

DOI: 10.5846/stxb201301150104

杨棠武, 吕美婷, 安树青, 赵德华. 城区森林与乡村森林近地层臭氧浓度的变化规律对比. 生态学报, 2014, 34(19): 5670-5678.

Yang T W, Lü M T, An S Q, Zhao D H. Comparison of near-ground ozone concentrations between urban and rural forests. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5670-5678.

## 城区森林与乡村森林近地层臭氧浓度的变化规律对比

杨棠武, 吕美婷, 安树青, 赵德华\*

(南京大学 生命科学学院, 南京 210093)

**摘要:**在基于城乡间环境梯度而发展的以“空间代替时间”研究陆地生态系统对全球气候变化响应的方法中,近地层臭氧的干扰是决定“城市自然大实验场”是否可行的最重要因素之一,但是城、乡近地层大气臭氧变化规律的研究却非常薄弱。以位于南京市中心的城区森林和镇江市下蜀的乡村森林为例,于2011年6月至2013年1月间,监测了近地层大气臭氧浓度,以及光照、温度、湿度等的变化动态,比较了两地臭氧浓度的日变化、季节变化规律。结果表明,城区样点与乡村样点相比,年平均气温高0.93℃,而相对湿度和光照强度最大值分别低3.37%和13108.77 lx。说明选择的样点有很好的代表性,反映了城、乡间典型的温湿度差异。而臭氧浓度的监测结果表明,乡村样点年平均臭氧浓度高于城区样点,但是生长季节(夏季)两样点间的差异不显著;城区和乡村样点一年中大于40 nL/L的时间分别是14%和13.9%;两样点AOT40的差异不显著。结果表明,虽然大部分时间乡村样点的近地层臭氧浓度高于城区样点,但是对研究陆地生态系统对全球气候变化响应的“城市自然大实验场”干扰较小。

**关键词:**臭氧;城乡差异;植物冠层;全球变化

## Comparison of near-ground ozone concentrations between urban and rural forests

YANG Tangwu, LÜ Meiting, AN Shuqing, ZHAO Dehua\*

School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** Numerous studies have shown that ecological factor changes along the spatial gradient of urban and rural sites have a strong similarity to the temporal gradient of global change. Therefore, based on environmental gradients between urban and rural areas, a space-for-time substitution experiment called the “urban nature experimental field” method is developed to research the response of the terrestrial ecosystem to global climatic change. In recent related studies, the characteristics of ecological factors in urban and rural areas were observed in many cities around the world, most of which were focused on temperature and carbon dioxide. However, some reports showed that the disturbance from near-ground ozone was one of the most influential factors in determining the effectiveness and applicability of the method. To date, little research has been carried out to monitor and identify the spatial variation of near-ground ozone concentrations along the urban-rural gradient. Therefore, we selected the following urban and rural forest sites: the urban site in Qingliangshan Park near the urban center of Nanjing, and the rural site in Xiashu at 41.7 km distance from the Nanjing city center. We monitored near-ground ozone concentrations, as well as light intensity, air temperature and humidity, from June 2011 to January 2013. We also compared diurnal and seasonal variation of ozone concentration. The results suggest that there were significant differences of temperature, humidity and maximum light intensity between the two observation sites ( $P < 0.001$ ). Compared to the rural forest site, the urban site had an average 0.93℃ higher temperature, 3.37% lower humidity, and 13108.77 lx lower maximum light intensity. This shows typical differences of temperature and humidity between urban and

基金项目:国家自然科学基金(31000226)

收稿日期:2013-01-15; 网络出版日期:2014-03-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dhzhao@nju.edu.cn

rural sites, and implies the representativeness and appropriateness of the selection of the two monitoring sites. At the urban site, an annual average of 19.95 nL/L in near-ground ozone concentration was observed, slightly less than that at the rural site (23.24 nL/L). The difference pattern of ozone concentration between the two sites varied seasonally. In autumn, winter and spring, significantly higher seasonal average ozone concentrations were observed at the rural forest site, relative to the urban site ( $P < 0.01$ ). In summer, there was no difference between the two sites ( $P > 0.05$ ). Relative frequencies of ozone concentrations in excess of 40 nL/L were 14.0% and 13.9% at the urban and rural sites, respectively. AOT40 (accumulated ozone exposure over a threshold of 40 nL/L) values at the urban and rural forest sites were  $0.968 \times 10$  h and  $1.259 \times 10$  h, respectively. There was no significant difference in AOT40 values between the two sites. Our study demonstrated that near-ground ozone concentration in the rural forest was generally higher than that in the urban forest. However, there was no significant difference during summer in the city of Nanjing, the season when plants grow vigorously and are susceptible to damage from near-ground ozone concentrations. We conclude that the disturbance of plant growth from variation of near-ground ozone concentrations between the urban and rural sites was negligible in the urban space-for-time substitution experiments.

