到的污染臭氧与来自美洲的气团输送也有密切的关系, 且与一氧化碳浓度的变化趋势接近. 可见, 远距离输送对臭氧污染有重要的影响. 输送可以在两个方面对臭氧污染产生影响: 1) 臭氧前体物被输送到观测点后, 通过现场光化学反应产生污染性臭氧; 2) 在输送过程中臭氧前体物通过光化学反应产生臭氧, 然后被输送到观测点. 哪一方面起主导作用主要取决于输送中光化学反应过程, 但都与输送路径有关. 在这个前提下, 可以不考虑臭氧和相关前体物的光化学生命, 利用后向输送轨迹并结合具体的观测结果分析低空污染型臭氧浓度的变化.

本文利用 Yamazaki 等人^[11]发展的三维后向轨迹模式来计算区域气团输送过程. 气象数据采用的是 NCEP/NCAR 再分析数据资料¹⁾, 其水平分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直方向分为 26 层. 该模式曾用于分析不同的天气条件下西宁对流层的臭氧垂直分布的动力变化机制^[12,13], 本文利用此模式分析以下 3 个个例.

(1) 3 月 12 和 13 日 3 月 12~13 日为晴朗稳定天气. 12 日 14:00 近地面气压高达 1098 hPa, 13 日仍维持在 1071 hPa, 满足了局地光化学反应条件. 12 13 日位温、比湿、臭氧和风速的垂直分布观测结果见图 3(a). 13 日位温在 1.5~2.6 km 之间, 随高度变化的斜率明显高于 12 日, 说明其大气稳定度也高于 12 日. 逆温层高度在 12 日为 2.6 km 左右(在 1.0 km 高度上有比较弱的逆温), 但 13 日仅在 1.4 km 左右. 稳定层高度降低抑制了近地面边界层内的物质向自由大气扩散. 这两天的比湿垂直梯度变化比较小, 而

