

DOI: 10.5846/stxb201306261781

张红星, 孙旭, 姚余辉, 万五星, 肖扬, 孙滨峰, William J. Manning, 韩春萌, 郜世奇, 高付元, 徐卫华, 冯兆忠, 欧阳志云, 王效科. 北京夏季地表臭氧污染分布特征及其对植物的伤害效应. 生态学报, 2014, 34(16): 4756-4765.

Zhang H X, Sun X, Yao Y H, Wan W X, Xiao Y, Sun B F, William J. Manning, Han C M, Gao S Q, Gao F Y, Xu W H, Feng Z Z, Ouyang Z Y, Wang X K. Ground-level ozone distribution pattern in summer of Beijing and its foliar injury effect upon plants. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4756-4765.

## 北京夏季地表臭氧污染分布特征及其 对植物的伤害效应

张红星<sup>1</sup>, 孙旭<sup>1</sup>, 姚余辉<sup>1</sup>, 万五星<sup>1,2,3</sup>, 肖扬<sup>1,2</sup>, 孙滨峰<sup>1,2</sup>,  
William J. Manning<sup>4</sup>, 韩春萌<sup>5</sup>, 郜世奇<sup>6</sup>, 高付元<sup>6</sup>, 徐卫华<sup>1</sup>, 冯兆忠<sup>1</sup>,  
欧阳志云<sup>1</sup>, 王效科<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京城市生态系统研究站, 北京 100085;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北师范大学, 石家庄 050016; 4. 马萨诸塞大学;

5. 中国矿业大学, 北京 100083; 6. 北京教学植物园, 北京 100061)

**摘要:** 臭氧是重要的空气氧化剂, 适当浓度的臭氧可以杀菌杀毒, 但过高浓度的臭氧可能对生物健康构成威胁。随着城市汽车保有量的迅速上升, 臭氧的前体物氮氧化物和 VOCs 排放增多, 臭氧浓度随之不断升高, 地表臭氧污染日趋严重。地表臭氧的分布特征以及其对植物的胁迫伤害效应引起了人们的重视。是通过监测北京夏季地表臭氧污染分布规律, 鉴定是否有植物受到臭氧伤害, 以及受伤害植物的种类及地理分布特征, 为城市与区域臭氧风险评估提供依据。从 2012 年 7 月 4 日到 8 月 30 日, 采用被动采样分析的方法, 在北京东北、西北、西南、东南郊区以及城区设置了 10 个研究样点, 监测平均臭氧浓度的变化。同时, 运用“森林健康专家咨询系统”鉴定植物受臭氧伤害的特征。结果表明: (1) 监测期间, 北京西部和北部山区的臭氧浓度高于平原地区; 在平原地区, 公园中的臭氧浓度高于道旁绿化带; 山区的臭氧浓度平均为  $105.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 公园中为  $68.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 道旁绿化带为  $56.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; (2) 在北京的公园和山区发现了 18 种植物符合“森林健康专家咨询系统”所述臭氧伤害特征, 有五叶地锦 (*Parthenocissus quinquefolia*)、核桃 (*Juglans regia*)、臭椿 (*Ailanthus altissima*)、喇叭花 (*Pharbitis purpurea*)、桑树 (*Morus alba*)、榆树 (*Ulmus pumila*)、国槐 (*Sophora japonica*)、金叶槐 (*Sophora japonica f. flavi-rameus*)、木槿 (*Hibiscus syriacus*)、重瓣棣棠花 (*Kerria japonica*)、山香 (*Hyptis suaveolens*)、决明 (*Cassia tora*)、毛白杨 (*Populus tomentosa*)、黄花柳 (*Salix caprea*)、大花地榆 (*Sanguisorba sitchensis*)、火炬树 (*Rhus typhina*)、大豆 (*Glycine max*)、向日葵 (*Helianthus annuus*); 没有在道旁绿化带的植物叶片发现臭氧伤害症状; (3) 臭椿 (*Ailanthus altissima*) 幼树臭氧伤害症状明显, 易于辨认, 且臭椿出现频率最高, 是分布广泛的乡土树种, 适合作为臭氧污染指示植物。

**关键词:** 北京; 臭氧分布; 植物伤害效应

## Ground-level ozone distribution pattern in summer of Beijing and its foliar injury effect upon plants

ZHANG Hongxing<sup>1</sup>, SUN Xu<sup>1</sup>, YAO Yuhui<sup>1</sup>, WAN Wuxing<sup>1,2,3</sup>, XIAO Yang<sup>1,2</sup>, SUN Binfeng<sup>1,2</sup>, William J. MANNING<sup>4</sup>, HAN Chunmeng<sup>5</sup>, GAO Shiqi<sup>6</sup>, GAO Fuyuan<sup>6</sup>, XU Weihua<sup>1</sup>, FENG Zhaozhong<sup>1</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>1</sup>, WANG Xiaoke<sup>1,\*</sup>

1 Beijing Urban Ecosystem Research Station, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences; State Key Laboratory of Urban

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (31170424); 国家自然科学基金重点项目 (41030744); 林业公益性行业科研专项 (210304301); 国家自然科学基金青年基金项目 (41201049)

收稿日期: 2013-06-26; 修订日期: 2014-06-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxk@rcees.ac.cn

and Regional Ecology, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Life Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