**Key Words:**  $O_3$ ; urban-rural variation ; plant canopy; global change

与乡村相比,城市在温度、湿度、 $CO_2$ 浓度等方面存在显著差异<sup>[1]</sup>,这种差异必将对生长在其中的植被产生影响<sup>[1-4]</sup>。目前对城市特征环境与植被间相互关系的研究主要集中在城市污染对植被的胁迫效应,以及城市植被生态反作用方面<sup>[1, 5-6]</sup>。已有研究表明,城乡梯度上生态因子的空间变化与全球变化因子的时间变化间存在很强的相似性,因此,基于城乡间的环境梯度可发展一种以空间代替时间的方法来研究陆地生态系统对全球气候变化响应的研究方法,即“城市自然大实验场法”<sup>[7-8]</sup>。Carreiro 等和 Grimm 等发表专论对这一新方法的有效性进行了探讨,肯定了这一新方法的潜在意义<sup>[7-9]</sup>。

为了发展这一新方法,有必要对城乡间可能影响植物生长的环境因子进行长期的监测研究,目前的研究主要集中在温度、 $CO_2$ 浓度和污染气体浓度等方面<sup>[1, 5-6]</sup>。有研究表明,导致城乡间植物生长差异的主导因素可能是臭氧浓度,乡村臭氧浓度往往高于城市,由于臭氧对植物生长的负作用,植物在城市生长反而更快,而且很有可能会掩盖温度、 $CO_2$ 浓度等全球变化因子对植物的作用<sup>[2, 10-11]</sup>。Gregg 等在纽约的研究表明城市杨树生长速度是郊区的两倍,其原因是郊区的高臭氧浓度减慢了植物的生长<sup>[2]</sup>。但是,目前有关臭氧浓度观测大都是在气象塔站(距地面高度 15 m 以上)上进行<sup>[11-12]</sup>,观测点与森林植物冠层相隔较远,由于植物冠层对大气环流的阻隔作用,以及植物释放的植物源挥发性有机物 VOC 与

臭氧浓度间复杂的相互作用,导致气象塔站上测得的臭氧浓度与近地层和植物产生直接作用的大气臭氧浓度间存在显著差异<sup>[13-19]</sup>,所以这些观测数据不能直接用于“城市自然大实验场法”的研究。然而,目前有关城区森林与远离城市的森林近地层臭氧浓度的对比研究鲜有报道。

本文自 2011 年 6 月至 2013 年 1 月逐月对位于南京市中心的城区森林和镇江市下蜀的乡村森林的近地层(高度 1.0 m)臭氧浓度进行跟踪监测,比较两样地近地层臭氧浓度的日变化与季节变化规律,以期在城市特征环境研究以及发展“城市自然大实验场法”提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样点选择

由于观测样点周边的植被会对近地层臭氧浓度产生影响<sup>[13, 16]</sup>,森林样点的选择尤为重要。最终监测的城乡森林样点间臭氧浓度差异必然是城乡大环境差异、目标森林差异和小样点(小生境)差异共同作用的结果。为了提高研究的代表性,在样点的选择方面作了严格的限制,首先,要求选择的城乡目标森林必须具有一定规模、人类活动干扰小,而且植被类型和土壤特征尽可能接近;其次,在目标森林选择小样点时,要求小样点不仅能够较好的代表目标森林的平均状况,而且城乡的 2 个小样点附近在地上生物量、地形、盖度等方面尽可能接近。

在综合考察样地规模、人类活动影响、植被类型和地上生物量、地形、土壤等因素的基础上,本研究选择了两个观测样点:南京市清凉山森林公园样点和句容市下蜀镇乡村森林样点(图1)。清凉山公园(N32°3',E118°45')靠近南京市市中心,离市中心新街口直线距2.5 km,公园面积0.73 km<sup>2</sup>,植被盖度约为85%,以30a以上的高大乔木为主,银杏、板栗、悬铃木、雪松为优势种;公园四周的土地利用类型以道路、公寓住宅和写字楼为主,人口密度高,是典型的

市区环境;采样点位于公园中心偏北的山腰处,周边相对平整,以小乔木为主。乡村森林样点位于句容市下蜀镇(N32°07',E119°13'),距离南京市市中心新街口41.7 km,采样点位于下蜀镇林场的空地中,下蜀林场面积3.25 km<sup>2</sup>,植被盖度90%以上,以30a以上大型乔木为主,麻栎、栓皮栎、白栎、金钱松等为优势种;采样点位于山脚下,周边地表相对平整,以小乔木为主。

