

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

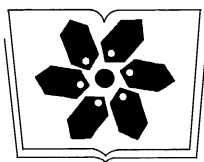
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 4 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203220388

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.

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.

北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害

万五星^{1,2}, 夏亚军³, 张红星¹, 王 娇⁴, 王效科^{1,*}

(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 100085;

2. 河北师范大学生命科学学院 050016; 3. 河北雾灵山国家级自然保护区管理局 067300;

4. 中国节能环保集团公司 100082)

摘要: 臭氧(O_3)是一种氧化性很强且生物危害很大的二次污染物。监测表明北京远郊区 O_3 浓度高于近郊区和城区,经常超过敏感植物 O_3 临界浓度($78.5\mu g/m^3$),自然植物的暴露剂量AOT40(超过 $78.5\mu g/m^3$ 的空气 O_3 浓度小时值累计量)值达到了 $98.9mg/m^3$,可能已经对植物生长造成危害。通过对远郊区 O_3 浓度监测点(北京蟒山森林公园)26种乔木和灌木植物的调查,参考国外有关植物野外观测和模拟实验的植物 O_3 伤害症状特征及植物 O_3 伤害鉴别标准,发现其中15种植物出现了比较明显的 O_3 伤害症状,表现为叶片出现点状、块状黄斑或褐色灼伤状干枯,表明北京远郊区的乔木和灌木已经受到了空气 O_3 污染的危害。另外11种植物也出现了类似 O_3 危害的伤害症状,需要进一步的研究验证是否由 O_3 污染造成。

关键词: O_3 ; 敏感植物; 伤害症状; 远郊区; 北京

The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region

WAN Wuxing^{1,2}, XIA Yajun³, ZHANG Hongxing¹, WANG Jiao⁴, WANG Xiaoke^{1,*}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

3 Administration of Hebei Wulingshan National Natural Reserve, Chengde 067300, China

4 China Energy Conservation and Environmental Protection Group, Beijing 100082, China

Abstract: Ozone is a kind of secondary pollutant with high oxidability and strong biohazard. Long-term monitoring shows that the ozone concentration in Beijing exurban region is obviously higher than that of the urban and the suburb regions. The value of AOT40, from May to September reached $98.9mg/m^3$, which might already have negative influence on the growth of the wild plants. Via investigation near the long-term monitoring spot sited in Mangshan Forest Park, and referring to the assessment standard of visible symptoms of ozone injury which comes from investigation and imitation experiment of other countries, we found that 15 ozone-sensitive species with obvious ozone foliar injury symptoms among 26 woody plants, including arbor and shrubs. These 15 plants species include *Grewia biloba* var. *parviflora*, *Lespedeza floribunda*, *Lespedeza tomentosa*, *Cotinus coggygia* var. *pubescens*, *Rhus typhina*, *Caragana frutex*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, *Prunus davidiana*, *Prunus sibirica*, *Ampelopsis humulifolia*, *Prunus triloba*, *Juglans mandshurica*, *Quercus wutaishanica*, *Rubus crataegifolius*, *Spiraea trilobata*. The typical symptoms of the ozone foliar injury are dark stipple, mottling and tip burn. The colors of the injury symptoms changed from light to deep, including white, gray, yellow, brown and tan, the latter

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31170424, 41030744)

收稿日期: 2012-03-22; 修订日期: 2012-09-06

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

three were more usual. It showed that the woody plants in Beijing exurban region, including arbor and shrubs, had already suffered the hazard of ambient ozone. Besides, the other 11 woody plant species, including *Pinus bungeana*, *Platycladus orientalis*, *Koelreuteria paniculata*, *Morus alba*, *Broussonetia papyrifera*, *Ziziphus jujuba* var. *spinosa*, *Pinus pumila*, *Pinus tabulaeformis*, *Ulmus pumila*, *Corylus mandshurica*, *Populus davidiana*, showed similar symptoms of the previous plants. But further research is still necessary to investigate the factors lead to the injury symptoms.

