

姜江,郭文利,王春玲.春节期间北京地区交通出行对城市热岛和大气污染的影响[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):89-97.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.02.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 春节期间北京地区交通出行对城市热岛和大气污染的影响

姜江,郭文利,王春玲

(北京市气象服务中心,北京 100089)

**摘要:**利用北京地区 2006—2015 年春节及其前后三周的城区、郊区站数据分析了早晚高峰期出行活动对城市热岛效应、 $\text{NO}_x$  浓度、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响。结果表明人口、交通、社会活动的密集程度的确会对城市热岛效应和大气污染物浓度造成一定的影响:(1)第-3、-2、+2、+3周(以下称“BG时段”)与春节周(以下称“CNY时段”)间的城市热岛效应差异在早高峰期间平均为  $0.30\text{ }^\circ\text{C}$ ,在晚高峰期间平均为  $0.43\text{ }^\circ\text{C}$ ,在其他时段平均为  $0.26\text{ }^\circ\text{C}$ ,晚高峰对城市热岛效应的影响更明显;(2)BG时段与CNY时段城、郊  $\text{NO}_x$  浓度差的最大差异出现在 08 时,为  $54.95\text{ }\mu\text{g/L}$ 。在早高峰期间为  $48.55\text{ }\mu\text{g/L}$ ,晚高峰期间为  $23.44\text{ }\mu\text{g/L}$ 。城市晚高峰出行活动对  $\text{NO}_x$  浓度城、郊差异的贡献量随着夜间的不利扩散条件而延迟出现峰值,城市早高峰出行对  $\text{NO}_x$  浓度城、郊差异的增大作用更为突出;(3)城郊  $\text{PM}_{2.5}$  浓度 BG 时段高于 CNY 时段的时间出现在 05—19 时,早高峰期间平均差值为  $12.82\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ,晚高峰期间平均差值为  $8.22\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 。考虑到汽车尾气中的超细粒子和污染气体需要在空气中进行化学反应或者吸湿增长才能变成  $\text{PM}_{2.5}$ ,因此  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化情况并不完全对应于早晚高峰出行的时间,而是有所延迟。

**关键词:**北京;热岛效应; $\text{PM}_{2.5}$ ;氮氧化物

**中图分类号:** X16

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0799(2021)02-0089-09

城市热岛效应和大气污染物的浓度对城市环境和居民生活的影响是非常显著的。研究指出在影响热岛效应和大气污染物的原因中,既包含自然因素,如风速、相对湿度、降雨量等<sup>[1-6]</sup>,也包含人为因素,主要涉及城市化和工业化的快速发展。北京作为中国超大城市之一,截至 2016 年底常住人口数量已经达到 2 172.9 万人,机动车保有量达到了 548 万辆,城区集中了全市 50%以上的人口和 80%以上的建筑物。未来随着城市内人口和车辆的持续增加,人类活动对城市热岛效应和大气污染的影响范围和程度必然会持续扩大和增加。

收稿日期:2019-05-27;修回日期:2020-06-19

基金项目:北京市自然科学基金青年项目(8214066)

作者简介:姜江(1987—),女,高级工程师,主要从事气象服务与人工智能业务应用研究。E-mail:jiangjiang@mail.iap.ac.cn

当前就人类活动对城市环境影响的研究已有很多<sup>[7-9]</sup>,结果均指出了制造业、交通、工业发展和能源利用的增长对城市大气环境组成成分(大气颗粒物、氮氧化物、硫化物、二氧化碳等)造成了一定的影响<sup>[10-12]</sup>。同时,就超大城市而言,人类活动在区域和时间上都表现出明显的特点,这些特点自然会对城市大气环境造成相比于其他区域和时段更显著的影响。其中,在区域上,表现为地表温度和气溶胶光学厚度高值区分布于城区人口密集、交通和商业活动频繁的区域<sup>[13-16]</sup>;在时间上,具体表现为早晚高峰期间,大量车辆、人口涌入城区。早晚高峰的大规模交通出行已经成为超大城市中人们的一种生活规律。这样的活动特点不仅仅表现在北京,在中国其他超大城市也都存在类似的现象。