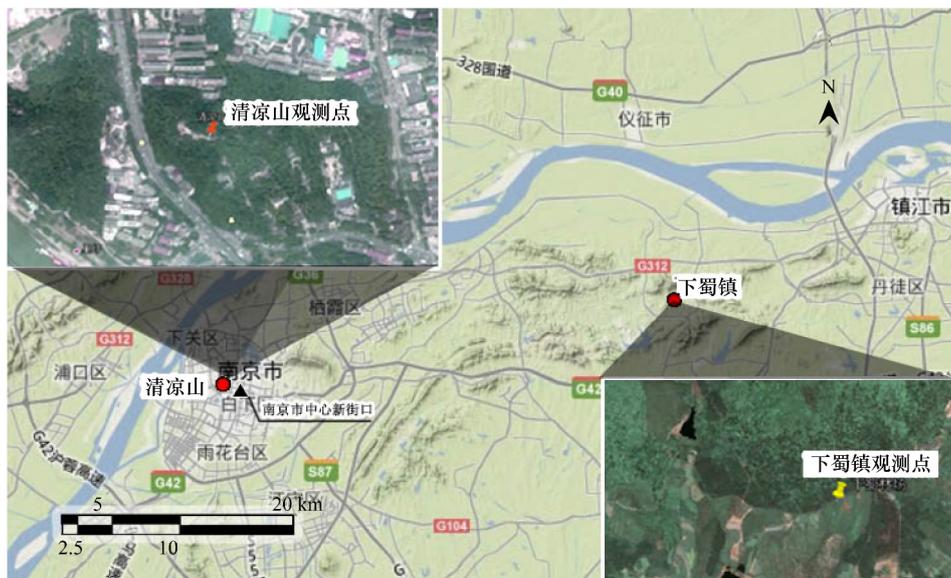


图1 城区森林与乡村森林位点图

Fig.1 Location of sampling sites in urban and rural forest

## 1.2 测定方法

在两个样点,分别安置一个按照 QXT5-2001 标准制作的百叶箱,距地面1 m,用于放置温度、湿度和臭氧的监测仪;光照强度检测仪安装在不受遮挡的水平面上。温度和湿度监测采用美国 HOBO 公司的 Pro V2 系列温湿度记录仪 U23-001(精度 $\pm 0.2$ ) $^{\circ}\text{C}$ ;光照采用美国 HOBO 公司的 UA-002-64;臭氧观测系统采用新西兰 AeroQual 公司的 Series500 臭氧监测仪(0—100 nL/L 范围内精度 $< 8$  nL/L)。

从2011年6月至2013年1月,对温度、湿度和光照强度进行不间断的连续监测,数据采集时间间隔为5 min。选择晴朗微风天气,进行臭氧浓度测定,每月测定数次(2011年12月和2012年1月数据缺失),每次测定时间持续24 h以上,数据采集时间间隔为5 min。

## 1.3 数据处理及分析

利用 Excel 和 SPSS18.0 软件对数据进行分析 and 处理。本文的臭氧小时平均值的频度是基于臭氧小时平均值统计的各样点不同浓度臭氧的出现频率,臭氧浓度间隔为1 nL/L<sup>[20]</sup>。季节采用宋吉化的划分方案:春季从2月12日到5月7日,共85d;夏季从5月8日到10月3日,共149d;秋季从10月4日到11月20日,共48d;冬季从11月21日到2月11日,共83d<sup>[21]</sup>。臭氧浓度平均日变化动态曲线用五点滑动平均法进行平滑处理<sup>[22]</sup>。

本文采用 AOT40 (Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion) 值评估臭氧浓度对植物的可能影响<sup>[23-24]</sup>, AOT40 指的是臭氧浓度超过40 nL/L时,高于40 nL/L部分臭氧浓度对时间积分的结果。城乡样点间不同月份温湿度、光照强度差异采用双因素方差分析。两样点间臭氧浓度日

变化动态对比采用配对样本 *T* 检验。不同样点间 AOT40 值对比采用单因素方差分析 (One-Way ANOVA)。

### 2 结果与分析

#### 2.1 城乡样点近地层大气温度、湿度和光照的差异

受城市热岛效应影响,清凉山样点近地层月平均气温在整个观测期间均高于同期的下蜀样点(图 2),年平均高 0.93 °C,其中 2012 年 5 月份两样点的

差值最大,达 1.41 °C;2011 年 11 月份两样点的差值最小,为 0.48 °C。与近地层气温相反,清凉山样点近地层月平均大气湿度在整个观测期间均低于同期的下蜀样点,年平均低 3.37%,其中,两样点相差最大值出现在 2012 年 10 月,达 6.29%,相差最小值出现在 2011 年 11 月,为 1.61%。与近地层大气湿度相似,清凉山样点日光照强度最大值的月平均值在整个观测期除 2012 年 3 月和 7 月以外的其它月份均低于同期的下蜀样点,年平均低 13108.77lx (11.0%),

