

北京夏季 O_3 垂直分布与气象因子的相关研究

任丽红¹ 胡非² 王玮¹

1 中国环境科学研究院空气质量与气溶胶研究室, 北京 100012

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 通过分析 2000 年 7 月 26 日~8 月 22 日北京 325 m 气象塔的 O_3 浓度梯度观测资料及同期的气象资料, 探讨了 O_3 与 NO_x 、风速、风向、温度及相对湿度的关系。通过建立不同风向下 O_3 浓度与 NO_x 、温度、相对湿度及风速的多元回归方程, 证实了高浓度的 O_3 是 NO_x 与气象条件综合作用的结果, 利用可得到的气象资料及 NO_x 浓度值进行 O_3 污染预报的尝试是可行的。

关键词 边界层 O_3 浓度 垂直分布 气象因子 回归分析

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0166-09 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

A Study of Correlations between O_3 Concentration and Meteorological Factors in Summer in Beijing

REN Li-Hong¹, HU Fei², and WANG Wei¹

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Utilizing the vertical measurement data of O_3 and meteorological factors obtained on the Beijing 325-m Meteorological Tower from 26 July to 22 August 2000, the relationships between O_3 and NO_x , O_3 and meteorological parameters (such as temperature, wind speed, wind direction, and relative humidity) are discussed. By regression analysis, the multiple regression equations are built in different wind directions. It is shown that high O_3 concentration is the interaction results of NO_x and meteorological factors. It is feasible to predict the potential ozone level based on currently available database of NO_x and meteorological parameters.

Key words boundary layer, O_3 concentration, vertical distribution, meteorological factor, regression analysis

1 引言

自 20 世纪开始, 对流层 O_3 浓度背景值大约为工业革命前的两倍多^[1], 浓度逐渐增高的 O_3 已成为城市低层大气最重要的污染物之一^[2]。对流层 O_3 的产生, 伴随着一系列复杂的称之为“光化学烟雾机制”的反应^[3]。光化学烟雾具有很强的

氧化性, 可使橡胶开裂, 对眼睛和呼吸道有很强的刺激性, 损害人体肺功能和伤害农作物, 并使大气能见度降低^[4]。继美国洛杉矶和英国伦敦发生光化学烟雾污染之后, 在日本东京和墨西哥的墨西哥城等地也发生了光化学烟雾, 该污染至今仍是欧洲、美国、日本等发达国家的主要大气环境问题^[5~7]。

我国城市大气污染虽受以煤炭为主的能源结

收稿日期 2004-01-18 收到, 2005-02-28 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030

作者简介 任丽红, 女, 1977 出生, 硕士, 主要从事大气环境方面的研究工作。E-mail: renlh@craes.org.cn

构制约，但早在 20 世纪 70 年代末就在我国兰州西固石油化工区首次发现光化学烟雾，并对其开展了大气物理和大气化学的大规模综合研究^[8]。1986 年夏季在北京也发现了光化学烟雾的迹象，近 10 年来日趋严重^[9,10]。随着经济的高速发展，我国中、南部特别是沿海城市也已发生或面临着光化学烟雾污染的威胁，上海^[11]、广州、深圳等城市频繁发现一些光化学烟雾污染的迹象。因此，近地层 O₃ 及光化学烟雾的研究已成为近年来城市大气污染研究领域的重要研究课题。

尽管国内外一些重要城市和地区已有较长时间的地面 O₃ 等污染物的监测^[12, 13]，但有关城市大气边界层内 O₃ 浓度的同步梯度观测还很少，O₃ 垂直分布资料对了解城市 O₃ 生成与转化及其输送规律有重要意义。O₃ 的形成是一个复杂的过程，是由 NO_x、VOCs（挥发性有机化合物）和气象条件共同作用的结果^[14]。本文利用 2000 年 7 月 26 日~8 月 22 日北京 325 m 气象塔的 O₃ 浓度梯度观测资料及同期的气象资料，对北京夏季 O₃ 浓度的垂直分布及其与 NO_x、气象条件的关系进行探讨，不仅有助于研究 O₃ 的输送机制和对流层 O₃ 的收支平衡，这对今后城市的 O₃ 预报、城市空气质量模式的研究以及为 2008 年北京奥运的服务等都具有科学意义和实际参考价值。

2 实验仪器及数据处理方法简介

北京 325 m 气象塔（39°58′N，116°22′E），位于北京市区北三环路和北四环路之间，南距三环约 700 m，气象塔向东 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路，北侧 150 m 处为东西走向的北土

城西路。塔上 280 m 和 120 m 处分别设置了美国热电子公司生产的 49C 紫外吸收 O₃ 分析仪及 8840 氮氧化物分析仪。地面实验室（东小楼 2 层环境监测实验室）装备了美国莫尼特公司生产的 8810 紫外吸收 O₃ 分析仪，可以对 O₃ 进行连续测量，测量精度达±0.002 mg·m⁻³。气象塔上共设置 15 层气象资料观测平台，每层提供风速、风向、温度及相对湿度观测值，其中相对湿度间隔为两层，共有 8 层观测平台。

