

天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法

姚青, 孙玫玲, 刘爱霞

天津市气象科学研究所, 天津 300061

摘要: 气象因素在影响夏季臭氧浓度水平和变化特征方面扮演着重要作用。通过对2008年夏季天津地面臭氧体积浓度和气象因素的相关分析, 揭示高浓度臭氧发生时的典型气象特征, 并初步建立了预测地面臭氧浓度的气象学方法。结果表明: 影响臭氧浓度的主要气象因素是气温、相对湿度和风速、风向, 当14时气温大于30℃, 相对湿度低于60%, 风向为偏西或偏南时, 高浓度臭氧的发生概率较高。采用14时气温、相对湿度和风速等气象参数拟合臭氧体积浓度, 效果良好。

关键词: 臭氧; 气象因素; 拟合; 天津

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2009)06-2206-05

京津地区工业高速发展和汽车保有量的迅速增加, 促使环渤海地区空气污染特征由煤烟型向煤烟-汽车尾气混合型转化, 其主要污染特征体现在高颗粒物浓度和夏秋季节的高O₃浓度, 并且区域性污染特征明显, 特别是在稳定的大气边界层结构下污染物持续不断积累, 极易形成持续性重污染和区域污染。近地面臭氧浓度日益增高, 不仅危害人类健康, 对生态环境造成严重的危害; 同时作为一种温室气体, 臭氧在地球辐射平衡中扮演着重要角色, 影响全球气候变化。近地面臭氧的形成机理和变化规律已成为环境科学尤其是空气污染研究的一个重要前沿课题。

北京、济南等地的学者对环渤海地区城市地面臭氧和边界层臭氧进行了多年连续观测, 获得了大量资料, 取得了很多有价值的成果^[1-5]。天津地区对臭氧的研究目前多集中在污染水平、季节分布以及与前体物的相互关系等^[6-10], 对臭氧分布具有重要影响的气象条件研究不多, 国内对臭氧浓度水平研究一般采用小时均值或最大小时值, 并不能很好的反映每日臭氧污染状况, 笔者对天津城区2008年夏季地面臭氧体积浓度的每日最大8h均值与相关气象因素的观测数据进行分析, 试图从中找到一些变化规律, 为开展以高浓度臭氧为标志的光化学污染趋势预报和寻找可行的气象指标提供依据和思路。

1 观测实验

中国气象局天津大气边界层观测站(北纬39°06', 东经117°10', 海拔高度3.3 m)位于天津市城区南部, 其北距快速路约100 m, 东临友谊路-友谊南路, 西南方向主要为住宅区, 交通源对其有一定的影响。采样点设在观测站院内一座一层平房的楼顶, 离地高约3 m, 采样管使用聚四氟乙烯管,

观测期为2008年7月3日-8月31日。

O₃观测仪器采用美国API公司生产的Model 400E型紫外光度法O₃分析仪, 量程为500×10⁻⁹(体积分数, 下同), 最低检出限为0.6×10⁻⁹, 噪音为0.3×10⁻⁹, 精度为读数的0.5%, 零点漂移低于1×10⁻⁹(24 h), 满度漂移低于读数的1%(7 d), 响应时间为10 s, 流量为(800±80) mL·min⁻¹。采样前后仪器均经过sabi2010气体标仪进行零点校正和满度校正, 每天连续24 h采样监测, 每5 min记录1次数据, 使用Microsoft Excel及Origin软件进行数据处理。同期的气象资料采用观测站院内的天津城市气候监测站(位于地面观测场内的自动气象站)数据。

2 结果与讨论

2.1 臭氧浓度水平与变化规律

我国城市近地层臭氧监测执行二级标准(GB/T 18883-2002《室内空气质量标准》), 小时均值限值为200 μg·m⁻³, 约合100×10⁻⁹。WHO在2005年根据最新研究结果, 对部分准则值进行了修订, 现行《WHO空气质量全球指导标准2005更新版》提出每日最大8小时均值(记作MAX8)限值为100 μg·m⁻³, 约合50×10⁻⁹, 过渡性中期限值为160 μg·m⁻³, 约合80×10⁻⁹。我国室内空气臭氧质量标准(GB 3095-1996《环境空气质量标准》)目前执行小时均值限值约为80×10⁻⁹。