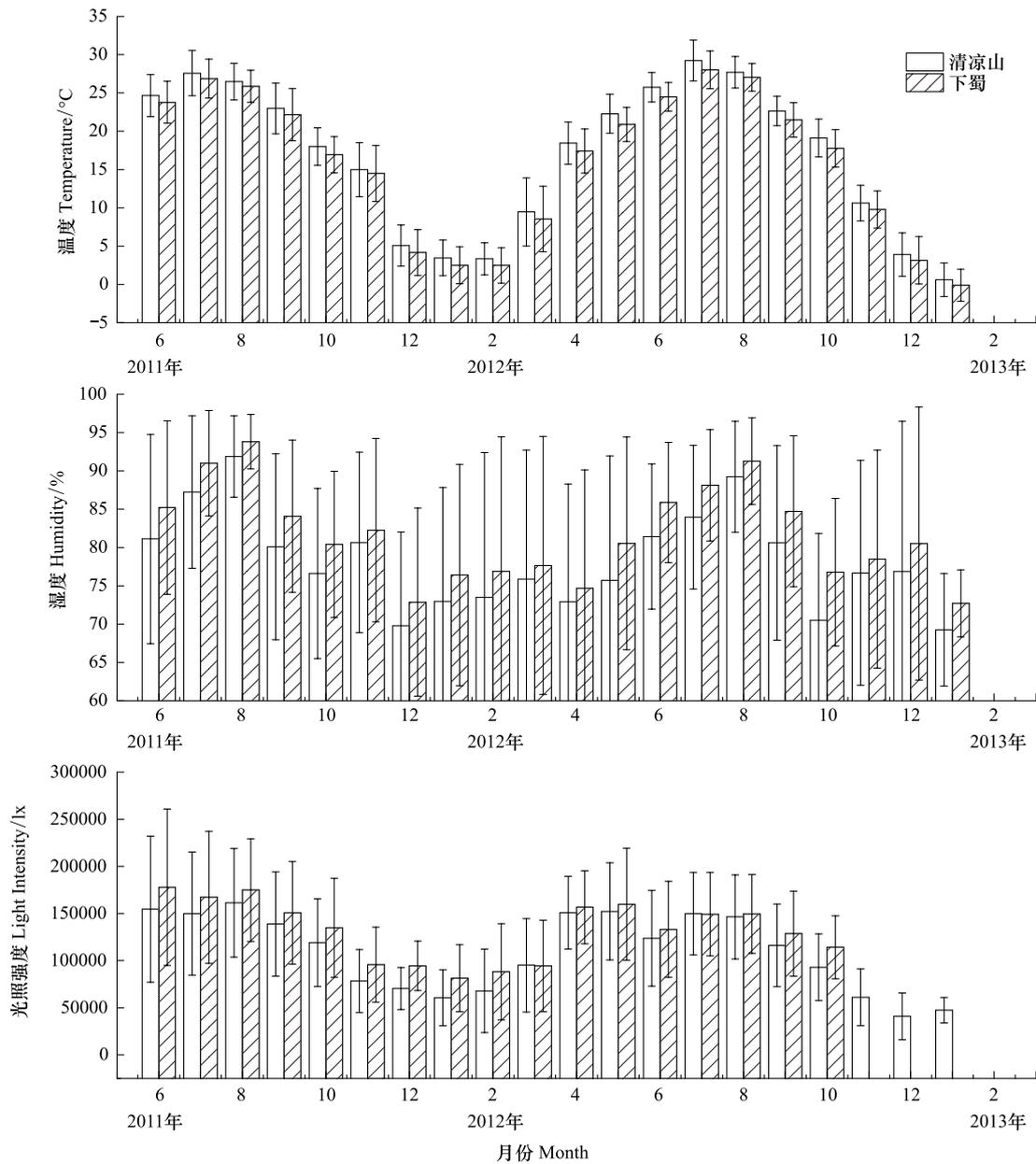


图 2 城市和乡村森林样点近地层大气温度、湿度和日光照最大值的月平均值

Fig.2 Monthly average values of near-surface atmospheric temperature、relative humidity、daily max light intensity for urban and suburban forest sites

两样点最大差值出现在 2011 年 12 月, 相差 24022.39 lx (25.4%)。通过双因素方差分析, 样点和月份对温度、湿度、光照强度的影响都是极显著 ( $P < 0.001$ )。

## 2.2 城乡样点植物冠层内臭氧浓度的变化特征

### 2.2.1 臭氧频谱分布

清凉山样点, 臭氧频度的分布总体表现为随臭氧浓度增加而逐步减少的趋势(图 3), 最大值出现在小于 10 nL/L 区域, 臭氧浓度在 0—10 nL/L 之间的相对频度为 41.0%, 在 10—40 nL/L 之间的相对频率为 45.0%, 而大于 40 nL/L 的频度为 14.0%, 也即

清凉山样点一年中 41.0% 的时间臭氧浓度小于 10 nL/L, 而 14.0% 的时间臭氧浓度大于 40 nL/L。下蜀样点, 臭氧频度的分布总体表现为中间高、两边低, 臭氧浓度出现在 0—10 nL/L 之间的频度为 28.3%, 在 10—40 nL/L 之间的相对频率为 57.7%, 大于 40 nL/L 的频度为 13.9%。结果表明, 两个样点间臭氧频度的分布表现出一定的差异, 清凉山样点臭氧频度低浓度 (<10 nL/L) 的区域分布相对较高, 下蜀样点在 10—40 nL/L 范围内分布相对较高, 而两者在高浓度 (>40 nL/L) 区域的频度总和则相差不大。

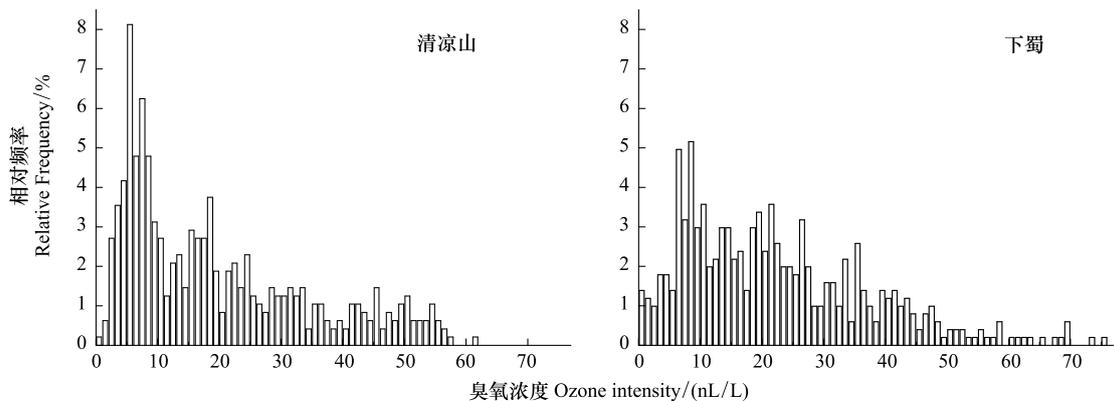


图 3 城市和乡村森林样点植物冠层内大气臭氧频度分布

Fig.3 Frequency distribution of inside forest canopy  $O_3$  concentration for urban and suburban sites

