

夏季南京市中心-郊区-城市森林梯度上的近地层大气特征

赵德华¹, 欧阳琰¹, 齐家国², 范亚民³, 安树青^{1,*}

(1. 南京大学生物系, 南京 210093; 2. 美国密歇根州立大学地理系和全球变化-对地观测中心, 密歇根州东兰辛市 48823;

3. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036)

摘要: 运用定点观测法和车载传感器的流动观测法, 研究了夏季沿南京市市中心-郊区-城市森林梯度的近地层大气温度 (T_{N-S})、 CO_2 浓度 ($p_{N-S}(CO_2)$)、湿度和污染气体浓度的变化规律。结果表明, 沿市中心-郊区-城市森林梯度, T_{N-S} 、 $p_{N-S}(CO_2)$ 、相对湿度 (RH_{N-S}) 和污染物浓度 ($p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$) 均表现为规律性的变化, 与观测点距市中心的距离间的关系可用 logistic 方程进行较好的拟合 (R^2 在 0.71 ~ 0.90 之间)。与城市森林 (S9) 相比, 市中心 (S1) 的 T_{N-S} 和 $p_{N-S}(CO_2)$ 在一天中的任何时段均有不同程度的升高, 其中, T_{N-S} 升高幅度在 5:00 ~ 6:00 时段最小, 而在 17:00 ~ 18:00 时段最大, 分别为 1.3℃ 和 4.7℃, 白天和夜间平均分别升高了 3.7℃ 和 2.1℃; 而 $p_{N-S}(CO_2)$ 升高幅度在 1:00 ~ 2:00 时段最小, 在 13:00 ~ 14:00 时段最大, 分别为 7.0 $\mu\text{mol/mol}$ 和 66 $\mu\text{mol/mol}$, 白天和夜间平均分别升高了 55 $\mu\text{mol/mol}$ 和 20 $\mu\text{mol/mol}$ 。S1 和 S9 点间, 绝对湿度 (AH_{N-S}) 的全天平均值无显著差异; 而 RH_{N-S} 除了 5:00 ~ 6:00 时段两点均接近饱和外, 一天中 S9 点均高于 S1 点, 两点最大差值出现在 13:00 ~ 14:00 时段, S1 和 S9 分别为 37.4% 和 52.9%, 全天平均升高了 7.0%。与 S9 点相比, S1 点的 $p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$ 在上午 10:00 ~ 11:40 间分别升高了 0.88 倍和 2.1 倍。表明, 当前城市的一些环境因子如 T_{N-S} 和 $p_{N-S}(CO_2)$ 相当于全球数十年或更久以后的水平。

关键词: 城市; 郊区; 城市森林; 热岛; CO_2

文章编号: 1000-0933(2009)12-6654-10 中图分类号: 文献标识码: A

Near-surface atmospheric properties along an urban center-suburban-urban forest gradient in summer in Nanjing City

ZHAO De-Hua¹, OUYANG Yan¹, QI Jia-Guo², FAN Ya-Min³, AN Shu-Qing^{1,*}

1 Department of Biological Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Department of Geography and Center for Global Change and Earth Observations, Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

3 Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6654 ~ 6663.

Abstract: Because of differences in land covers and human activities, urban areas have significant different near-surface atmospheric conditions compared to suburban, rural or forested areas. Numerous studies documented the heat island phenomenon and air pollutions in urban areas but few researches focused on atmospheric compositions that are related to global climatic change such as atmospheric CO_2 along urban-forest gradients. The objectives of this study were to (1) explore the temporal and spatial variations of near-surface (2.5 m above the ground) atmospheric temperature (T_{N-S}), CO_2 concentration ($p_{N-S}(CO_2)$), humidity, SO_2 concentration ($p_{N-S}(SO_2)$) and NO_2 concentration ($p_{N-S}(NO_2)$) in an urban to urban forest environment with varying land covers and human activities, and (2) further investigate whether urban environment can mimic the future global climate condition. A transect from Nanjing urban center, across a suburban area to a forested area (urban forest) was selected as our study site (termed as urban-forest gradient or urban center-suburban-urban forest gradient in this paper). Atmospheric properties, including T_{N-S} , $p_{N-S}(CO_2)$ and atmospheric humidity, were

基金项目: 国家林业局公益资助项目 (200804001)

收稿日期: 2008-12-05; 修订日期: 2009-02-12

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

measured with sensors mounted on a vehicle, and $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ and $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ were measured at selected, representative, sites along the transect in summer of 2008.

Results showed that T_{N-S} , $p_{N-S}(\text{CO}_2)$, $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ and $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ increased significantly along the forest-urban transect from forested area to the urban center. This observed variation in atmospheric properties may mimic a temporal change of the global environment from current to future conditions. Furthermore, a significant correlation was found between the daily average relative humidity (RH_{N-S}) and the distance to the urban center, with a R^2 of 0.88. The urban center had consistently and significantly higher T_{N-S} , $p_{N-S}(\text{CO}_2)$, $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ and $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ throughout a day than those at urban forest site. The RH_{N-S} generally increased from urban center to urban forested area most time in a day except at 5:00–6:00 in the morning when the humidity nearly reached to saturation. The largest difference in T_{N-S} between the urban center and forested area were observed at 17:00–18:00 (4.7°C), while smallest at 5:00–6:00 (1.3°C). Similarly, T_{N-S} differed by 3.7°C (daytime) and 2.1°C (nighttime). However, there is an asynchrony in $p_{N-S}(\text{CO}_2)$: the maximum difference occurred at 13:00–14:00 (66 $\mu\text{mol/mol}$) and minimum difference at 1:00–2:00 (7.0 $\mu\text{mol/mol}$). On an average, urban center $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ was 55 $\mu\text{mol/mol}$ higher than urban forested site during the daytime and 20 $\mu\text{mol/mol}$ higher at nighttime. Although no significant difference in daily average absolute humidity (AH_{N-S}) was found between the urban and forested areas, daily average RH_{N-S} differed by as much as 7%. The largest difference in RH_{N-S} between the urban center and urban forested area were observed at 13:00–14:00 (15.5%). The near-surface atmospheric pollutants increased by as much as 88% ($p_{N-S}(\text{SO}_2)$) and 210% ($p_{N-S}(\text{NO}_2)$) from urban forested area to urban center. The gradients observed in atmospheric properties seem to mimic the future changes in global climate environment as predicted by some Global Climate Models (GCM).

