

何清, 杨兴华, 梁云, 等. 冬季乌鲁木齐市低层大气  $O_3$  垂直分布观测的个例分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 126-131.

# 冬季乌鲁木齐市低层大气 $O_3$ 垂直分布观测的个例分析<sup>\*1</sup>

何 清 杨兴华 梁 云 霍 文 艾力·买买提明 刘 强

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

**提 要:** 为了揭示乌鲁木齐冬季边界层  $O_3$  垂直分布特征, 利用系留气艇于2008年1月11—13日在乌鲁木齐市进行了边界层  $O_3$  观测试验。利用本次观测试验的数据并结合相关气象资料, 对观测期间边界层  $O_3$  的垂直分布特征及其影响因子进行了分析。结果表明: 白天近地面 500~800 m 高度以下  $O_3$  浓度较低, 该高度以上存在  $O_3$  高浓度分布区, 夜间整个观测高度范围内  $O_3$  浓度均较低;  $O_3$  浓度分布与太阳辐射、温度层结、风、相对湿度等因子密切相关,  $O_3$  高浓度分布区出现在逆温层底以上, 且  $O_3$  浓度与相对湿度呈显著的反相关分布; 近地面的  $NO_x$  对  $O_3$  浓度有着重要影响。由此表明乌鲁木齐冬季低层大气  $O_3$  的分布在各种因素的影响下具有明显的时空变化。

**关键词:** 边界层  $O_3$ , 垂直结构, 气象因子

## A Case Analysis on Lower Atmospheric Ozone Vertical Profiles Observed in Winter over Urumqi Urban Area

HE Qing YANG Xinghua LIANG Yun HUO Wen Aili MAIMAITIMING LIU Qiang

Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

**Abstract:** In order to reveal the characteristics of the boundary layer ozone vertical profiles in winter in Urumqi, the observation experiment with tethered balloon has been carried out from 11 to 13 January 2008. Based on the observation experiment data and some related data, the vertical distribution characters of ozone concentration and the relationship with meteorological factors were studied. The results showed that: The ozone concentration is lower below 500—800 m during the daytime and the distribution area of high concentration ozone appears over this height. However, the ozone concentration is lower in the range of whole observed height at night. There existed a close relationship between the ozone concentration and the meteorological factors including solar radiation, temperature stratification, wind and relative humidity. The distribution area of high concentration ozone exists over the inversion base, and there is a significant inverse correlation between the ozone concentration and the relative humidity. The nitrogen oxides in the near surface has an important influence on ozone concentration. The above facts obtained indicate that the ozone in the lower troposphere has significant temporal and spatial variations in winter in Urumqi, which results from the joint effects of various factors.

**Key words:** boundary layer ozone, vertical structure, meteorological factors

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)2007-6-8);国家自然科学基金项目(40775019);新疆维吾尔自治区科技攻关项目(200833119);中央级公益性科研院所科研业务费专项资金项目(IDM200602);新疆气象局项目(C2008002)共同资助

2008年12月1日收稿; 2009年12月20日收修定稿

第一作者:何清,主要从事沙漠气象研究. Email:qinghe@idm.cn

## 引言

空气污染对气候变化及人类健康有着重要影响,而空气污染中的近地面臭氧污染已成为人们关注的焦点问题<sup>[1-3]</sup>。当前,O<sub>3</sub>已是城市大气环境监测的一项重要内容,也是环境研究的前沿问题之一。

近十多年来,我国在经济发达的长三角、珠三角和京津冀等地区开展了较多的近地面 O<sub>3</sub> 及其前体物或相关污染物的观测研究工作,对城市边界层 O<sub>3</sub> 的分布及变化特征有了一定的认识<sup>[4-9]</sup>。同时,也认识到光化学反应是大气臭氧的主要来源之一,这也意味着人为活动将对臭氧浓度产生重要的影响<sup>[10-12]</sup>。独特的地形、逐渐增强的源排放、复杂的城市冠层和特殊的气象条件,都会使得大气污染越加严重<sup>[13-15]</sup>,而乌鲁木齐市具备了上述所有条件,冬季大气污染十分严重,这种条件下边界层 O<sub>3</sub> 的分布应该有一定的独特性。但是迄今,对乌鲁木齐冬季低空大气 O<sub>3</sub> 垂直分布的研究尚少。为了揭示独特城市冬季低空大气 O<sub>3</sub> 的分布特点,利用 2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐市展览馆院内系留气艇观测的边界层 O<sub>3</sub> 分布数据,结合相关资料对观测期间乌鲁木齐市低层大气 O<sub>3</sub> 垂直分布特征及相关影响因素进行了初步分析。