我国目前使用的臭氧标准限值均为小时值, 浓度水平最高的夏季其超标率一般多在1%~3%^[1-2, 11], 较低的超标率并不能完全反映城市近地层臭氧的实际污染状况, 因为即使是在臭氧浓度最高的夏季, 其夜间和早晨臭氧浓度也较低, 大量的低值“拉低”了超标率, 本次观测期内如按《环境

基金项目: 天津市自然科学基金项目(08GCYBGC10200); 天津市气象局科研课题(200909)

作者简介: 姚青(1980年生), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为大气环境与大气化学。E-mail: yao.qing@163.com

收稿日期: 2009-09-17

空气质量标准》计算其超标率为 1.4%，但 60 个观测日内有 6 d 的日最大小时值（记作 MAX1）大于国家二级标准（ 100×10^{-9} ），出现小时浓度超标的观测日应该记作臭氧超标日，而不应该被“湮没”在较低的小时超标率中，如此计算则观测期内的“日超标率”达到 10%。现行环境空气质量标准缺乏对臭氧超标日的界定方法，因此笔者参照 WHO 标准，选择每日最大 8 小时均值，以其过渡性中期限值（ 80×10^{-9} ）作为临界浓度，MAX8 超过这一浓度限值记作臭氧高值日，并以此为基础研究臭氧体积浓度与气象因素的相互关系，并初步建立符合天津本地实际的臭氧高值气象预警指标体系。

本文为简化计算过程，将观测期内每日 11—18 时这 8 h 的平均值近似记作 MAX8，而不进行每日筛选，一般而言，作这样的近似是合理且可行的。图 1 为观测期内 O_3 体积浓度和气温、相对湿度、

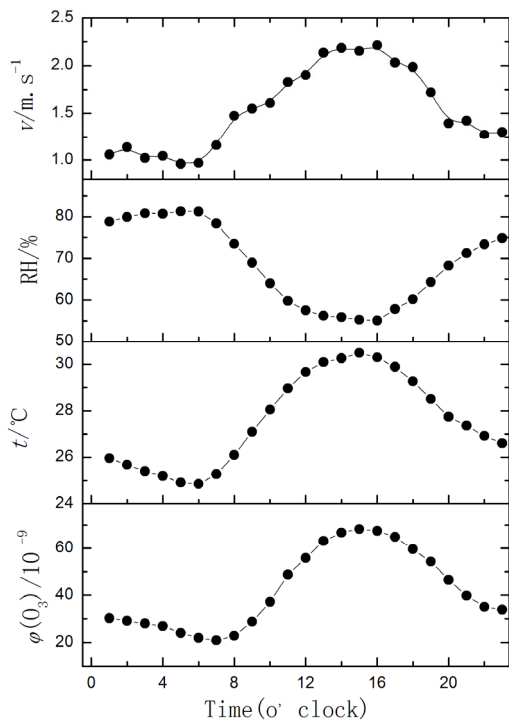


图 1 O_3 浓度、气温、相对湿度和风速日变化特征

Fig.1 Hourly variation of O_3 concentration, t, RH and v

风速的日变化特征。 O_3 浓度小时均值全天分布呈单峰结构，6 时出现最小值，为 20.98×10^{-9} ，随着太阳辐射强度和气温逐渐升高， O_3 小时均值逐渐增大，至 14 时出现最大值，达到 68.23×10^{-9} ，一日内小时均值最高的 8 个小时为 11—18 时，浓度范围为 $54.26 \times 10^{-9} \sim 68.23 \times 10^{-9}$ ，其余 16 小时的浓度范围为 $20.98 \times 10^{-9} \sim 48.71 \times 10^{-9}$ ，因此一般有每日 $MAX1 > MAX8 > DAV$ （如图 2，臭氧体积浓度日均