Key Words: Urban; Suburban; Urban forest; Urban island; CO_2

自从 Manley 于 1958 年首次提出城市热岛的概念之后^[1],城市热岛效应受到了强烈的关注,在全球范围内的众多城市开展了有关城市热岛的研究^[2-4]。由于受特殊的下垫面、建筑物及人类活动的影响,城市还形成了除热岛之外的其它一系列特征性环境,如大气环境、土壤环境和生物区系等^[4]。此外,国外的一些观测还表明,由于受汽车尾气、工业生产等的影响,城市近地层大气 CO_2 浓度显著高于郊区(即 urban CO_2 dome),如美国巴尔的摩市市中心与相距 87km 的农村相比, CO_2 浓度平均高 66 $\mu\text{mol/mol}$ ^[5];美国菲尼克斯市市中心与农村相比, CO_2 浓度可最高升 75%^[6]。

近年来,一些研究认为,城市的特殊环境有可能给我们提供一个“自然大实验场”(因为城市具有高温、高大气 CO_2 浓度、高氮沉降、高污染等特点,这些特征与全球变化驱动因子的变化趋势相一致),来研究生态系统对全球气候变化的响应和预测未来生态系统的变化趋势^[5,8,9]。但是,这一新方法目前仍处于前期的讨论阶段,相关方面的研究工作却很少。虽然已有一些关于城市特征因子的研究报道^[5,8,10-13],但总的来说,目前国内外特别是国内,对城市特征性环境因子的研究大都集中在城市热岛和城市污染等方面,对其它与全球变化相关的特征因子的研究却相对薄弱,对有关城市-郊区-梯度(或城市-森林梯度)的大气 CO_2 浓度特征及其动态变化方面鲜见报道。

本文运用定点观测和车载传感器流动观测相结合的方法,研究了沿南京市城市森林—郊区—市中心梯度的近地层大气温度、 CO_2 浓度、湿度和污染气体浓度的变化规律,以期探讨城市气候特征及其形成机制、城市规划与设计,以及全球变化新研究方法的提出提供理论依据。

1 实验地与研究方法

选择了一条从市中心到城市森林公园的观测样线:从新街口到中山陵东侧,途经大栅门、卫岗、中山门等地(称为城市-森林梯度或城市-郊区-城市森林梯度,图 1)。其中,新街口为繁华的市中心,分布着大量的高层商场与写字楼;中山陵位于紫金山深处,而紫金山位于南京市东部,是城市的绿肺,森林绿地面积达 29.7

km²;大栅门是南京市城区-郊区结合地带。全程的路两侧分布着一些大型卖场、写字楼、机关、住宅小区、医院和学校等,无大型工业用地,因此,这条样线对于研究城市—郊区—森林小气候变化特征较为理想(因为本研究的另外一个目的是研究道路两侧具有 50a 以上树龄的高大悬铃木(*Platanus acerifolia*)对于样线上变化着的小气候的响应,而悬铃木是引种树种,很难在更远的森林发现符合研究条件的植物样本;而且出于经费方面的考虑,没有选择更远的原始森林作为参照样点)。为了简化问题,在整个样线上选择具有代表性的 9 个样点,每个样点均选择在路两侧连续生长着高大悬铃木的路段,每个样点的基本情况详见表 1 和图 1。

表 1 观测样点基本情况
Table 1 Conditions of selected measurement sites

代号 Code	名称 Name	与市中心距离 Distance- to- urban center (km) *	车流状况 Traffic condition	附近景观 Near area landscape
S1	新街口 Xingjiekou	0	车流量大,时有拥堵 High density with frequent traffic jam	密集的高层建筑,绿地少 Dense high-buildings, low green cover
S2	南京军区医院 General Hospital of Nanjing Military Command	2.2	车流量大,时有拥堵 High density with frequent traffic jam	密集的高层 + 多层建筑,绿地少 Dense high- and tier-buildings, low green cover
S3	中山门 Zhongshan Gate	3.8	车流量大,时有拥堵 High density with frequent traffic jam	密集的高层 + 多层建筑,绿地少 Dense high- and tier-buildings, low green cover
S4	卫岗 Weigang	5.3	车流量较大,少有拥堵 A little high density, seldom traffic jam	多层建筑,绿地面积一般 Tier-buildings, medium green cover
S5	理工大学宿舍 Nanjing University of Science and Technology	6.7	车流量较大,少有拥堵 A little high density, seldom traffic jam	多层建筑,绿地面积一般 Tier-buildings, medium green cover
S6	农科院家属区 Residence District of Jiangsu Academy of Agricultural Science	7.8	车流量一般,一般无拥堵 Medium density, generally no traffic jam	多层建筑,绿地面积较大 Tier-buildings, a little high green cover
S7	体育学院 Nanjing Sport Institute	8.6	车流量较小,无拥堵 A little low density, no traffic jam	稀疏的多层建筑,绿地面积较大 Sparse tier-buildings, a little high green cover
S8	灵谷寺 Linggu Temple Park	9.5	车流量小,无拥堵 Low density, no traffic jam	人工建筑少,绿地面积大 Sparse man-made buildings, high green cover
S9	中山陵东侧 East to Zhongshan Cemetery	10.3	车流量小,无拥堵 Low density, no traffic jam	人工建筑少,绿地面积大 Sparse man-made buildings, high green cover

