

# 包头市大气臭氧污染特征分析

周海军<sup>1,2,3</sup>, 樊庆云<sup>4</sup>, 卢振国<sup>5</sup>, 张军<sup>4</sup>, 刘涛<sup>4</sup>, 目仁更<sup>4</sup>

- (1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古自治区蒙古高原环境与全球变化重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区湿地修复工程实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022; 4. 内蒙古自治区环境监测中心站, 内蒙古 呼和浩特 010011; 5. 包头市环境监测站, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:**利用包头市2015年环境空气自动监测数据,分析包头市臭氧(O<sub>3</sub>)时空分布特征。结果表明:2015年全市O<sub>3</sub>日最大8 h均值有26 d超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值,且主要出现在6—8月,夏季O<sub>3</sub>污染问题突出。白天太阳辐射较强,O<sub>3</sub>浓度明显高于夜间。夏季O<sub>3</sub>浓度达到峰值的时间比冬季早1 h,这与夏季日出时间比冬季早有关。O<sub>3</sub>前体物浓度采暖季高于非采暖季,O<sub>3</sub>浓度呈相反规律。东河湾龙湾离城区相对较远,颗粒物浓度低,太阳辐射较强,致使O<sub>3</sub>浓度高于其他点位。

**关键词:**臭氧;臭氧前体物;污染特征;包头

中图分类号:X515

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2019)01-0019-05

## Characteristics of Ozone Pollution in the Atmosphere of Baotou

ZHOU Hai-jun<sup>1,2,3</sup>, FAN Qing-yun<sup>4</sup>, LU Zhen-guo<sup>5</sup>, ZHANG Jun<sup>4</sup>, LIU Tao<sup>4</sup>, MU Ren-geng<sup>4</sup>

- (1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Wetland Restoration Engineering Laboratory, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China; 4. Environmental Monitoring Center of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 5. Environmental Monitoring Station of Baotou, Baotou, Inner Mongolia 014010, China)

**Abstract:** Based on automatic monitoring data in Baotou during 2015, the characteristics of ozone in air were analyzed. The results showed that there were 26 days of maximum 8-hour average of ozone over the secondary standard limit of ambient air quality standards (GB 3095—2012), mainly through June to August, indicating heavy ozone pollution in summer. The concentration of ozone during daytime significantly higher than that at nighttime. The peak time in summer was earlier than that in winter due to the early sunrise. In contrast to ozone, the concentration of ozone precursors were higher during heating period than that in non-heating period. The concentration of ozone in Donghehonglongwan site was higher than that in other sites for it was far from urban, where the particulate concentration was low and sun radiation was strong.

**Key words:** Ozone; Ozone precursors; Pollution characteristic; Baotou

近年来,随着工业化、城镇化的迅速发展,以臭氧(O<sub>3</sub>)为特征的大气光化学污染开始显现<sup>[1]</sup>,引起社会的广泛关注,O<sub>3</sub>已成为影响城市环境空气质量的主要污染物之一。夏季O<sub>3</sub>污染问题尤为突出,经常成为影响环境空气质量的首要污染物,对环境<sup>[2]</sup>、健康<sup>[3]</sup>乃至全球气候<sup>[4-5]</sup>等产生显著的

影响,O<sub>3</sub>污染治理已成为夏季大气污染防治的重

收稿日期:2017-11-24;修订日期:2018-11-08

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2018MS02001);  
环保公益性行业科研专项基金资助项目(201509020)

作者简介:周海军(1981—),男,内蒙古通辽人,高级工程师,博士,主要从事大气污染研究。

要任务。环境空气中的  $O_3$  除少量来自平流层的输入外<sup>[6]</sup>,主要来自一氧化碳(CO)、甲烷( $CH_4$ )、挥发性有机物(VOCs)等含碳化合物与氮氧化物( $NO_x$ )经过光化学反应生成<sup>[7-8]</sup>。2014年包头市172个污染天中9%以 $O_3$ 为首要污染物, $O_3$ 污染问题突出<sup>[9]</sup>。虽然关于 $O_3$ 污染的研究已屡见不鲜,但是多集中在京津冀、长三角和珠三角等地区,关于半干旱区环境空气中 $O_3$ 的污染特征鲜有报道。

今利用2015年包头市环境空气自动监测数据,探讨该市 $O_3$ 污染水平、变化特征,以期对半干旱区重工业城市 $O_3$ 污染防治提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