4 University of Massachusetts Amherst, Amherst Center, MA, USA, 01003

5 China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

6 Beijing Teaching Botanical Garden, Beijing 100061, China

**Abstract:** The ozone in the stratosphere protects the earth from harm due to ultraviolet radiation, while the ozone in the troposphere might do harm to human beings. Ozone below certain concentration can sterilize the air and do good to organisms, but high ozone concentration does harm to terrestrial ecosystems. Very high ozone concentrations were firstly found as pollutant in the smog of Los Angeles and its toxic effect upon plants received more attention. The rapid urbanization in China has caused the emission of large amounts of  $\text{NO}_x$  and VOCs (the main precursors to  $\text{O}_3$  formation). Ambient ozone concentration has been the most serious air pollution among many cities in China. In this study, our objectives are: to discern the distribution pattern of ground-level ozone in Beijing; to find whether plants were injured by ambient ozone in Beijing; and to detect the distribution pattern of the damaged plants in this region. We used passive sampler to monitor ozone concentrations at 10 sites in the city and suburb of Beijing from July 1st to August 30 in 2012 and surveyed the foliar ozone symptoms on the basis of the Forest Health Expert Advisory System from August 15 to 19. The results indicated that the ozone concentrations in mountain regions were significantly higher than those in plain regions around Beijing. In the plain region, the ozone concentration in the green belt adjacent to main motorways was lower than that in parks. The mean ozone concentrations in the mountain, the park and the green belt near to main motorway were:  $105.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $68.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  and  $56.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Except for the green belt of motorway, 18 species showed typical ozone symptoms both in mountain and in plain regions. These plants are: *Parthenocissus quinquefolia*, *Juglans regia*, *Ailanthus altissima*, *Pharbitis purpurea*, *Morus alba*, *Ulmus pumila*, *Sophora japonica*, *Sophora japonica* f. *flavi-rameus*, *Hibiscus syriacus*, *Kerria japonica*, *Hyptis suaveolens*, *Cassia tora*, *Populus tomentosa*, *Salix caprea*, *Sanguisorba sitchensis*, *Rhus typhina*, *Glycine max*, *Helianthus annuus*. *Ailanthus altissima* was native and popular in mountain and plain around Beijing and its ozone symptoms was easy to diagnose. Therefore, *Ailanthus altissima* might work as bio-indicator of ozone in Beijing.

**Key Words:** Beijing; ozone distribution pattern; foliar injury effect

臭氧对人类而言有利有弊。在海拔约 15—30 km 范围的平流层中,臭氧可以吸收太阳的高能紫外辐射,从而保护地球上的生物免遭紫外线的伤害,然而,在距离地表 15 km 范围内的对流层中,当超过一定浓度时,臭氧却是一种对地球上的生物有害的气体污染物。北京夏季大气臭氧污染十分严重,是光化学污染的典型季节,污染状况可能已超过欧美特大城市<sup>[1]</sup>。到 2012 年,北京机动车保有量已经超过 500 万辆,随着汽车保有量的增加,北京臭氧浓度有继续提升的巨大潜势。

臭氧熏蒸实验表明,高浓度臭氧可以影响小麦、水稻、油菜等植物的光合速率,以及叶片生理生化特征,最终影响生物量<sup>[2-7]</sup>。植物长期暴露在高浓度臭氧环境条件下的生长状况和生理反应能反映大气臭

氧污染的程度。因此,利用臭氧对植物的伤害胁迫效应监测指示城市及区域臭氧风险是可靠有效的途径。欧洲科学家建立了一套标准的鉴定和描述方法。这套方法把伤害症状及叶片面积标准化,每 5% 为一个等级,即 0, 5%, 10%, 15%, ..., 100%。科学工作者通过“林业健康专家咨询系统”反复的训练能够提高判断臭氧伤害胁迫症状的能力<sup>[8]</sup>。但是,地域不同,气候类型各异,物种组成不一,不同地区对臭氧敏感的植物可能不尽相同,选择本地适宜的臭氧胁迫指示生物对于评估臭氧风险意义重大。欧洲和美国的科学家运用植物的指示作用评估了臭氧风险<sup>[9-10]</sup>,目前我国在自然状况下观察臭氧对植物胁迫伤害症状的学术报道非常有限<sup>[11]</sup>,应用“森林健康专家咨询系统”在野外鉴定植物臭氧伤害的研究

未见报道。

北京城市及附近区域是京津冀城市群的重要组成部分,随着城市规模的不断扩大,机动车保有量迅速攀升,臭氧的前体物(氮氧化物)的排放量加大,臭氧污染日益加剧。研究臭氧在北京地表的分布规律,及其对生态系统的影响非常迫切和必要。利用大范围被动监测和植物指示研究北京的臭氧污染状况及生态响应保障首都及周边区域生态安全有重要意义。

本研究拟回答如下问题:(1)在夏季臭氧高风险期,北京城市及区域尺度上,地表臭氧浓度的空间分布规律是什么?(2)在自然条件下北京是否真正有植物受到臭氧胁迫伤害?受到胁迫伤害的植物种类及分布特征是什么?通过综合分析北京夏季臭氧分布规律,植物伤害物种的种类及分布特征,评估北京地表臭氧污染的现状和潜在风险,筛选北京地区臭氧伤害指示植物,为利用生物监测北京臭氧的污染状况提供方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

北京市中心位于北纬  $39^{\circ}.54'$ ,东经  $116^{\circ}.23'$ ,居于华北平原北端。北京的西、北和东北,群山环抱,东南是平原,地势西北高、东南低。西部是太行山余脉的西山,北部是燕山山脉的军都山,两山在昌平南口关沟相交,形成一个向东南展开的半圆形大山弯,人们称之为“北京湾”,它所围绕的平原即北京平原,北京城的核心及外延城区主要坐落于山前平原上。

北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。年平均气温  $10-12^{\circ}\text{C}$ ,1月  $-7-4^{\circ}\text{C}$ ,7月  $25-26^{\circ}\text{C}$ 。极端最低  $-27.4^{\circ}\text{C}$ ,极端最高  $42^{\circ}\text{C}$  以上。全年无霜期  $180-200\text{ d}$ ,西部山区较短。年平均降雨量  $600\text{ mm}$ ,为华北地区降雨最多的地区之一,山前迎风坡可达  $700\text{ mm}$  以上。降水季节分配不均匀,全年降水的  $75\%$  集中在 7、8、9 等 3 个月。

北京属于东亚季风区,冬夏风向相反。因地理位置关系,北京冬季是西北风,夏季是东南风。有的地方可能是冬季东北风,夏季西南风。又因北京地处西风带,冬季随着气压中心的位移形成西北风,夏季低气压中心位移大陆中心,大洋暖湿气流与之形

成对流,时而东南时而偏西风。这样,夏季时北京的西部、北部、东北部的山区就处于下北京城的下风向。

### 1.2 监测样地选择

为了评估北京城市与区域尺度上地表臭氧污染的空间分布规律及其植物胁迫伤害状况,共建立了 10 个监测点。这 10 个地点分布于大兴区、东城区、海淀区、门头沟区、顺义区、昌平区、延庆县等 7 个区县(图 1)。