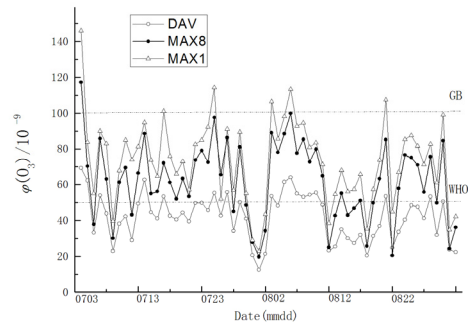


图 2 2009 年夏季 O_3 浓度逐日变化特征

Fig.2 Daily variations of ozone concentrations in summer of 2009

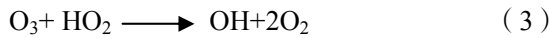
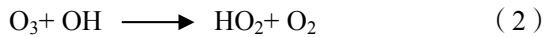
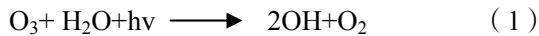
值, Daily Average Value, 记作 DAV), 但如果 MAX1 不发生在 11—18 时 (唯一的例外在 8 月 21 日, MAX1 发生在夜间 1 时), 即 MAX8 与 11—18 时不完全吻合, 则可能发生 $MAX8 < DAV$ 的情况。在 60 个观测日内, 经此简化计算的臭氧高值日发生频率为 20%。谈建国等人^[12]在上海进行的研究, 采用 MAX1 是否高于 80×10^{-9} 作为高浓度臭氧的区分标准, 臭氧高值日发生频率约为 10%, 如按该方法计算则有天津地面臭氧约一半观测日发生臭氧高值, 这可能与天津盛夏光照强烈, 气象条件适合臭氧堆积以及临近地区有大量石化行业等因素有关。

2.2 气象因素对臭氧浓度的影响

气象因素在臭氧的形成和转化过程中起着非常重要的作用, 它通过影响前体物的扩散、大气环流、光化学环境等影响臭氧浓度的变化。从图 1 可以发现 O_3 体积浓度与气温、风速的日变化趋势一致, 最大值均出现在 13—15 时, 最小值出现在 4—6 时, 全天分布呈单峰结构, 这是因为温度作为太阳辐射强弱的重要指标, 一般存在明显的日变化特征, 午后高温一般也伴随着强日照, 易发生一系列光化学反应而生成 O_3 ^[13], 而且随着温度的升高, 生物排放量增大, O_3 前体物浓度增加, 也促进了 O_3 浓度的增大。午后风速增大, 同时臭氧体积浓度达到最大值, 表明外来源影响不容忽视, 因为如果仅存在单纯的局地源, 较大的风速应该不利于污染物富集, 从而令 O_3 浓度降低, 地面风速大, 垂直动量输送加强, 有利于臭氧从浓度较高的高空往下输送, 而且随着风速和湍流作用的增强, 对光化学反应起加速作用, 可能也是造成午后高浓度臭氧的重要原因之一。

O_3 体积浓度与相对湿度的日变化趋势相反, 一日内 O_3 浓度最高的午后存在高温, 低相对湿度的特点, 这是由于空气中大量水汽经如下反应 (1, 2, 3) 消耗 O_3 , 是形成对流层 O_3 的重要汇之一。这些反应生成的自由基 (OH, HO_2) 是大气光化学过程的

重要触发机制^[14], 丰富水汽则是反应发生的前提条件^[15]。



夏季午后是高浓度臭氧污染事件的易发期, 而午后典型气象特征体现为高温、低湿和高风速, 考察每日 MAX8 与 14 时气温、相对湿度和风速的关系, 如图 3 所示, 取 MAX8 大于 80×10^{-9} 为臭氧浓度高值, 可见全部臭氧浓度高值都发生在 14 时气温大于 30°C , 相对湿度低于 60% 的情况下, 与风速关系相对复杂, 午后风速的高低都可能带来高浓度臭氧, 这可能与风向有关。对 MAX8 与 14 时风向作散点图(图 3D), 对低浓度臭氧(小于 80×10^{-9}) 而言, 其分布较为平均, 与风向无显著相关性, 高浓度臭氧分布则与风向明显相关, 12 次 MAX8 高值中除 1 d 风向偏北, 其余为偏西和偏南方向。偏西和偏南风向的 MAX8 平均值分别为 71.33×10^{-9} 和 68.20×10^{-9} , 高于偏北的 57.95×10^{-9} 和偏东的 47.89×10^{-9} 。从高浓度臭氧的来源判断, 周边地区尤其是河北、山西等省可能对天津近地层臭氧的远距离输送具有贡献, 这与北京的研究^[16]近似。