包头市( $E109^{\circ}15' \sim E110^{\circ}26'$ ,  $N40^{\circ}15' \sim N42^{\circ}43'$ )属半干旱中温带大陆性季风气候。全年日照时数2 955 h,年均气温 $2.0^{\circ}C \sim 7.7^{\circ}C$ ,年均降水量175 mm~400 mm,主要集中在6—8月。该市位于内蒙古自治区西部,是国家重要工业基地,主要以钢铁制造、有色金属生产、电力生产、稀土开发、机械制造、重型汽车制造和化工产品生产为支柱产业,这些产业在生产过程中排放大量二氧化硫( $SO_2$ )、 $NO_x$ 等污染物,严重影响环境空气质量。

### 1.2 数据来源

包头市共有6个环境空气自动监测点位(见图1),分别为包百大楼、惠龙物流、青山宾馆、市环境监测站、东河城环局和东河湾龙湾,均属二类环境质量功能区。采集6个点位2015年1月1日—12月31日期间 $O_3$ 、二氧化氮( $NO_2$ )、 $NO_x$ 、一氧化氮(NO)和CO等参数的小时在线监测数据,6个监测点的采样仪器和方法一致,数据具有可比性。

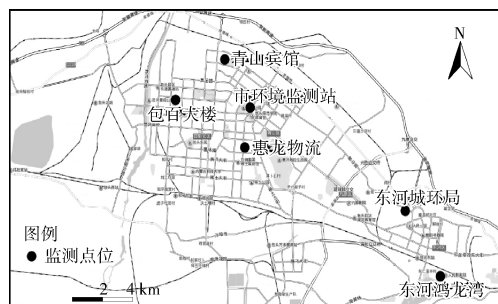


图1 包头市环境空气自动监测点位分布

Fig. 1 Distribution of air quality monitoring site in Baotou

### 1.3 统计方法

使用2015年每日 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、NO、CO的24 h平均值和 $O_3$ 日最大8 h平均值( $O_3-8 h$ ),分析 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、NO、CO等的日变化规律;将 $O_3-8 h$ 平均质量浓度按月计算平均值,分析 $O_3$ 及其前体物质量浓度的月变化规律;将全年分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—2月),观测分析 $O_3$ 及其前体物质量浓度的季节变化规律;分析 $O_3$ 质量浓度空间分布规律。

## 2 结果与讨论

### 2.1 $O_3$ 污染现状

图2(a)—(f)为2015年包头市6个监测点 $O_3$ 质量浓度日变化。由图2可见,包百大楼、惠龙物流、青山宾馆、市环境监测站、东河城环局和东河湾龙湾的 $O_3$ 质量浓度范围分别为 $6 \mu g/m^3 \sim 203 \mu g/m^3$ 、 $8 \mu g/m^3 \sim 245 \mu g/m^3$ 、 $7 \mu g/m^3 \sim 225 \mu g/m^3$ 、 $2 \mu g/m^3 \sim 225 \mu g/m^3$ 、 $6 \mu g/m^3 \sim 231 \mu g/m^3$ 和 $7 \mu g/m^3 \sim 235 \mu g/m^3$ ,年均值分别为 $(79 \pm 41) \mu g/m^3$ 、 $(94 \pm 47) \mu g/m^3$ 、 $(88 \pm 46) \mu g/m^3$ 、 $(84 \pm 49) \mu g/m^3$ 、 $(80 \pm 49) \mu g/m^3$ 和 $(99 \pm 47) \mu g/m^3$ ,全年分别有13 d、33 d、27 d、28 d、31 d和42 d  $O_3$ 质量浓度超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值( $160 \mu g/m^3$ ),6个点位超标0.01~0.53倍。全市 $O_3$ 质量浓度范围为 $12 \mu g/m^3 \sim 224 \mu g/m^3$ ,年均值为 $(88 \pm 45) \mu g/m^3$ ,全年有26 d超标,主要集中在6—8月。夏季 $O_3$ 污染严重,是包头市首要污染物。