虽然以往的研究已经证实了超大城市中的大规

模人口活动对城市热岛效应、城市气候特点等方面的影响<sup>[17-19]</sup>,但是针对早晚高峰出行对城市环境的影响研究仍需要进一步关注。目前,北京市气象局自动站观测时间间隔已经发展至小时级别,因此本文基于前人的研究<sup>[20]</sup>,关注 2006—2015 年春节及春节前后各 3 周,分别来代表早晚高峰期人类出行活动频率较低和较高的时段,从而解释人类出行对城市环境所造成的具体影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

本文所有数据均来自北京市气象局自动气象要素观测站,所涉站点有大兴站(39°48'N,116°28'E,海拔高度 32 m)、密云站(40°23'N,116°52'E,海拔高度 73 m)、宝联站(39°57'N,116°16'E,海拔高度 37 m)、上甸子站(40°39'N,117°07'E,海拔高度 287 m),涉及 2006—2015 年 2 m 气温、降水量、风速、风向等逐时气象要素数据。大气污染成分主要来自城区宝联站和郊区密云上甸子站的逐时大气污染数据,涉及 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub> 浓度,文中所采用的观测数据均经过质量控制和均一性检验。

### 1.2 研究方法

每年的春节假期期间,北京会有接近一半的城市人口返回家乡,如 2017 年春节假期期间北京人口减少了约 4 成,近 848 万人离开北京返乡过年<sup>[19]</sup>。春节长假的特点为:人口大量返乡,行驶车辆大幅减少。这恰巧能够作为大规模人口早晚高峰出行活动频率降低的背景值。另外,春节长假处于冬季,冬季既是北京地区城市热岛效应最为明显的时期,也是平均污染物浓度相对较高的时期。鉴于此,为更加准确地分析早晚高峰交通出行对城市环境的影响,参考前人的实验方案<sup>[20]</sup>:选用 2006—2015 年 10 a 春节及春节前后各 3 周,即每年共 7 周(49 d),之后在文中称其为 ALL 时段。为下文便于说明,按顺序将所涉及到的 7 周分别称为第-3 周、第-2 周、第-1 周、第 0 周、第+1 周、第+2 周、第+3 周。其中,定义第 0 周为春节周(以下称为“CNY 时段”,来自 Chinese New Year 的缩写),第-1、+1 周被总称为过渡时段(称之为过渡周,因为部分人群在此期间处于返乡离京的时期),第-3、-2、+2、+3 周被总称为背景时段(以下称为“BG 时段”,来自 Background 的缩写,也是大部分人群稳定在京的时段)。同时,为了突出识别城区人口出行对城市环境的影响,在背景周计算时去除了周末 2 d 的数据,每年具体时间见表 1。

表 1 2006—2015 年所选研究时段

年份	春节假期		背景周(BG 时段)	
	春节当日	第 0 周(CNY 时段)	第-3 周至第-2 周	第 2 周至第 3 周
2006	1月29日	1月29日—2月4日	1月8—21日	2月12—25日
2007	2月18日	2月18—24日	1月28日—2月10日	3月4—3月17日
2008	2月7日	2月6—12日	1月16—29日	2月20日—3月4日
2009	1月26日	1月25—31日	1月4—17日	2月8—21日
2010	2月14日	2月13—19日	1月23日—2月5日	2月27日—3月12日
2011	2月3日	2月2—8日	1月12—25日	2月16日—3月1日
2012	1月23日	1月22—28日	1月1—14日	2月5—18日
2013	2月10日	2月9—15日	1月19日—2月1日	2月23日—3月8日
2014	1月31日	1月31日—2月6日	1月10—23日	2月14—27日
2015	2月19日	2月18—24日	1月28日—2月10日	3月4—17日