## 1 观测与数据处理

本次观测试验使用芬兰 Vaisala 公司生产的电化学反应池(ECC)6A型臭氧探空仪和 II S111型气象探空仪分别对边界层 O<sub>3</sub>、气温、相对湿度、气压和风等要素进行了观测。详细的仪器性能参数见文献<sup>[16]</sup>。O<sub>3</sub>观测原理是利用 O<sub>3</sub>与碘化钾溶液反应产生的电流信号来获取 O<sub>3</sub>浓度的变化信息。由于边界层 O<sub>3</sub>浓度较低,同时,近地面的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等会与碘化钾发生反应,这在一定程度上会影响到边界层 O<sub>3</sub>测量的精度<sup>[17]</sup>。系留气艇观测 O<sub>3</sub>前的标定工作与释放 O<sub>3</sub>探空的准备过程相同,都需要确定电化学反应池的背景电流与抽气泵的流量。根据操作要求,对重复使用的电化学反应池和进气管道,在每一次观测结束后都要用蒸馏水清洗 3 遍,然后用甲醇清洗,放置 3~6 小时后再重复使用。

观测试验中,气艇上升速度过快时,观测要素的垂直分辨率会变低,而上升速度过慢时,则垂直分辨

率变高。因此将仪器采集数据的频率设为每秒钟 1 组,将气艇的释放速度控制在 1.0~1.5 m·s<sup>-1</sup>之间。由于乌鲁木齐冬季较为寒冷,气象探空仪电池的工作时间受到较大影响,往往在气艇收回的过程中因电池耗尽而无法正常工作。另外,碘化钾溶液对 O<sub>3</sub>浓度变化的响应时间与气象传感器对它们各自测量要素的响应时间相比要明显长<sup>[18-19]</sup>。基于上述原因,对观测数据的处理遵循以下原则:

(1) 文中所用数据均为气艇上升过程中所采集;

(2) 分析 O<sub>3</sub>数据时,传感器的滞后时间为 75 s,虽然温度、湿度、风速和风向传感器响应时间各不相同,相比 O<sub>3</sub>观测而言,气象传感器的响应滞后效应在数据处理时不予考虑;

(3) 每一次气温、相对湿度、气压和风速 4 项气象要素观测值若有一组无效,则剔除该次观测数据;

(4) 由于气艇在上升过程中速度的不匀速性,在相同高度上可能获取多次观测数据,我们以多次观测的平均值代表该高度上的观测结果。

本次试验观测地点位于乌鲁木齐市展览馆院内(49°49'N,87°34'E,海拔 820 m),观测时间为 2008 年 1 月 11 日 14:00 至 13 日 14:00,释放系留气艇 13 次,成功取得 O<sub>3</sub>垂直廓线 11 条。观测期间除 2008 年 1 月 11 日 14:00 有小雪外,其他观测时间段雾、霾出现的频率很高,这和乌鲁木齐冬季大气污染严重相符(见表 1)。文中所用时间均为北京时,乌鲁木齐地方时与北京时的时差为 2 小时 07 分。

表 1 2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐 O<sub>3</sub> 观测概况

Table 1 General situation of ozone observation over Urumqi from January 11 to 13, 2008