1) <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>

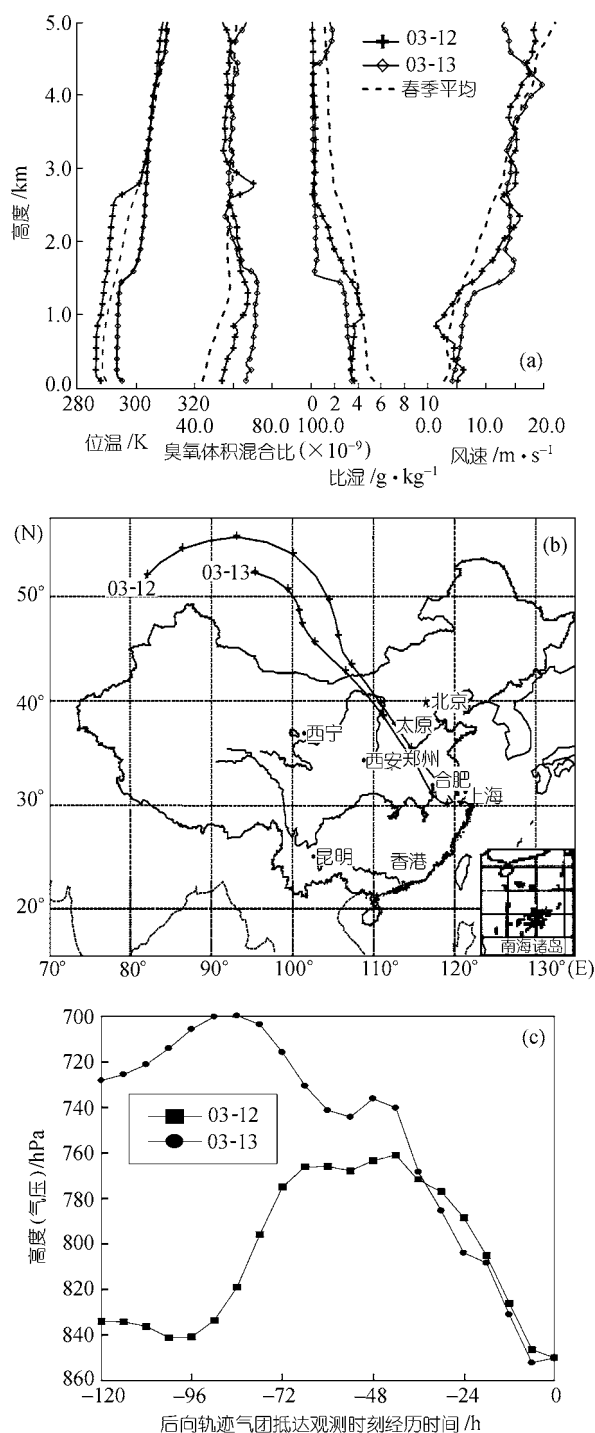


图 3 3月12~13日低空臭氧污染个例分析

(a) 3月12和13日位温、臭氧浓度、比湿和风速的垂直分布变化及其与观测期间的平均结果比较; (b) 3月12和13日850 hPa 5天后向轨迹的水平分布; (c) 3月12和13日850 hPa 5天后向轨迹的垂直分布

且明显低于平均值, 具有干空气的特征. 在 0.6~1.8 km高度层 13 日的风速高于 12 日的测值, 也高于平均风速. 两天的位温和风速的垂直分布变化表明气团有下沉运动, 这种“下沉”导致了 13 日位温升高(空气压缩温度上升)和风速在 0.6~1.8 km增加(能量由势能向动能的转换). 在 0.4 km以下, 13 日的风速却小于 12 日的, 在这种动力条件下, 臭氧前体物在边界层内不容易扩散, 为近地面光化学生成臭氧提供反应物, 导致 13 日 1.6 km以下臭氧浓度值超过 65×10^{-9} ; 在 2.1 km以下, 臭氧浓度值高于整个观测平均值, 近地面边界层超过了 60×10^{-9} .

图 3(b)显示的是 12 和 13 日近地面 850 hPa 高度气流输送轨迹. 从轨迹的水平分布可以看出, 3 月 12 和 13 日 850 hPa 高度气团输送路径在抵达站点前 3 d 都来自 NNW 方向, 途经太原、郑州和合肥等地. 12 和 13 日气团轨迹在垂直方向上, 都有比较明显的下沉过程(图 3(c)), 这与位温和风速的分析结果一致. 由此可见, 来自北方的气流在带来了晴朗、稳定天气的同时也有可能把沿途城市排放的臭氧前体物带到观测地区, 随着稳定天气的建立富集在低空对流层, 并通过局地光化学反应产生污染性臭氧.

(2) 4月1, 4和7日 从3月31日开始, 来自中国北方的天气系统受到西太平洋上准静止锋的阻挡, 缓慢地移向东南并逐步控制了长江三角洲地区, 并于4月3日东移出境; 接着4月4日中心位于黄海上空的高压系统又向西南方向延伸, 长江三角洲地区再次被稳定天气系统控制, 到4月8日才结束, 这为持续性的臭氧污染提供了天气条件. 在此期间, 临安地区低层以微弱的东北风为主(图1(d)). 从4月1, 4和7日观测结果可以看出(图4(a)), 风速在 0.7 km 以上均低于平均值, 表明低空处在稳定状况; 这 3 天的臭氧在 2 km 以下都超过了平均值. 4月4日的低比湿显示气团来自北方地区, 但其他两次均是高臭氧、水汽分布, 表现出典型的臭氧污染特征.

4月1~7日 925 hPa 高度的后向轨迹分布见图 4(b). 4月2和3日气流分别从西南和东南两个方向抵达临安. 4日轨迹的最终来源可追溯到中国东北地区; 而 5~7 的轨迹则分别从东北以及东南方向抵达观