Key Words: ozone; sensitive plants; foliar injury symptoms; exurban region; Beijing

伴随着工业化程度的提高,人类日常生活、工业生产以及汽车尾气排放等过程消耗大量化石燃料,并向大气中不断排放 CO、NO/NO_x、VOC_s 等物质,导致对流层大气 O₃ 循环丧失原有平衡,并最终导致 O₃ 浓度显著升高,成为许多地区的主要空气污染现象。

臭氧(O₃)是一种氧化性很强且生物危害很大的二次污染物,会对包括农作物和野生植物在内的很多种植物造成明显危害^[1]。O₃ 通过气孔进入植物,在植物体内产生脂质过氧化反应,破坏细胞膜结构,改变植物生理生化过程,造成植物叶片出现斑点和萎黄等可见的叶片伤害特征,还会导致幼叶脱落、光合降低以及根茎叶生物量的减少^[2]。欧美国家已经在野外观测到大量植物受害症状。

在美国,早在 1956 年, Middleton 就认为空气 O₃ 会威胁到植物的生长。随后有许多控制实验证明了 O₃ 对植物,包括森林植物,有非常大的危害。1983 年, Skelly 等在美国的 Virginia 的 Shenandoah National Park (SHEN)就发现自然空气 O₃ 已经威胁到部分地区的森林生长,叶片已经出现受害症状^[3]。在美国的 California 也发现多处森林植物受到 O₃ 的危害^[4]。在欧洲, Richards 等早在 1958 年就对葡萄属(*Vitis*)植物叶片在高浓度 O₃ 条件下近轴面出现深色斑点的典型伤害特征进行了描述^[5]。Donald D. Davis 等人在对福赛斯野生生物保护区的植物进行研究时,在黑莓(*Rubus villosus*)、马利筋(*Asclepias curassavica*)、黄樟(*Cinnamomum porrectum*)以及野葡萄(*Vitis thunbergii*)等植物上也发现了相同的特征。同时他们还在少数美国接骨木(*Sambucus canadensis*)和一些不知名的荚蒾属(*Viburnum*)植物上也发现了相同特征^[6-8]。熏气实验证明了 O₃ 浓度升高可以造成小麦、水稻和油菜等农作物的叶片出现受害症状和减产及林木叶片出现受害症状和生长减缓等特征。尽管我国许多地区的空气 O₃ 浓度已经超过了植物受害的临界浓度,但目前对高 O₃ 浓度地区的植物生长进行观测缺乏,还未见有关野外 O₃ 伤害症状的报道。

对野外 O₃ 伤害症状进行观测,是一种研究 O₃ 对植物影响的简单而直接的方法,不但可以判断目前空气 O₃ 浓度是否达到了危害自然状况下植物生长发育的水平,而且可以为进行植物敏感性评价提供客观证据。本研究在分析北京城市生态站 3 个观测站点 O₃ 浓度监测结果的基础上,评价了空气 O₃ 对植物的危害风险;并通过在北京远郊区的实地观察,分析了高 O₃ 浓度下主要木本植物叶片伤害症状。

通过对北京市及周边 O₃ 浓度监测结果与国内外相关研究数据对比,发现北京市空气 O₃ 浓度已经达到很高的水平,以远郊地区最为显著。通过观测发现,多种植物叶片表现出了 O₃ 伤害症状。本研究以报道北京远郊区高浓度空气 O₃ 对植物造成的伤害为出发点,旨在号召相关研究人员深入开展针对北京市环境 O₃ 的进一步研究,以期获得环境 O₃ 浓度升高与植物叶片伤害之间关系的明确结论,并为北京市城市发展规划提供可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 空气 O₃ 浓度长期定位监测

中国科学院北京城市生态系统研究站在北京市设有 3 个长期定位监测站,包括北京市教学植物园、生态环境研究中心和北京蟒山天池风景区,分别位于北京市的城区、近郊区和远郊区,对空气 O₃ 浓度进行连续观测。O₃ 浓度监测采用 Thermo 49iO₃ 分析仪,通过测量 254nm 波长下 O₃ 对紫外辐射的吸收计算出 O₃ 浓度,仪器的分析最低检测限为 0.098 μg/m³。有专人进行仪器维护和严格的监测数据质量控制。计算空气 O₃ 暴露

剂量 AOT40(大于 $78.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的空气 O_3 小时浓度值的累计值),作为评价 O_3 对植物造成危害的指标。在本研究中,为了评价 O_3 对植物生长的影响,只使用了植物生长盛期(5—9 月份)的 O_3 浓度观测记录。