* 沿样线距离,而非直线距离 Distance along our selected gradient, not the line distance

流动观测和 T_{N-S} 、 p_{N-S} (CO_2)、 RH_{N-S} 、 AH_{N-S} 数据来源。 T_{N-S} 和 p_{N-S} (CO_2) 分别用 S132 温度计和 S151 型 CO_2 分析仪测定(加拿大 Quibit 公司生产)。其中,S132 精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}C$,探头放在汽车上部 1.2 m 处(距地 2.5 m);S151 量程为 0 ~ 2000 $\mu\text{mol/mol}$,精度为 $\pm 2\text{ }\mu\text{mol/mol}$ 。利用气泵(G101,加拿大 Quibit 公司生产)抽取汽车上部 1.2 m(距地 2.5 m)处的空气(速度为 1.0 L/m),通过细塑料管进入置于车内的 S151 测定 CO_2 含量。同时,S132 和 S151 安装在数据采集器 Labpro 上,设定数据采集间隔为 3s。大气湿度用 HOBO H8 数据采集器进行测量(美国 ONSET 公司生产,设定数据采集间隔同样为 3s)。上述测量选择在晴朗无风(微风)的天气进行,实际测量日为 2008 年 7 月 24 日、8 月 6 日和 8 月 26 日(取 3 次观测数据的平均值)。每天分别在 6 个时段进行测量:1:00 ~ 2:00、5:00 ~ 6:00、9:00 ~ 10:00、13:00 ~ 14:00、17:00 ~ 18:00 和 21:00 ~ 22:00。汽车行驶速度约为 35 km/h,即大约每 30 m 记录 1 次数据,同时用 GPS 记录各测点的位置。为了降低测量在时间上不同步对结果产生的可能影响,每个时段往返测定两次(每次往返共需约 1h),将两次结果进行平均作为该时段某个测量点的值。将上述 9 个样点为中心的前后各 300m 的观测值(温度、湿度和 CO_2 浓度)进行平均作为该点数值(即将 600m 的约 20 个观测值进行平均),即每个观测点的数值为 120 个数据的平均值(20m $\times$ 2 $\times$ 3,即 600m 样线的 20 个数据,往返 2 次,重复 3 次)。

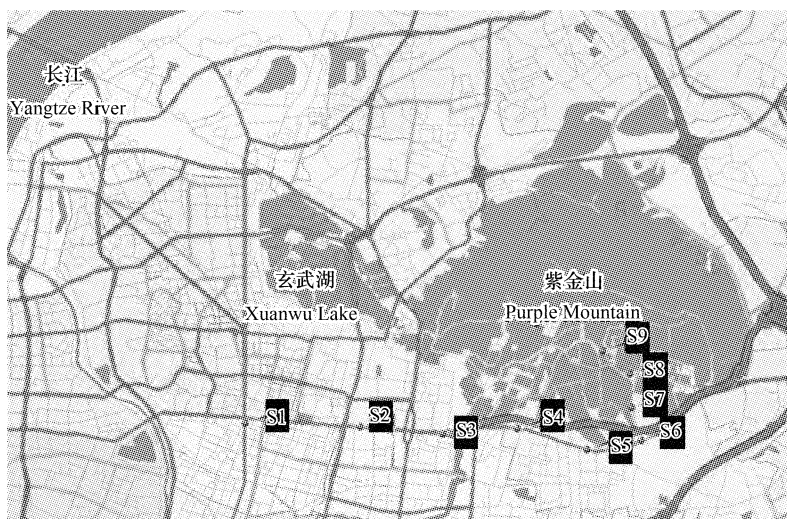


图1 流动观测的样线及样点分布

Fig. 1 Map of Nanjing City showing locations of the urban-forest gradient and measurement sites from S1 to S9

定点观测和 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 、 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 数据来源。在 2008 年 7 月 17 日和 8 月 28 日之间,遇晴天(或多云天气),10:00 ~ 11:40 间,在上述 9 个样点处,进行 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 测定,大气采样器气体进口离地高度同样为 2.5 m,采样器设定流速为 0.5 L/min,采样持续时间 100 min (50 L),每个点至少重复 3 次。 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 分别采用甲醛吸收副玫瑰苯胺分光光度法 (GB/T 15262-1994) 和 Saltzman 法 (GB/T 15436-1995) 测定。

T_{N-S} 、 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 、 RH_{N-S} 、 $p_{N-S}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{N-S}(\text{NO}_2)$ 沿着城市-郊区-城市森林梯度的变化用 logistic 方程进行模拟:

$$y = \frac{c}{1 + e^{a \cdot x + b}} + d \quad (1)$$

式中, x 为观测点距市中心的距离; y 为 x 处的研究参数; a 和 b 为拟合参数,用最小二乘法计算获得; $c + d$ 为 y 的潜在最大值; d 为 y 的潜在最小值(背景值)。

2 结果与分析

2.1 近地层大气温度(T_{N-S})

白天(9:00 ~ 10:00、13:00 ~ 14:00 和 17:00 ~ 18:00 三个时段平均值)和夜间(1:00 ~ 2:00、5:00 ~ 6:00 和 21:00 ~ 22:00 三个时段平均值)的 T_{N-S} 均表现为距市中心越远越低的趋势(图 2),logistic 方程能够较好的拟合 T_{N-S} 与距市中心距离间的关系(白天和夜间的 R^2 分别为 0.85 和 0.90)。无论是白天还是夜间, T_{N-S} 在 S1 点最高,而在 S9 点最低,两点间的差值白天大于夜间,分别为 3.7℃ 和 2.1℃。从图 2 还可以看出,从 S1 到 S5, T_{N-S} 虽然有下降的趋势,但是其下降的幅度相对较小,而从 S5 开始到 S9, T_{N-S} 迅速降低,说明 T_{N-S} 与距市中心距离间并不符合线性关系,城市热岛强度与参照点的选择有很大关系。

S1 点与 S9 点的 T_{N-S} 在一天内总的变化趋势相似:清晨最低,而正午前后最高,S1 点的 T_{N-S} 在一天内的各个时段均高于 S9 点(图 3)。S1 点与 S9 点的差值在 5:00 ~ 6:00 时段表现最小,而在 17:00 ~ 18:00 时段表现最大,分别为 1.3℃ 和 4.7℃。

2.2 近地层大气 CO_2 浓度($p_{N-S}(\text{CO}_2)$)

与 T_{N-S} 相似, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 无论是白天还是夜间与观测点距市中心距离间均存在显著的相关性,总的来说,表现为距市中心越近,数值越高(图 4);logistic 方程能够较好的拟合这种关系,白天和夜间的拟合度 R^2 分别为 0.83 和 0.73。但是,与 T_{N-S} 不同, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 的最大值出现在 S2 点,而最小值出现在 S7 点,但是 S1 点和 S2 点,以及 S7 点和 S9 的差异相对较小。不同观测点间最大值与最小值的差值(变幅)在白天和夜间分别为 66 $\mu\text{mol/mol}$ 和