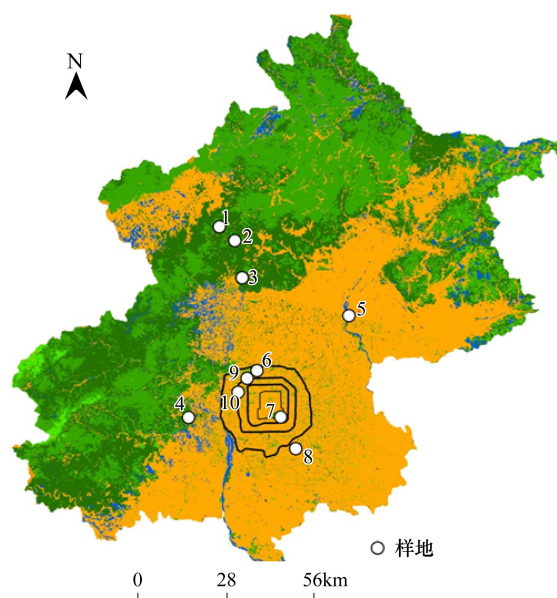


图 1 臭氧监测地点分布图

Fig.1 Distribution of ozone monitoring sites

1—4 号监测点位于山上,周围背景为森林;5—8 号位于公园内,监测地点远离交通繁忙线路;9、10 号位于城市环路绿化带,监测点毗邻北京四环路,交通繁忙

### 1.3 监测点介绍

1—4 号监测点位于北京西北方向山区,远离交通干线,周围植被覆盖率在  $95\%$  以上。1 号监测点位于北京西北部的延庆山区大庄科乡董家沟( $116^{\circ}11'29''$ ,  $40^{\circ}25'28''$ ),距离北京核心城区约  $60-70\text{ km}$ ,海拔约  $640\text{ m}$ ;2 号监测点位于北京西北部昌平和延庆交界处的山梁( $116^{\circ}14'29''$ ,  $40^{\circ}23'3''$ ),海拔约  $647\text{ m}$ ;距离北京约  $60\text{ km}$ ;3 号样地位于昌平区蟒山国家森林公园( $116^{\circ}16'43''$ ,  $40^{\circ}16'35''$ ),距离北京约  $40\text{ km}$ ,海拔约  $588\text{ m}$ ;4 号监测点位于北京城的西南山区戒台寺( $116^{\circ}4'53''$ ,  $39^{\circ}52'10''$ ),距离北京约  $30\text{ km}$ ,海拔  $369\text{ m}$ 。

5—8 号监测点都位于核心城区和郊区的公园或教学科研园区内,离交通繁忙线路较远。5 号监测点

位于顺义奥林匹克水上运动中心,乡村高尔夫俱乐部( $116^{\circ}40'58''$ , $40^{\circ}10'7''$ ),距离北京核心区约40km,周围绿化率90%以上;6号监测样地位于海淀区中国科学院生态环境研究中心院内( $116^{\circ}20'15''$ , $40^{\circ}00'26''$ ),西北方向距离交通主干道双清路约300m,海拔约45m,其他方向是植被和建筑物镶嵌的格局,植被覆盖率约50%;7号位于东城区北京教学植物园( $116^{\circ}25'39''$ , $39^{\circ}52'22''$ ),南方距离二环主干道约300m,周围植被覆盖率90%以上;8号位于大兴区,北京东南五环外凉水河滨河公园,植被覆盖率90%,代表北京城夏季上风向的情况。

9—10号位于海淀区,都位于四环路绿化隔离带中,距离四环主干道约30m,交通繁忙。9号位于海淀桥北和北京大学南门之间的绿化隔离带( $116^{\circ}18'1''$ , $39^{\circ}59'4''$ ),海拔51m;10号位于四季青桥南绿化隔离带( $116^{\circ}16'1''$ , $39^{\circ}56'39''$ ),海拔53m。

#### 1.4 气象因子的测定

从2012年7月1日到8月30日的气象数据采用中国科学院生态环境研究中心北京城市生态系统研究站的数据。

#### 1.5 臭氧浓度测定

在本研究中,从2012年7月4日到8月30日采用被动采样的方法测定臭氧的平均浓度,臭氧浓度测定的原理、方法参见“用臭氧被动采样膜片测定臭氧浓度”的说明书(Ogawa & Co., USA, Inc.)<sup>[12]</sup>。

##### 1.5.1 被动采样器的准备和野外安装及回收

在超净工作台上,用镊子打开采样器壳体,将样品膜片装入被动采集器圆柱体两端。操作过程中不要破损污染采样膜片。设置空白(实验室空白和运输空白),膜片从药瓶中取出要迅速,并迅速安装。装置好样品后,将采样器密封,避光保存。将在实验室准备好的采样器在密封、避光的条件下,运输到测定现场。把采样器安放到监测场地的风雨帽中的弹簧夹上。记录好安装采样器的位置、安装时间,安装时的天气情况。在1周后的同一个工作日,同样的时间出发,同样的交通线路,把被动采样器取下来,密封、避光运回实验室。同时布置下一个测定周期的采样器。

##### 1.5.2 室内分析

采样结束后样品运回中国科学院生态环境研究中心,在2d内进行集中分析。运输、实验室空白样

品尽可能在相同温度下操作。样品经提取后均采用Dionex公司戴安2000i型离子色谱进行定量。采用质量分数为0.5mol/L的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{NaHCO}_3$ 溶液配置淋洗液,实验过程用水为MilliQ纯水仪产生的电阻率为 $18.2\text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的高纯水。

##### (1) 淋洗液配置

0.5mol/L  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 母液9mL, 0.5mol/L  $\text{NaHCO}_3$ 母液5mL移液到1L的容量瓶中,用超纯水定容至1L,得到4.5mmol/L的 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和2.5mmol/L的 $\text{NaHCO}_3$ 的混合溶液。配置 $\text{NO}_3^-$ 标准曲线溶液:称取1.371g  $\text{NaNO}_3$ 定容至1L的容量瓶,得到1000 $\mu\text{g/g}$ 的 $\text{NaNO}_3$ 母液,分别吸取1、0.4、0.2、0.008、0.004mL的 $\text{NaNO}_3$ 母液定容至100mL容量瓶得到10、4 $\mu\text{g/g}$ , 2、0.8、0.4 $\mu\text{g/g}$ 的标准曲线溶液。

##### (2) 样品溶液的提取

用镊子将膜片取出置于25mL的比色管中。每支比色管事先加入10mL的高纯水。保证膜片完全浸入到水中。将比色管置入超声水浴锅中,保证水浴锅中水面超过比色管中水面高度。超声15min,每5min旋转比色管90度。超声完毕后,用0.45 $\mu\text{m}$ 滤膜过滤。将样品溶液转移至离子色谱瓶中准备上离子色谱仪分析。按照纯水空白、标准曲线溶液、实验室空白、运输空白、样品溶液的顺序放置于离子色谱分析仪中。