### 2.2.2 日变化与季节变化动态

两个样点臭氧浓度的日变化在全年均以单峰曲线为主: 最低值和最高值都分别出现在 7:00 和 15:00 左右(图 4)。但是, 日变化幅度在不同季节表现出较大差异, 春夏秋三季日变化幅度都较大, 都在 20 nL/L 左右, 而在冬季, 日变化幅度则较小, 清凉山冬季变化幅度为 7.02 nL/L, 而下蜀冬季变化幅度为 9.68 nL/L。两样点间, 不同季节的日变化动态也表现出一定的差异: 春秋两季, 下蜀在各个时段的臭氧浓度均高于清凉山; 而在夏季, 两样点间臭氧浓度相差较小, 基本上同步变化。在冬季, 清凉山和下蜀在夜间臭氧浓度相差不大, 而在白天则下蜀高于清凉山。表明, 两个样点臭氧浓度的日变化趋势相似, 大部分时段下蜀样点的臭氧浓度高于清凉山样点。

两样点季节平均臭氧值最大值均出现在秋季, 清凉山样点和下蜀样点秋季平均值分别为 24.93 nL/L 和 31.63 nL/L。季节平均值最小值出现在冬

季, 清凉山样点和下蜀样点冬季平均值分别为 7.82 nL/L 和 11.48 nL/L。两样点间差别最小的季节为夏季, 清凉山样点和下蜀样点夏季平均值分别为 24.47 nL/L 和 24.15 nL/L。在春季, 下蜀样点高于清凉山样点, 清凉山样点和下蜀样点秋季平均值分别为 12.05 nL/L 和 22.57 nL/L。清凉山的臭氧年平均浓度为 19.95 nL/L, 下蜀为 23.24 nL/L。通过配对样本  $T$  检验, 发现春季、秋季、冬季 3 个季节不同样点间臭氧浓度差异都是极显著 ( $P < 0.01$ ), 而夏季两样点间的臭氧浓度则差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.2.3 AOT40 值

统计两个样点 4 个季节的 AOT40 的结果表明, 两个样点 AOT40 均为夏秋较高, 春冬较低。清凉山夏季 AOT40 为  $0.643 \times 10^{-6}$  h, 下蜀夏季 AOT40 为  $0.578 \times 10^{-6}$  h; 冬季都为 0。两个样点全年的 AOT40 累计值估计为  $0.968 \times 10^{-6}$  h,  $1.259 \times 10^{-6}$  h(表 1)。

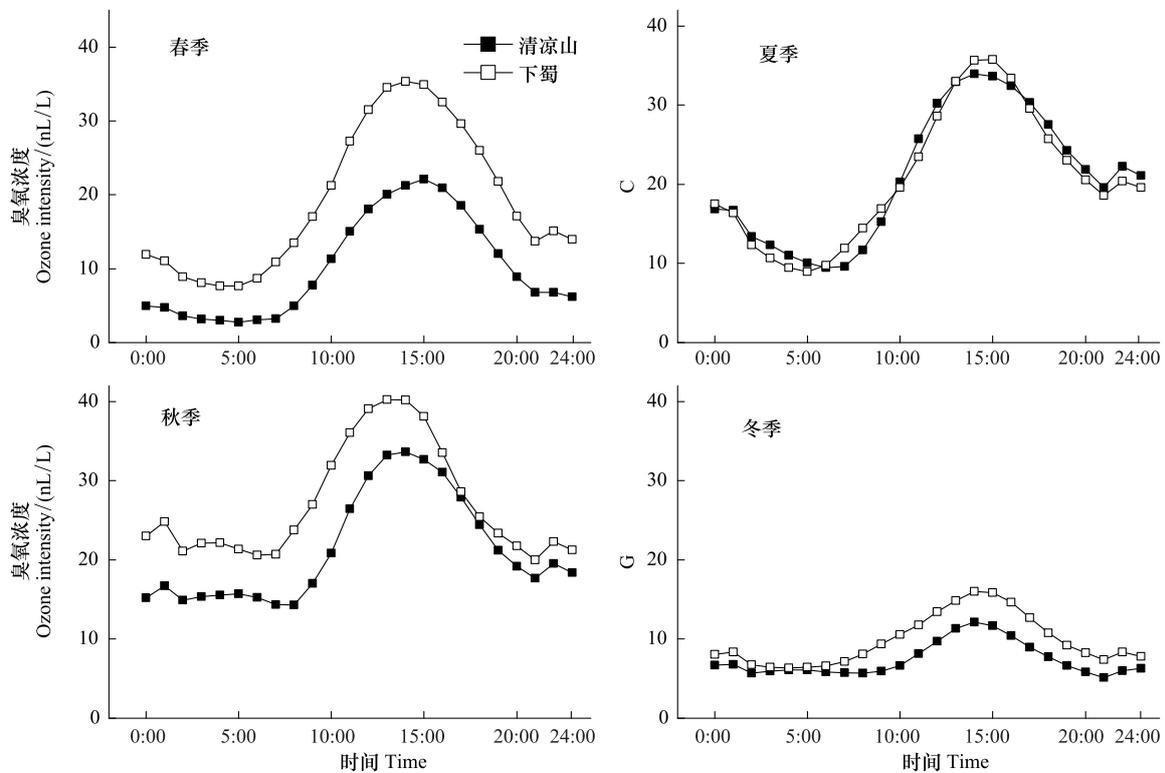


图4 城市和乡村森林植物冠层内四季臭氧日变化对比图

Fig.4 Average inside forest canopy Ozone concentration diurnal patterns of four season for urban and suburban forest sites