实验期间各主要污染物以相同的采样间隔输出，即每分钟输出一个平均值，单位为 mg·m⁻³。实验数据真实可靠，所有实验仪器在实验前后均在北京市分析仪器厂进行了标定，并在监测期间对仪器进行定时标零。资料中明显不合理的数据如小于测量精度值以及开始观测的预报期数据（仪器稳定期）予以剔除，以获得稳定的观测值。

3 观测结果和分析

O₃ 是一种复杂的光化学产物，因其不是直接排放到空气中，而是其前体物 NO_x 与气象条件综合作用的结果，因此，我们首先对 O₃ 浓度与 NO_x 及各气象变量进行简单的相关分析，结果见表 1。

从表 1 可以看出，温度、相对湿度、风速、NO_x 都是影响北京地区 O₃ 浓度重要因子。其中 O₃ 与温度的相关性最好，相关系数可达 0.61，说明大气中的 O₃ 浓度与温度的关系十分密切，即温度对 O₃ 的形成、传输过程起着重要的作用。温度是地面气象要素之一，其有利于污染预报工作的实施。下面就分别对 O₃ 与温度、相对湿度、风速、风向及 NO_x 的关系加以讨论。

表 1 O₃ 与各气象要素及 NO_x 之间的相关分析
Table 1 Correlation studies between O₃ and the main meteorological variables and NO_x

		<i>r</i> (<i>p</i>)		
		<i>H</i> =8 m, <i>N</i> =360	<i>H</i> =120 m, <i>N</i> = 305	<i>H</i> =280 m, <i>N</i> =360
风速	Wind speed	0.18 (<0.01)	0.24 (<0.01)	0.12 (<0.1)
温度	Temperature	0.61 (<0.01)	0.43 (<0.01)	0.44 (<0.01)
相对湿度	Relative humidity	-0.41 (<0.01)	—	—
NO _x		-0.39 (<0.01)	-0.37 (<0.01)	—

注：r 为皮尔森相关系数，p 为相关概率，H 为采样高度，N 为样本个数，“—”表示未通过 90% 的显著性检验。
Note: r is Pearson coefficients, p is correlation probabilities, H is height and N is the number of sample. “—” means that the correlation is not significant for a confidence level of 90%.

3.1 与温度的关系

O_3 与温度的关系可以从理论上给予解释：一般在高温、强日照条件下，易发生一系列光化学反应而生成 O_3 ^[15]，高 O_3 浓度往往和高温联系在一起。高温直接加强光化学反应速率，而且随着温度的升高，生物排放加大， O_3 的前体物浓度增加。

图 1 给出了各层高度上 O_3 浓度与温度的逐日变化曲线。由图我们可以看出，近地面温度的日变化曲线和 O_3 浓度的日变化曲线十分相似，8：00（北京时，下同）左右两者的曲线开始缓慢上升，下午 14：00 至 16：00 之间达到峰值，以后

又开始下降，至次日 6：00 达到最低点。

为了定量地描述温度对 O_3 浓度的影响，我们在不同风向下，对温度与 O_3 浓度进行了一元线性回归、指数回归、多项式回归分析，并对回归结果进行了比较，发现 O_3 浓度跟温度的线性关系较好，相关参数见表 2。从表中可以看出，偏东、偏南、偏西风时， O_3 浓度与温度的正相关性都很好，都通过 90% 的显著性检验。其中偏南风时，各层高度的相关系数皆大于其余风向上的值。