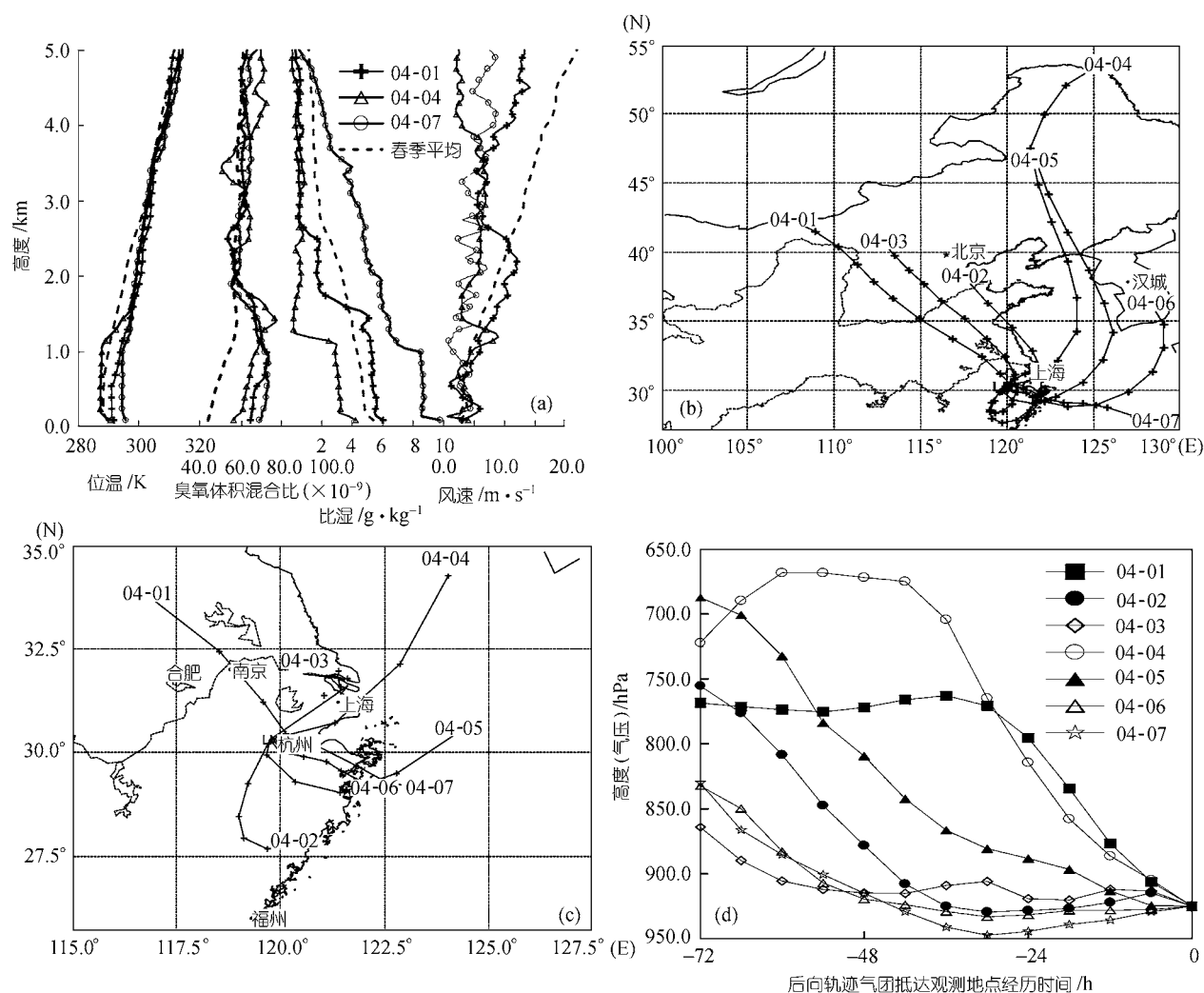


图 4 4月1~7日低空臭氧污染个例分析

(a) 4月1, 4和7日位温、臭氧浓度、比湿和风速的垂直分布变化及其与观测期间的平均结果的比较; (b) 4月1~7日925 hPa 3天后向轨迹的水平分布; (c) 4月1~7日925 hPa后向轨迹靠近观测点时的水平分布; (d) 4月1~7日轨迹的垂直分布

测点上空, 6日的轨迹来自于韩国(图4(b)); 而从靠近观测点的轨迹来看, 气团在抵达观测点上空时都经过了长江三角洲地区(图4(c)), 4月3~7日特别明显。从轨迹的垂直分布来看(图4(d)), 1, 4和5日的气团在轨迹结束30~36 h明显有下沉过程, 这与高压天气系统的移动有关。1和4日的气团在较长时间的下沉过程更象一次弱的冷锋过境; 而2~3和5~7日下沉运动逐渐趋缓, 6~7日在轨迹结束前的30 h内基本上是缓慢的平流输送, 甚至从更低的高度略微上升。无论气流如何演变, 所有气流抵达临安前一天都集中分布