表1 城市与乡村样点不同季节的植物冠层内臭氧 AOT40

Table 1 The inside forest canopy ozone concentrations AOT40 for urban and suburban forest sites

	AOT40/( $\times 10^{-6}$ h)				总 AOT40 All year AOT40
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	
清凉山 Qingliangshan	0.016 a	0.643 a	0.318 a	0.00 a	0.968
下蜀 Xiashu	0.199 a	0.578 a	0.482 a	0.00 a	1.259

AOT40: Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion 臭氧浓度超过 40 nL/L 时,高于 40 nL/L 部分臭氧浓度对时间积分的结果; 同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 3 讨论

#### 3.1 城乡样点臭氧浓度差异

分析植物冠层内臭氧四季的日变化发现,在 4 个季节中乡村样点的臭氧浓度都要高于城市样点,尤其在春季和秋季,这种差别更加明显(图 4)。这与马志强等在北京与香河县观测到的结果类似<sup>[25]</sup>。乡村的臭氧浓度偏高可能是城市带有臭氧前体物质的气团在往乡村扩散的过程中逐渐反应积累的结果<sup>[19-20]</sup>。臭氧是由在其前体物在太阳辐射下经光化学反应生成的,本研究的光照辐射结果显示,乡村样点的光照强度比城市平均要高 11%(图 2),这也可能是乡村臭氧浓度高于城市的一个重要因素。本研

究发现在四个季节中,秋季臭氧浓度平均值最高,这与段玉森等研究类似<sup>[26]</sup>。这可能是因为臭氧易在高温和强光下产生,但因南方夏季降雨较多,湿度较高(图 2)能降低臭氧浓度,所以夏季虽然有高温和强光照(图 2)等有利于产生臭氧的条件,但臭氧总体水平依然相对较低。在冬季,温度、光照等条件不利于臭氧生成,所以冬季臭氧浓度相对其它季节来说都要低,但乡村样点相对城市依然要高。这与 Lamaud 等在法国大西洋海岸森林观察到的现象一致,Lamaud 等的研究表明在森林地区夏季植物生长旺盛,能降低臭氧浓度,所以城市与森林相差不大,而冬季植物休眠,则森林地区消除臭氧的能力较弱<sup>[27]</sup>。而城市相对而言气流扰动较大,所以臭氧浓

度相对较低<sup>[28]</sup>。

### 3.2 植被对臭氧浓度的影响和样点的选择

植物吸收空气的同时,也能吸入臭氧,臭氧通过植物的气孔进入植物叶片细胞间隙内,对植物会造成伤害<sup>[29-30]</sup>;另一方面,植物在吸收臭氧,受到臭氧伤害的同时,也能消耗一部分臭氧,使臭氧浓度降低。Lamaud 等在法国大西洋沿岸森林做的研究表明植物对臭氧的吸收能够显著降低臭氧浓度<sup>[27]</sup>。Gerosa 等在地中海的森林的研究表明,植物冠层对臭氧浓度影响较大,植物冠层下方(2 m)比上方(18 m)臭氧浓度要低(最大值达 20 nL/L),尤其在早上和晚上差值更大<sup>[31]</sup>;Ollinger 等的研究表明,森林上方的臭氧浓度同其下方的植物 LAI 成一定的相关性,森林 LAI 越高, O<sub>3</sub> 越低<sup>[17]</sup>。此外,除了直接的吸收外,植物也能通过释放的 NO 和萜类等气体的中和作用来降低大气的臭氧浓度<sup>[13]</sup>。安俊琳等在南京北郊监测到的臭氧浓度年平均值为 30.7 nL/L<sup>[32]</sup>,高于本实验的两个监测样点。其原因可能就与监测样点的选择有关:安俊琳等的监测样点设在学校的楼顶,周边是教学生活区,而本研究的样点周围都是植物,监测点设在植物冠层内。

近地层臭氧浓度易受植被的影响,考虑到样点间小生境,特别是植被特征差异的影响,严格地选择样点,以降低其可能的干扰。除臭氧外,还监测了样点的温度、湿度、光照等气象因子,结果表明,城市样点呈现高温、低湿、弱光照等特点,表现出典型的城市特征(图 2);两样点间温度、湿度和光照的结果符合典型的城市-乡村环境梯度特征。但是其差值小于已报道的无森林覆盖地区<sup>[4]</sup>。同样的,本实验两样点的臭氧浓度在变化趋势上与同城的其它观测结果相似,但是在平均值上却比他们的要低<sup>[32-33]</sup>。表明观测的城乡臭氧浓度是城乡大环境和观测样点小生境条件共同作用的结果;由于选择的样点小生境差异较小,样点间臭氧浓度的差别主要是由城乡间大环境差异造成的。

### 3.3 城乡臭氧浓度差异对植被的影响

城市有着较高的温度以及 CO<sub>2</sub> 浓度,因此城乡的空间差异能用来研究全球变化的时间差异,这种方法,即“城市自然大实验场法”<sup>[7-8]</sup>,已经被广泛的讨论,Carreiro 等和 Grimm 等对这一方法进行了肯定<sup>[7-9]</sup>。本研究的结果表明,南京的城市乡村森林间