从高浓度臭氧发生时的气象条件来看, 14 时气象指标(气温、相对湿度和风向)可初步作为判定高浓度臭氧发生的气象预警指标, 当 14 时气温大于 30°C , 相对湿度低于 60%, 风向为偏西或偏南时, 发生以臭氧浓度高值为标志的光化学污染事件的概率较高, 应引起足够的重视。

2.3 臭氧浓度预报方法与效果检验

以往的研究多选取臭氧浓度与某一影响因子作线性或非线性相关分析, 计算其相关系数, 本次观测实验选择每日 11—18 时的气压、气温、露点温度、相对湿度、风速与 11—18 时臭氧小时浓度作线性相关分析, 结果显示除气温、相对湿度与之相关性较好(相关系数 R^2 分别为 0.62 和 0.39) 外, 其余因素相关性均较低(风速 R^2 为 0.08, 气压和露点温度 $R^2 < 0.01$), 表明影响臭氧水平高低的气象因素以气温(与太阳辐射强度强相关)和相对湿度为主, 风速存在一定影响。

去除相关性较低的气压、露点温度后, 采用 7 月臭氧浓度 MAX8 与每日 14 时气温、相对湿度和风速作线性多项式拟合, 结果如下:

$$[\text{O}_3] = -62.60 + 4.610 T - 0.1969 \text{RH} - 2.335 V,$$

$$R^2 = 0.6070 (N=29)$$

多因子拟合的结果显示臭氧体积浓度与气象因素的相关系数较单一, 影响因子大幅度提高, 应用该关系式对 8 月臭氧浓度 MAX8 及诸气象要素拟

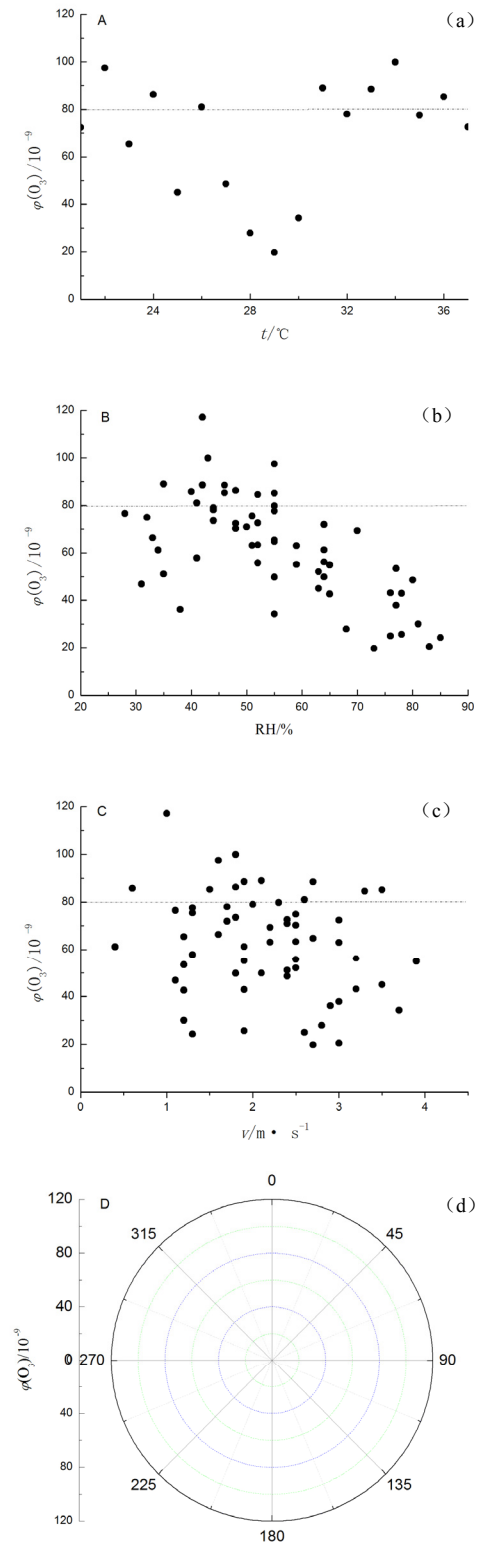


图3 臭氧最大8小时体积浓度与气象因素的关系

Fig.3 Correlation between T, RH, V, WD and MAX8

合(见图4), 8月预测值与观测值的线性相关系数 $R^2 = 0.7466$, 高于7月的0.4751, 表明该拟合关系式能够较好的通过气象因素反演出臭氧浓度数值, 选取气温、相对湿度和风速作为主要气象因素