图 2 给出了 O_3 浓度与温度的日变化。由图可见，温度一般在 16：00 达到峰值，比 O_3 出现峰值的时间延后了 1~3 h，这可能意味着就北京而

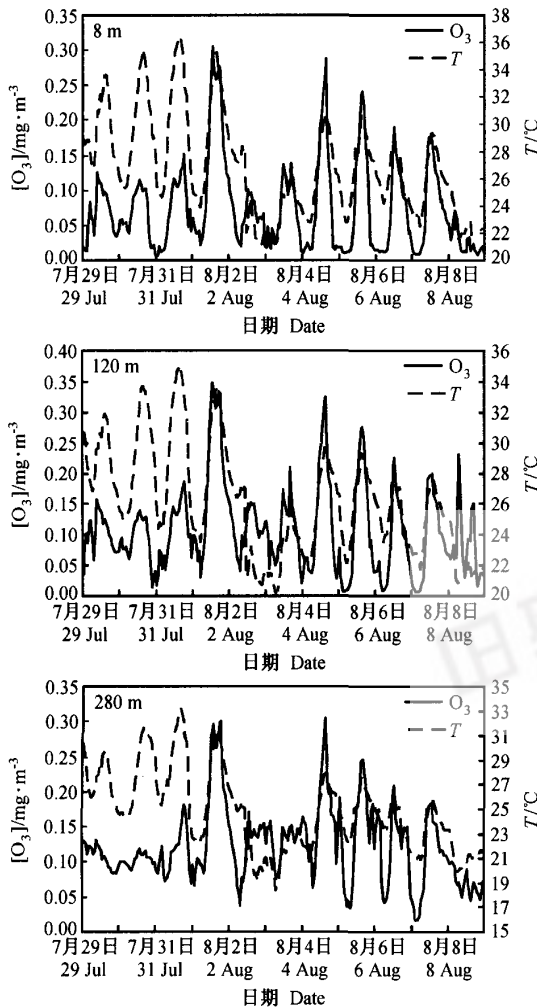


图 1 各层高度上 O_3 浓度与温度 (T) 的逐日变化

Fig. 1 Daily values of O_3 concentration and temperature (T) at different height

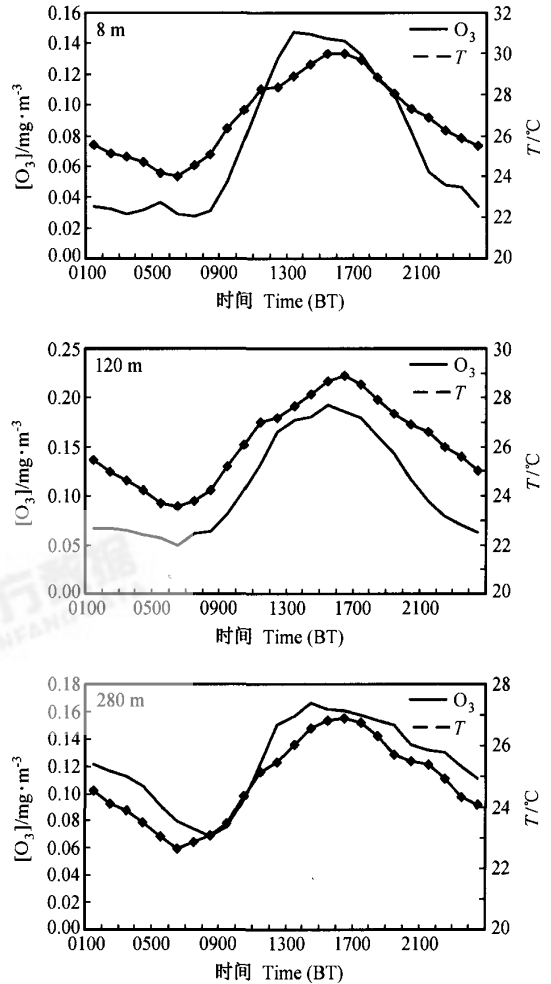


图 2 各层高度上 O_3 浓度与温度 (T) 的日变化

Fig. 2 Hourly O_3 concentration and temperature levels (T) at different height

表 2 不同风向下 O₃ 浓度与温度 (T) 的回归方程
Table 2 Regression equations between O₃ and temperature (T) in different wind direction

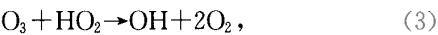
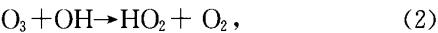
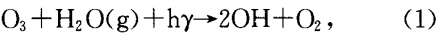
	高度	Height /m	N	r	方程	Regression equations
偏东风 East wind	8		112	0.54	[O ₃] = (6.3 ± 0.94)T + (-136.30 ± 24.46)	
	120		53	0.61	[O ₃] = (8.95 ± 1.62)T + (-163.27 ± 40.48)	
	280		92	0.43	[O ₃] = (5.27 ± 1.18)T + (-65.43 ± 26.81)	
偏南风 South wind	8		124	0.66	[O ₃] = (6.45 ± 0.66)T + (-131.02 ± 18.61)	
	120		125	0.71	[O ₃] = (9.91 ± 0.88)T + (-205.75 ± 23.63)	
	280		91	0.74	[O ₃] = (11.15 ± 1.06)T + (-214.75 ± 27.36)	
偏西风 West wind	8		92	0.45	[O ₃] = (2.98 ± 0.63)T + (-46.31 ± 17.61)	
	120		68	0.40	[O ₃] = (1.79 ± 0.50)T + (-3.11 ± 13.68)	
	280		84	0.54	[O ₃] = (4.85 ± 0.83)T + (-61.10 ± 20.93)	
偏北风 North wind	8		13	—	—	—
	120		54	—	—	—
	280		71	0.35	[O ₃] = (1.31 ± 0.42)T + (14.04 ± 10.95)	

表注同表 1 Notes as in Table 1

言，当对 O₃ 浓度作污染预报时，太阳辐射是一个更重要的参数，这与许多学者的研究结果是一致的^[16]。

3.2 与相对湿度的关系

在近地面边界层气象观测中，对水汽的观测是很重要的内容。水汽不仅在大气能量的转换过程中起重要的作用，而且水汽与 O₃ 的反应是对流层 O₃ 的一个重要的汇，这些反应生成的自由基 (OH, HO₂) 是大气光化学过程的重要触发机制。