1.2 野外植物 O_3 伤害的鉴定

野外植物 O_3 伤害症状的调查地点在昌平区的蟒山国家森林公园,时间为 2010 年 9 月底。通过野外观测和拍照,共调查了 26 种木本植物,并邀请美国 *Environmental Pollution* 杂志主编、马萨诸塞大学 William J. Manning 教授对野外观测的照片进行了鉴定指导。依据国内外实验研究及野外观测的结果,当植物环境 O_3 浓度超过一定值时,部分植物就会表现出叶面伤害特征。一般情况下, O_3 敏感植物表现为老叶受伤害较严重,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,受害严重的会出现斑块状干死和尖烧现象。

1.3 对指示植物及疑似植物的定义

2003 年 6 月,在美国马里兰州巴尔的摩召开了关于国家公园中 O_3 敏感植物研究的研讨会,这次会议将 O_3 敏感植物分为 2 类: O_3 伤害指示植物和 O_3 伤害疑似植物,并分别对这两类植物进行了定义^[9]。定义指出:指示植物是指在环境 O_3 浓度下产生的叶片伤害特征能容易被专业人士认定为 O_3 伤害,而且这些叶片伤害特征已经在可靠浓度下的曝气实验中得到验证,同时这些物种在研究区域内分布较广泛且较容易野外识别;疑似植物是指植物具有 O_3 伤害的敏感特征,但不能满足指示植物的鉴定标准,例如仅在远高于环境实际 O_3 浓度的条件下或在有限的区域中体现伤害特征,或不同观测者的结论存在冲突等。但这些疑似植物可以作为研究者未来调查、研究的备选对象。

2 结果

2.1 北京市远郊区空气 O_3 浓度特征

通过长期定位监测,获得了北京市 O_3 小时浓度的统计特征(表 1)。研究表明:城区、近郊区和远郊区监测点空气 O_3 浓度较高的时期集中在 5—8 月份,从 3 个监测点的 O_3 浓度的绝对值来看,远郊监测点获得的 O_3 浓度 8:00—18:00 平均值和日平均值均显著高于城区和近郊区。植物生长盛期(5—9 月份) O_3 小时浓度实测值超过国家二级 O_3 环境质量标准($160 \mu\text{g}/\text{m}^3$)的天数占监测天数的 28.7%。远郊区 6 月份 8:00—18:00 平均值均超过国家空气质量二级标准,7 月份 8—18 时平均值也达到 $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$,接近国家空气质量二级标准。各监测点较高的 O_3 小时浓度最大值在 6—8 月份集中出现,其中近郊区和远郊区 7 月份最大值几乎达到国家环境空气质量二级标准的 3 倍。远郊区 5—8 月份 O_3 小时浓度最大值总体水平也略高于城区和近郊区。总体上看,站点间 O_3 浓度差异达到显著水平($P<0.05$)。

表 1 2010 年 5 月—2010 年 9 月 O_3 小时浓度统计特征

Table 1 Statistical characteristic of ozone hour concentration from May to September in 2010

月份 Month	O_3 最高浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$) The highest O_3 value			8:00—18:00 O_3 平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$) O_3 mean value from 8 to 18 o'clock			O_3 日平均浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$) O_3 daily mean value		
	城区 urban	近郊区 suburb	远郊区 exurban	城区 urban	近郊区 suburb	远郊区 exurban	城区 urban	近郊区 suburb	远郊区 exurban
5	268	242	300	90.6±54.0a	59.2±41.2b	127.0±45.4c	60.6±53.8a	42.0±42.0b	109.0±45.2c
6	252	292	362	128.0±67.2a	144.0±82.0b	163.0±60.8c	89.8±66.9a	108.0±82.0b	141.0±60.6c
7	300	432	418	93.0±67.4a	129.0±80.0b	144.0±69.6c	67.8±67.2a	95.8±79.8b	133.0±69.4c
8	362	238	298	74.4±62.8a	86.0±47.6b	136.0±49.4c	50.6±62.6a	64.4±47.2b	118.0±49.8c
9	292	222	204	74.4±55.6b	68.8±42.8b	102.0±42.6a	47.2±55.2b	48.0±42.6b	89.6±42.4a

英文字母 a、b、c 表示同月份不同监测站点间 O_3 浓度差异显著程度,不同字母表示差异显著($P<0.05$)

从各监测点 5—9 月份 AOT40 值来看,均远远超过 WHO 提出的对野生植物构成伤害的 $19.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的限度。远郊区达到 $98.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$,并远远高于城区和近郊区(图 1)。