在长江三角洲地区, 这表明这一段时间临安低空污染性臭氧浓度的增强是长江三角洲地区一个区域性现象。该地区城市群羽缓慢扩散, 已影响到背景地点的臭氧浓度分布。同时期的近地面(臭氧、一氧化碳)观测也验证了这一点, 高浓度的臭氧和一氧化碳呈现明显的正相关。

(3) 3月15日 3月15日的臭氧分布特征表现为低空污染型臭氧被抬升。臭氧污染主要分布在1~2.5 km之间(图2(d))。从水平轨迹的分布可以看出(图5(a)), 925和850 hPa高度气团轨迹分别来自临安北

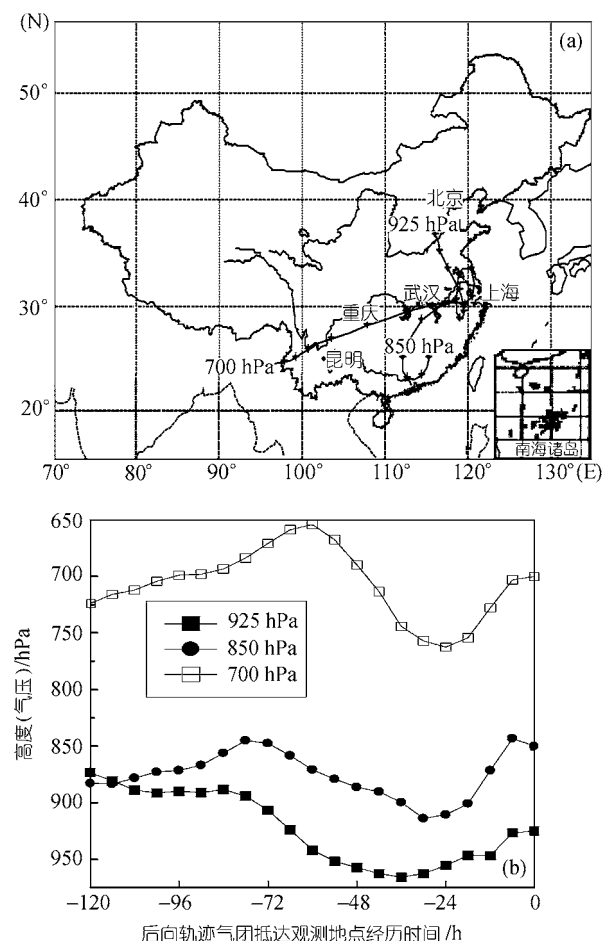


图5 3月15日臭氧垂直分布分层结构的动力输送过程分析
(a) 3月15日925、850和700 hPa 5天后向轨迹的水平分布; (b) 3月15日925、850和700 hPa 5天后向轨迹的垂直分布

部和珠江三角洲地区, 而700 hPa(约在3.0 km左右)上则是来自缅甸、云南等地。近地面层气团输送来自北方; 850 hPa的气团则起源于珠江三角洲地区。这里是中国经济发展的另一个重要地区, 有关观测研究表明这里的空气污染已接近了典型大、中城市的水平^[14,15]。空气污染物往北输送并被抬升, 在临安与来自北方的气流相遇, 出现了图2(d)中的臭氧垂直分布分层现象。这种分层现象在比湿垂直分布上也较明显(图2(d))。700 hPa高度上臭氧浓度在 60×10^{-9} 左右, 接近平均观测结果。

3 结论

根据2001年春季在临安进行了近1个半月、共

27次臭氧探空所获取的观测数据, 分析了5 km以下低空大气臭氧垂直分布特征。研究工作得出了以下的结论:

(1) 臭氧垂直分布随时间的变化与气象要素有着密切的联系。较大幅度的臭氧分布变化主要出现在2 km以下, 并且受天气过程的影响很明显。在弱风或近低空出现东风分量时, 低层的臭氧浓度明显上升。