反应(1)~(3)中，丰富水汽是反应发生的前提条件^[11]。许多在对流层的观测结果已阐述了水汽与 O₃ 之间的相互关系^[17]。

图 3 给出了近地面层 O₃ 浓度与相对湿度的逐日分布曲线。由图可见，夜间相对湿度的高值区总是对应着 O₃ 浓度的低值区，白天相对湿度的低值区对应着 O₃ 浓度的高值区，即近地面边界层，水汽与 O₃ 的变化基本上是呈反相的关系。水汽和

O₃ 的反相分布特点，也反映了光化学过程对 O₃ 浓度的影响。高水汽、低 O₃ 的这种对应关系在其他观测中也被注意到^[17, 18]。

表 3 给出了不同风向下近地面 O₃ 浓度与相对湿度的线性回归方程。由表可以看出偏东、偏南、偏西风向，O₃ 浓度与相对湿度呈显著的负相关关系。而偏北风向，相关性不那么显著。

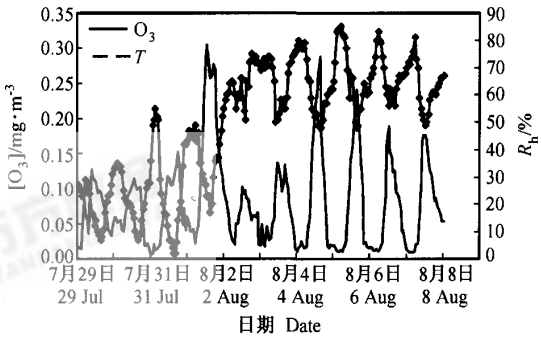


图 3 近地面层 (8 m) O₃ 浓度与相对湿度 (R_h) 的逐日变化
Fig. 3 Daily values of O₃ concentration and relative humidity (R_h) at 8 m

表 3 不同风向下近地面 (8 m) O₃ 浓度与相对湿度 (R_h) 的回归方程
Table 3 Regression equations between O₃ and relative humidity (R_h) at 8 m in different wind direction

	N	r	回归方程	Regression equations
偏东风 East wind	112	-0.47	O ₃ = (-0.81 ± 0.15)R _h + (83.04 ± 10.55)	
偏南风 South wind	124	-0.49	O ₃ = (-0.77 ± 0.12)R _h + (93.94 ± 7.79)	
偏西风 West wind	92	-0.21	O ₃ = (-0.19 ± 0.10)R _h + (44.73 ± 5.03)	
偏北风 North wind	13	—	—	—

表注同表 1 Notes as in Table 1

3.3 与风速的关系

风速对原生污染物的影响，主要取决于大气对污染物的稀释和传输的特征，但对二次污染物O₃来说，风速的作用要复杂的多。图4为各层高度上，O₃浓度与风速的逐日变化曲线。由图可见，在近地面，风速一般都是在大气最不稳定的中午或午后一段时间达到最大，而O₃峰值恰恰也在这段时间。然而值得注意的是，即使在阴天O₃曲线的峰值仍在中午前后（8月2日），只靠太阳辐射作用形成的O₃局地浓度是不够的，外来源的补充也起了很大作用。这是因为地面风速增大，垂直动量输送加强，有利于O₃从浓度较高的高空往下输送；同时随着风速和湍流作用的增强，对光化

学反应起到了加速作用，也是造成午后高浓度O₃的一个重要原因。120 m和280 m高度上，风速峰值往往落后于O₃浓度峰值。

表4统计了不同风速范围内对应各层的O₃浓度的小时平均值。由表可见，在一定的临界值范围内(近地面：2 m·s⁻¹；120 m和280 m：6 m·s⁻¹)，随着风速的增加，O₃浓度也相应增大，当平均风速大于临界值时，O₃浓度随风速的变化比较复杂，其原因有待进一步研究。