文中城市热岛效应的计算方法为同时间同高度下,城市热岛中心气温与郊区的气温差值<sup>[21-22]</sup>。考虑到不同代表站点的数据对于热岛效应还是有一定的影响,选取位于北京平原城区内最高级别大兴站为城市代表站,同时综合考虑到城市化的扩张以及站点所在海拔高度的差异等因素,选取密云站为郊区代表站,热岛效应以两站同时的 2 m 气温差值来表示。在对数据进行质量控制后,剔除共同或单一点数据中的缺测值和异常值,对 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub> 观测的宝联站与上甸子站全要素样本量分别为 9 096、9 136 份。考虑到降水对城市热岛效应的减弱影响<sup>[19,23-25]</sup>,将大兴站与密云站中的有降水样本(92 个)剔除,剩余为无降水样本(11 411 个),城市热岛效应具体计算公式为:

$$\Delta T = T_u - T_r \quad (1)$$

式中,  $T_u$  代表城市站气温,  $T_r$  代表参考站气温。为保证 NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 与热岛效应的研究时段一致、站点位置稳定,选用北京市气象局仅有的两个长时间序列的大气成分观测站点。其中,城区宝联站位于北京西三环和西四环之间,周边没有大的污染源,主要为居民区。郊区的上甸子站位于北京市东北部密云区上甸子村,距密云县城 55 km,距北京市区 150 km。宝联站在 2016 年初进行了迁站工作,为了保障数据连续和数据质量,在本文中统一研究时段为 2006—2015 年。城、郊站间 NO<sub>x</sub> 浓度差异和城、郊站间 PM<sub>2.5</sub> 浓度差异计算公式如下:

$$\Delta \text{NO}_x = \text{NO}_{x_u} - \text{NO}_{x_r} \quad (2)$$

城、郊站间 PM<sub>2.5</sub> 浓度差异:

$$\Delta PM_{2.5} = PM_{2.5u} - PM_{2.5r} \quad (3)$$

式(2)中,  $NO_{xu}$  代表城区站  $NO_x$  浓度,  $NO_{xr}$  代表郊区站  $NO_x$  浓度; 式(3)中,  $PM_{2.5u}$  代表城区站  $PM_{2.5}$  浓度,  $PM_{2.5r}$  代表郊区站  $PM_{2.5}$  浓度。

考虑到降水、大风对城市热岛效应和污染物的影响, 定义降雨天气为: 小时累积降水  $> 0.1$  mm; 定义大风天气为: 风速  $> 5.4$  m/s 时, 相当于三级风力以上。文中所涉及 t 检验, 主要用于样本含量较小, 总体标准差  $\sigma$  未知的正态分布, 常用于比较两组数据的差异是否显著。t 检验公式如下:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 - 2\gamma\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}}{n-1}}} \quad (4)$$

其中,  $\bar{X}_1$ 、 $\bar{X}_2$  分别为两样本平均数,  $\sigma_{x_1}^2$ 、 $\sigma_{x_2}^2$  分别为两样本方差,  $\gamma$  为相关样本的相关系数,  $n$  为样本容量。

## 2 结果

### 2.1 城市热岛效应

从 ALL 时段内的热岛效应日变化趋势 (图 1a) 可以看出, 热岛效应在 00—06 时基本处在同一水平 (平均为  $3.02$   $^{\circ}C$ ), 07 时达到最高值  $3.26$   $^{\circ}C$ , 之后热岛效应随着近地面气温的升高和湍流交换加强而迅

速减弱, 直至 15 时达到最低值  $0.35$   $^{\circ}C$ , 17 时前后随着近地面气温的降低和湍流交换减弱, 热岛效应又迅速增强, 至 22 时再次达到峰值  $3.04$   $^{\circ}C$ , 随后变化幅度趋于平缓。就平均状态而言, 城市热岛的日变化主要受热力因素和湍流活动的日变化规律影响, 因而与气象条件的日变化是非常一致的<sup>[26-27]</sup>。

BG 时段内分析城市热岛的日变化特征 (图 1b)。多年平均热岛效应最大值同样出现在 07 时, 为  $3.42$   $^{\circ}C$ , 相比于 ALL 时段的平均值偏高  $0.16$   $^{\circ}C$ 。夜间并没有出现明显的热岛效应高峰值, 22 时达到  $3.14$   $^{\circ}C$ , 相比于 ALL 时段同时间偏高  $0.10$   $^{\circ}C$ 。CNY 时段 (图 1c) 城市热岛效应的两次高峰值, 第一次仍然出现在 07 时, 为  $3.08$   $^{\circ}C$ , 相比于 BG 时段同时间偏低  $0.34$   $^{\circ}C$ , 夜间 22 时城市热岛效应再次达到高峰, 为  $3.04$   $^{\circ}C$ , 相比于 BG 时段同时间偏低  $0.10$   $^{\circ}C$ 。