温度存在显著差异(图 2),2011 年 6 月至 2012 年 5 月,市区的温度均高于乡村,最高高出 1.41 °C,平均高出 0.93 °C。说明城区森林环境依然受城市大环境的影响。此外,赵德华等在 2009 年南京的研究结果还表明,南京市中心的 CO<sub>2</sub> 浓度要比郊区白天和夜间平均高出 55 nL/L 和 20 nL/L。这说明南京市城市与乡村的空间差异与全球变化的时间差异相类似,符合“城市自然大实验场”的要求。

然而有研究表明城乡间臭氧浓度的差别可能是城市与乡村植物生长差别最主要的原因,且其影响程度可能远远大于城乡间温度、CO<sub>2</sub> 浓度差异对植物的影响<sup>[2, 10-11]</sup>。AOT40 值被广泛用作评估臭氧对植物生长影响大小的指标。Fuhrer 等在 1994 年的研究发现,臭氧超过 40nL/L 的累积值(AOT40)与植物生长之间有很好的相关性<sup>[23]</sup>。马志强等在研究北京及其下游地区臭氧浓度差异中发现,兴隆(郊区)地区的臭氧浓度 AOT40 春夏秋各为  $23.1 \times 10^{-6}$  h、 $26.5 \times 10^{-6}$  h、 $14.1 \times 10^{-6}$  h,能导致对小麦的减产超过 30%<sup>[11]</sup>。Gregg 等 2006 年在研究纽约城郊臭氧浓度差别对植物生长影响时发现,郊区的 AOT40 累计值在  $5.1 \times 10^{-6}$  h 到  $10.2 \times 10^{-6}$  h 之间,而城市为  $1.6 \times 10^{-6}$  h 到  $6.6 \times 10^{-6}$  h 之间,导致郊区的杨树比城市的生长要慢一倍<sup>[10]</sup>。本研究表明,清凉山冠层内的 AOT40 年累计值为  $0.968 \times 10^{-6}$  h,下蜀为  $1.259 \times 10^{-6}$  h(表 1),不仅远远低于北京和纽约的监测结果<sup>[2, 11]</sup>,而且低于其它在南京的研究监测结果<sup>[32]</sup>,对植物的影响相对较小。此外,虽然两样点间年臭氧平均浓度相差较大,但是主要的差别来自非生长季节,在植物生长旺盛的夏季则相差不大(图 4),且两样点间夏季的 AOT40 值差异并不显著(表 1)。因此,通过选择具有一定规模的森林(公园)作为研究样点,可以有效降低样点间臭氧浓度差异对“城乡自然大实验场法”的干扰,提高其可行性。

### References:

- [ 1 ] Xiao R B, Ouyang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Gregory T Jr, Wang X K, Miao H. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [ 2 ] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424 (6945): 183-187.