##### (3) 离子色谱分析

按照实验室戴安2000i型离子色谱具体操作说明,进行淋洗液的装配、清洗离子色谱柱、仪器稳定、跑基准线操作。设定程序按顺序分析样品。每个样品分析完毕约需要30min,每1min约消耗1mL的淋洗液,分析 $\text{NO}_3^-$ 浓度。

#### 1.6 植物臭氧伤害症状鉴定方法

2012年8月15日到8月19日,专家组依据“森林健康专家咨询系统”,对污染监测样点区域周围植物进行考察鉴定,通过观察叶片的表型受害特征,判断植物叶片是否受到臭氧伤害。方法和步骤如图2<sup>[8]</sup>。为了判定植物是否受到臭氧伤害,需要在同一个枝条上比较新老叶症状,有个枝条表现出症状,即视为该植物受到臭氧伤害。2013年8月对同样区域再次考察鉴定。

#### 1.7 数据分析处理

依据下述公式,计算得出臭氧平均浓度:

$$C=2.144\times(n\times10/T\times18.09\times1000)\mu\text{g}/\text{m}^3$$

式中, $n$  为离子色谱分析得出的  $\text{NO}_3^-$  浓度值, $C$  即为所测样本取样点的空气中臭氧平均浓度值, $T$  为采样分钟数。18.09 为常温 20℃ 条件下气流为 21.8 mL/min 的经验常数。

采用 SPSS13.0 的 ANOVA 程序分析比较 10 个监测地点之间臭氧浓度的差异;采用 Sigmaplot10.0 绘制风场雷达图以及气象因子的变化图;采用 ArcGIS9.3 软件绘制监测地点分布图,以及臭氧浓度的空间分布特征。

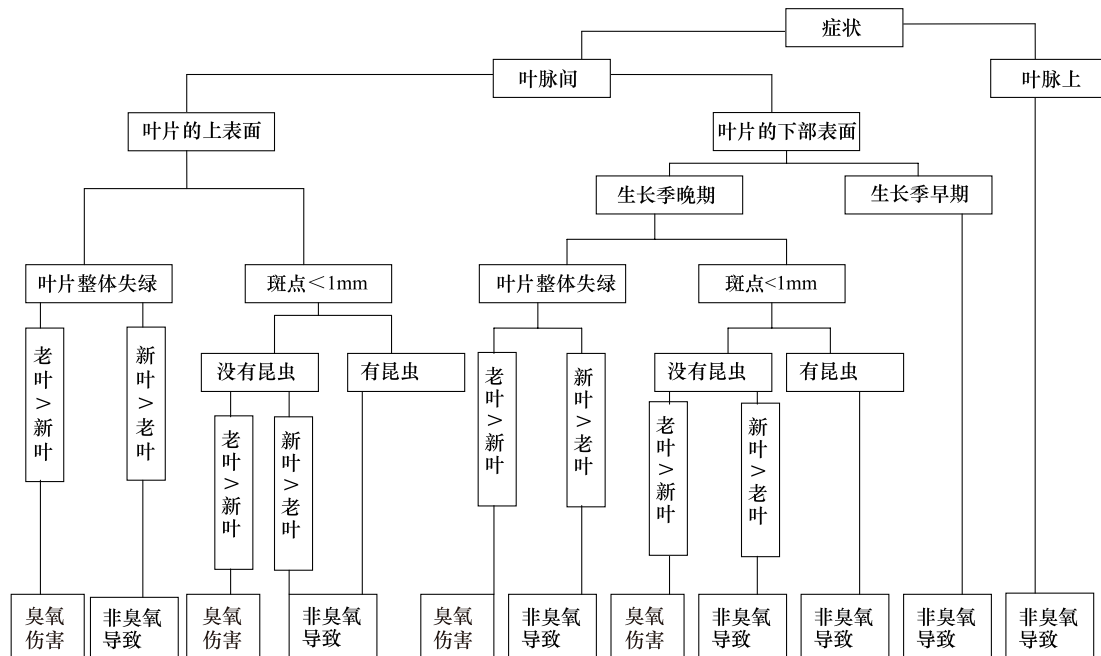


图2 森林健康专家咨询系统  
Fig.2 Forest Health Expert Advisory System

## 2 结果与分析

### 2.1 气象因子变化

#### 2.1.1 气温

气温是臭氧生成的重要环境条件,从 7 月 1 日到 8 月 30 日,中国科学院生态环境研究中心自动气象监测系统记录的平均气温为 26.92℃,最高温度为 31.75℃,最低温度为 20.47℃。监测臭氧浓度变

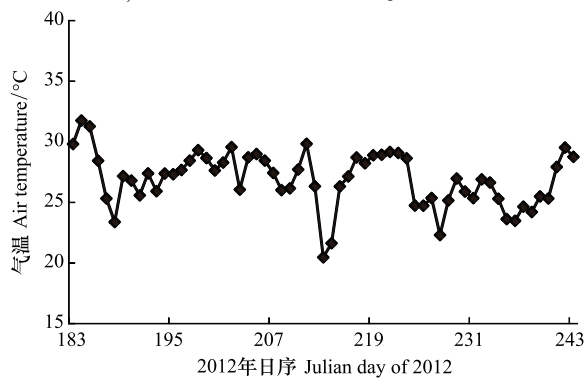


图3 实验期间气温变化情况  
Fig.3 Daily air temperature variation

化期间的温度变化情况如图 3。

#### 2.1.2 全辐射

太阳辐射是光化学反应生成臭氧的必要条件,从 7 月 1 日到 8 月 30 日,平均辐射为 185.01 W/m<sup>2</sup>,最高辐射为 327.18 W/m<sup>2</sup>,最低辐射为 20.26 W/m<sup>2</sup>。辐射变化情况如图 4。