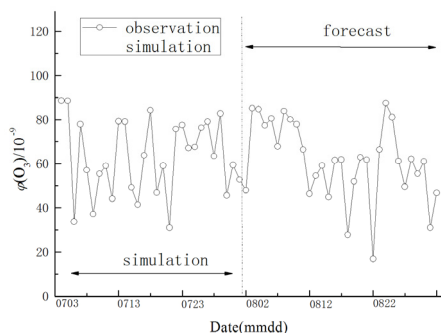


图4 臭氧最大8小时体积浓度观测值与拟合值比较

Fig.4 Ozone concentration experimentally observed vs. the values calculated by the regression equation

进行拟合也是合适的。

值得注意的是，从7、8月模拟值（8月模拟值实际上也是预测值）和观测值比例关系（图5）上可见，部分比值大于1，并且随着时间的推移，这一比值存在上升的趋势。这与天津8月6—15日的机动车限行有关，限行期间及以后的几天，来源于交通源的前体物NO、NO₂、CO大幅减少，致使臭氧浓度逐日降低，而在本次多项式拟合过程中，忽略前体物浓度变化，假定臭氧浓度仅依赖于气象因素变化，模拟值逐日变化较为平稳，造成预测期模拟值与观测值比值高于7月。在进一步的拟合研究中，应加入前体物浓度等影响因子，以提高拟合准确度和实用性。

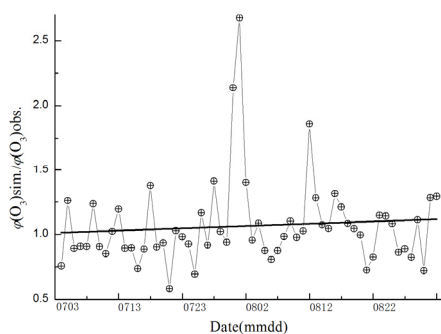


图5 臭氧最大8小时体积浓度观测值与拟合值比值的变化趋势

Fig.5 Daily variations of ratio of Ozone concentration observed to concentration simulated

