

# 气象因子对近地面臭氧污染 影响的研究

徐家骝 朱毓秀\*

(上海城市建设学院环境工程系, 上海 200092)

## 提 要

本文通过对1993年春季和春夏之交的O<sub>3</sub>浓度逐日变化、日变化和气象因子关系的分析, 提出了影响O<sub>3</sub>浓度的主导气象因子和不同情况下形成高浓度O<sub>3</sub>的主要因子, 提出了大风速对逐日变化中O<sub>3</sub>浓度特高及浓度日变化峰值的重要作用, 并指出高温、低湿、小风并不是在所有情况都是促成高浓度O<sub>3</sub>的因子。另外, 雾也可以成为近地面O<sub>3</sub>浓度增值的因素, 主要原因是雾内湍流发展将高浓度O<sub>3</sub>大量输向下方。

关键词: 臭氧浓度; 气象因子; 臭氧污染。

## 一、引言

我们在1990年冬<sup>[1]</sup>、1991年夏和冬<sup>[2]</sup>曾对近地面O<sub>3</sub>和NO<sub>x</sub>进行过多日同步观测, 并和气象要素进行对比分析。为了进一步了解气象因子对近地面O<sub>3</sub>污染的影响, 我们又在1993年的冬春之交、春季及春夏之交开展O<sub>3</sub>和NO<sub>x</sub>的连续观测, 但每天观测次数从常规的2—3次增加到5次, 日变化观测从白天5次增加到昼夜12次, 还利用设置在观测点——六层实验大楼平台上的气象百叶箱, 开展气象参数的同步观测。观测点位于上海市居民区。本文将对观测时段最长的春季(4月5日—5月7日)进行逐日变化的分析, 并对其中连续4天(4月20日—4月23日)的昼夜观测和春夏之交连续3天(5月31日—6月2日)的昼夜观测结果进行日变化的分析, 从中探讨各气象因子在不同情况下对O<sub>3</sub>污染过程的不同作用, 为今后开展光化学污染的潜势预报提供物理依据和预报思路。

## 二、观测和分析方法

每天常规时5次观测, 正点为8:00, 10:00, 12:00, 14:00, 16:00, 每次采样1小时, 得小时平均浓度; 有13天是昼夜观测, 除上述7天外, 它们是: 2月24、26日, 3月5日, 4月15日、27日, 都是隔1小时采一次。浓度分析采用标准方法<sup>[3]</sup>: NO<sub>x</sub>用盐酸萘乙二胺比色法, O<sub>3</sub>用碘酸碘化钾比色法, 比色分析均使用日立150—20型

1993年8月12日收到, 1994年1月28日收到修改稿。

\* 上海城市建设学院环境工程专业89级学生顾剑斌、于晓民、周伟参加了观测和计算工作。

双光束分光光度计。 $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_3$  的采样相对标准偏差各为 4.43% 和 5.55%，分析测定的相对标准偏差各为 1.36% 和 1.72%。