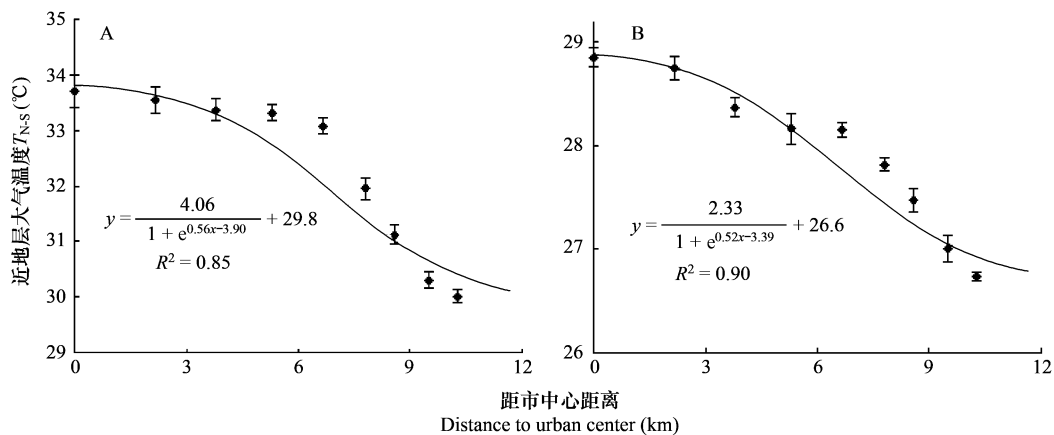


图2 近地层大气温度(T_{N-S})和观测点距市中心距离间的关系

Fig. 2 Relationships between near-surface atmospheric temperature (T_{N-S}) and the distance-to-urban center

其中 A 和 B 分别表示白天和夜间,分别为 9:00 ~ 10:00、13:00 ~ 14:00、17:00 ~ 18:00 的平均值和 1:00 ~ 2:00、5:00 ~ 6:00、21:00 ~ 22:00 的平均值,测定时间为 2008 年 7 月 24 日、8 月 6 日和 8 月 26 日, $n=120$ The A and B are daytime (mean of the measurements at 1:00 ~ 2:00, 5:00 ~ 6:00 and 21:00 ~ 22:00) and nighttime (mean of measurements at 9:00 ~ 10:00, 13:00 ~ 14:00 and 17:00 ~ 18:00), respectively. The measurements were carried out on July 24, August 6 and August 28 in 2008 ($n=120$)

30 $\mu\text{mol/mol}$ 。S1 点与 S9 点相比, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 在白天和夜间分别高 55 $\mu\text{mol/mol}$ 和 20 $\mu\text{mol/mol}$ 。

图 5 结果表明, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 在 S1 点与 S9 点形成了不同的日变化曲线(图 5)。总体而言, S1 点的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 在一天内皆高于 S9 点, S1 点的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 在白天强烈受到车辆的影响,重复间变异较大(误差线长),夜间的变异较小(误差线短),而 S9 点无论是白天还是夜间重复间变异均较小。S1 点的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 一天内的变化幅度接近于 S9 点,其范围分别为 415 ~ 455 $\mu\text{mol/mol}$ 和 366 ~ 408 $\mu\text{mol/mol}$ 。对于 S1 点,受汽车尾气的影响,白天的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 高于夜间;而对于 S9 点,除了 13:00 ~ 14:00 出现了一个显著低值外,其他时段间变化较小。对于 S1 点, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 一天中有两个峰,分别出现在 9:00 ~ 10:00 和 17:00 ~ 18:00 两个时段;而对于 S9 点,最高值出现在午夜的 1:00 ~ 2:00 之间。在时段 13:00 ~ 14:00,无论是 S1 点还是 S9 点, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 都有一个下降的趋势,特别是 S9 点,全天的最低值正是出现在了这一时段。S1 点与 S9 点的差值在 1:00 ~ 2:00 时段表现最小,而在 13:00 ~ 14:00 时段表现最大,分别为 7.0 $\mu\text{mol/mol}$ 和 66 $\mu\text{mol/mol}$ 。

2.3 近地层大气湿度

沿本研究选择的城市中心-郊区-城市森林梯度,近地层大气日平均相对湿度(RH_{N-S})有增加的趋势(图 6),最小值出现在 S1 点,而最大值出现在 S9 点,分别为 62.3% 和 69.3%;logistic 方程也可以较好的拟合 RH_{N-S} 与观测点距市中心距离间的关系($R^2=0.88$)。但是,不同的观测点间的近地层大气绝对湿度(AH_{N-S})差异却并不显著(图 7)。不同观测点 RH_{N-S} 与 T_{N-S} 间存在显著的线性负相关($R^2=0.96$),表明,在城市中心-郊区-城市森林梯度上 RH_{N-S} 的变化主要是由温度决定。

无论是 S1 点还是 S9 点, RH_{N-S} 均表现为白天低而夜间高的日变化趋势(图 8),最低值出现在正午前后,而

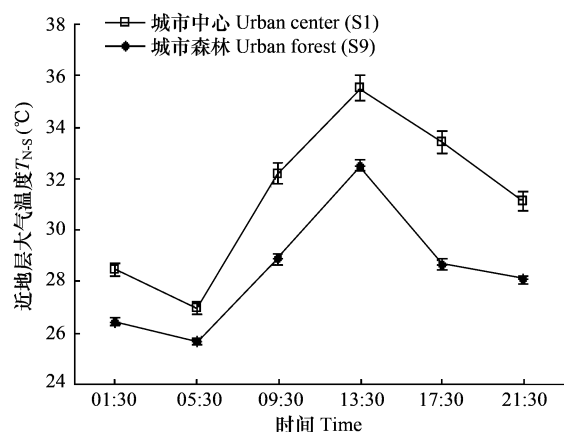


图3 城市中心(S1)与城市森林(S9)近地层大气温度(T_{N-S})一天中的变化规律(测定时间与图 2 相同, $n=120$)

Fig. 3 Daily variations of near-surface atmospheric temperature (T_{N-S}) at urban center (S1) and urban forest (S9); The measurement time is same as Fig. 2