观测时间 (北京时)/月-日-时	探测最大高度 /m	O <sub>3</sub> 最大值 /ppb	天气状况
1-11-14:00	790	2.1	小雪
1-11-18:00	1004	38.6	多云转晴
1-11-22:00	975	3.0	
1-12-02:00	875	13.5	
1-12-06:00	991	—	
1-12-10:00	1108	36.8	晴
1-12-14:00	1144	—	
1-12-18:00	1110	44.5	晴(能见度低)
1-12-22:00	1109	1.6	
1-13-02:00	885	4.9	
1-13-08:00	1037	38.8	晴
1-13-11:00	993	31.3	晴(能见度低)
1-13-14:00	818	40.6	晴(能见度低)

## 2 结果分析

### 2.1 臭氧廓线特征

图 1 给出了 11 日 14:00—13 日 14:00 大气边界层 O<sub>3</sub> 浓度(实线)、温度(虚线)垂直分布的观测结果。由图可知,尽管每一次气艇上升高度不同,但是 O<sub>3</sub> 垂直廓线有以下特征:(1)观测期间,乌鲁木齐大气边界层 O<sub>3</sub> 浓度空间变化显著。在所取得的 11 条廓线中,所有时次在 500~800 m 高度区间以下 O<sub>3</sub> 浓度都较低,除了 12 日 02:00 在地面附近 O<sub>3</sub> 浓度接近 10 ppb,其余时次都在 1~5 ppb(1 ppb=1×10<sup>-9</sup>,下同)之间。所有的白天时次(11 日 14:00

除外)及 13 日的清晨 08:00 在 500~800 m 高度区间以上存在 O<sub>3</sub> 高浓度分布区,在这一高度区间,O<sub>3</sub> 浓度急剧上升,最大值可达 40 ppb 以上;夜间观测时次在这个高度区间以上没有发现 O<sub>3</sub> 高浓度分布区。(2)观测期间大气边界层 O<sub>3</sub> 浓度日变化显著。由上述分析可知所有的夜间观测时次,在整个观测高度范围内 O<sub>3</sub> 浓度都较低且变化幅度不大。白天除了 11 日 14:00,都观测到了相对较高的 O<sub>3</sub> 浓度,如 11 日 18:00、12 日的 10:00、18:00、13 日的 11:00、14:00 最大浓度分别为 38.56 ppb、36.8 ppb、44.5 ppb、31.3 ppb、40.6 ppb,与夜间观测到的 O<sub>3</sub> 浓度相差 30 ppb 左右。(3)近地层 O<sub>3</sub> 浓度随高度上升呈下降的趋势,其中夜间比白天更加显著。