### 三、气象因子对 $\text{O}_3$ 浓度逐日变化的影响

#### 1. $\text{O}_3$ 和 $\text{NO}_x$ 浓度逐日变化的特点

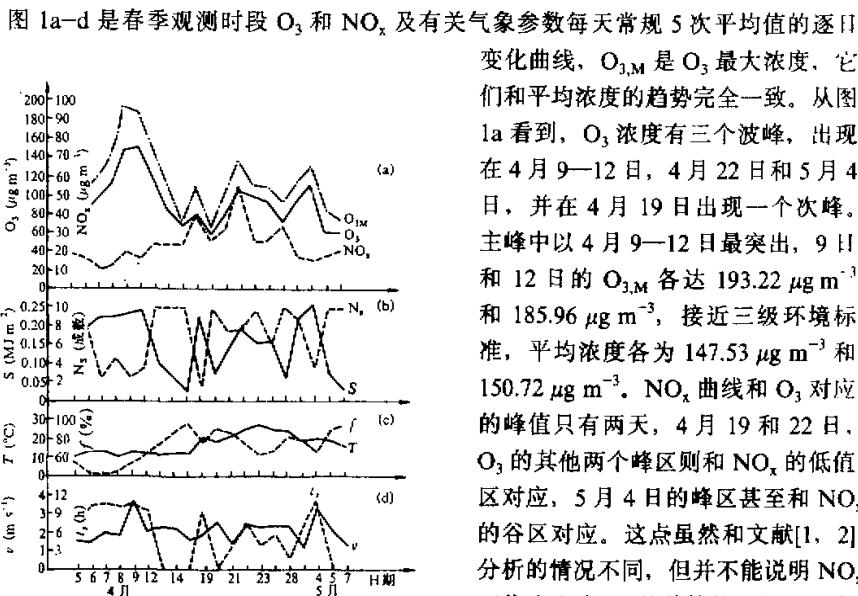


图 1  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$  浓度和气象参数白天平均值的逐日变化曲线

$\text{O}_{3,\text{M}}$ — $\text{O}_3$  最大浓度； $S$ —太阳辐射总量； $N_c$ —总云量；  
 $T$ —温度； $f$ —相对湿度； $v$ —地面风速； $I_s$ —日照时间

浓度降低的原因，但对  $\text{O}_3$  浓度却造成有利条件。

#### 2. 气象因子对 $\text{O}_3$ 浓度逐日变化的影响

春季观测时段的  $\text{O}_3$  平均浓度，最高值为最低值的 2.6 倍，一次浓度的最高值为最低值的 4.9 倍。造成  $\text{O}_3$  浓度起伏的原因比较复杂，但气象因子是重要的影响因素。将图 1a 的  $\text{O}_3$  曲线和图 1b、图 1d 的各气象参数曲线对照看： $\text{O}_3$  峰区和  $S$  峰区、 $N_c$  谷区的对应关系最好，说明日照强是造成高浓度  $\text{O}_3$  的主导因子；另外， $\text{O}_3$  峰区还和  $f$  的谷区以及 4 月 15 日以后的  $T$  的峰区相对应，说明低湿、高温是配合日照促成高浓度  $\text{O}_3$  的重要条件。值得一提的是，整个观测阶段  $\text{O}_3$  的浓度曲线中最突出的 4 月 9—12 日和 5 月 4 日两个峰区与风速最突出的两个峰区相对应。过去都认为风速小，不利于扩散，容易使大气污染物包括  $\text{O}_3$  的浓度升高，应该说，这是针对局地源而言。我们认为这次

变化曲线， $\text{O}_{3,\text{M}}$  是  $\text{O}_3$  最大浓度，它们和平均浓度的趋势完全一致。从图 1a 看到， $\text{O}_3$  浓度有三个波峰，出现在 4 月 9—12 日，4 月 22 日和 5 月 4 日，并在 4 月 19 日出现一个次峰。主峰中以 4 月 9—12 日最突出，9 日和 12 日的  $\text{O}_{3,\text{M}}$  各达  $193.22 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $185.96 \mu\text{g m}^{-3}$ ，接近三级环境标准，平均浓度各为  $147.53 \mu\text{g m}^{-3}$  和  $150.72 \mu\text{g m}^{-3}$ 。 $\text{NO}_x$  曲线和  $\text{O}_3$  对应的峰值只有两天，4 月 19 和 22 日。 $\text{O}_3$  的其他两个峰区则和  $\text{NO}_x$  的低值区对应，5 月 4 日的峰区甚至和  $\text{NO}_x$  的谷区对应。这点虽然和文献[1, 2] 分析的情况不同，但并不能说明  $\text{NO}_x$  不作为生成  $\text{O}_3$  的前体物，相反，在这两段时间(5 月 4 日，4 月 9 日—12 日)里，由于太阳辐射总量很强(图 1b)， $\text{NO}_x$  的消耗特别厉害；另外，地面风速较大(图 1d)，也是造成  $\text{NO}_x$