### 2.2 日变化特征

图3(a)—(e)为2015年全年及四季包头市 $O_3$ 、 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、NO和CO质量浓度小时变化。由图3可见,包头市 $O_3$ 质量浓度为夏季>春季>秋季>冬季,而 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、NO和CO质量浓度均冬季最高。 $O_3$ 日变化呈“单峰”分布,白天明显高于夜间。 $NO_2$ 、 $NO_x$ 和CO等 $O_3$ 前体物呈“双峰”型分布,在7:00或8:00时达到第一个峰值,20:00—22:00之后出现第二个小峰值。NO春、夏季呈“单峰”分布,秋、冬季呈“双峰”分布。春夏7:00和秋冬8:00  $O_3$ 出现最低值,日出后随着太阳辐射增强,氧自由基迅速升高,与 $NO_x$ 和VOCs等 $O_3$ 前体物的光化学反应加快<sup>[10-11]</sup>, $O_3$ 浓度迅速升高,夏季14:00、冬季15:00达到峰值,之后随着太阳辐射减弱和大气光化学反应不断消耗<sup>[12]</sup>, $O_3$ 浓度不断降

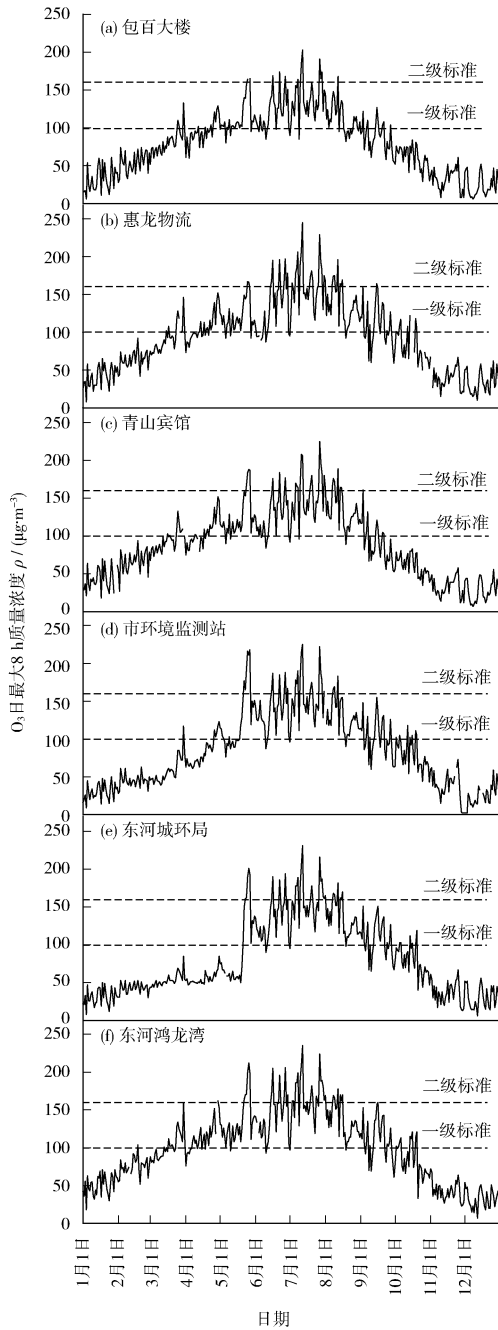


图 2 2015 年包头市 6 个监测点 O<sub>3</sub> 质量浓度日变化  
Fig. 2 Daily variation of O<sub>3</sub> concentration in six sites in Baotou during 2015

低。夏季 O<sub>3</sub> 达到峰值和出现谷值的时间均比冬季早 1 h, 这与夏季日出时间比冬季早有关。NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO 和 CO 第一个峰值出现在 8:00, 这是由城市交通早高峰引起的<sup>[13-14]</sup>, 第二个峰值出现在 20:00—22:00, 这与夜间柴油机动车尾气的大量排放有关<sup>[15]</sup>。随着太阳辐射增强, 光化学反应加剧,