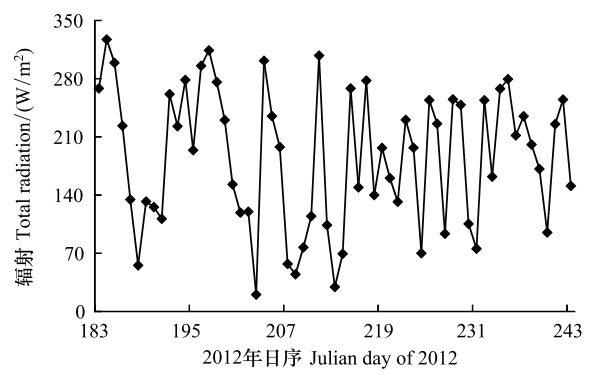


图4 实验期间辐射变化  
Fig.4 Daily total radiation variation

#### 2.1.3 降雨和空气湿度

降雨直接影响空气湿度,而空气湿度影响生成

臭氧的光化学反应。从7月1日到8月30日,平均湿度为61.35%,最高湿度为90.38%,最低湿度为26.55 W/m<sup>2</sup>。期间,降雨总量为416.5 mm,单日最大降雨量是169.6 mm,出现在7月21日。测定臭氧期间每天的降雨情况和平均空气湿度见图5。

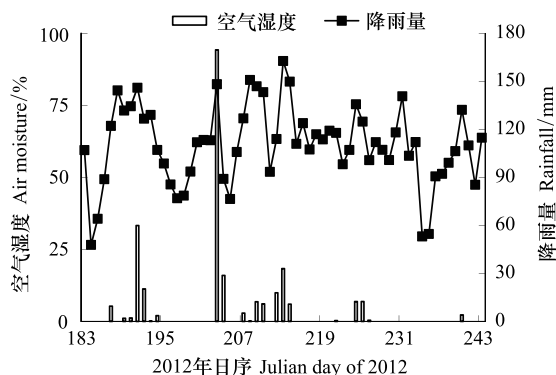


图5 实验期间降雨及空气湿度

Fig.5 Rainfall and air humidity variation

#### 2.1.4 风向

风向决定污染物向什么方向迁移,是臭氧污染分布规律的重要驱动因素。在测定臭氧期间,把中国科学院生态环境研究中心每天的平均风向数据做成雷达图(图6),从7月1日到8月30日,在测定臭氧期间,北京的主要风向是东南风,这样的结果是,北京的西部山区和北部山区都介于北京城区的下风向。

#### 2.2 地表臭氧浓度变化

从北京的西北远郊山区到核心城区,再到东南郊区,1—10号监测地点测到的平均臭氧浓度依次为:118.79、113.87、102.14、86.72、74.60、73.21、64.06、62.07、56.07、57.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从区域尺度看,根据臭氧浓度相对高低,通过多重比较,把北京的臭氧浓度分为红黄蓝三级,绘制臭氧浓度分布格局图(图7)。北京西北部山区的臭氧浓度最高,为第I级(图7中红点);其次是中国科学院生态环境研究中心(6号监测点)、城里的园区北京教学植物园(7号监测点)、东南五环外大兴亦庄凉水河(8号监测点)等远离交通干线的区域,为第II级(图7中黄点);交通干线附近区域的北四环(9、10号监测点)最低,为第III级(图7中蓝点)。整体而言,监测期间,北京西部和北部山区的臭氧浓度高于平原地区;在平原地区,公园中的臭氧浓度高于道旁绿化带;山区的臭氧浓度平均为105.39  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,公园中为

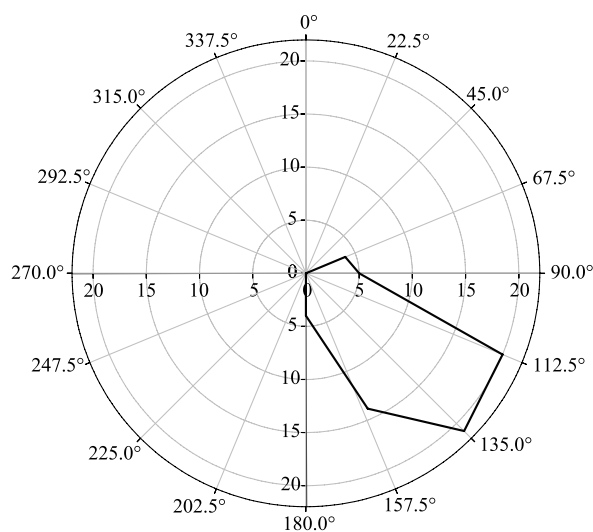


图6 实验期间北京的风向玫瑰图

Fig.6 Wind fields rose diagram during experimental period

0是正北方向,顺时针方向分成16个方向,分别是N(0)、NNE(22.5)、NE(45)、ENE(67.5)、E(90)、ESE(112.5)、SE(135)、SSE(157.5)、S(180)、SSW(202.5)、SW(225)、WSW(247.5)、W(270)、WNW(292.5)、NW(315)、NNW(337.5)

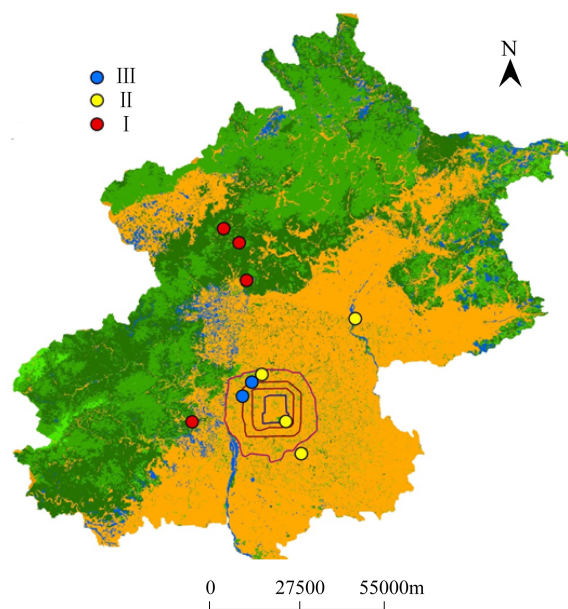


图7 北京城市与区域臭氧空间格局

Fig.7 The ozone distribution pattern in urban and districts of Beijing

68.49  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 道旁绿化带为56.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

#### 2.3 植物伤害效应

##### 2.3.1 受到臭氧伤害的植物的种类

2012年8月份,分别在10个臭氧监测地点方圆3km范围内沿道路进行了线性踏勘,随机调查是否有植物受到臭氧伤害,鉴定植物伤害特征,对确认是

臭氧伤害的植物叶片进行拍照。依据野外臭氧伤害鉴定手册中记录的“森林健康专家咨询系统”以及手册中刊录的图片,判断植物是否受到伤害<sup>[8]</sup>。在 10 个地点共发现受到伤害的植物 18 种,其中臭椿、桑树、五叶地锦、榆树、金叶槐伤害特征最为明显,臭椿、桑树出现频率最大。在 9 号和 10 号地点周围没有发现明显受到臭氧伤害的植物。