2.2 北京市远郊区木本植物在高 O₃ 浓度下的叶片伤害特征

依据欧洲以及北美等国家长期研究建立的 O₃ 叶片伤害鉴定标准,对昌平区蟒山国家森林公园木本植物在高 O₃ 浓度下的叶片伤害特征进行了鉴定。研究表明,在北京市远郊目前的大气 O₃ 浓度水平下,多种木本植物表现出了典型 O₃ 叶片伤害特征,可以作为北京市及周边地区高浓度 O₃ 造成叶片伤害的指示植物。另外还有一些具有类似 O₃ 叶片伤害特征的物种,但由于目前尚无明确的研究结论作为理论支持,暂定为本地区的 O₃ 叶片伤害疑似物种(表 2)。

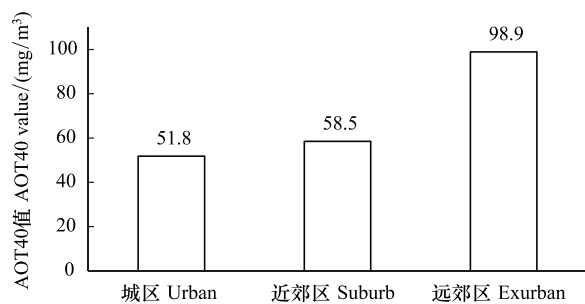


图 1 北京市空气 O₃ 2010 年 5—9 月份 AOT40 值

Fig. 1 AOT40 value of Beijing ambient O₃ from May to September in 2010

表 2 北京市远郊木本植物 O₃ 叶片伤害特征

Table 2 Ozone foliar injury symptoms of the woody plants in Beijing exurban region

物种 Species	叶片伤害特征 Foliar injury symptoms
指示植物 Indicator plant	
扁担木 <i>Grewia biloba</i> var. <i>parviflora</i>	叶侧脉间出现黄斑或褐色枯死;出现尖烧
多花胡枝子 <i>Lespedeza floribunda</i>	全叶遍布浅色斑点或棕褐色枯死;叶缘处枯死并卷曲
短梗胡枝子 <i>Lespedeza tomentosa</i>	叶片呈灰白色至呈黄褐色斑枯
毛黄栌 <i>Cotinus coggygria</i> var. <i>pubescens</i>	叶片呈红色至褐色斑枯,枯死部分收缩致叶皱卷
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	叶片呈黄色至红褐色斑枯,并使叶面向上方卷曲
金雀花 <i>Caragana frutex</i>	叶片出现灰白色或黄色斑块
荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	叶片出现黄色至棕褐色斑块;尖烧并使叶片向上翻卷
山桃 <i>Prunus davidiana</i>	叶片出不规则形状棕色枯死
山杏 <i>Prunus sibirica</i>	叶片出现灰白色至黄色斑点;褐色枯死并使叶面卷曲
葎叶蛇葡萄 <i>Ampelopsis humulifolia</i>	植物全叶遍布浅色斑点
榆叶梅 <i>Prunus triloba</i>	叶片出现黄褐色至红褐色枯死,并致叶片向背面微卷
核桃楸 <i>Juglans mandshurica</i>	叶片出现浅色至褐色斑点,叶缘褐色枯死严重
辽东栎 <i>Quercus wutaishanica</i>	叶片中间出现浅色斑块;叶缘呈黄色至褐色严重枯死
牛迭肚 <i>Rubus crataegifolius</i>	叶片遍布红褐色斑枯
三裂绣线菊 <i>Spiraea trilobata</i>	叶片呈现黑褐色斑枯,叶缘严重,并致使叶片卷曲
疑似植物 Suspected plant	
白皮松 <i>Pinus bungeana</i>	针叶自顶部向下干枯,呈红褐色或灰褐色
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	鳞叶出现黄色至褐色枯死,向阳侧枯死严重
栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	叶片腹面出现浅色斑点或深色枯死
桑 <i>Morus alba</i>	沿叶脉出现长条形黄斑;叶片出现大片黄斑,出现尖烧
构树 <i>Broussonetia papyrifera</i>	叶脉附近出现黄白色斑点
酸枣 <i>Ziziphus jujuba</i> var. <i>spinosa</i>	叶片出现红褐色斑点
偃松 <i>Pinus pumila</i>	针叶出现红褐色间断干枯;新生叶完全枯死
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	针叶自顶部向下枯死或呈现间断状枯死
榆 <i>Ulmus pumila</i>	羽脉间呈现黄色至黄褐色条斑,充满羽脉间隙
毛榛 <i>Corylus mandshurica</i>	叶片叶脉间呈红褐色枯斑
山杨 <i>Populus davidiana</i>	叶片出现大面积赭石色枯死