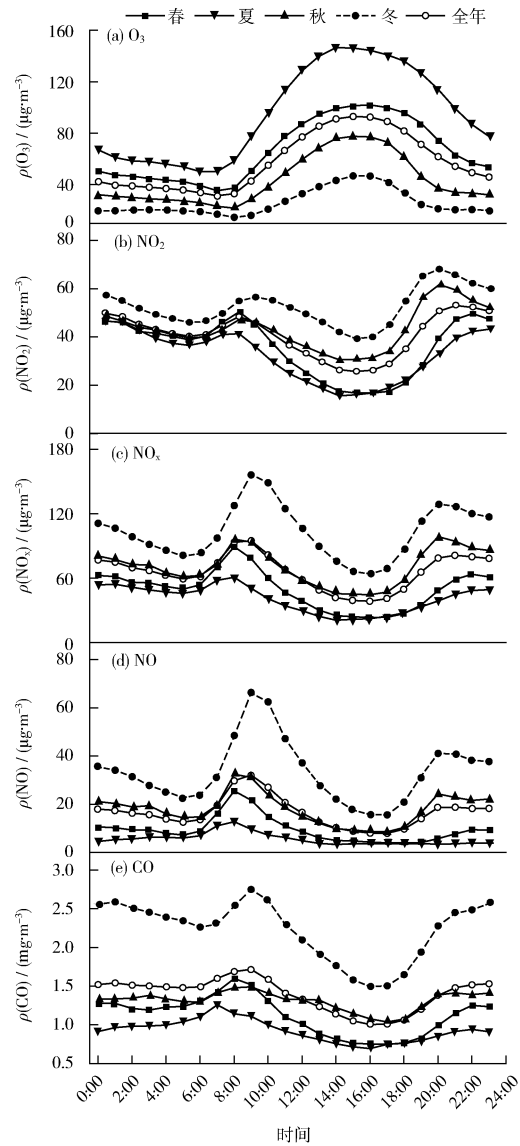


图 3 2015 年全年及四季包头市 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO 和 CO 质量浓度小时变化  
Fig. 3 Diurnal variation of O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO and CO in Baotou during the four seasons of 2015

NO 被 O<sub>3</sub> 等大气氧化剂氧化为 NO<sub>2</sub><sup>[13]</sup>, 加上夜间 NO<sub>2</sub> 光解反应停滞<sup>[16]</sup>, 在 8:00 时出现 NO<sub>2</sub> 峰值。NO<sub>x</sub> 的日变化主要是由 NO 的日变化造成, 在 16:00 时出现低值, NO<sub>x</sub> 向亚硝酸(HNO<sub>2</sub>)转化<sup>[17]</sup>。O<sub>3</sub> 前体物在 20:00—22:00 之间出现第二个峰值, 这是由夜间大气稳定度高和光化学反应速率低共同作用造成<sup>[18]</sup>。

### 2.3 月变化特征

图 4 为 2015 年包头市 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO 和 CO 质量浓度月变化。由图 4 可见, 2015 年 O<sub>3</sub> 月

均值范围为  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 156 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 先增后减, 7 月达到峰值, 12 月最低。NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO 和 CO 变化规律与 O<sub>3</sub> 相反, 先降后升, 采暖季 (10 月 15 日—翌年 4 月 15 日) 浓度明显高于非采暖季; NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 NO 6 月均值最低, 12 月最高; CO 5 月均值最低, 1 月最高。究其原因可能是: ①北方城市冬季燃煤取暖排放大量的 NO<sub>x</sub> 和 CO<sup>[19]</sup>; ②冬季太阳辐射少, 大气光化学反应较弱, NO<sub>x</sub> 和 VOCs 等前体物生成 O<sub>3</sub> 的速率较低; ③冬季容易形成逆温层, 不利于污染物扩散, 与燃煤相关的大气污染物容易积累。相反, 由于夏季降水和垂直扩散等原因, 这些与燃煤相关的大气污染物容易扩散, 且由于太阳辐射较强, O<sub>3</sub> 的生成速率较快。

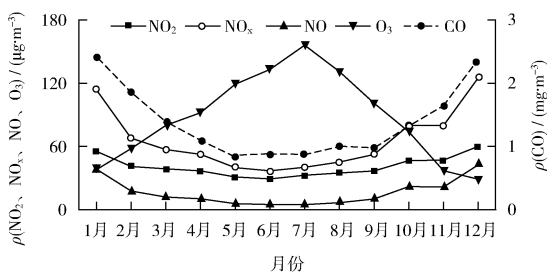


图 4 2015 年包头市 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO 和 CO 质量浓度月变化

Fig. 4 Monthly variation of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NO and CO in Baotou during 2015

### 2.4 空间分布

图 5 (a) — (f) 为 2015 年包头市 6 个监测点 O<sub>3</sub> 质量浓度频次分布。由图 5 可见, 包百大楼 O<sub>3</sub> 质量浓度在  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间频次最高, 惠龙物流、青山宾馆和东河湾龙湾 O<sub>3</sub> 质量浓度在  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间频次最高, 市环境监测站和东河城环局 O<sub>3</sub> 质量浓度在  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间频次最高。东河区的 2 个点位有明显差异, 东河城环局低浓度频次相对较高, 而东河湾龙湾高浓度频次相对较高。