为了更清楚地了解早晚高峰的城市人口出行对热岛效应的影响, 利用城市热岛效应在 CNY 时段与 BG 时段的差异进行分析 (图 1d)。结果表明, BG 时段与 CNY 时段之间的城市热岛效应差异在早高峰期间平均为  $0.30$   $^{\circ}C$ , 在晚高峰期间平均为  $0.43$   $^{\circ}C$ , 在其他时段平均为  $0.26$   $^{\circ}C$ 。BG 时段与 CNY 时段城市热岛效应差异的最大值和次大值分别为 19 时的  $0.75$   $^{\circ}C$  和 08 时的  $0.57$   $^{\circ}C$ 。对 BG 时段与 CNY 时段

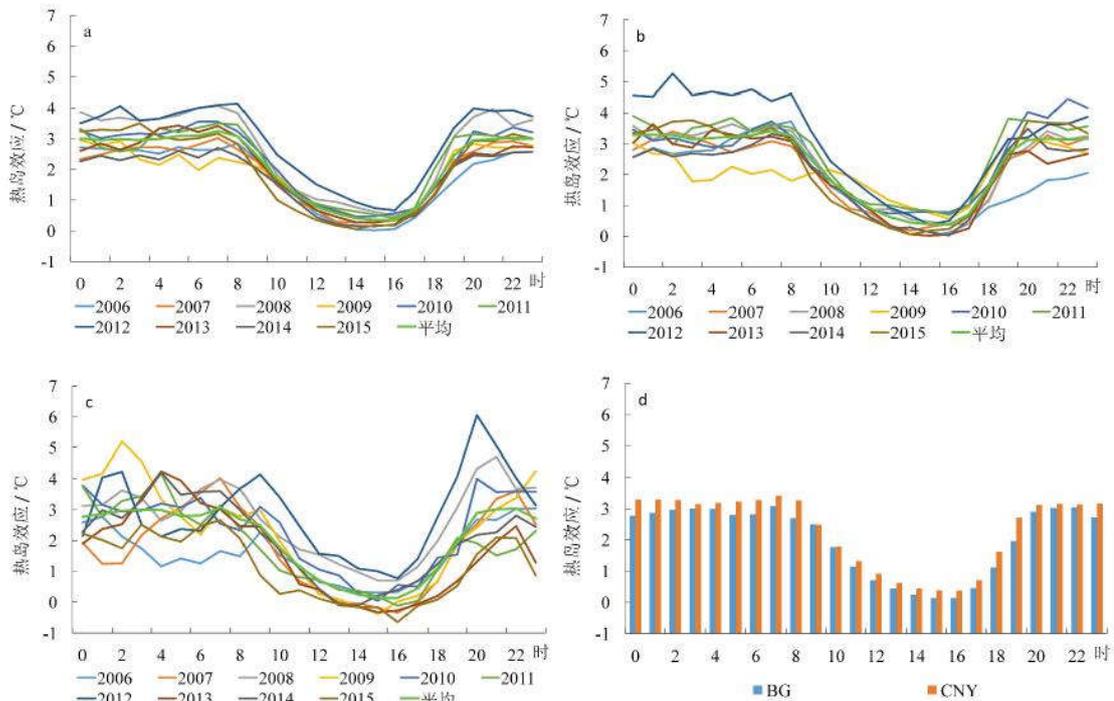


图 1 2006—2015 年不同研究时段内的热岛效应日变化

(a 为 ALL 时段: 代表 490 d 无降水样本共 11 411 小时; b 为 BG 时段: 代表 199 d 工作日无降水样本共 4 650 小时; c 为 CNY 时段: 代表春节周 70 d 无降水样本共 1 631 小时; d 为 CNY 时段和 BG 时段内城市热岛效应的多年平均值)

之间的城市热岛效应的差异利用 t 检验方法进行检验,两阶段的差异通过了 0.01 的显著性检验。结果说明,不同规模下的人口出行规律的确对城市热岛效应产生了影响。尤其是在傍晚之后,由于近地面气温的降低和湍流交换减弱,再叠加大规模人口晚高峰出行的影响作用,使得大规模人口出行对于城市热岛影响的程度还要高于早高峰期间。