2.2.1 O₃ 造成叶片伤害的指示植物

综合北京市远郊高浓度 O₃ 导致敏感植物造成叶片伤害的基本特征来看,大体可以分为以下几种情况:

(1) 叶片上出现灰色、白色或淡黄色等浅色斑点或斑块。一般情况下, 这些斑点或斑块面积较小, 直径一般在 1—2mm, 多数不超过 5mm。如多花胡枝子、短梗胡枝子、葎叶蛇葡萄等。这些颜色较浅的叶片伤害特征, 与 W. J. Manning 等研究中最早出现的 O_3 导致叶片伤害特征相同^[10]。

(2) 叶片上出现较深的黄色、黄褐色、棕色、褐色或赭石色斑块或枯死, 如扁担木、荆条、山桃、核桃楸等。还有一些植物呈现红色或红褐色斑块, 如毛黄栌等, 斑块一般较大, 多数能达到 5mm 以上, 甚至更大或连成一片, 扩展到整个叶片。较大斑块中间往往呈深褐色枯死, 同时还往往导致叶片出现向背面或腹面的卷曲, 如山杏、毛黄栌、荆条、火炬树等。这些黄色至褐色的斑枯, 是实验条件和环境条件下 O_3 导致叶片伤害的最常见特征, 与众多研究结果一致^[5-12]。

(3) 植物叶片边缘呈现褐色枯死或尖烧, 由叶缘向叶片中间蔓延, 边缘枯死严重, 如三裂绣线菊、辽东栎、扁担木、多花胡枝子、荆条、核桃楸等。在 Manning 及 Innes 等的研究中出现了相似叶片伤害特征^[10,12]。

以上植物叶片伤害特征明显, 且与众多国内外实验观测结果相吻合^[5-12], 属于大气 O_3 污染的敏感物种, 可以作为北京市远郊区大气 O_3 污染监测的指示植物(图 2)。

2.2.2 疑似由于 O_3 造成叶片伤害的植物

在相同环境条件下还有另外一些植物, 其叶片表现出类似的伤害特征, 如出现黄色、褐色斑块或部分乃至全叶枯死等。但目前尚未通过实验证明这些物种产生类似伤害特征是否属于 O_3 污染导致的叶片伤害, 依照欧洲以及北美等国家鉴定 O_3 敏感植物的一般区分方法, 可将这些植物作为北京市远郊区 O_3 污染监测的疑似物种。这些物种的叶片伤害特征可以分为以下几类:

(1) 裸子植物的叶片枯死 枯死的类型包含 3 种不同类型, 一是当年生针叶完全干枯, 枯死叶呈柔软草质, 如偃松; 其次, 针叶呈现自顶部向基部的枯死, 枯死呈间断或连续状, 枯死长度不一, 严重者全叶枯死, 如偃松、油松、白皮松; 第三种就是鳞状叶植物的叶片枯死, 多数呈现叶片从枝基部向顶部枯死, 由于鳞状叶较小, 均为全叶枯死, 颜色为土黄色, 如侧柏, 远观整株植物呈明显病态, 且有向阳面较背阴面严重的特点。

在 2003 年巴尔的摩会议上提出的关于 O_3 伤害指示植物和疑似植物的分类列表中, 不同的裸子植物(针叶树)种类被作为不同的类群看待, 主要依据是这些植物的受伤害特征是否广泛、普遍存在或是否只存在于极端条件下^[9]。本研究中针叶植物出现的伤害特征虽然明显且在观测区域广泛存在, 但目前不具备明确实验研究依据及广泛观测证据支持, 暂作为 O_3 导致叶片伤害的疑似植物看待。