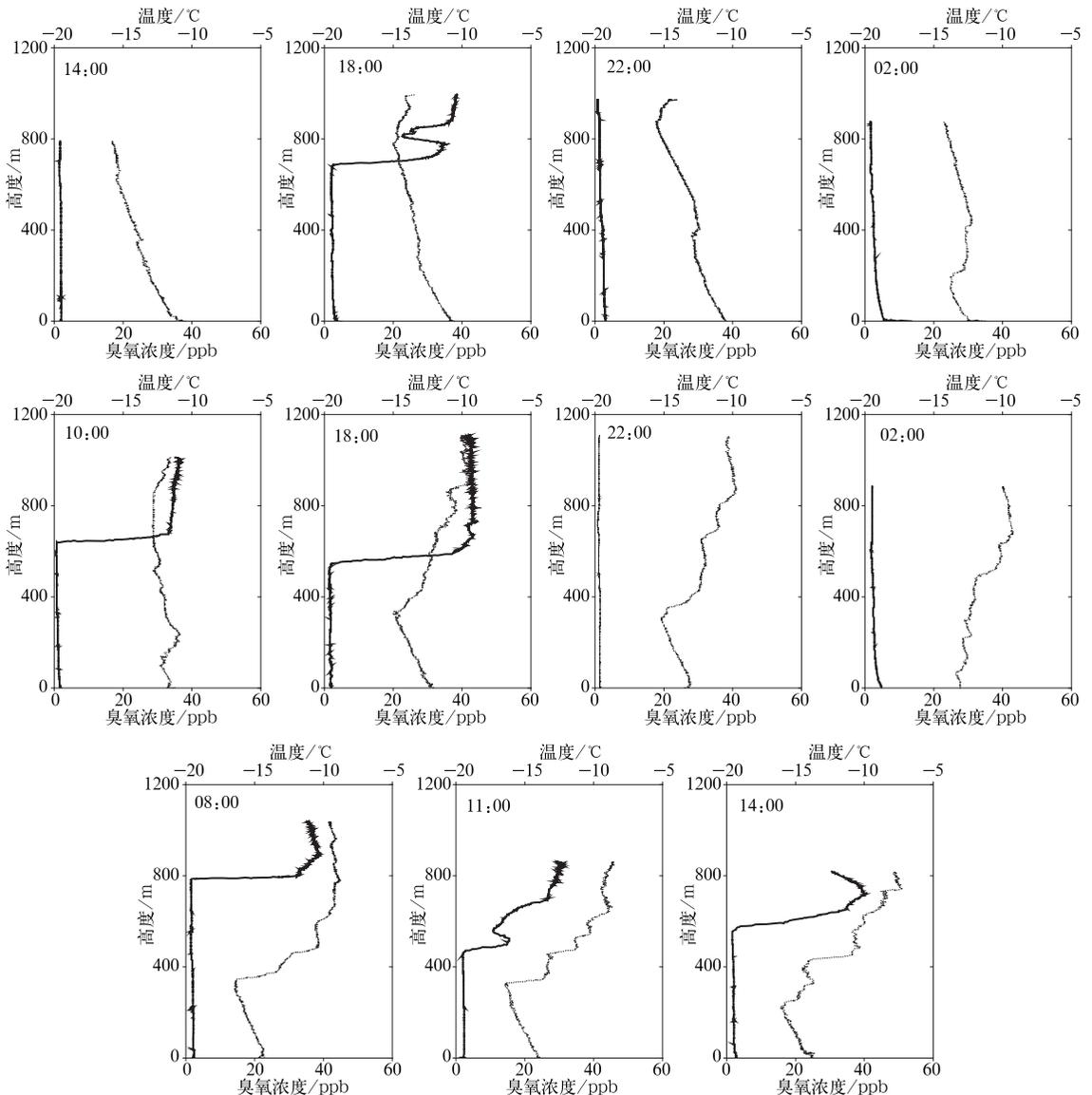


图 1 2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐 O<sub>3</sub> 浓度(实线)、温度(虚线)垂直廓线  
Fig. 1 The vertical profiles of ozone concentration (solid) and temperature (dotted) over Urumqi from January 11 to 13, 2008

综上所述,观测期间乌鲁木齐低层大气 O<sub>3</sub> 分布具有显著的时空多变性,特别是在 500~800 m 高度区间以下,O<sub>3</sub> 浓度普遍较低。

## 2.2 O<sub>3</sub> 浓度变化与相关气象因子的关系

气象条件是影响边界层 O<sub>3</sub> 分布的主要因素之一,它造成了臭氧浓度分布的时空变化。观测结果表明 O<sub>3</sub> 浓度变化与太阳辐射、气温、风速、相对湿度的波动有一定的联系。

### 2.2.1 O<sub>3</sub> 浓度与辐射

太阳辐射特别是紫外辐射的强度决定着边界层生成 O<sub>3</sub> 的光化学反应过程的变化,所以辐射对 O<sub>3</sub> 的浓度变化具有决定性意义。由图 1 可知,观测期间高浓度 O<sub>3</sub> 基本上都出现在白天,夜间在整个观测高度范围内 O<sub>3</sub> 浓度都很低,这种现象与夜间缺少太阳辐射而导致的生成 O<sub>3</sub> 的光化学反应无法进行有关。同时,O<sub>3</sub> 浓度的空间分布也受到太阳辐射的影响。观测期间近地面 O<sub>3</sub> 浓度在白天也较低,这与乌鲁木齐冬季易形成逆温层,大气层结稳定,大量污染物汇聚在乌鲁木齐上空,削弱了到达近地面的太阳辐射,进而在一定程度上抑制了近地面生成 O<sub>3</sub> 的光化学反应过程。11 日 14:00 的观测结果证实了这一点,14:00 的天气为小雪,近地面太阳辐射很弱,边界层 O<sub>3</sub> 分布与夜间相似,最高浓度仅为 2.1 ppb。由此说明太阳辐射的变化,在一定程度上影响着边界层 O<sub>3</sub> 浓度的时空变化。