3.4 与风向的关系

风向与污染的关系主要表现在风对污染物水平输送作用上，高值污染浓度常出现在大污染源的下风向。风向不同可以反映出不同来向的污染

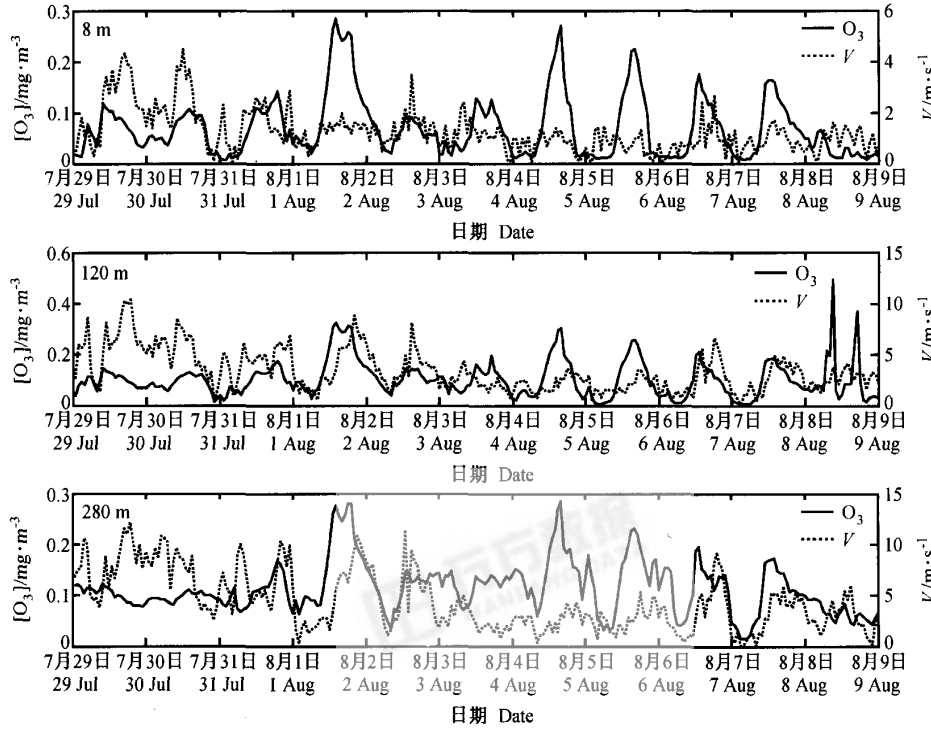


图4 各层高度上O₃浓度与风速(V)的变化
Fig. 4 Daily values of O₃ concentration and wind speed (V) at different height

表4 不同风速、不同高度上的O₃浓度值

Table 4 O ₃ concentrations at different wind speed and different height											mg • m ⁻³
高度	风速 Wind speed / m•s ⁻¹										
Height/m	0.1~1.0	1.1~2.0	2.1~3.0	3.1~4.0	4.0~5.0	5.1~6.0	6.1~7.0	7.1~8.0	8.1~9.0	9.1~10.0	≥10
8	0.056	0.088	0.068	0.089	0.085	—	—	—	—	—	—
120	0.048	0.080	0.111	0.115	0.115	0.133	0.106	0.152	0.143	0.101	0.094
280	0.070	0.107	0.124	0.129	0.129	0.133	0.130	0.119	0.106	0.113	0.106

物对测站污染的影响。下面根据 O₃ 的观测资料，做不同风向的平均，得到如图 5 所示的计算结果。

由图 5 可见，在各层高度上，O₃ 浓度随风向的分布符合很好，最大 O₃ 浓度值基本上与主导风向对应。8 m 高度上高 O₃ 浓度出现在东南风至西南风的范围内，120 m 高度 O₃ 浓度主要出现在东风至南风的范围内，其他风向 O₃ 浓度值明显偏小。280 m 高度上，各风向平均 O₃ 浓度的差别没

有 8 m 和 120 m 明显，但仍可以得到南风至西风的范围内，有较高的平均浓度。

这主要是因为气象塔位于北京市区偏北，东面为南北向的高速公路，汽车排放的尾气污染物较多，加之南风输送其上风向的城市污染物，在到达观测地点过程中进行一系列光化学反应促使该地的 O₃ 逐渐增加。