(2) 阔叶植物叶脉间呈现条状、块状黄色至褐色斑块, 如榆、毛榛、桑、构树等。严重的也出现叶缘枯死或尖烧, 如桑、山杨。

(3) 仅在叶片腹面出现浅色斑点或深色枯死, 如栎树。

后两类植物出现的类似高浓度 O_3 导致叶片伤害的现象, 有待于进一步通过实验进行验证, 暂将这些植物作为高浓度 O_3 导致叶片伤害的疑似物种对待(图 3)。

3 讨论

O_3 对植物造成伤害的症状, 往往会表现为叶片变红、萎黄、斑枯以及叶片未成熟脱落。这些特征可以通过控制性熏气实验来证实。但类似的叶片症状也可能出现在植物受到炎热、干旱等胁迫因子的影响或秋季植物休眠开始时^[11]。Gravanoet 等发现, 作为外来入侵物种的天堂树(*Ailanthus altissima*)呈现出了从浅褐色到黑色的斑点, 斑点的黑色与已有研究的其他植物不同^[13], 依据 Manning 等的研究, 可以认为斑点颜色变黑的特征是由于受到 O_3 伤害的时间长、程度深造成的^[10]。尽管光叶盐肤木(*Rhus copallina*)和美国地锦(*Parthenocissus quinquefolia*)被美国内政部(US DOI, 2003)列为臭氧敏感植物^[14], 但这两种植物的臭氧伤害特征是叶片变红, 而这样的特征又与出现斑点伤害特征存在明显差异。在很多人的研究中, 也发现了相同的叶片变红的特征, 尤其是在生长季末、潮湿、炎热或者秋季休眠开始的时候进行调查时, 这样的现象更加显著^[6-8]。

同时, 通过对目前已有的研究结论进行比较发现, 同一植物在不同的环境中会表现为对 O_3 伤害的不同反



图2 北京市远郊 O₃ 叶片伤害指示植物

Fig. 2 Indicator plants of O₃ foliar injury in Beijing exurban region

1 辽东栎;2 毛黄栌;3 扁担木;4 短梗胡枝子;5 三裂绣线菊;6 葎叶蛇葡萄;7 火炬树;8 核桃楸;9 多花胡枝子;10 榆叶梅;11 荆条;12 牛迭肚;13 山杏;14 金雀花;15 山桃

应。在某个地方表现为对 O₃ 敏感的植物在另一个具有相似臭氧特征的环境下则有可能没有出现 O₃ 导致的叶片伤害症状。产生这种现象的原因可能是:由于自然生态系统中,很多其他的生态因子可能会对 O₃ 造成的叶片伤害起到缓解或者是加剧的作用,例如土壤湿度、其他污染气体的存在、昆虫、疾病以及其他环境胁迫因子的影响^[12]。

目前,研究人员通过开顶气室(OTC)等实验手段模拟 O₃ 浓度升高对植物造成的伤害,确定了一些物种可以作为区域性 O₃ 伤害的指示植物^[10]。但由于 O₃ 对不同植物的叶片以及对同一植物不同生长状态的叶片造成伤害的表现特征存在显著差异和不确定性,对一些叶片出现类似 O₃ 伤害特征的植物物种,并不能明确其具体原因,将其作为疑似 O₃ 伤害物种对待。

不同植物在高浓度 O₃ 危害下出现的伤害斑点的颜色具有明显差异。可能是由于植物本身的生理生化特征不同,造成由气孔进入植物体的 O₃ 与植物组织产生氧化反应的过程存在差异,伤害结果和伤害程度因此表现不同。植物所处环境中的水分、光照等生态因子的差异也有可能缓解或者加剧了 O₃ 对植物叶片造成的伤



图3 北京市远郊 O₃ 叶片伤害疑似植物

Fig. 3 Suspected plants of O₃ foliar injury in Beijing exurban region

1 桑; 2 栎树; 3 榆; 4 毛榛; 5 偃松; 6 侧柏; 7 构树; 8 白皮松; 9 油松; 10 酸枣; 11 山杨

害。此外, O₃ 对植物的伤害可能与植物叶片成熟时期有关。欧美学者利用开顶气室(OTC)研究发现, O₃ 伤害造成的深色斑点或尖烧现象多数发生在较成熟的叶片上, 因叶片的成熟时期不同, 高浓度 O₃ 对植物叶片形成伤害的时间长短也就存在差异, 因而表现出了斑点颜色由浅及深的叶片伤害特征。

本研究观测到了北京市远郊地区 15 种木本植物出现 O₃ 伤害症状, 结合远郊地区空气 O₃ 浓度较高的特点, 说明北京远郊区的一些敏感植物已经受到了空气 O₃ 危害。因此, 控制空气 O₃ 污染对我国城市周边的森林生态系统保护具有重要意义。