### 2.2.2 O<sub>3</sub> 浓度与温度、风

O<sub>3</sub> 浓度变化与温度垂直结构有密切关系。由于夜间 O<sub>3</sub> 浓度低,且变化不显著,以白天的观测结果为例来分析 O<sub>3</sub> 浓度变化与温度垂直结构的关系。由温度廓线可知 12 日的 10:00、18:00、13 日的 08:00、11:00、14:00 分别在相对高度 200 m、380 m、390 m、330 m、200 m 左右观测到了较强的逆温,11 日 18:00 在 800 m 左右有弱逆温。而这些时次从地面到逆温层底部的高度范围内 O<sub>3</sub> 浓度都很低,然后在逆温层以上 O<sub>3</sub> 的浓度都有一急剧上升的区域。逆温层阻碍了上层大气与低层大气的扩散交换,同时也限制了上层大气中高浓度 O<sub>3</sub> 向低层大气的输送。逆温层也使得大气趋于稳定状态,抑制了 O<sub>3</sub> 的水平输送。同时,在不考虑臭氧探空仪测量精度的情况下,重力作用可能导致的 O<sub>3</sub> 沉降会对近地层 O<sub>3</sub> 浓度的变化产生一定的影响,即低温使湍流运动减弱,可使大分子量的臭氧集中于地面附近。当然,重力作用导致的 O<sub>3</sub> 沉积浓度有待于我们进一步的研究确定,而且也不一定是导致文

中乌鲁木齐近地层 O<sub>3</sub> 浓度随高度上升呈下降趋势的因素之一,在这里只讨论了这种可能性的存在。

观测试验期间乌鲁木齐市大气边界层廓线的垂直特征非常明显(图略),全天 500~800 m 以下风速都较小,均在 4 m·s<sup>-1</sup> 以下,且风速随高度的上升整体上变化不大。在 500~800 m 以上存在明显的风速切变,这些切变高度对应是 O<sub>3</sub> 浓度急剧上升区域,风是 O<sub>3</sub> 输送的重要动力。O<sub>3</sub> 浓度的变化与风向无明显关系,廓线上一定高度 O<sub>3</sub> 浓度的波动现象,可能为风扰动所致。

### 2.2.3 O<sub>3</sub> 浓度与湿度

图 2 给出了观测期间大气边界层 O<sub>3</sub> (实线)与相对湿度(虚线)垂直分布的观测结果。由图 2 可知,观测期间乌鲁木齐相对湿度的分布是先随着高度的增加而变大,然后在一定高度又随着高度的增高而降低,这与水汽随高度增加而递减的一般分布规律有所差别。图中所有的曲线都有一个共同的特点,即相对湿度曲线与 O<sub>3</sub> 浓度曲线呈反相分布。在近地面附近相对湿度都较低,其对应的 O<sub>3</sub> 浓度相对较高,随着高度上升,相对湿度都出现增大趋势,O<sub>3</sub> 浓度则呈下降趋势。白天时,在 O<sub>3</sub> 浓度迅速增加的高度区域对应的相对湿度都明显降低。如 12 日 10:00、18:00、13 日 08:00、11:00,在 400 m 左右相对湿度在经过上升或饱和后,出现了迅速降低的拐点,此高度上的 O<sub>3</sub> 浓度却在增大。夜间相对湿度明显比白天要高,普遍在 80% 以上,与此相对应的是夜间的臭氧浓度也都很低。水汽和臭氧的反相分布特点,反映了光化学过程对臭氧浓度的影响。水汽与 O<sub>3</sub> 的反应是边界层 O<sub>3</sub> 的一个重要的汇,空气中水汽产生的自由基 OH 和 HO<sub>2</sub> 等很容易与 O<sub>3</sub> 和 O 发生反应而消耗 O<sub>3</sub>,因此湿度增加,臭氧浓度减小。许多观测结果也阐述了水汽与臭氧之间的相互关系<sup>[9,18-20]</sup>。O<sub>3</sub> 浓度与相对湿度相关系数  $r$  平均为 -0.697。