3.5 与 NO_x 的关系

NO_x 是影响 O₃ 的重要前体物，NO_x 浓度与 O₃

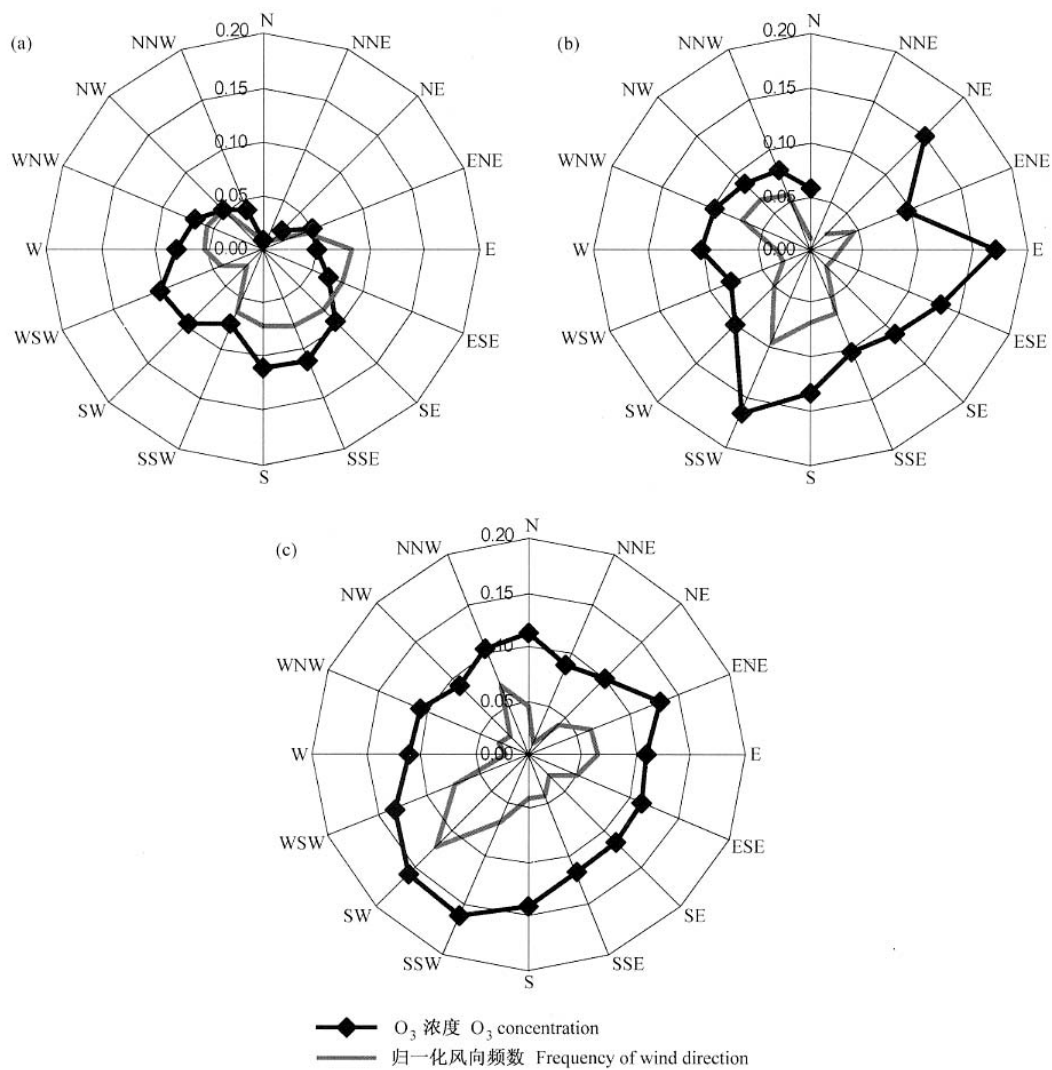


图 5 各层高度上 O₃ 浓度随风向的分布。(a) 8 m；(b) 120 m；(c) 280 m
Fig. 5 Average O₃ concentration for every wind direction sector. (a) 8 m；(b) 120 m；(c) 280 m

浓度的关系如图 6 所示。由图可以看出,观测期间,很少有 NO_x 浓度低于 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况, O_3 的生成与 NO_x 浓度的关系是非线性的,而且随着 NO_x 浓度的增加 O_3 浓度呈现下降的趋势。这是因为当 NO_x 浓度大于 $0.006 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,随着 NO_x 的进一步增加,抑制了过氧基 (HO_2 和 RO_2) 的生成, OH 自由基的消耗作用开始超过生成作用占主导地位,从而造成在这种高浓度 NO_x 条件下, O_3 的生成量随着 NO_x 浓度的增加呈下降趋势^[16]。

4 多元回归分析

影响地面污染物浓度变化的各要素不是独立存在和作用的,它们之间相互关联、相互制约,即大气污染变化是多个气象要素及其前体物共同作用的结果。

为了综合判断各气象参数及 NO_x 浓度对 O_3 浓度的共同影响,我们利用统计分析软件 SPSS,采

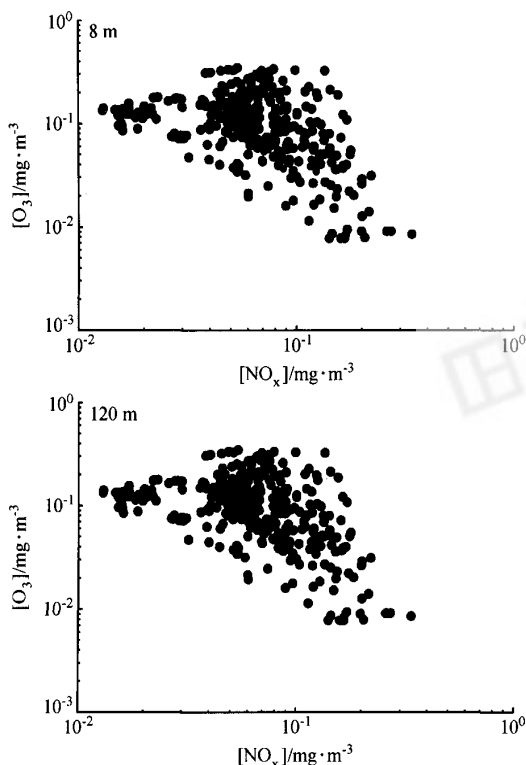


图 6 各层高度上 NO_x 浓度与 O_3 浓度的关系
Fig. 6 Relationship between $[\text{O}_3]$ and $[\text{NO}_x]$

用逐步引入变量的方法,将各风向下的 O_3 小时平均浓度值与对应的温度、相对湿度、风速及 NO_x 浓度值进行多元回归分析,所得回归方程如下:

偏东风:

$$[\text{O}_3] = (-191.01 \pm 29.87) + (7.47 \pm 0.87)T - (0.88 \pm 0.17)R_h - (0.54 \pm 0.11)[\text{NO}_x],$$

$$R = 0.75$$

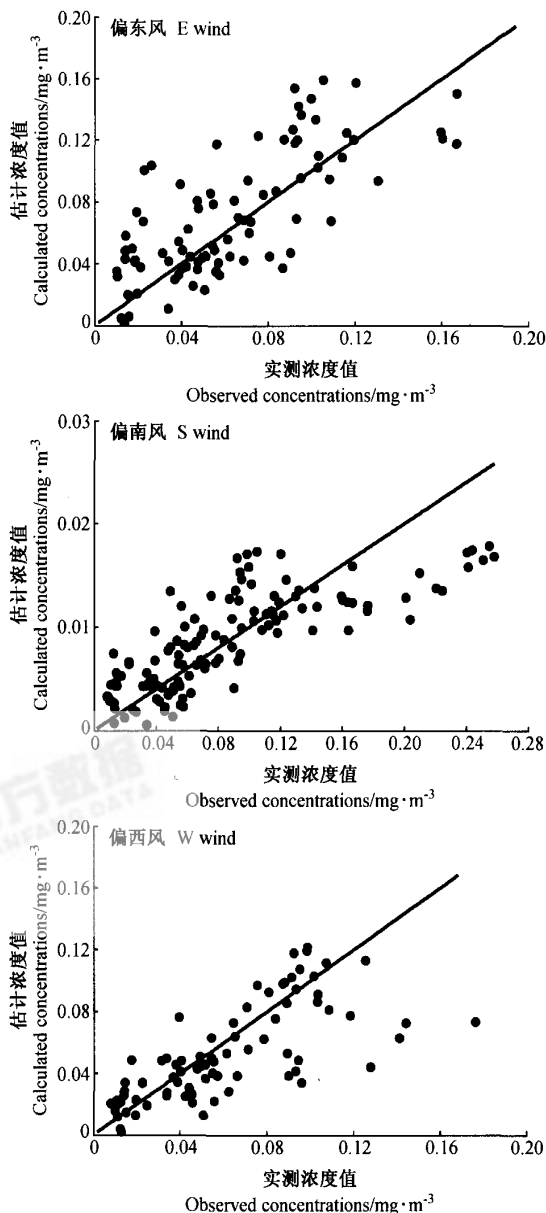


图 7 回归方程得到的 O_3 估计值与实测值的比较

Fig. 7 Comparison between O_3 concentration calculated by regression equations and the values experimentally observed.

偏南风:

$$[O_3] = (-226.31 \pm 25.62) + (8.63 \pm 0.75)T \\ - (0.96 \pm 0.12)R_h - (0.55 \pm 0.10)[NO_x], \\ R = 0.78$$

偏西风:

$$[O_3] = (-89.37 \pm 27.18) + (4.19 \pm 0.82)T \\ - (0.29 \pm 0.06)[NO_x] - (0.36 \pm 0.12)R_h, \\ R = 0.69$$

上述方程都通过回归效果及 90% 的显著水平检验。偏北风向, 相关性不显著, 未给出回归方程。

这些方程给出了不同风向下, 影响 O₃ 浓度的主要因子。方程中未引入气象变量风速, 可能是由于碳氢化合物、氮氧化物等之间的化学反应造成, 其具体原因有待进一步研究。

图 7 对不同风向下, 观测实验得到的 O₃ 浓度值与回归方程的计算值进行了比较分析, 结果表明计算值和实测值之间吻合的较好, 这说明根据 NO_x 的浓度值、少数的几个气象要素及盛行风向对 O₃ 进行污染预报的尝试是可行的。

5 小结与讨论

通过对北京夏季 325 m 气象塔污染物的垂直梯度观测资料及同期的气象要素实际观测资料的分析, 结果表明, 高浓度 O₃ 的产生是其前体物 NO_x 与多项气象参数的综合结果。

NO_x 浓度与 O₃ 浓度呈一种非线性的关系, O₃ 浓度随着 NO_x 浓度的增加呈下降的趋势, 主要是因为随着 NO_x 浓度的进一步增加, 抑制了过氧基团的生成, 使臭氧浓度降低。

高 O₃ 浓度往往与高温对应, 温度的峰值比 O₃ 浓度的峰值延迟了 1~3 h; O₃ 浓度与水汽的变化基本是呈反相关关系, 水汽与 O₃ 发生光化学反应消耗是对流层 O₃ 的一个重要的汇; 在一定的风速临界值范围内, O₃ 浓度随着风速的增大而增加。风速在不同高度上有不同的临界值: 8 m 高度上约为 2 m·s⁻¹, 120 m、280 m 约为 6 m·s⁻¹; 垂直向的动力输送对高浓度 O₃ 有着重要的作用。