图 6 为 2015 年包头市 6 个监测点 O<sub>3</sub> 质量浓度季节变化。由图 6 可见, 春季各点位 O<sub>3</sub> 平均值依次为东河湾龙湾 > 青山宾馆 > 惠龙物流 > 包百大楼 > 市环境监测站 > 东河城环局; 夏、秋季各点位 O<sub>3</sub> 平均值顺序相同, 均为东河湾龙湾 > 惠龙物流 > 东河城环局 > 市环境监测站 > 青山宾馆 > 包百大楼; 冬季各点位 O<sub>3</sub> 平均值依次为东河湾龙湾 >

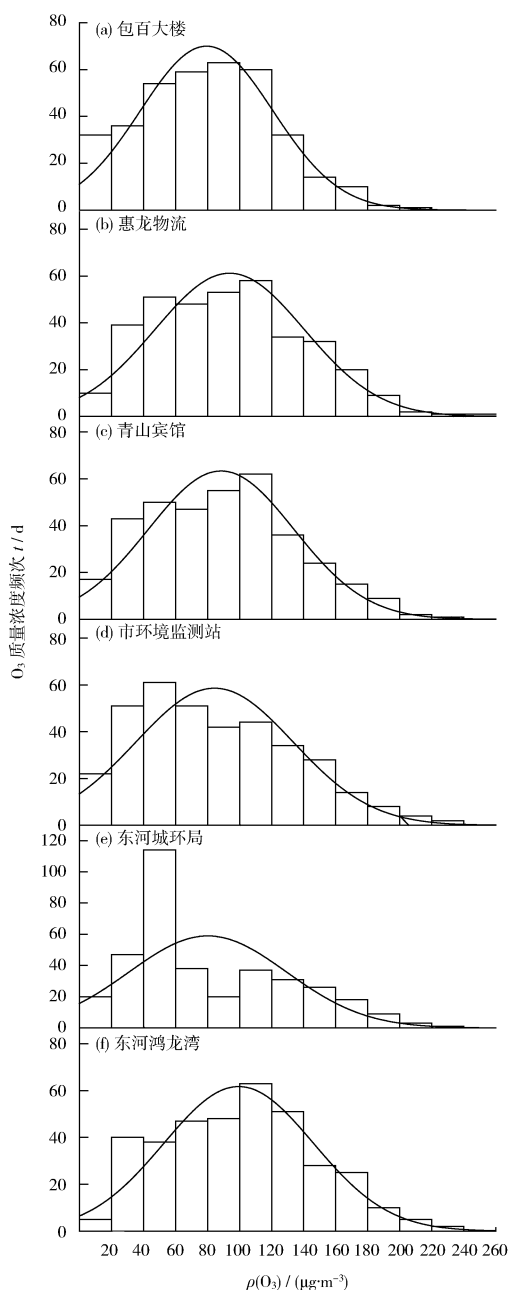


图 5 2015 年包头市 6 个监测点 O<sub>3</sub> 质量浓度频次分布

Fig. 5 Frequency distribution of O<sub>3</sub> concentration in six sites in Baotou during 2015

惠龙物流 > 青山宾馆 > 包百大楼 > 东河城环局 > 市环境监测站。包百大楼监测点在城市核心区, 周围高楼林立, 且西南边污染源密集, O<sub>3</sub> 浓度低于其他点位, 这可能与监测点周边 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 等前体物排放强度及太阳辐射强度有关。东河湾龙湾位于南海湿地景区内, 离城区相对较远, O<sub>3</sub> 浓度高于其他点位。包头市 O<sub>3</sub> 浓度总体呈现郊区高于城市

核心区,这与段玉森等<sup>[20]</sup>研究结果一致。

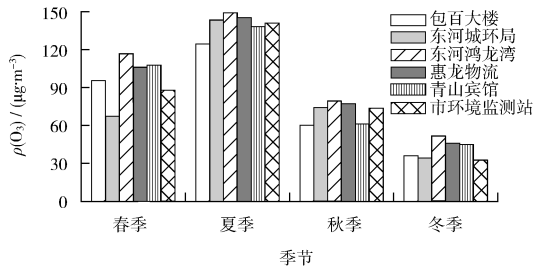


图6 2015年包头市6个监测点O<sub>3</sub>质量浓度季节变化  
Fig. 6 Seasonal variation of O<sub>3</sub> concentration in six sites in Baotou during 2015