观测到风速大、 $O_3$ 浓度特高的现象，应当归因于动力传输作用，这可能包括平流、对流、湍流等作用。根据我们对春季 170 个  $O_3$  浓度观测记录的统计，对应于偏东风、偏南风、偏西风、偏北风时的平均浓度，分别为 92.98、93.96、78.99、89.73  $\mu\text{g m}^{-3}$ ，除偏西风时稍低外，其他风向的浓度十分接近，故可排除水平输送对  $O_3$  浓度的增值作用。因而，垂直输送的作用可能是主要的。垂直输送包括垂直向平流(如下沉气流)、对流和湍流。从天气形势看，风速最大、 $O_3$  浓度也处于峰区的 4 月 9 日和 5 月 4 日都受高压控制，但均属变性后的弱冷高压，下沉气流作用不大；这两天都是典型的晴天，日照强，但因空气比较干燥，对流没有发展(没出现低云)。然而 07 时和 19 时从地面到 900 hPa 的  $Ri$  数都是负值，说明湍流有一定发展，由于上空的动量和  $O_3$  浓度都比地面大得多，湍流的混合作用可以造成动量以及  $O_3$  指向地面的通量，这就不难解释风速大时  $O_3$  浓度很高的现象。这次观测表明，这种作用引起  $O_3$  浓度的增值比风速小、大气稳定引起  $O_3$  的增值更大(表 1)。

表 1 高浓度  $O_3$  日的气象

日期	4月7日	4月8日	4月9日	4月12日	4月13日	4月22日	4月23日	4月27日	5月3日	5月4日
最大浓度 $\mu\text{g m}^{-3}$	115.50	143.69	193.22	185.96	149.66	135.81	110.46	110.19	117.23	129.66
平均浓度 $\mu\text{g m}^{-3}$	95.30	111.52	147.53	150.72	115.65	107.46	99.95	94.63	96.67	112.97
天 气	晴	多云、晴	晴	晴、多云	阴、小雨	晴、浓雾	晴、多云	多云	晴、多云	晴
$t_s \geq 5\text{ h}$	是	是	是	是	否	是	否	是	是	是
$s \geq 0.15 \text{ MJ m}^{-2}$	是	是	是	是	否	是	是	是	是	是
$f \leq 65\%$	是	是	是	是	否	否	是	否	否	否
$T \geq 20^\circ\text{C}$	否	否	否	否	否	是	是	是	否	是
$v \geq 3 \text{ m s}^{-1}$	否	否	是	否	否	否	否	否	否	是
$v \leq 2 \text{ m s}^{-1}$	是	是	否	是	否	否	否	否	是	否

为了表明不同情况下形成高浓度  $O_3$  的主要因子，我们根据春季观测情况，定义最大浓度大于  $100 \mu\text{g m}^{-3}$  同时平均浓度大于  $85 \mu\text{g m}^{-3}$  为高浓度  $O_3$  日，则符合该标准的有 10 天(表 1)。这 10 天中只有 4 月 13 日阴有小雨，其他均为晴到多云、多云或晴天， $S$  均超过  $0.15 \text{ MJ m}^{-2}$ ， $t_s$  也都大于 5 小时(4 月 23 日例外)，其他条件则出现在不同阶段：例如  $f \leq 65\%$  在 4 月 12 日以前均能满足，但在 4 月 13 日以后绝大多数不能满足，而  $T \geq 20^\circ\text{C}$  则在 4 月 22 日以后基本都能满足，但在 4 月 13 日以前均不能满足；此外，满足小风( $v \leq 2 \text{ ms}^{-1}$ )或大风( $v \geq 3 \text{ ms}^{-1}$ )的高浓度日各有 4 例和 2 例。以上说明，日照是形成局地高浓度  $O_3$  的最主要条件，高温或低湿是居于第二位的因子，特别在过渡季节可以不同时出现，而小风也并非必要的条件，这个情况和通常文献所报道的光化学烟雾出现在高温、低湿、小风的气象情况<sup>[4]</sup>不完全一样。

为了对比，再看  $O_3$  浓度曲线出现低谷的气象情况：低谷有 5 个，分别落在 4 月 15、20、28 日，5 月 5、7 日，它们的气象情况列于表 2。