4 结论

(1) 北京市远郊区的 O₃ 浓度日平均值和 8:00—18:00 平均值明显高于城区和近郊区, 生长盛期(5—9 月份)远郊区的 AOT40 是 98.9 μg/m³, 已经远远超过 WHO 提出的野生植物临界负荷(4—9 月份的 AOT40 < 19.6 μg/m³)。

(2) 扁担木、多花胡枝子、荆条、毛黄庐、金雀花以及葎叶蛇葡萄等 15 种野生木本植物可以作为北京市远郊地区 O₃ 污染监测的指示植物。在各种不同植物出现的 O₃ 伤害特征中, 大体可以分为两类: 叶片上的斑点和叶缘的尖烧现象。叶片上的斑点颜色表现为: 从白色、灰白色的非着色现象到黄色、黄褐色、深褐色至黑色的灼伤特征, 这些特征与欧洲及北美学者获得的研究结论基本一致。

(3) 栎树、构树、桑、榆以及油松等 11 种植物表现出了与现有观测及实验研究相似的 O₃ 叶片伤害特征, 但由于环境的复杂性(包括自然因子的差异及其他污染气体的共同作用), 目前尚不能确定其伤害特征是否由高浓度 O₃ 引起, 暂将这些植物指定为北京市远郊 O₃ 污染监测的疑似植物。

References:

- [1] U. S. Environmental Protection Agency. Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants. Vol. 2. EPA/600/P-93/004bF. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development. North Carolina: Research Triangle Park, 1996.
- [2] Skelly J M. Tropospheric ozone and its importance to forests and natural plant communities of the northeastern United States. Northeastern

- Naturalist, 2000, 7(3):221-236.
- [3] Yang Y S, Skelly J M, Chevone B I, Birch J B, Effects of short-term ozone exposure on net photosynthesis, dark respiration, and transpiration of three eastern white pine clones, *Environment International*, 1983, 9, (4), 265-269.
- [4] Miller P R, McBride J R, *Oxidant Air Pollution Impacts in the Montane Forests of Southern California: A Case Study of the San Bernardino Mountains*, New York: Springer-Verlag, 1999: 424-424.
- [5] Richards B L, Middleton J T, Hewitt W B, Air pollution with relation to agronomic crops. V. Oxidant stipple of grape. *Agronomy Journal*, 1958, 50(9): 559-561.
- [6] Davis D D, Skelly J M, Foliar sensitivity of eight eastern hardwood tree species to ozone. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 62(3/4): 269-277.
- [7] Davis D D, Hutnik R J, McClenahan J R, Evaluation of vegetation near coal-burning power plants in Southwestern Pennsylvania: ozone injury on foliage of hybrid poplar. *Journal of Air and Waste Management Association*, 1993, 43(5):760-764.
- [8] Davis D D, Orendovici T, Incidence of ozone symptoms on vegetation within a National Wildlife Refuge in New Jersey, USA. *Environmental Pollution*, 2006, 143, (3): 555-564.
- [9] *Ozone Sensitive Plant Species on National Park Service and U. S. Fish and Wildlife Service Lands: Results of a June 24-25, 2003 Workshop*, Baltimore, Maryland.
- [10] Manning W J, Godzik B, Bioindicator plants for ambient ozone in Central and Eastern Europe. *Environmental Pollution*, 2004, 130(1): 33-39.
- [11] Orendovici T, Skelly J M, Ferdinand J A, Savage J E, Sanz M J, Smith G C, Response of native plants of northeastern United States and southern Spain to ozone exposures; determining exposure/response relationships. *Environmental Pollution*, 2003, 125(1): 31-40.
- [12] Innes J L, Skelly J M, Schaub M, *Ozone and broadleaved species-A guide to the identification of ozone-induced foliar injury*. Bern; Stuttgart; Wien; Haupt, 2001.
- [13] Gravano E, Giuliotti V, Desotgiu R, Bussotti F, Grossoni P, Gerosa G, Tani C, Foliar response of an *Ailanthus altissima* clone in two sites with different levels of ozone-pollution. *Environmental Pollution*, 2003, 121(1):137-146.
- [14] United States Department of the Interior (US DOI), *Ozone Sensitive Plant Species on National Park Service and U. S. Fish and Wildlife Service Lands: Results of a June 24-25, 2003 Workshop*, Baltimore, Maryland. Natural Resource Report NPS/NRARD/NRR-2003/01, 2003, 21-21.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元