3 结论

(1) 天津夏季地面臭氧分布具有明显的日变化特征，11-18时是主要的臭氧高值区，也是臭氧监测和预报最重要的时期。

(2) 影响臭氧浓度的主要气象因素是气温、相对湿度和风速风向，14时气温大于30℃，相对湿度低于60%，风向为偏西或偏南时，高浓度臭氧的发生概率较高。

(3) 采用14时气温、相对湿度和风速等气象参数，多项式线性拟合臭氧浓度，模拟值与实测值符合良好，对预测臭氧浓度具有参考意义。

致谢：天津市气象科学研究所韩素芹高工和中国科学院城市环境研究所郭青海助理研究员对本研究工作提供了帮助，在此表示衷心的感谢。

参考文献：

- [1] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, 28(4): 706-711.
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ concentrations in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, 28(4): 706-711.
- [2] 殷永泉, 李昌梅, 马桂霞, 等. 城市臭氧浓度分布特征[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 16-20.
YIN Yongquan, LI Changmei, MA Guixia, et al. Ozone concentration distribution of urban[J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 16-20.
- [3] 单文坡, 殷永泉, 杜世勇, 等. 夏季城市大气 O₃ 浓度影响因素及其相关关系[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1276-1281.
SHAN Wenpo, YIN Yongquan, DU Shiyong, et al. Ozone pollution, influence factors and their correlation at urban area in summer[J]. Environmental Science, 2006, 27(7): 1276-1281.
- [4] 刘洁, 张小玲, 张晓春, 等. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 2006, 19(4): 19-25.
LIU Jie, ZHANG Xiaoling, ZHANG Xiaochun, et al. Surface ozone characteristics and the correlated factors at shangdianzi atmospheric background monitoring station[J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(4): 19-25.
- [5] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中 SO₂、NO_x、CO 和 O₃ 体积分数变化分析[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1585-1589.
AN Junlin, WANG Yuesi, LI Xin, et al. Measurement on the atmospheric SO₂, NO_x, CO and O₃ concentrations in Beijing[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1585-1589.
- [6] 姚青, 刘爱霞, 张小玲, 等. 天津秋季地面 O₃ 和 NO_x 的浓度变化特征与影响因素[EB/OL]. 环境污染与防治, 2007, 29(10): www.zjepc.com
YAO Qing, LIU Aixia, ZHANG Xiaoling, et al. Characteristics of surface ozone and nitrogen oxide in autumn in Tianjin, and its correlated factors[EB/OL]. Environmental Pollution and Control, 2007, 29(10): www.zjepc.com
- [7] 姚青, 樊文雁, 黄鹤, 等. 天津夏季地面 O₃ 浓度变化规律与影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 12-16.
YAO Qing, FAN Wenyan, HUANG He, et al. Surface ozone characteristics and the correlated factors in summer in Tianjin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 12-16.
- [8] 黄鹤, 姚青, 张文煜, 等. 天津夏季低层大气 O₃、NO₂ 浓度垂直观测研究[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 315-320
HUANG He, YAO Qing, ZHANG Wenyu, et al. Preliminary analysis on boundary layer O₃ and NO₂ observed in summer in Tianjin area[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(3): 315-320.
- [9] 韩素芹, 黄岁樑, 边海, 等. 天津市秋季臭氧浓度影响因素及相关关系研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(12): 893-895.
HAN Suqin, HUANG Suiliang, BIAN Hai, et al. Correlations of af-

- fecting environmental factors with the ozone pollution in Tianjin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2007, 29(12): 893-895.
- [10] 刘彩霞, 冯银厂, 孙韧. 天津市臭氧污染现状与污染特征分析[J]. *中国环境监测*, 2008, 24(3): 52-56.
- LIU Caixia, FENG Yinchang, SUN Reng. The analysis of ozone distributions in Tianjin and its characteristics[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2008, 24(3): 52-56.
- [11] 袁野, 范莉, 邹玉林, 等. 成都市大气中臭氧的分布及污染水平[J]. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(2): 44-45.
- YUAN Ye, FAN Li, ZOU Yulin, et al. Ozone pollution level in the atmosphere of Chengdu[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2003, 16(2): 44-45.
- [12] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. *热带气象报*, 2007, 23(5): 515-520.
- TAN Jianguo, LU Guoliang, GENG Fuhai, et al. Analysis and prediction of surface O₃ concentration and related meteorological factors in summer time in urban area of Shanghai[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(5): 515-520.
- [13] 杨昕, 李兴生. 近地面 O₃ 变化化学反应机理的数值研究[J]. *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[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1999, 23(4): 427-438.
- [14] 任丽红, 胡非, 王玮. 北京夏季 O₃ 垂直分布与气象因子的相关研究[J]. *气候与环境研究*, 2005, 10(2): 166-174.
- REN Lihong, HU Fei, WANG Wei. A study of correlations between O₃ concentration and meteorological factors in summer in Beijing[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(2): 166-174.
- [15] 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[J]. *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[J]. *China Environmental Science*, 1993, 13(4): 269-273.
- [16] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 944-951.
- AN Junlin, WANG Yuesi, SUN Yang. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 944-951.

Analysis and prediction of surface ozone concentration and related meteorological factors in summer in Tianjin

YAO Qing, SUN Meiling, LIU Aixia

Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300061, China

Abstract: Meteorological factors played an important role in ozone concentrations and their temporal variation characteristics. Based on the observational data of ground O₃ and meteorological factors in the urban area of Tianjin in summer, 2008. Typical meteorological factors with high ozone concentration were revealed, and a simple statistical equation was fitted to forecast ground-level O₃ concentration. The results showed that main meteorological factors were temperature, relative humidity, wind speed and wind direction. All the factors, such as high temperature, low relative humidity and westerly or southerly, led to high ozone concentration. With temperature, relative humidity and wind velocity at 14:00, a simple statistical function was fitted, which allowed the maximum 8 hours ozone concentration be forecasted to some extent.

Key words: ozone; meteorological factors; fitting; Tianjin