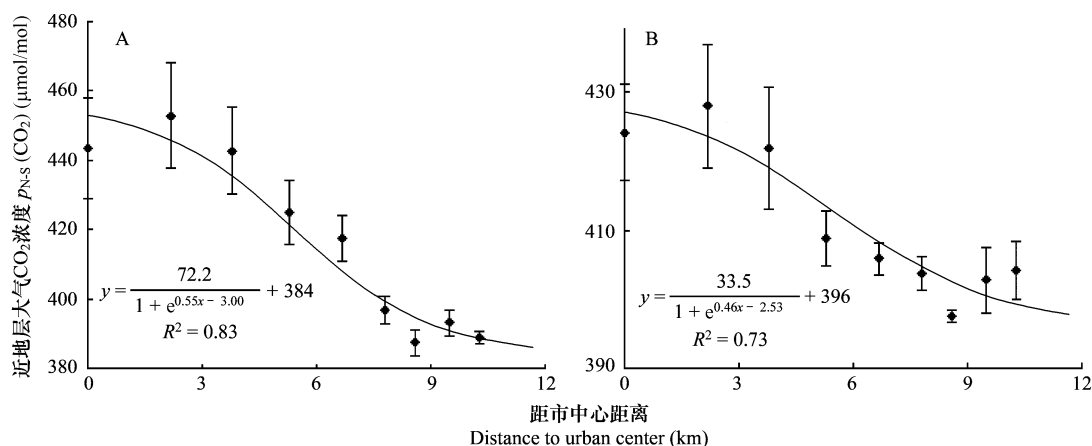


图 4 近地层大气 CO_2 浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) 和观测点距市中心距离间的关系

Fig. 4 Relationships between near surface atmospheric CO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) and the distance-to-urban center

其中 A 和 B 分别表示白天和夜间,分别为 9:00 ~ 10:00、13:00 ~ 14:00、17:00 ~ 18:00 的平均值和 1:00 ~ 2:00、5:00 ~ 6:00、21:00 ~ 22:00 的平均值,测定时间与图 2 相同, $n = 120$ The A and B are daytime (mean of 1:00 ~ 2:00, 5:00 ~ 6:00 and 21:00 ~ 22:00) and nighttime (mean of 9:00 ~ 10:00, 13:00 ~ 14:00 and 17:00 ~ 18:00), respectively; The measurement time is same as Fig. 2

最高值出现在清晨前后,一天中不同时刻 $RH_{\text{N-S}}$ 与 $T_{\text{N-S}}$ 间存在显著的线性负相关(S1 点与 S9 点 R^2 分别为 0.75 和 0.89),表明,S1 和 S9 一天中不同时刻 $RH_{\text{N-S}}$ 均主要由温度决定。除了 5:00 ~ 6:00 时段,S1 和 S9 的 $RH_{\text{N-S}}$ 接近相等且接近饱和外,一天中 S9 点的 $RH_{\text{N-S}}$ 均高于 S1 点,最大差值出现在 13:00 ~ 14:00 时段,S1 和 S9 分别为 37.4% 和 52.9%,差值为 15.5%。

2.4 污染气体浓度

10:00 ~ 11:40 间,近地层大气污染气体浓度的观测结果表明,沿城市中心-郊区-城市森林梯度, $p_{\text{N-S}}$ (SO_2) 和 $p_{\text{N-S}}$ (NO_2) 均有显著降低的趋势,与距市中心距离间仍可以用 logistic 进行较好的拟合,其拟合度 R^2 分别为 0.78 和 0.71。 $p_{\text{N-S}}$ (SO_2) 和 $p_{\text{N-S}}$ (NO_2) 最高值均出现在 S2 点,而最低值均出现在 S9 点, $p_{\text{N-S}}$ (SO_2) 和 $p_{\text{N-S}}$ (NO_2) 间存在极显著的正相关关系 ($R^2 = 0.83$)。与 S9 点相比,S1 点的 $p_{\text{N-S}}$ (SO_2) 和 $p_{\text{N-S}}$ (NO_2) 分别升高了 0.88 倍和 2.1 倍。

3 结论与讨论

3.1 城市小气候特征性指标与近地层大气

与周边地区相比,城市具有特殊的近地层大气环境,如高温(城市热岛)^[2~4]、低湿(城市干岛)^[4,14]、高 CO_2 浓度^[5]、高污染浓度^[5,6]。其中,国内外对于城市热岛和城市大气污染的研究相对较多,而对于城市其它的大气特征,特别是城市-森林梯度的近地层大气 CO_2 浓度的研究却相对较少。本研究结果表明,沿城市中心-郊区-城市森林梯度, $T_{\text{N-S}}$ 、 $p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$ 、 $RH_{\text{N-S}}$ 和污染物浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{SO}_2)$ 和 $p_{\text{N-S}}(\text{NO}_2)$) 均表现为规律性的变化,与观测点距市中心距离的关系可用 logistic 方程进行较好的拟合。

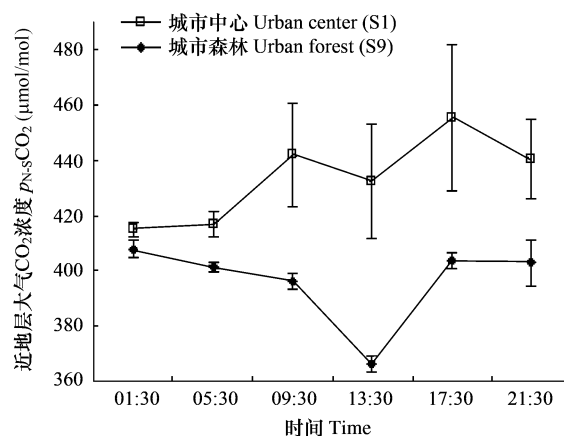


图 5 城市中心(S1)与城市森林(S9)近地层大气 CO_2 浓度 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) 一天中的变化规律(测定时间与图 2 相同, $n = 120$)

Fig. 5 Daily variations of near-surface atmospheric CO_2 ($p_{\text{N-S}}(\text{CO}_2)$) at urban center (S1) and urban forest (S9). The measurement time is same as Fig. 2 ($n = 120$)

不同观测点间, T_{N-S} 的最大差值在白天和夜间分别为 3.7°C 和 2.1°C , 这一数值高于前人报道的城市热岛强度^[15,16]; 而且本研究还表明, S1 点与 S9 点的 T_{N-S} 差值在 5:00 ~ 6:00 时段最小, 而在 17:00 ~ 18:00 时段最大, 分别为 1.3°C 和 4.7°C , 这与人认同的夜间热岛强度强于白天的观点不同^[14~16]。这可能是由不同的研究选择的观测点和参照点差异所致, 本研究中 S1 点与 S9 点 T_{N-S} 的差值表示的是市中心温度与林地温度的差值, 与一般意义上的城市热岛强度不同(一般把市中心的高温与郊区温度的差值定义为“热岛强度”^[1]), 其不仅包含了城市热岛效应, 还包括了森林植被对小气候的影响作用^[17]。白天, 森林植被的强烈蒸腾和遮荫作用, 可以显著降低近地层大气温度; 而夜间, 森林植被含水量较高而比热大, 可以延缓温度的下降。因此出现了以城市森林为参照点的热岛强度大于以郊区为参照点的热岛强度, 且热岛强度白天大于夜间的现象。