### 2.2 氮氧化物(NO<sub>x</sub>)城郊浓度差异

氮氧化物(NO<sub>x</sub>)目前已经成为大气污染中的主要污染物之一,其主要成分包括 NO、N<sub>2</sub>O、NO<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等<sup>[28]</sup>,是光化学烟雾污染、城市灰霾天气、大气酸沉降等一系列环境问题的重要根源,也是生成臭氧光化学反应的主要前体物。由于 NO<sub>x</sub> 可以在大气层中长距离输送,其引起的全球性或区域性污染问题也日益凸显。研究指出 NO<sub>x</sub> 可以经过一系列的光化学反应生成硝酸盐气溶胶,导致城市能见度下降,出现灰霾现象<sup>[29]</sup>。而 NO<sub>x</sub> 也是汽车尾气中的主要污染物之一,由于早晚高峰期有大量的车辆行驶,因而对城市大气环境造成相比于其他时段更显著的影响。因此,以 NO<sub>x</sub> 的城区、郊区站间的浓度差异来判断大规模人群出行规律对城郊大气污染物的影响是具有一定代表性的。

从图 2a 可知,郊区上甸子站的 NO<sub>x</sub> 浓度在一天当中呈现波动性的变化,并在 10—16 时期间有一个低谷存在,但整体而言并无特别明显的波峰与波谷存在,多年日平均值为 15.92 μg/L。城区宝联站则表现出明显的日变化特征(图 2b),就平均值而言,第一个波峰出现在 08 时,NO<sub>x</sub> 浓度为 91.58 μg/L。随着

白天扩散条件转好后明显下降至 16 时的 40.41 μg/L。随后伴随着晚高峰污染的积累与扩散条件转差的共同作用,NO<sub>x</sub> 浓度再次上升至 23 时的 78.67 μg/L。由于郊区站的 NO<sub>x</sub> 浓度日变化特征微弱,因此图 2c 中 ALL 时段城、郊两站 NO<sub>x</sub> 浓度差异类似于宝联站的日变化特征,其中 10 a 平均值的日间最大差异出现在 08 时,为 76.11 μg/L,最小值出现在 16 时,为 26.86 μg/L。

由图 3 可以看出,在 CNY 时段 NO<sub>x</sub> 的浓度城、郊差异整体上均明显低于 BG 时段。其中,BG 时段与 CNY 时段城、郊 NO<sub>x</sub> 浓度差的最大差异在 08 时,达 54.95 μg/L。在早高峰期间平均差异为 48.55 μg/L,也是一天当中差异 BG 时段与 CNY 时段差异最大的时期。晚高峰期间平均差异为 23.44 μg/L,其他时间段平均为 27.97 μg/L。对 BG 时段与 CNY 时段城、郊两站 NO<sub>x</sub> 的浓度差异的差值利用 t 检验方法进行检验,结果表明两阶段的差异通过了 0.01 的显著性检验。相比于 CNY 时段,BG 时段城市晚高峰出行活动对城、郊 NO<sub>x</sub> 浓度差异的贡献量随着夜间的不利扩散条件而延迟出现峰值,城市早高峰出行对城、郊 NO<sub>x</sub> 浓度差异的增大作用更为突出。此外,考虑到不同天气过程对结论的影响,尝试剔除大风、降雨天气过程之后,对城、郊两站 NO<sub>x</sub> 的浓度用相同方法进行计算,所得结果并无明显差别(图 3)。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub> 浓度城郊差异

PM<sub>2.5</sub> 是悬浮在空气中的空气动力学当量直径 ≤2.5 μm 的颗粒物的统称,主要来源是工业生产、汽车尾气排放、火力发电等过程中经过燃烧而排