2.3.2 受伤害植物的症状

调查发现有 18 种植物的臭氧伤害症状和“森林健康专家咨询系统”的判断标准基本一致,其伤害特征首先表现为叶片出现均匀细密斑点,多为黄色至褐色,特别是,伤害发生在叶脉之间,老叶比新叶伤害症状严重,没有明显虫子和霉斑。臭椿、桑树、五叶地锦和鉴定手册上的症状基本一致。各个监测地点周围发现的臭氧伤害植物状况见表 1 和图 8。

3 讨论与结论

3.1 北京城市与区域地表臭氧浓度特征

尽管被动采样方法因为系统误差的原因造成整体上低估臭氧浓度<sup>[13]</sup>,但不影响不同监测点位相对高低的比较。研究表明,整体上北京平原区域的臭氧浓度低于西部、北部山区的臭氧浓度。刘希文在北京东北方向密云上甸子测到的臭氧浓度比海淀区高<sup>[14]</sup>,徐敬也发现密云上甸子臭氧浓度显著高于平原区域(顺义、海淀、丰台)<sup>[15]</sup>。不同之处是,徐敬等的研究认为,在区域尺度上,从西南到东北方向臭氧浓度有随输送方向升高的趋势,而本文的监测结果表明戒台寺(监测点位 4)的臭氧浓度比位于其东北方向的顺义奥林匹克水上运动中心(监测点位 5)高。原因可能是景观及地形特征影响臭氧的传输和富集。戒台寺周围景观为森林,其因为地形和风向的原因成为臭氧富集区域,顺义奥林匹克水上运动中心可能是臭氧及其前体物远程输送的路径,而非富集场所。北京属于东亚季风区,因为地理位置关系,北京夏季是东南风。有的地方可能是西南风。又因为北京地处西风带,冬季随着气压中心的位移形成西北风,夏季低气压中心位移大陆中心,大洋暖湿气流与之形成对流,时而东南时而偏西风。这样,夏季时北京的西部、北部的山区就处于下北京城的下风向(图 6),臭氧前体物向西部、北部远程输送,边输送边反应,因为地形原因,最终在山地富集,形

成西部、北部山区臭氧浓度高的格局。

表 1 北京受到臭氧伤害的植物的种类  
Table 1 The plants injured by ozone in Beijing

| 地点编号<br>Sites No. | 照片编号<br>Picture No. | 植物名称<br>Plants name                         |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------------|
| 1                 | 1-1                 | 大豆 <i>Glycine max</i>                       |
| 2                 | 2-1                 | 五叶地锦 <i>Parthenocissus quinquefolia</i>     |
|                   | 2-2                 | 核桃 <i>Juglans regia</i>                     |
|                   | 2-3                 | 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>               |
| 3                 | 3-1                 | 喇叭花 <i>Pharbitis purpurea</i>               |
|                   | 3-2                 | 桑树 <i>Morus alba</i>                        |
|                   | 3-3                 | 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>               |
|                   | 3-4                 | 榆树 <i>Ulmus pumila</i>                      |
| 4                 | 4-1                 | 臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>               |
| 5                 | 5-1                 | 国槐 <i>Sophora japonica</i>                  |
| 6                 | 6-1                 | 金叶槐 <i>Sophora japonica f. flavi-rameus</i> |
|                   | 6-2                 | 木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>                 |
|                   | 6-3                 | 重瓣棣棠花 <i>Kerria japonica</i>                |
|                   | 6-4                 | 山香 <i>Hyptis suaveolens</i>                 |
|                   | 6-5                 | 决明 <i>Cassia tora</i>                       |
|                   | 6-6                 | 毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>                |
|                   | 6-7                 | 黄花柳 <i>Salix caprea</i>                     |
| 7                 | 7-1                 | 大花地榆 <i>Sanguisorba sitchensis</i>          |
| 8                 | 8-1                 | 桑树 <i>Morus alba</i>                        |
|                   | 8-2                 | 火炬树 <i>Rhus typhina</i>                     |
| 9                 |                     | —                                           |
| 10                |                     | —                                           |

“—”表示在此地点没有发现臭氧伤害的植物

山区臭氧浓度高的另外一个可能原因是平流层臭氧向下输送。相对于平原地区,山区海拔较高,还原性气体较少,平流层向下输送的臭氧容易到达且不容易被还原。远郊山区臭氧来源如何辨析,需要深入研究。9、10 号监测点位离交通繁忙的道路距离较近,容易受到道路“滴定作用”作用的影响,可能是这两个地方臭氧浓度相对最低的原因。

3.2 植物伤害效应

不同植物对臭氧的敏感性不同,敏感性大小受植物自身特性及环境因素的影响<sup>[16]</sup>。在北京山区和平原都发现了有典型臭氧胁迫伤害特征的植物。值得注意的是,无论在平原还是山区,发现的受到臭氧伤害的植物有如下特征:(1)分布在硬化道路旁边,或向阳干旱山坡;(2)伤害多发生在孤立幼树、低矮植物、片林边缘;(3)在林下、阴坡没有发现臭氧伤害胁迫的植物。高浓度臭氧和地表反射辐射特征可

能共同作用,造成植物伤害。气孔是臭氧进入植物叶片的途径,孤立幼树、低矮植物、片林边缘所处硬化地表的反射辐射可能增加植物的蒸腾作用,叶片为了维持正常的温度被迫通过蒸腾作用降温,气孔