## 2.3 O<sub>3</sub> 浓度与近地面污染物

逆温层的存在不仅影响了动力输送对低空大气 O<sub>3</sub> 浓度造成的变化,而且造成了城市市区大量氮氧化物、碳氢化合物等污染物在逆温层下近地面大量的累积,由此所引起的臭氧—氮氧化物—挥发性有机化合物(O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOCs)所耦合的复杂化学反应体系是影响 O<sub>3</sub> 浓度变化重要的因素<sup>[21-22]</sup>。城市地区的氮氧化物浓度一直较高,已有学者研究证明氮氧化物对臭氧损耗的作用是显著的<sup>[23-25]</sup>。乌鲁木齐冬季逆温频率高、强度大,静风或微风出现频率

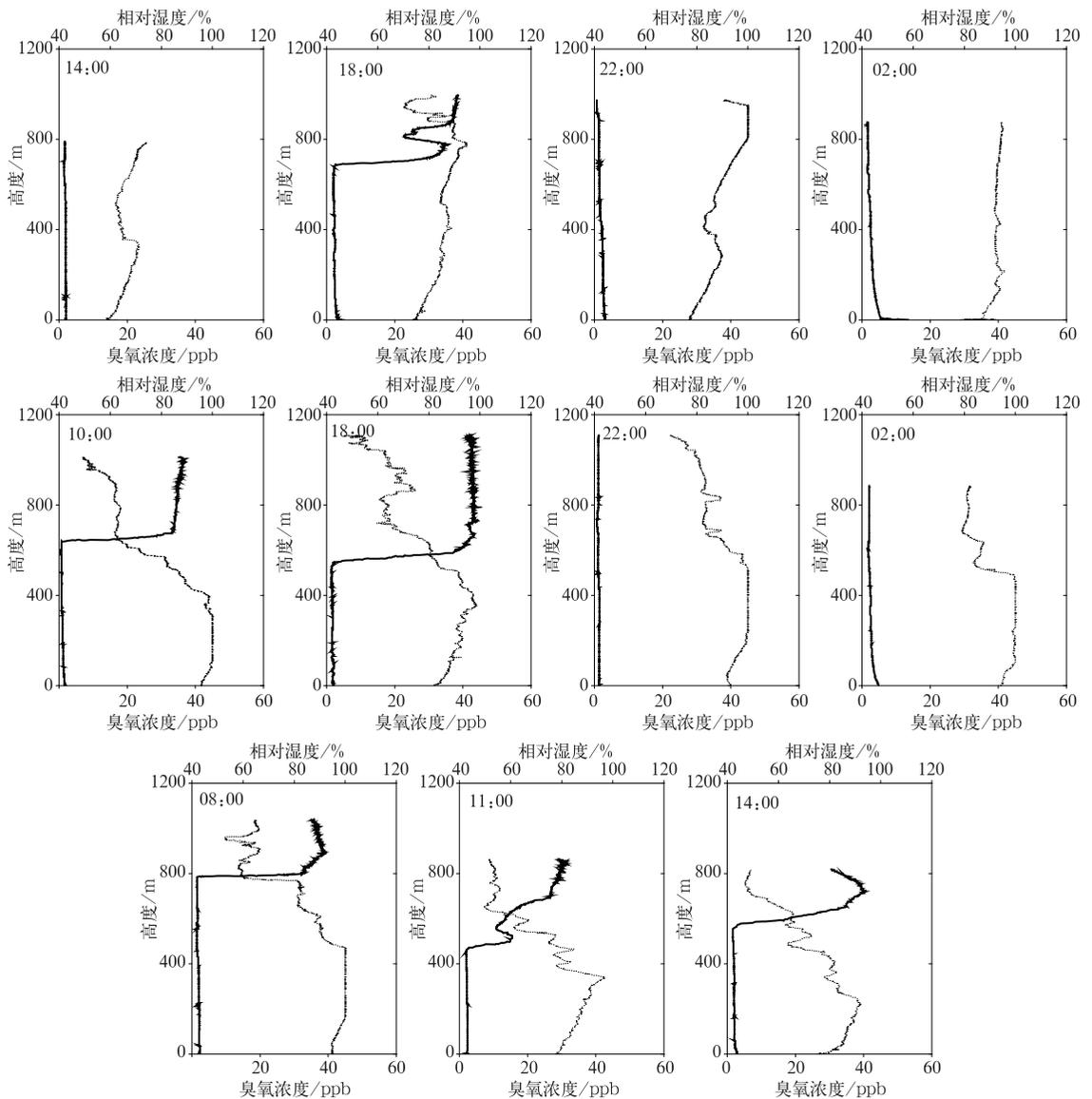


图 2 2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐  $O_3$  (实线)、相对湿度(虚线)垂直廓线  
 Fig. 2 The vertical profiles of ozone concentration (solid) and relative humidity (dotted) over Urumqi from January 11 to 13, 2008

高,导致大气污染物难以扩散<sup>[26-27]</sup>。据乌鲁木齐市环保局的测量数据显示,2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐市的  $NO_x$  浓度日均大于  $0.120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,远远超过国家年平均浓度  $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  的二级标准。如此高浓度的  $NO_x$  含量会使氮氧化物与  $O_3$  反应的几率增加,而观测期间白天乌鲁木齐近地面的太阳辐射被严重削弱,结果  $NO_x$  与  $O_3$  反应,损耗了近地面大气中的  $O_3$ ,导致乌鲁木齐近地面  $O_3$  浓度全天都较低,这和观测的结果相符。

### 3 结论与讨论

利用 2008 年 1 月 11—13 日乌鲁木齐市大气边

界层  $O_3$  观测试验的数据并结合相关资料,对观测期间低层大气  $O_3$  的垂直分布特征及相关气象因子进行了分析。结果表明:

(1) 观测期间,乌鲁木齐低层大气  $O_3$  分布具有显著的时空多变性,特别是在 500~800 m 高度区间以下, $O_3$  浓度普遍较低;在  $O_3$  高浓度分布区最大值可达 40 ppb 以上;在近地层  $O_3$  浓度随高度上升呈下降的趋势,其中夜间比白天更加显著。

(2) 低层大气  $O_3$  浓度的分布与气象因子关系密切。大量污染物聚集在乌鲁木齐上空削弱了到达近地面的辐射,使得近地面  $O_3$  浓度在白天也较低;逆温层的存在抑制了动力输送对近地面边界层  $O_3$  的补充;边界层  $O_3$  浓度的急剧上升与水平风速切

变引起的湍流输送有关;而边界层 O<sub>3</sub> 浓度与相对湿度基本呈负相关。

(3) 观测期间乌鲁木齐近地面高浓度的 NO<sub>x</sub> 损耗了近地面大气中的 O<sub>3</sub>, 是导致近地面 O<sub>3</sub> 浓度全天都较低的因素之一。

通过上文中分析与总结,我们可以知道观测期间乌鲁木齐低层大气 O<sub>3</sub> 的垂直分布特征是各种源汇综合作用的结果。至于哪种因素的作用更大一些,对其进行量化研究确实有相当的难度。如文中观测到在近地层有 O<sub>3</sub> 浓度随高度上升呈下降趋势,造成这种现象的原因有可能是温度作用下的 O<sub>3</sub> 重力沉降、水汽或者近地面的 NO<sub>x</sub>。通过文中的分析我们知道 NO<sub>x</sub> 与 O<sub>3</sub> 反应会损耗近地面大气中的 O<sub>3</sub>, 且夜间损耗的更大,这与我们观测到近地层夜间 O<sub>3</sub> 浓度比白天大相矛盾,因此我们可以排除这种现象是 NO<sub>x</sub> 造成的可能。但是在近地层 O<sub>3</sub> 浓度普遍低于 10 ppb 的状况下, O<sub>3</sub> 重力沉降作用能否体现出来或者与水汽对近地面 O<sub>3</sub> 浓度的影响作用哪个更显著,这是一个复杂而有待于进一步研究讨论的问题。

本文虽然只用了 2008 年 1 月 11—13 日两天的观测数据,但是观测期间,除了 11 日 14:00 为小雪天气,中间没有较明显的天气过程,所以本文的研究结果在一定程度上可以代表乌鲁木齐冬季低层大气 O<sub>3</sub> 的分布特征。

## 参考文献

[1] 丁一汇,李巧萍,刘艳菊,等. 空气污染与气候变化[J]. 气象, 2009, 35(3): 3-14.