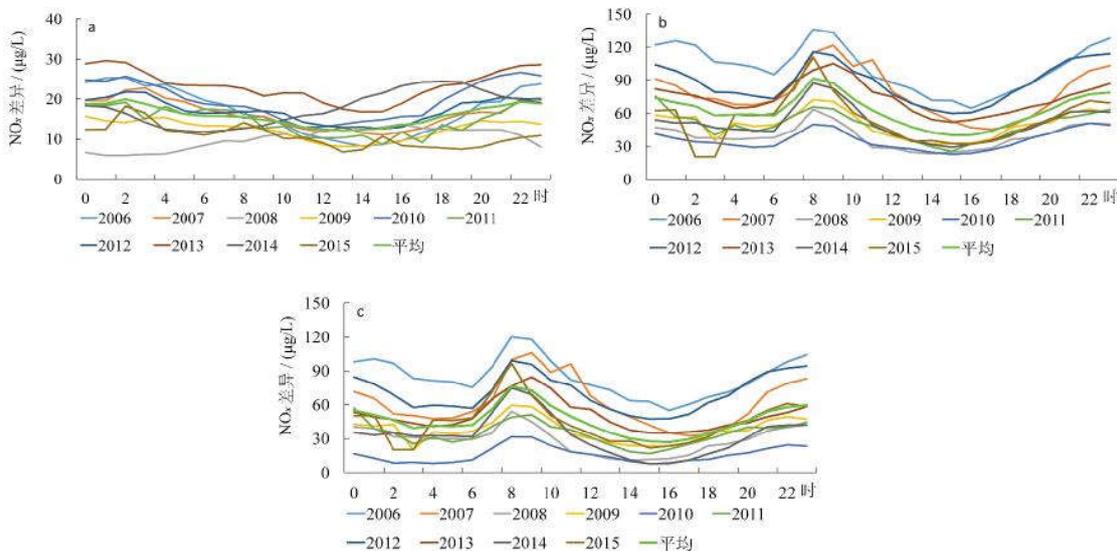


图 2 2006—2015 年 ALL 时段城、郊两站 NO<sub>x</sub> 日变化及两站 NO<sub>x</sub> 浓度差异的日变化 (a 为上甸子站 NO<sub>x</sub> 浓度日变化;b 为宝联站 NO<sub>x</sub> 浓度日变化;c 为宝联站与上甸子站间的 NO<sub>x</sub> 浓度差异)

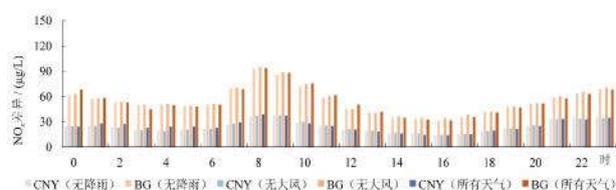


图3 不同天气情况下多年平均 CNY 时段、BG 时段内宝联站与上甸子站间的  $\text{NO}_x$  浓度差异

放的残留物,大多含有重金属等有毒物质<sup>[30-34]</sup>。从结果来看  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在城、郊两站间的差异,相较于  $\text{NO}_x$  的浓度在城、郊两站间的差异,两者既有共性又存在着明显的不同。原因在于  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的日变化不仅受到污染物的累积和扩散条件两方面的影响,同时还存在着化学反应以及颗粒物吸湿增长的影响,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度比  $\text{NO}_x$  的浓度的日变化情况和规律要更复杂。

图 4a 中 ALL 时段内郊区站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度并没有表现出非常明显的日变化特征,但是也仍然存在着一定的变化规律,ALL 时段内郊区站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最高峰出现在 23 时前后,次高峰出现在 14 时前后。相比之下,ALL 时段内城区站则存在着更明显的日变化特征(图 4b),类似于同站点的  $\text{NO}_x$  的浓度日变化特征,只是峰谷出现的时间存在差异。

就平均值而言,07 时城区站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度出现第一个波谷,为  $73.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,随后增加至 14 时达到第一个波峰,为  $91.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;第二个波谷出现在 16 时,为  $78.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,随后再次增加直至 23 时达到第二个波峰(也是最高峰),为  $107.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。简言之,ALL

时段内城区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的日变化呈明显的双峰现象,一个峰出现在夜间,另一个峰出现在中午,这既与污染物排放有关,又与气象条件有关<sup>[35-37]</sup>。