处于被迫开放状态,臭氧能够更多的进入叶片,引起伤害。不同硬化地表的反射辐射特征及其对植物气孔的影响机制需要进一步研究。

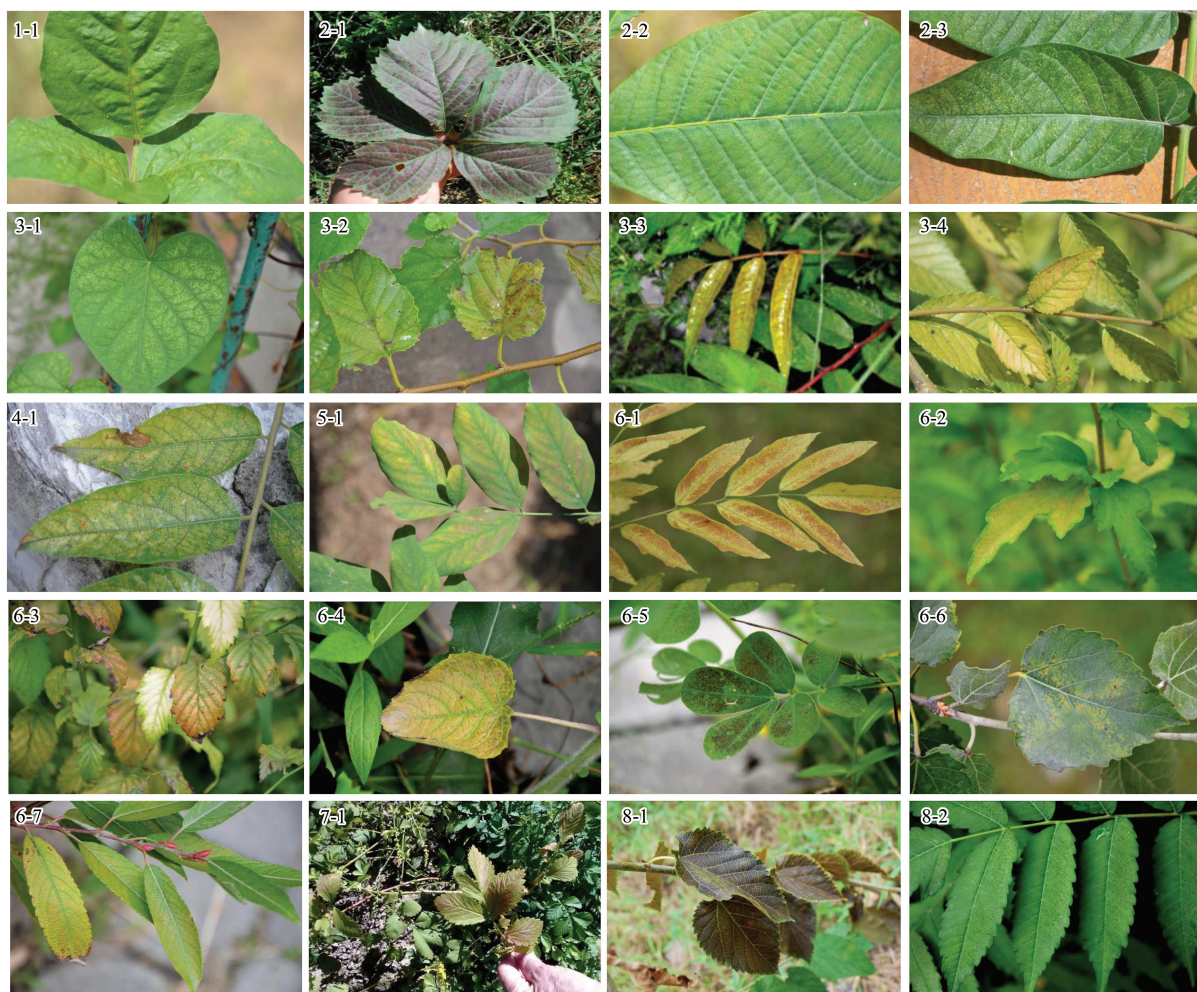


图8 臭氧伤害植物的照片

Fig.8 Pictures of ozone injured plants leaves

1-1: 大豆 *Glycine max*; 2-1: 五叶地锦 *Parthenocissus quinquefolia*; 2-2: 核桃 *Juglans regia*; 2-3: 臭椿 *Ailanthus altissima*; 3-1: 喇叭花 *Pharbitis purpurea*; 3-2: 桑树 *Morus alba*; 3-3: 臭椿 *Ailanthus altissima*; 3-4: 榆树 *Ulmus pumila*; 4-1: 臭椿 *Ailanthus altissima*; 5-1: 国槐 *Sophora japonica*; 6-1: 金叶槐 *Sophora japonica f. flavi-rameus*; 6-2: 木槿 *Hibiscus syriacus*; 6-3: 重瓣棣棠花 *Kerria japonica*; 6-4: 山香 *Hyptis suaveolens*; 6-5: 决明 *Cassia tora*; 6-6: 毛白杨 *Populus tomentosa*; 6-7: 黄花柳 *Salix caprea*; 7-1: 大花地榆 *Sanguisorba sitchensis*; 8-1: 桑树 *Morus alba*; 8-2: 火炬树 *Rhus typhina*

北京大概有 437 种植物,经过初步的抽样调查,发现 18 种植物有臭氧伤害特征,达物种总数的 3.9%,是否有更多其他植物受到胁迫伤害,需要进一步研究。此外,在平原地区发现的植物种类多于山区。原因可能是平原地区公园中植物种类相对较为集中,容易发现。同时,山区温度相对较低,湿度较高,可能能够减缓臭氧对植物叶片的伤害。

臭椿受到臭氧伤害的症状在 4 个山区监测点中

出现了 4 次,在北部和西部山区都有发现;五叶地锦出现了 2 次;桑树在山区和平原 10 个监测点出现了 2 次,且在平原(8 号监测点)和山区(3 号监测点)都有发现。其他植物都出现了 1 次。比较而言,臭椿分布较广,伤害特征明显且易于识别,是北京的乡土树种,可初步选为臭氧伤害的指示植物。更多指示植物筛选需要扩大调查范围,并通过熏蒸控制实验确定。

此前,万五星等对北京远郊植物的臭氧伤害进行了初步调查<sup>[11]</sup>,与万五星的研究不同,本研究将臭氧监测和植物伤害特征鉴定结合起来,阐释臭氧在北京城市和区域的分布特征和生态毒理效应。本研究臭氧植物伤害特征鉴定依据“森林健康专家咨询系统”,由专家团队联合做出鉴定结论,结果比较真实。

### 3.3 结论

#### 3.3.1 臭氧浓度分布规律

从7月4日到8月30日,从西北前山区向城区东南方向的10个监测地点的平均臭氧浓度分别是:118.79、113.87、102.14、86.72、74.60、73.21、64.06、62.07、56.07、57.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。北京城市与区域臭氧污染的基本格局是,北京北部、西部山区的臭氧浓度高于平原地区,公园臭氧浓度高于道旁绿化带。