不同观测点间, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 的变幅白天大于夜间, 分别为 $66\mu\text{mol/mol}$ 和 $30\mu\text{mol/mol}$, 这一差值与美国巴尔的摩市的结果较为接近^[5,11]。不同时段变幅可能是由多种因素共同决定, 包括不同时段车流量、空气的流动速度和植被的光合与呼吸作用等^[18,19]。白天, 城市的车流量一般较大, 从而引起城市 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 的显著升高, 而城市森林植被的光合作用会显著降低林下 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$, 从而引起白天城市-森林间的 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 变幅较大, 而夜晚相反。城市中心 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 一天内的变化幅度接近于城市森林, 其范围分别为 $415 \sim 455\mu\text{mol/mol}$ 和 $366 \sim 408\mu\text{mol/mol}$ 。这一变幅高于美国菲尼克斯市和中国北京市的研究结果^[18~20], 这主要是由不同的研究中选择的研究样点和观测高度差异所致, 本研究是车载流动观测, 观测的是快车道上距地 2.5m 高的大气, 强烈受汽车尾气的影响, 从而导致本研究中观测的变化范围较大。对于城市中心, $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 一天中有两个峰, 分别出现在 9:00 ~ 10:00 和 17:00 ~ 18:00 两个时段, 这主要是因为这两个时段处于上下班的高峰时段, 路上的车辆较多且行驶较慢, CO_2 排放量较大所致; 而对于城市森林, 最高值出现在午夜的 1:00 ~ 2:00, 这可能是由城市森林植被的夜间呼吸作用所致。在 13:00 ~ 14:00 之间, 无论是城市中心还是城市森林 $p_{N-S}(\text{CO}_2)$ 都有一个下降的趋势, 特别是城市森林, 全天的最低值正是出现在了这一时段, 这可能主要是由于这一时段空气垂直混合较强^[6,14], 近地层大气与其上层低 CO_2 浓度空气的强烈混合, 引起近地层 CO_2 浓度降低; 而对于城市森林, 这个时候植被的光合作用较强, 从而导致这一时段近地层 CO_2 最低。

受下垫面和周围环境影响, 城市中白天会出现水汽压低于城郊的“干岛效应”, 而夜间会出现水汽压高于

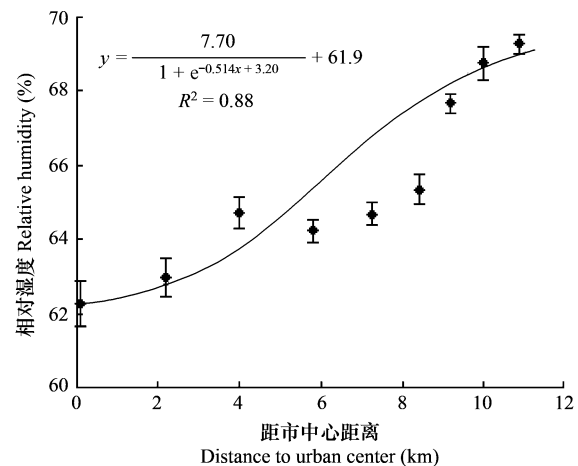


图6 近地层大气相对湿度(RH_{N-S} , 6个时段观测值的平均值)和观测点距市中心距离间的关系(测定时间与图2相同, $n=120$)

Fig. 6 Relationship between near-surface atmospheric Relative Humidity (RH_{N-S} , the mean of the values measured at our six measurement periods in a day) and the distance-to-urban center. The measurement time is same as Fig. 2 ($n=120$)

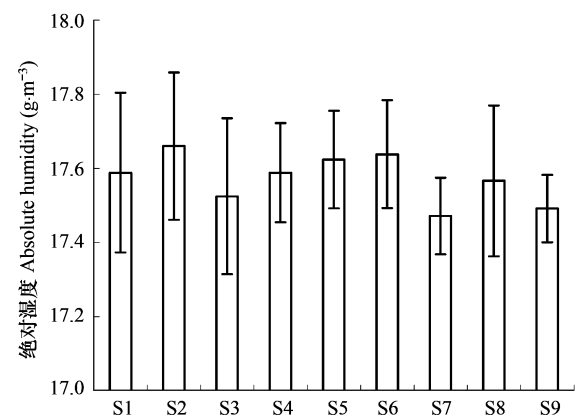


图7 从S1点到S9点的近地层大气绝对湿度(AH_{N-S} , 6个时段观测值的平均值, 测定时间与图2相同, $n=120$)

Fig. 7. Near-surface atmospheric Absolute Humidity (AH , the mean of the values measured at our six periods in a day) at the sites from S1 to S9 along the urban center-suburban-urban forest gradient; The measurement time is same as Fig. 2 ($n=120$)

城郊的“湿岛效应”^[4,14]。本研究结果表明,以天为单位的城市、郊区和城市森林间的 AH_{N-S} 差异皆不显著。而 RH_{N-S} 与 AH_{N-S} 却有所不同,表现为沿城市中心-郊区-城市森林梯度而逐步增加的趋势, T_{N-S} 与 RH_{N-S} 间显著的负相关说明城市中 RH_{N-S} 的降低主要是由城市热岛效应引起。由于本研究选择的城市中心-郊区-城市森林梯度上无大型工业用地,大气污染物 SO_2 和 NO_2 主要来源于汽车尾气,从而导致 $p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$ 有沿这一梯度逐渐降低的趋势。而且,城市森林植被对 SO_2 和 NO_2 具有较强的吸收和存贮作用,增加其沉降速度^[21],从而进一步降低城市森林的 $p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$ 。

3.2 城市在全球变化研究中的潜在意义

陆地生态系统对全球变化响应是全球变化研究领域核心问题之一,自 20 世纪 80 年代以来已发展了许多的研究方法,根据其数据源的不同,可分为 3 类^[22]:①人为环境控制方法^[23~25],②基于不同地点、不同时间相的