(2) 低空臭氧垂直分布变化受大气热力、动力因素控制, 其中热力因素的作用在边界层内更为显著。低空臭氧垂直廓线可分为5种类型, 其中次峰值型、边界层均匀型和低空污染型所占的比例较大, 这在一定程度上反映了春季边界层臭氧垂直分布的基本特征。

(3) 区域尺度输送显著地影响了低空臭氧的垂直分布。短时间内边界层污染臭氧的形成与来自北方气团的输送和晴天下沉运动有关。持续长达一周边界层内的臭氧污染与长江三角洲区域性的工业城市群烟羽平流输送有联系; 而来自珠江三角洲地区的污染物向北输送可导致临安地区1 km以上高度产生臭氧污染现象。

探空观测仅能提供时、空分辨率有限的信息, 限制了对地面边界层结构与臭氧垂直分布更深入的研究。但作为一种重要的痕量气体, 臭氧几乎参与大气光化学反应的全过程, 它在边界层内垂直分布的变化在一定程度上反映了大气污染的垂直状况。本文分析是在背景地区获取的观测数据, 受大城市污染排放的直接影响很小, 这在一定程度上也代表了长江三角洲地区春季低空臭氧垂直分布状况。

致谢 周秀骥院士提出建议; 浙江省气象局临安区域大气本底站提供现场观测条件; 香港理工大学王韬博士提供地面连续观测资料供参考。

参 考 文 献

- 1 周秀骥, 罗超, 丁国安, 等. 中国东部地区大气臭氧及前体物本底变化规律的初步研究. 中国科学, B辑, 1994, 24(12): 1323~1330
- 2 Luo C, John J C, Zhou X, et al. A nonurban ozone air pollution episode over eastern China: Observations and model simulations. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 1889~1908 [DOI]

- 3 Wang T, Cheung V T F, Li Y S, et al. Ozone and related gaseous pollutants in the boundary layer of eastern China: Overview of the recent measurements at a rural site. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 2373~2376[DOI]
- 4 Vincent T F C, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 4947~4958[DOI]
- 5 王会祥, 唐效炎, 王木林, 等. 长江三角洲痕量气态污染物的时空分布特征. *中国科学, D辑*, 2003, 33(2): 114~118
[摘要] [PDF]
- 6 Chan C Y, Chan L Y, Chang W L, et al. Characteristics of tropospheric ozone profile and implications on the origin of ozone over subtropical China in spring 2001. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D20): 10. 1029/2003JD003427
- 7 Chan C Y, Chan L Y, Cui H, et al. Origin of the springtime tropospheric ozone maximum over East China at Linan in year 2001. *Tellus*, 2003, 55: 982~992[DOI]
- 8 Cox R A, Eggleton A, Derwent E J, et al. Long-range transport of photochemical ozone in north-western Europe. *Nature*, 1975, 255: 118~121
- 9 Parrish D D, Holloway J S, Trainer M, et al. Export of North American ozone pollution to the North Atlantic Ocean. *Science*, 1993, 259: 1436~1439
- 10 Parrish D D, Trainer M, Holloway J S, et al. Relationships between ozone and carbon monoxide at surface sites in the North Atlantic region. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 13357~13376[DOI]
- 11 Yamazaki K, Okada, Iwasaka Y. Where do aerosol particles in the Antarctic upper troposphere come from? *Journal of Meteorological Society of Japan*, 1989, 67: 889~906
- 12 郑向东, 周秀骥, 秦瑜, 等. 一次对流层异常臭氧次峰的观测研究及其动力输送过程的分析. *气象学报*, 2003, 61(33): 257~266
- 13 Zheng X D, Zhou X J, Tang J, et al. A meteorological analysis on a low tropospheric ozone event over Xining, North western of China on 26~27 July, 1996. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 261~271[DOI]
- 14 Chan C Y, Chan L Y. The effect of meteorology and air pollutant transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 20707~20719[DOI]
- 15 Wang X M, Sheng G Y, Fu G M, et al. Urban ground levels of BTEX at three cities in the Pearl River Delta region. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 5141~5148[DOI]