### 3 结论

(1) 2015年包头市O<sub>3</sub>均值有26 d超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准限值,且主要出现在6—8月,夏季O<sub>3</sub>污染问题突出,O<sub>3</sub>已成为该市夏季大气污染的首要污染物。

(2) O<sub>3</sub>质量浓度日变化呈现明显的“单峰”分布,白天太阳辐射较强,O<sub>3</sub>浓度明显高于夜间。夏季O<sub>3</sub>达到峰值的时间比冬季早1 h,这与夏季日出时间比冬季早有关。

(3) O<sub>3</sub>月均值呈先升后降,NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NO和CO月均值呈先降后升变化趋势。O<sub>3</sub>前体物采暖季浓度高于非采暖季,O<sub>3</sub>呈相反规律。

(4) 包百大楼位于城市核心区,周围高楼林立,且西南边污染源密集,O<sub>3</sub>浓度低于其他点位,这可能与点位周边VOCs和NO<sub>x</sub>等前体物排放强度及太阳辐射强度有关。东河湾龙湾位于南海湿地景区内,离城区相对较远,O<sub>3</sub>浓度高于其他点位。

#### [参考文献]

[1] LI L, AN J Y, SHI Y Y, et al. Source apportionment of surface ozone in the Yangtze River Delta, China in the summer of 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144(11): 194–207.

[2] ALLEN R J, SHERWOOD S C, NORRIS J R, et al. Recent Northern Hemisphere tropical expansion primarily driven by black carbon and tropospheric ozone [J]. *Nature*, 2012, 485(5): 350–354.

[3] LIU T, LI T T, ZHANG Y H, et al. The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76(9): 59–67.

[4] UNGER N, SHINDELL D T, KOCH D M, et al. Cross influences of ozone and sulfate precursor emissions changes on air quality and climate [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

of the United States of America, 2006, 103(12): 4377–4380.

[5] RAJAB J M, MATJAFRI M Z, LIM H S. Combining multiple regression and principal component analysis for accurate predictions for column ozone in Peninsular Malaysia [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 71(6): 36–43.

[6] LEFOHN A S, WERNLI H, SHADWICK D, et al. The importance of stratospheric-tropospheric transport in affecting surface ozone concentrations in the western and northern tier of the United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(28): 4845–4857.

[7] YADAV R, SAHU L K, JAFFREY S N A, et al. Distributions of ozone and related trace gases at an urban site in western India [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2014, 71(2): 125–144.

[8] LOMBARDOZZI D, SPARKS J P, BONAN G. Integrating O<sub>3</sub> influences on terrestrial processes: photosynthetic and stomatal response data available for regional and global modeling [J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 6815–6831.

[9] 周海军, 刘涛, 都达古拉, 等. 包头市大气污染特征及其影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(2): 202–213.

[10] ZHANG Q, YUAN B, SHAO M, et al. Variations of ground-level O<sub>3</sub> and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(12): 6089–6101.

[11] 薛莲, 王静, 冯静, 等. 青岛市环境空气中VOCs的污染特征及化学反应活性 [J]. *环境监测管理与技术*, 2015, 27(2): 26–30.

[12] 闫雨龙, 温彦平, 冯新宇, 等. 太原市城区臭氧变化特征及影响因素 [J]. *环境化学*, 2016, 35(11): 2261–2268.

[13] LATIF M T, DOMINICK D, AHAMAD F, et al. Seasonal and long term variations of surface ozone concentrations in Malaysian Borneo [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573(12): 494–504.

[14] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气O<sub>3</sub>与NO<sub>x</sub>的变化特征 [J]. *生态环境*, 2008, 17(4): 1420–1424.

[15] JENKIN M E. Analysis of sources and partitioning of oxidant in the UK—Part 2: contributions of nitrogen dioxide emissions and background ozone at a kerbside location in London [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(30): 5131–5138.

[16] 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.

[17] CLAPP L J, JENKIN M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO as a function of NO<sub>x</sub> in the UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(36): 6391–6405.

[18] AWANG N R, RAMLI N A, YAHAYA A S, et al. Multivariate methods to predict ground level ozone during daytime, nighttime, and critical conversion time in urban areas [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2015, 6(5): 726–734.

[19] ZHANG Q, STREETS D G, HE B K, et al. NO<sub>x</sub> emission trends for China, 1995—2004: the view from the ground and the view from space [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D22): 22306–22323.

[20] 段玉森, 张懿华, 王东方, 等. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(S0): 34–39.