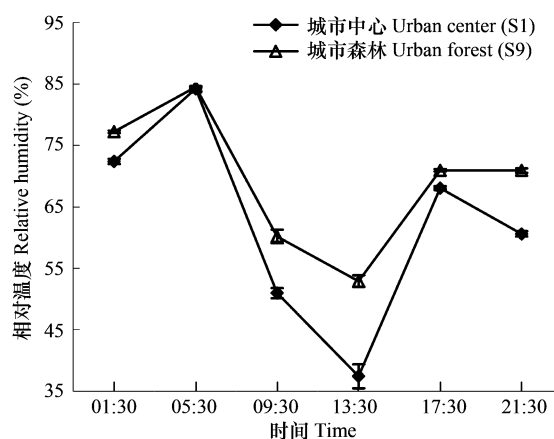


图8 城市中心 (S1) 与城市森林 (S9) 近地层大气相对湿度 (RH-N-S) 一天中的变化规律 (测定时间与图 2 相同, $n=120$)

Fig. 8 Daily variations of near-surface atmospheric Relative Humidity (RH-N-S) at urban center (S1) and urban forest (S9). The measurement time is same as Fig. 2 ($n=120$)

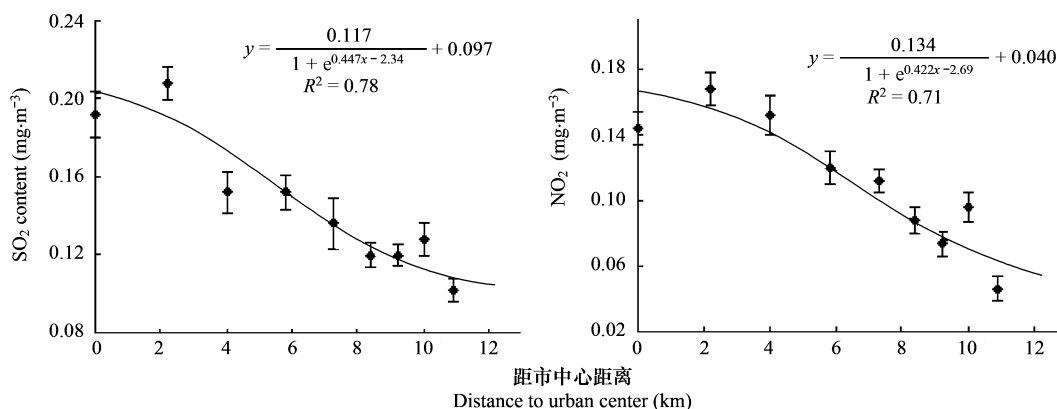


图9 近地层大气污染物($p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$)浓度与距市中心距离间的关系 (测定时间在 2008.7.17 和 8.28 之间, $n=3$)

Fig. 9 Relationships between the distance-to-urban center and near-surface $p_{N-S}(SO_2)$ and $p_{N-S}(NO_2)$ concentrations; The measurements were carried out between July 16 and August 28, 2008 ($n=3$)

清单与调查观测法^[26,27],③模型方法^[28]。方法①具有操作相对简单方便、结果可靠等优点,一般适用于响应机制的理解和为大尺度的模型提供参数,但是这类方法在进行尺度变换时会遇到巨大的困难^[23]。方法②由于是基于实测数据的基础之上的,其结果往往较为可靠,但是这类方法的投入往往较大,且数据往往不同步或不连续。目前已建立了大量的生态学模型用于研究陆地生态系统对全球变化的响应,但是模型的应用往往受到可靠参数缺乏和对有关机制理解不足等的限制,而且不同的模型其结果往往差异较大^[28]。

沿森林-城市梯度, T_{N-S} 、 $p_{N-S}(CO_2)$ 和污染气体浓度 (如 $p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$) 等环境因子会表现为规律性的变化^[5,8,10~13]。本研究结果也表明, S1 点与 S9 点相比, T_{N-S} 在白天和夜间分别升高了 3.7℃ 和 2.1℃, $p_{N-S}(CO_2)$ 在白天可升高 55 $\mu\text{mol/mol}$, 而 $p_{N-S}(SO_2)$ 和 $p_{N-S}(NO_2)$ 分别升高了 0.88 倍和 2.1 倍。本研究中选择的城市森林样地位于紫金山森林公园,距市中心只有 10.3km,直线距离更短,这里的大气特征已不可避免的受到城市的影响,因此,如果选择距离城市更远的原始森林作为参照点,得出的结果将更加显著。此外,一些研究还表明,与郊区或森林相比,城市还具有较高的 O_3 和 N 沉降等特点^[5,8,10~13,22]。城市的特征环境对其中的生态系统必将产生显著的影响作用^[8,12,13,22],例如, Gregg 等^[8] 比较了种植在纽约市区和相距约 100km 的农村

的美洲黑杨(*Populus deltoides*),表明,城市中的生长速度约是农村的2倍。

据 IPCC 报道,目前大气 CO₂ 积累量已经超过了工业革命前的 31%,到下个世纪将升高到 540~970 μmol/mol;1990~2100 年全球表面温度将升高 1.4~5.8℃。全球范围内的污染气体(如 NO₂、SO₂、O₃)和 N 沉降将有持续增加的趋势^[29,30]。也就是说,沿森林-城市空间上变化的环境因子与沿现在-将来时间上变化的全球变化驱动因子具有很强的相似性,城市有可能为人们提供一个“自然大实验场”或“以空间代时间的替代实验场”,来研究陆地生态系统对全球变化的响应,本研究结果也表明,当前城市的一些环境因子如 T_{N-S} 和 p_{N-S} (CO₂) 相当于全球数十年或更久以后的水平。一些科学家针对这一问题已展开了讨论,大多数认为这是一个非常新颖的方法,有着巨大的应用潜力^[5,8,9,31]。“城市自然大实验场”法具有很强的优势,如城市面积较大(与环境控制实验常采用的研究尺度相比),且在全球的分布非常广泛(与布点实验相比)。但是,这一方法也有明显的缺点,如城市生态系统非常复杂,与全球变化驱动因子无关的环境因子对结果会产生巨大的干扰,从而增加研究问题的复杂性,这也是相似研究中普遍存在的核心问题。虽然一些科学家已认识到这一新方法巨大的意义,但是目前仍处于前期的讨论阶段,相关方面实质性研究仍然少见。是否可以将城市环境对陆地生态系统的影响理解为陆地生态系统对全球变化的响应?还有待深入验证。

References:

- [1] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1958, 84: 70–72.
- [2] Shu J, Jiang T H. Character analysis of Shanghai urban heat island. *Shanghai Environmental Science*, 2000, 19 (11): 532–534.
- [3] Peng S L, Zhou K, Ye Y H. Research progress in urban heat island. *Ecology and Environment*, 2005, 14 (4): 574–579.
- [4] Xiao R B, OuYang Z Y, Li W F, Zhang Z M, Tarver Jr G, Wang X K, Miao H. A review of the eco-environmental consequences of urban heat islands. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (8): 2055–2060.
- [5] George K, Ziska L H, Bunce J A, Quebedeaux B. Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 7654–7665.
- [6] Idso C D, Idso S B, Balling Jr R C. An intensive two-week study of an urban CO₂ dome in Phoenix, Arizona, USA. *Atmospheric Environment*, 2001, 35: 995–1000.
- [7] Houghton J T, Ding Y. IPCC Report. Cambridge University Press, UK, 2001.
- [8] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424: 183–187.
- [9] Shen W J, Wu J G, Grimm N B, Hope D. Effects of urbanization-induced environmental changes on ecosystem functioning in the Phoenix metropolitan region, USA. *Ecosystems*, 2008, 11: 138–155.
- [10] Lovett G M, Traynor M M, Pouyat R V, Carreiro M M, Zhu W X, Baxter J W. Atmospheric deposition to oak forests along an urban-rural gradient. *Environmental Science and Technology*, 2000, 34: 294–300.
- [11] Ziska L H, Bunce J A, Goins E W. Characterization of an urban-rural CO₂/temperature gradient and associated changes in initial plant productivity during secondary succession. *Oecologia*, 2004, 139: 454–458.
- [12] Gratani L, Varone L. Daily and seasonal variation of CO₂ in the city of Rome in relationship with the traffic volume. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 2619–2624.
- [13] 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: 385–395.
- [14] He Y L, Zhang Y P, Liu Y H, Ma Y X, Li Y R, Dou J X, Guo P. A study on the horizontal-spatial characteristics of urban climate in Kunming City. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22 (6): 724–729.
- [15] Huang L M, Li J L, Zhao D H. A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Buildings and Environment*, 2008, 43: 7–17.
- [16] Liu H N, Jiang W M, Sun J N, Liu G. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, eastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2008, 44 (1): 99–106.
- [17] Wu F, Li S H, Liu J M. The effects of greening, non-greening square and lawn on temperature, humidity and human comfort. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (7): 2964–2971.
- [18] Idso S B, Idso C D, Balling Jr R C. Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration within a residential sector of the urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA. *Atmospheric Environment*, 2002, 36: 1655–1660.

- [19] Nasrallah H A, Balling Jr R C, Madi S M, Al-Ansari L. Temporal variations in atmospheric CO₂ concentrations in Kuwait City, Kuwait with comparisons to Phoenix, Arizona, USA. *Environmental Pollution*, 2003, 121: 301–305.
- [20] Wang C K, Wang Y S, Liu G R. Characteristics of atmospheric CO₂ variations and some affecting factors in urban area of Beijing. *Environmental Science*, 2003, 24 (4): 13–17.
- [21] Yan W D, Tian D L, Xiang W H, Huang Z H. Seasonal change in atmospheric SO₂ concentration in forested and non-forested urban lands. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (5): 1367–1374.
- [22] Zhao D H, Li J L, Qi J G, Fan Y M. An overview of current methods to estimate carbon budget of terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 26 (8): 2655–2662.
- [23] Davidson E A, Savage K, Verchot L V, Navarro R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 21–37.
- [24] Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, Ort D R. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants face the future. *Annals Reviews of Plant Biochemistry*, 2004, 55: 591–628.
- [25] Niu S L, Han X G, Ma K P, Wang S Q. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31 (2): 262–271.
- [26] Ellis C J, Rochefort L. Long-term sensitivity of a High Arctic wetland to Holocene climate change. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 441–454.
- [27] Peñuelas J, Boada M. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (*NE Spain*). *Global Change Biology*, 2003, 9: 131–140.
- [28] Tian H Q. Dynamics of the terrestrial biosphere in changing global environments: date, models, and validation. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57: 379–388.
- [29] Zheng L X, Liu X J, Zhang F S. Atmospheric deposition of organic nitrogen: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27, 3828–3834.
- [30] Davson J P, Racherla P N, Lynn B H, Adams P J, Pandis S N. Simulating present-day and future air quality as climate changes: Model evaluation. *Atmospheric Environment*, 2008, 42: 4551–4566.
- [31] Carreiro M M, Tripler C E. Forest remnants along urban-rural gradients: Examining their potential for global change research. *Ecosystems*, 2005, 8: 568–582.

参考文献:

- [1] 束炯, 江田汉. 上海城市热岛效应的特征分析. *上海环境科学*, 2000, 19 (11): 532~534.
- [2] 彭少麟, 周凯, 叶有华. 城市热岛效应研究进展. *生态环境*, 2005, 14 (4): 574~579.
- [3] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 张兆明, Tarver Jr G, 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.
- [14] 何云玲, 张一平, 刘玉洪, 马友鑫, 李佑荣, 窦军霞, 郭萍. 昆明城市气候水平空间分布特征. *地理科学*, 2002, 22 (6): 724~729.
- [15] 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 刘罡. 南京城市边界层微气象特征观测与分析. *南京大学学报(自然科学)*, 2008, 44 (1): 99~106.
- [17] 吴菲, 李树华, 刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温湿度及人体舒适度. *生态学报*, 2007, 27 (7): 2964~2971.
- [20] 王长科, 王跃思, 刘广仁. 北京城市大气 CO₂ 浓度变化特征及影响因素. *环境科学*, 2003, 24 (4): 13~17.
- [21] 闫文德, 田大伦, 项文化, 黄志宏. 城市林地与非林地大气 SO₂ 季节动态变化. *生态学报*, 2006, 26 (5): 1367~1374.
- [22] 赵德华, 李建龙, 齐家国, 范亚民. 陆地生态系统碳平衡主要研究方法评述. *生态学报*, 2006, 26 (8): 2655~2662.
- [25] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 万师强. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置. *植物生态学报*, 2007, 31 (2): 262~271.
- [28] 田汉勤. 陆地生物圈动态模式生态系统模拟的发展趋势. *地理学报*, 2002, 57 (4): 379~388.
- [29] 郑利霞, 刘学军, 张福锁. 大气有机氮沉降研究进展. *生态学报*, 2007, 27 (9), 3828~3834.