- [ 3 ] Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO<sub>2</sub>/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 2004, 139(3): 454-458.
- [ 4 ] Zhao D H, Ouyang Y, Qi J G, Fan Y M, An S Q. Near-surface atmospheric properties along an urban center-suburban-urban forest gradient in summer in Nanjing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6654-6663.
- [ 5 ] Singh A, Agrawal S B, Rathore D. Amelioration of Indian urban air pollution phytotoxicity in *Beta vulgaris* L. by modifying NPK nutrients. *Environmental Pollution*, 2005, 134(3): 385-395.
- [ 6 ] Yan W D, Tian D L, Xiang W H, Huang Z H. Seasonal change in atmospheric SO<sub>2</sub> concentration in forested and non-forested urban lands. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1367-1374.
- [ 7 ] Carreiro M M, Tripler C E. Forest remnants along urban-rural gradients; Examining their potential for global change research. *Ecosystems*, 2005, 8(5): 568-582.
- [ 8 ] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [ 9 ] George K, Ziska L H, Bunce J A, Quebedeaux B. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(35): 7654-7665.
- [ 10 ] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Physiological and developmental effects of O<sub>3</sub> on cottonwood growth in urban and rural sites. *Ecological Applications*, 2006, 16(6): 2368-2381.
- [ 11 ] Ma Z Q, Wang Y S, Zhang X L, Xu J. Comparison of ozone between Beijing and downstream area. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, 32(4): 924-929.
- [ 12 ] Liu J, Zhang X L, Zhang X C, Tang J. Surface ozone characteristics and the correlated factors at Shangdianzi atmospheric background monitoring station. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(4): 19-25.
- [ 13 ] Mikkelsen T N, Ro-Poulsen H, Pilegaard K, Hovmand M F, Jensen N O, Christensen C S, Hummelshøj P. Ozone uptake by an evergreen forest canopy: temporal variation and possible mechanisms. *Environmental Pollution*, 2000, 109(3): 423-429.
- [ 14 ] Jiménez P, Baldasano J M. Ozone response to precursor controls in very complex terrains: Use of photochemical indicators to assess O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity in the northeastern Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D20.
- [ 15 ] Jiang W M, Cai C X, Li X. Simulation of the forming of ozone in the low layer air of urban area. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2001, 21(2): 154-161.
- [ 16 ] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment*, 1998, 32(1): 53-68.
- [ 17 ] Ollinger S V, Aber J D, Reich P B. Simulating ozone effects on forest productivity: interactions among leaf-, canopy-, and stand-level processes. *Ecological Applications*, 1997, 7(4): 1237-1251.
- [ 18 ] Taha H. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(20): 3423-3430.
- [ 19 ] Isakse I S A, Hov O, Hesstvedt E. Ozone generation over rural areas. *Environmental Science & Technology*, 1978, 12(12): 1279-1284.
- [ 20 ] Liu X W, Xu X B, Lin W L. Variation characteristics of surface O<sub>3</sub> in Beijing and its surrounding area. *China Environmental Science*, 2010, 30(7): 946-953.
- [ 21 ] Song J H. Study on division of Nanjing phenology quarter. *China Forestry Science and Technology*, 1991, 1(1): 52-53.
- [ 22 ] Wei F Y. *Diagnosis and Prediction Technology of Modern Climate Statistics*. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 42-61.
- [ 23 ] Fuhrer J, Skärby L, Ashmore M R. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution*, 1997, 97(1/2): 91-106.
- [ 24 ] Zheng Y F, Liu R N, Wu R J, Zhao Z, Hu C D, Zhang J E, Wang L X. Effects of ozone stress on dry matter production and yield components in winter wheat. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 409-417.
- [ 25 ] Ma Z Q, Wang Y S, Sun Y, Ji D S, Hu B. Characteristics of ozone and oxides of nitrogen in Beijing and Xianghe. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(6): 832-837.
- [ 26 ] Duan Y S, Zhang Y H, Wang D F, Xu J, Wei H P, Cui H X. Spatial-temporal patterns analysis of ozone pollution in several cities of China. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, 23(S1): 34-39.
- [ 27 ] Lamaud E, Carrara A, Brunet Y, Lopez A, Druilhet A. Ozone fluxes above and within a pine forest canopy in dry and wet conditions. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(1): 77-88.
- [ 28 ] Li L Q, Li X S. The numerical study of urban atmospheric boundary layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 16(2): 237-247.
- [ 29 ] Reich P B. Quantifying plant response to ozone: a unifying theory. *Tree Physiology*, 1987, 3(1): 63-91.
- [ 30 ] Winner W E. Mechanistic analysis of plant responses to air pollution. *Ecological Applications*, 1994, 4(4): 651-661.
- [ 31 ] Gerosa G, Vitale M, Finco A, Manes F, Denti A B, Cieslik S. Ozone uptake by an evergreen Mediterranean Forest (*Quercus ilex*) in Italy. Part I: Micrometeorological flux measurements and flux partitioning. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(18): 3255-3266.
- [ 32 ] An J L, Hang Y X, Zhu B, Wang D D. Observational study of ozone concentrations in northern suburb of Nanjing. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 26(6): 1383-1386.
- [ 33 ] Gao J H, Zhu B, Wang D, Wang F. The variation of air pollutants

and the impact of long-range transport in the northern suburb of Nanjing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32 (5): 1149-1159.

#### 参考文献:

- [1] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Gregory T Jr, 王效科, 苗鸿. 城市热岛的生态环境效应. *生态学报*, 2005, 25(8): 2055-2060.
- [4] 赵德华, 欧阳琰, 齐家国, 范亚民, 安树青. 夏季南京市中心-郊区-城市森林梯度上的近地层大气特征. *生态学报*, 2009, 29(12): 6654-6663.
- [6] 闫文德, 田大伦, 项文化, 黄志宏. 城市林地与非林地大气 SO<sub>2</sub> 季节动态变化. *生态学报*, 2006, 26(5): 1367-1374.
- [11] 马志强, 王跃思, 张小玲, 徐敬. 北京城区与下游地区臭氧对比研究. *环境科学*, 2011, 32(4): 924-929.
- [12] 刘洁, 张小玲, 张晓春, 汤洁. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素. *环境科学研究*, 2006, 19(4): 19-25.
- [15] 蒋维楣, 蔡晨霞, 李昕. 城市低层大气臭氧生成的模拟研究. *气象科学*, 2001, 21(2): 154-161.
- [20] 刘希文, 徐晓斌, 林伟立. 北京及周边地区典型站点近地面 O<sub>3</sub> 的变化特征. *中国环境科学*, 2010, 30(7): 946-953.
- [21] 宋吉化. 南京物候季划分初探. *林业科技开发*, 1991, 1(1): 52-53.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999: 42-61.
- [24] 郑有飞, 刘瑞娜, 吴荣军, 赵泽, 胡程达, 张金恩, 王连喜. 臭氧胁迫对冬小麦干物质生产和产量构成的影响. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3): 409-417.
- [25] 马志强, 王跃思, 孙扬, 吉东生, 胡波. 北京市与香河县大气臭氧及氮氧化合物的变化特征. *环境化学*, 2007, 26(6): 832-837.
- [26] 段玉森, 张懿华, 王东方, 徐捷, 魏海萍, 崔虎雄. 我国部分城市臭氧污染时空分布特征分析. *环境监测管理与技术*, 2011, 23(增刊): 34-39.
- [28] 李乐泉, 李兴生. 城市大气边界层的数值研究. *大气科学*, 1992, 16(2): 237-247.
- [32] 安俊琳, 杭一纤, 朱彬, 王东东. 南京北郊大气臭氧浓度变化特征. *生态环境学报*, 2010, 26(6): 1383-1386.
- [33] 高晋徽, 朱彬, 王东东, 王飞. 南京北郊 O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 浓度变化及长/近距离输送的影响. *环境科学学报*, 2012, 32(5): 1149-1159.