由不同风向的多元回归方程得到的计算值和实测值之间一般吻合得较好, 得到的相关系数远远高于 90% 的置信水平。为了更好地了解大气中

O₃ 浓度和气象变量之间的统计相关性, 做好污染预报工作, 应该积累更多的长期监测数据和考虑更多的气象变量。本研究仅对 O₃ 与温度、相对湿度、风速、NO_x 的统计相关性做了初步探讨, 其研究有待今后进一步深入。

参考文献

- [1] Staehelin J, Thudium J, Burhler R, et al. Trends in surface ozone concentrations at ARISA (Switzerland). *Atmos. Environ.*, 1994, **28** (1): 75~87
- [2] 王明星. 大气化学. 北京: 北京气象出版社, 1991. 283~290
Wang Mingxing. *Atmosphere Chemistry* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 283~290
- [3] 王春乙, 关福来. O₃ 浓度变化对我国主要农作物产量的可能影响. 应用气象学报, 1995, **6** (增刊): 69~74
Wang Chunyi, Guan Fulai. The potential effects of O₃ concentration change on yield of main crops in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (Suppl.): 69~74
- [4] 张远航, 邵可声, 唐孝炎. 中国城市光化学烟雾污染研究. 北京大学学报 (自然科学版), 1998, **34** (2): 392~400
Zhang Yuanhang, Shao Kesheng, Tang Xiaoyan. The Study of the Urban Photochemical Smog Pollution in China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 1998, **34** (2): 392~400
- [5] Affre C, Carrara A, Lefebvre F, et al. Aircraft measurement of ozone turbulent flux in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**: 1561~1574
- [6] Abdul-Wahab S A, Al-Alawi S M. Assessment and prediction of tropospheric ozone concentration levels using artificial neural networks. *Envir. on Modelling Software*. 2002, **17** (3): 219~228
- [7] Carpenter L J, Clemittshaw K C, Burgess R A, et al. Investigation and evaluation of the NO_x/O₃ photochemical steady state. *Atmospheric Environment*, 1998, **32** (19): 3353~3365
- [8] Tang Xiaoyan. Photochemical Smog Pollution in Lanzhou City. Proceedings of China-Korea Workshop on Atmospheric Environment' **95**, Beijing, 1995: 96~105
- [9] Tang Xiaoyan, Li Jinlong, Chen Danhua. Summertime Photochemical Pollution in Beijing. *Pure Applied Chemistry*, 1995, **67**: 1465~1468
- [10] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京地区严重大气污染的气象和化学因子. 气候与环境研究, 1999, **4** (3): 231~236
Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang, Li Jianlun, et al. Mete-

- orological and Chemical Parameters Determining the Photochemical Air Pollution in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4**: 231~236
- [11] 朱毓秀, 徐家骝. 上海市臭氧浓度某些特征及其和气象参数关系的分析. 中国环境科学, 1993, **13** (4): 269~273
Zhu yuxiu, xu jialiu. Some characteristics of ozone concentrations and their relation with the meteorological factors in shanghai. *China Environmental Science* (in Chinese), 1993, **13** (4): 269~273
- [12] 陈辉. 北京城市边界层污染物垂直分布特征研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000
Chen hui. Study on the vertical distribution of pollutants in the boundary layer in Beijing area. Ph. D. disstertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000
- [13] 李昕, 安俊琳, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气臭氧观测研究. 中国环境科学, 2003, **23** (4): 353~357
Li Xin, An Junlin, Wan Yuesi, et al. Study on the measurement of atmospheric ozone in summer with Beijing meteorological tower. *China Environmental Science* (in Chinese), 2003, **23** (4): 353~357
- [14] Finalayson B J, Pitts J N. Photochemistry of the polluted troposphere. *Science*, 1976, **192**: 111~119
- [15] 杨昕, 李兴生. 近地面 O_3 变化化学反应机理的数值研究. 大气科学, 1999, **23** (4): 427~438
Yang Xin, Li Xingsheng. A numerical study of photochemical reaction mechanism of ozone variation in surface layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (4): 427~438
- [16] 丁国安, 罗超, 汤洁, 等. 清洁地区气象因子与地面 O_3 关系的初步研究. 应用气象学报, 1995, **6** (3): 350~355
Ding Guoan, Luo Chao, Tang Jie, et al. Preliminary study of relationship of meteorological elements with surface ozone in remote area. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1995, **6** (3): 350~355
- [17] 郑向东, 丁国安, 孙敏峰, 等. 北京冬季低层大气 O_3 垂直分布观测结果的研究. 应用气象学报, 2002, (特刊): 100~108
Zheng Xiangdong, Ding Guoan, Sun Mingfeng, et al. Preliminary Analysis on Boundary Layer Ozone Vertical Profiles Observed in Beijing Urban Region, *Journal Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (suppl.): 100~108
- [18] Tsutsu mi Y, Makino Y, Jensen J. Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**: 1763~1772