[2] Chameides W L, Lindsay R W, Richardson J, et al. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog; Atlanta as a case study [J]. Science, 1988, 241(4872): 1473-1475.

[3] Roleeel S J, Pierce T E, Schere K L. The sensitivity of regional ozone modeling to biogenic hydrocarbon[J]. J Geophys Res, 1991, 96(D4): 7371-7394.

[4] 周秀骥,罗超,丁国安. 中国东部地区大气 O<sub>3</sub> 及前体物本底变化规律的初步研究[J]. 中国科学, B 辑, 1994, 24(12): 1323-1330.

[5] 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 [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28: 2373-2376.

[6] 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[J]. 中国科学, D 辑, 2003, 33(2): 114-118.

[7] 郑向东,陈尊裕,崔宏,等. 长江三角洲地区春季低空大气 O<sub>3</sub> 垂直分布特征[J]. 中国科学, D 辑, 2004, 34(12): 1184-1192.

[8] 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 [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105: 707-719.

[9] Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol Radiative, physical and chemical properties in Beijing during June 1999 [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106: 17969-17980.

[10] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends [J]. Atmos Environ, 2004, 38: 3431-3442.

[11] 田广生,区柏森,陈罕立. 近地层氮氧化物和臭氧的区域分布研究[J]. 环境科学研究, 1995, 8(6): 1-6.

[12] 边智,李杰,王喜全. 泰山春季臭氧污染特征[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 36-39.

[13] 郑玉萍,李景林. 乌鲁木齐近 31 年大雾天气气候特征分析 [J]. 气象, 2008, 34(8): 22-28.

[14] 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.

[15] 王晓明,云天,张智勇,等. 吉林省冬季逆温天气特征分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 91-97.

[16] Vaisala, Inc. Tethersonde Meteorological Tower, User's Guide. Vaisala, Inc., Fin200421, Helsinki, 2000.

[17] Schenkel A, Broder B. Interference of some trace gases with ozone measurement by the KI2 Method [J]. Atmos Environ, 1982, 16: 2187-2190. 1996, 25: 215-226.

[18] 郑向东,丁国安,孙敏峰,等. 北京冬季低层大气 O<sub>3</sub> 垂直分布观测结果的研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13: 100-108.

[19] 郑向东,周秀骥,秦瑜,等. 西宁夏季对流层臭氧垂直分布变化与气象要素的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 46-53.

[20] Tsutsumi Y, Makino Y, Jensen J. Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean [J]. Atmos Environ, 1996, 30: 1763-1772.

[21] 唐孝炎. 大气环境化学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 116-120.

[22] Barbara J, Finlayson P, Jame N P. Tropospheric air pollution: ozone, airborne toxics, polycyclic aromatic hydrocarbons and particles [J]. Science, 1997, 276: 1045-1050.

[23] 李昕,安俊琳,王跃思,等. 北京气象塔夏季大气臭氧观测研究 [J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 353-357.

[24] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中 NO、NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度变化的相关性分析 [J]. 环境科学, 2007, 28(4): 706-711.

[25] 朱彬,王韬,倪东鸿. 临安秋季近地层臭氧的形成及其前体物特征 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(2): 185-192.

[26] 杨舵,王淑民,桑修诚. 乌鲁木齐市 SO 浓度的分布及其可能原因 [J]. 气象, 2000, 26(4): 29-32.

[27] 郑庄川. 北京东部地区的污染气象特征 [J]. 气象, 1995, 21(1): 28-31.