由表 2 可见，凡属  $O_3$  浓度低值，均为阴雨天气，湿度很大( $\geq 84\%$ )，太阳辐射量小，温度偏低(4 月 28 日例外)。

表 2  $O_3$  浓度低谷日的气象

日期	4月15日	4月20日	4月28日	5月5日	5月7日
天 气	小到中雨	阴	阴有中雨	阴	阴
$s (\text{MJ m}^{-2})$	0.022	0.063	0.059	0	0
$T (^{\circ}\text{C})$	11.9	17.8	25.1	19.8	16.5
$f (\%)$	95.2	90	84	87.8	94
$N_s$ (成数)	10	10	10	10	10

#### 四、气象因子对 $O_3$ 浓度日变化的影响

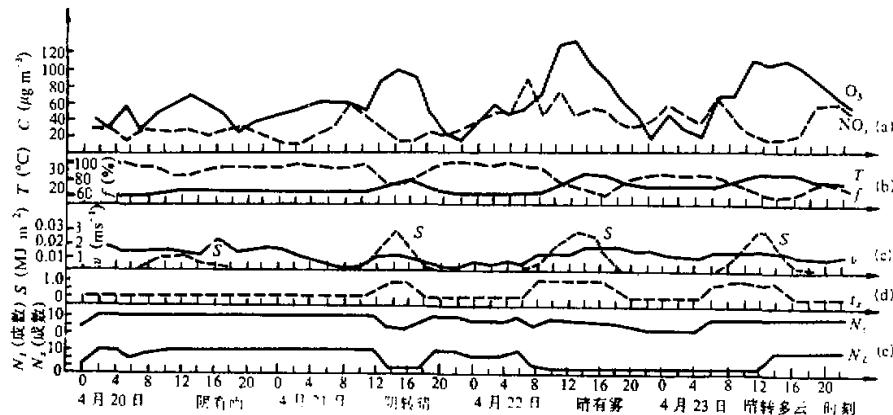
##### 1. $O_3$ 浓度日变化的特征

我们在文献[2]中指出过,  $O_3$  浓度的日变化在 12:00—15:00 出现峰值, 比  $\text{NO}_x$  的峰值时间滞后 3—5 小时。这次春季观测情况是:  $\text{NO}_x$  在 8:00—10:00 最高, 多日平均值以 8:00 最高;  $O_3$  在 12:00—14:00 最高, 多日平均值以 12:00 最高, 比  $\text{NO}_x$  滞后 4 小时, 与文献[2]的结果一致。这是白天 5 次常规观测的情况。如果是昼夜观测, 则发现  $O_3$  浓度在 04:00 或 0:00—04:00 还存在第二峰值, 如图 2、图 3 所示。

对夜间第二峰值的解释: 在晚间, 一方面  $O_3$  局地生成趋弱; 另方面,  $\text{NO}_x$  包括 NO 的减少使  $O_3$  的消除过程( $\text{O}_3 + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$ )也大大减弱。而凌晨 0:00—04:00 地面降温剧烈, 空气下沉, 还有陆风的下沉气流, 但下沉都不强, 从而将上空的  $O_3$  带向地面, 造成不太高的次峰浓度。