#### 3.3.2 北京臭氧伤害植物的种类及分布

北京目前受到臭氧伤害的植物分布广泛,在平原地区(北京东南郊区、核心城区、东北郊区)和西部、北部远郊山区都有发现,共发现受到伤害胁迫的植物18种。交通繁忙的交通干道绿化带没有发现臭氧伤害植物。

#### 3.3.3 北京臭氧伤害指示植物的筛选

臭椿幼树对臭氧敏感,伤害特征明显,同时又是北京乡土树种,平原与山区均有分布,比较适合作为北京地区臭氧风险监测的生物指示植物。

**致谢:**感谢城市与区域生态重点实验室实验平台的支持,感谢王巧环老师、付慧敏老师、李虹老师对实验分析的帮助;感谢北京教学植物园关云飞主任,北京市第五中学的陈梓睿同学工作的帮助。

### References:

- [1] Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric Environmental Chemistry. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 222-223.
- [2] Yao F F, Wang X K, Lu F, Feng Z W, Ouyang Z Y. Assessing the impact of ambient ozone on crop ecosystem: A case study in Yangtze delta, China. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3 (2): 189-195.
- [3] Zheng F X, Wang X K, Zhang W W, Duan X N, Hou P Q. Influences of elevated ozone on rice photosynthesis and yield. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (11): 2217-2223.
- [4] Yao F F, Wang X K, Chen Z, Feng Z Z, Zheng Q W, Duan X N, Ouyang Z Y, Feng Z W. Response of photosynthesis, growth and yield of field-grown winter wheat to ozone exposure. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 212-219.
- [5] Zheng Q W, Wang X K, Feng Z Z, Feng Z W, Ouyang Z Y, Xie J Q. Impact of different ozone exposure regimes on photosynthetic rate, biomass and yield of field-grown Oilseed Rape. Asian Journal of Ecotoxicology, 2006, 1(4): 323-328.
- [6] Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, He X Y, Fu S J. Effects of elevated ozone concentration on Ginkgo biloba photosynthesis. Journal of Chinese Ecology, 2007, 26(5): 645-649.
- [7] Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, Zhang X, He X Y, Fu S L. Effect of elevated ozone concentration on photosynthesis of *Pinus tabulaeformis* Carr. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(3): 1024-1028.
- [8] Innes J L, Skelly I M, Schaub M. Ozone and Broadleaved Species. A Guide to the Identification of Ozone-induced Foliar Injury. Bern Switzerland: Paul Haupt Publishers, 2001.
- [9] Smith G. Ambient ozone injury to forest plants in Northeast and North Central USA: 16 years of biomonitoring. Environment Monitoring Assessment, 2012, 184(7): 4049-4065.
- [10] Klumpp A, Ansel W, Klumpp G, Ansel W, Calatayud V, Pierre G J, He S, Peñuelas J, Ribas À, Ro-Poulsen H, Rasmussen S, Sanz M J, Vergne P. Ozone pollution and ozone biomonitoring in European cities. Part I: Ozone concentrations and cumulative exposure indices at urban and suburban sites. Atmospheric Environment, 2006, 40(40): 7963-7974.
- [11] Wan W X, Xia Y J, Zhang H X, Wang J, Wang X K. The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (4): 1098-1105.
- [12] Protocol for Ozone Measurement Using the Ozone Passive Sampler Badge. Harvard School of Public Health, Environmental Science and Engineering Program Department of Environmental Health 665 Huntington Avenue Boston, MA 02115 USA, Modified by Ogawa & Co, USA, Inc, 2001.
- [13] Zhao Y, Shao M, Wang C, Wang B G, Lu S H, Zhong L J. Characterizing spatial patterns of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{O}_3$  in Pearl River Delta by passive sampling. Environmental Science, 2011, 32(2): 324-329.
- [14] Liu X W, Xu X B, Lin W L. Variation characteristics of surface  $\text{O}_3$  in Beijing and its surrounding area. China Environmental Science, 2010, 30(7): 946-953.
- [15] Xu J, Zhang X L, Zhao X J, Xu X F, Meng W. Influence of summer local circulation on the transportation of ozone from urban to the downwind area in Beijing. China Environmental Science, 2009, 29(11): 1140-1146.
- [16] Xu H, Yang J C, Chen S B, Jiang G M, Li Y G. Review of plant responses to ozone pollution. Journal of Plant Ecology, 2007, 31 (6): 1205-1213.

## 参考文献:

- [ 1 ] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006: 222-223.
- [ 2 ] 姚芳芳, 王效科, 逯非, 冯宗炜, 欧阳志云. 臭氧对农业生态系统影响的综合评估: 以长江三角洲为例. 生态毒理学报, 2008, 3(2): 189-195.
- [ 3 ] 郑飞翔, 王效科, 张巍巍, 段晓男, 侯培强. 臭氧胁迫对水稻光合作用与产量的影响. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2217-2223.
- [ 4 ] 姚芳芳, 王效科, 陈展, 冯兆忠, 郑启伟, 段晓楠, 欧阳志云, 冯宗炜. 农田冬小麦生长和产量对臭氧动态暴露的响应. 植物生态学报, 2008, 32(1): 212-219.
- [ 5 ] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 冯宗炜, 欧阳志云, 谢居清. 不同臭氧熏气方式对油菜光合速率、生物量和产量的影响. 生态毒理学报, 2006, 1(4): 323-328.
- [ 6 ] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 何兴元, 付士磊. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响. 生态学杂志, 2007, 26(5): 645-649.
- [ 7 ] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 张鑫, 何兴元, 付士磊.  $O_3$  浓度升高对油松光合作用的影响. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1024-1028.
- [ 11 ] 万五星, 夏亚军, 张红星, 王娇, 王效科. 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害. 生态学报, 2013, 33(4): 1098-1105.
- [ 13 ] 赵阳, 邵敏, 王琛, 王伯光, 陆思华, 钟流举. 被动采样监测珠江三角洲  $NO_x$ 、 $SO_2$  和  $O_3$  的空间分布特征. 环境科学, 2011, 32(2): 324-329.
- [ 14 ] 刘希文, 徐晓斌, 林伟立. 北京及周边地区典型站点近地面  $O_3$  的变化特征. 中国环境科学, 2010, 30(7): 946-953.
- [ 15 ] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 徐晓峰, 孟伟. 夏季局地环流对北京下风向地区  $O_3$  输送的影响. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1140-1146.
- [ 16 ] 许宏, 杨景成, 陈圣宾, 蒋高明, 李永庚. 植物的臭氧污染胁迫效应研究进展. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1205-1213.