##### 2. 气象因子对 $O_3$ 浓度日变化的影响

先看天气背景对  $O_3$  浓度值及分布特征的影响: 在 4 月 20—23 日的过程中(图 2),

图 2 4月20—23日  $O_3$ 、 $\text{NO}_x$  浓度和各气象参数的日变化曲线

$N_L$ —低云量, 其他符号同图 1

就平均浓度和主峰浓度来看，阴有雨的4月20日最低，晴且有雾的4月22日最高，其次是晴转多云的23日，再其次是阴转晴的21日。5月31日—6月2日的过程也一样。曲线特征则表现为晴天的峰顶高而突出，主峰和次峰的高差很大；阴天的峰顶低而平缓，主次峰的高差小；晴到多云或阴雨天时，在主峰上还可出现分叉。这些现象的规律性和相应天气下的局地气象参数有关：例如，只存在于白天的太阳辐射总量 $S$ 的日变化曲线和 $O_3$ 浓度曲线的主波相当吻合。在晴天，前者均表现为高而突出，阴天都是低而平缓，对比十分鲜明，甚至在晴到多云的6月2日在 $S$ 曲线的峰顶也出现叉形。 $t_s$ 曲线在晴天或晴到多云时均和 $O_3$ 曲线对应得很好。和 $S$ 、 $t_s$ 一致的总云量 $N_s$ 曲线则是谷区和 $O_3$ 的峰区对应，峰区和其谷区对应。另外， $O_3$ 的峰区还和 $T$ 的峰区、 $f$ 的谷区相对应。这一切再次说明日照、温度和湿度对近地面 $O_3$ 污染的作用，而后两者与 $O_3$ 变化的关系要比逐日变化明显得多。

然而值得注意的是，即使处在阴天的 $O_3$ 曲线的峰值仍在中午前后，虽然图中看到的 $S$ 曲线也是对应的，但它的值很低，单靠太阳辐射作用形成的 $O_3$ 局地浓度是很不够的，不大可能形成像4月20日(阴有雨)、6月1日(阴)那样不算太低的峰值浓度(分别为 $70$ 和 $56 \mu\text{g m}^{-3}$ )，这只能归因于外来源的补充。我们在前面对风速大、 $O_3$ 浓度特高的现象曾做过解释：在高压比较弱的过渡季节， $O_3$ 的外来源主要靠垂直向的湍流输送。在逐日变化中如此，在日变化中更是如此，因为一天中，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，图2、图3中的风速曲线基本上也是这种情况，而 $O_3$ 峰值恰恰也在这段时间。事实上，国外也曾报道过地面 $O_3$ 浓度日变化峰值时间对应于地面风速峰值时间的观

测结果<sup>[9]</sup>，但对逐日变化中风速大时 $O_3$ 浓度高的情况还没见过报道。

晴且有雾的天气 $O_3$ 浓度特高也是观测到的现象，我们在过去观测中就曾遇到过，这次4月22日的例子更为典型：这天是雨后的一个晴天，湿度大，风速小，具备辐射雾的条件。从零点出现雾，逐渐加浓达到大雾的程度。雾持续到上午10点才开始消散，这时的 $O_3$ 浓度已经上升到 $129.98 \mu\text{g m}^{-3}$ ，中午12点的主峰浓度达到 $135.81 \mu\text{g m}^{-3}$ ，是这4天过程中最大的浓度。我们曾经通过几个实例研究了雾对地面 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$ 浓度的影响<sup>[8]</sup>，说明影响是显著的。理论和观测都证明<sup>[7,8]</sup>，随着雾的形成和增厚，

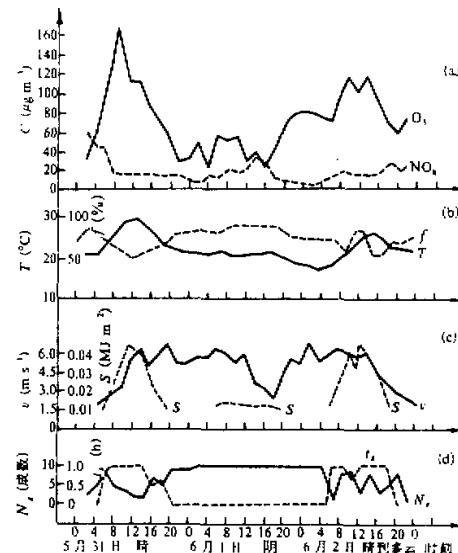


图3 5月31日—6月2日 $O_3$ 、 $\text{NO}_x$ 浓度和各气象参数的日变化曲线

符号同图1

雾内原来的稳定层结构自下而上地遭到破坏，逐渐变成不稳定层结，湍流随之加强，湍流交换系数在冷却率最大的雾顶附近达到最大，造成雾内污染物的混合，而原来地面逆温层则逐步抬升到雾顶。 $O_3$ 等污染物便集聚在雾顶逆温层附近。当雾顶逆温减弱、消失，上空较高浓度的 $O_3$ 借助湍流交换而大量被输送到下方，很像日出后逆温层抬升、消失中的“熏烟”过程造成地面高浓度污染的情形。另外方面，对水滴来讲 $O_3$ 是溶解度较低的气体，属可逆吸收<sup>[9]</sup>；更因雾滴小，沉降慢，在空中停留时间长，到达地面之前就达到吸收平衡了，所以雾对地面 $O_3$ 几乎没有清除作用。由上可见，有雾时 $O_3$ 向下输送很多，而清除很少，加上雾消后太阳辐射的光化学反应，造成雾后晴天很高的 $O_3$ 浓度。

## 五、结 论

(1)气象因子对近地面 $O_3$ 浓度有着重要的作用，但在不同情况下，主导因子不尽相同。

(2)高温、低湿、小风并不是在所有情况都是促成高浓度 $O_3$ 的因素。

(3)垂直向的动力传输对高浓度 $O_3$ 有着重要的作用，在过渡季节，主要是湍流混合引起的动量和 $O_3$ 的向下输送，故表现为风速大时 $O_3$ 浓度高。这是一种外来源，它甚至可超过局地源。

(4)如果说风速大 $O_3$ 浓度高对日平均值的逐日变化只是不多的个例，则小时值的日变化却是普遍情况，原因是中午大气最不稳定，湍流引起的动量和 $O_3$ 的向下输送最强，即使处在阴天的 $O_3$ 日变化曲线仍在中午出现峰值，单靠太阳辐射是很难做出解释的，可不可以说这时的湍流输送已经成了主导因子。

(5)我们还观测到雾后晴天很高的 $O_3$ 浓度，主要是雾内湍流的发展将集聚在雾顶逆温层附近的高浓度 $O_3$ 大量输送到地面的结果。

(6)观测到夜间 $O_3$ 浓度的第二峰现象，可能是地面强烈降温使空气下沉从而将上空较高浓度的 $O_3$ 带到地面的结果，由于下沉较弱，次峰浓度也不高。

## 参 考 文 献

- [1] 朱毓秀、徐家骝，1993，近地面臭氧、氮氧化物的垂直梯度及其和气象的关系，气象学报，51，495—504。
- [2] 朱毓秀、徐家骝，1993，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，13，269—273。
- [3] 吴鹏鸣等，1989，环境空气监测质量保证手册，中国环境科学出版社，197—203；216—220。
- [4] 张秀宝等，1989，大气环境污染概论，中国环境科学出版社，59—60。
- [5] Mizuno, T. et al., 1981, Some characteristics of the diurnal variation of ozone in the atmospheric environment. *Pollution Control*, 16, 323—330.
- [6] 周斌斌、徐家骝，1993，雾对大气污染物迁移扩散的影响，环境科学，14，87—89。
- [7] 周斌斌，1987，辐射雾的数值模拟，气象学报，45，21—29。
- [8] 孙旭东等，1991，二维平流辐射雾的数值模拟，大气科学，15(6)，99—109。
- [9] Hales, J.M., 1972, Fundamental of the theory of gas scavenging by rain, *Atmos. Environ.*, 6, 635—659.

## Effects of the Meteorological Factors on the Ozone Pollution near the Ground

Xu Jialiu and Zhu Yuxiou

(Department of Environmental Engineering, Shanghai Institute of Urban Construction, Shanghai 200092)

### Abstract

Based on the data observed in the 1993 spring and early summer, we analyze the relations of diurnal and the day-by-day variations of ozone with the meteorological factors and obtain the leading meteorological factors in affecting the ozone concentration. It can be seen that the main factors in different situations can play different roles in the formation of high ozone concentration. We find also the important effects of high wind speed on the high ozone value. High temperature, low humidity, or low wind speed may not always cause high ozone concentration. In addition, fog is also a factor to increase the ozone concentration near the ground because the evolution of turbulence in fog may cause a great ozone transfer towards the ground.

**Key words:** ozone concentration, meteorological factors, ozone pollution.