一般而言,中午到下午是一天当中扩散条件最好的时候,也是多数污染物都呈现较低值的阶段。夜间,多数污染物都有高值出现,原因在于夜间易发生逆温,相对湿度通常最高,扩散条件最差,使得地面产生的颗粒物不易扩散而逐渐累积。ALL 时段内城区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度却在 14 时出现波峰,说明城市早高峰出行对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响是有一定的滞后作用的。夜间 23 时出现另一个波峰,证明叠加因素(不利扩散条件、晚高峰影响)对夜间  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响相比白天更明显,这一点在分析  $\text{NO}_x$  的浓度日变化特征时也得到了类似的结论。午夜到凌晨的时段  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的变化则很平缓,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布也比较均匀,与前人的结论一致<sup>[35-38]</sup>。研究指出,虽然单纯机动车直接排放的颗粒物对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的贡献并不高,但是汽车尾气中的超细粒子和污染气体,可以在空气中发生化学反应或者吸湿增长变成  $\text{PM}_{2.5}$ 。这也解释了  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的快速增长阶段没有完全对应于早晚高峰出行的时间,而是有所延迟。相对而言,  $\text{NO}_x$  的日变化能更加直接地反映出机动车高峰等人类活动对大气的影影响<sup>[39-40]</sup>。

根据 2006—2015 年 ALL 时段内的城、郊  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异的日变化趋势来看(图 4c),夜间扩散条件差,00—06 时城郊  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异持续减小,至 07 时达到最低( $28.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),07 时以后扩散条件逐渐改善,但位于山区的上甸子站海拔较高,扩散条件恢

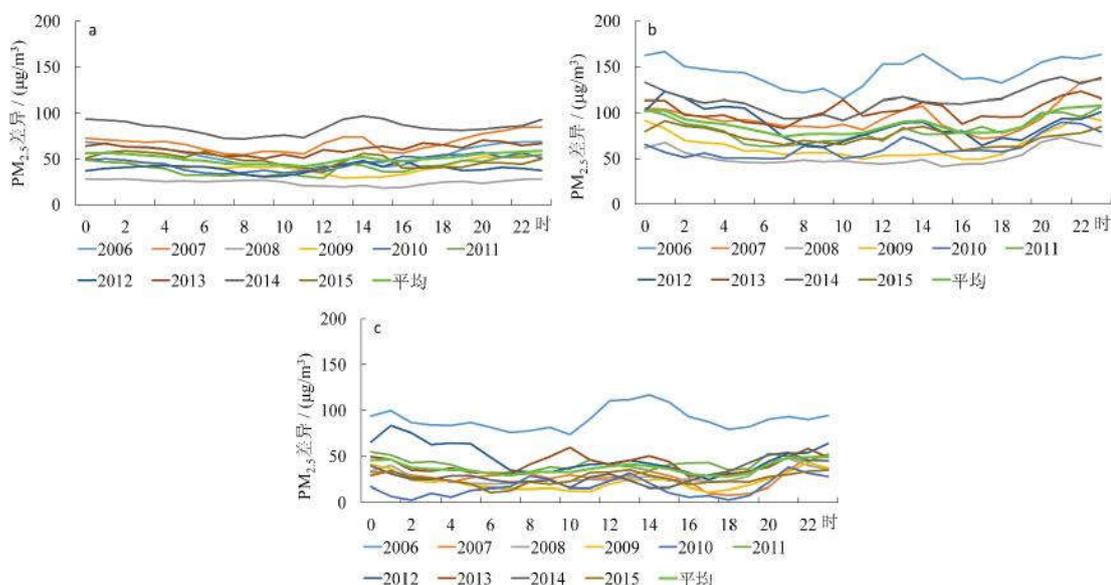


图4 2006—2015 年 ALL 时段内的城、郊两站  $\text{PM}_{2.5}$  日变化及两站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异的日变化 (a 为上甸子站  $\text{PM}_{2.5}$  日变化; b 为宝联站  $\text{PM}_{2.5}$  日变化; c 为 ALL 时段内宝联站与上甸子站间的颗粒浓度差异)

复更快,且城区站在 07—10 时颗粒物浓度变化略有上升,因此两者间的差异反而随着热力条件的改善而增加,至 13 时达到最高(41.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );13 时以后颗粒物浓度随着扩散条件逐渐转差而上升,但位于山区的上甸子站扩散条件转差得更快,因此两者间的差异随着热力条件的转差再次减小,至 18 时达到最低(27.81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。而后扩散条件失去作用,污染物累积占据主导作用,而城区站的颗粒物增长速度快于郊区,使得颗粒物效应再次增加,至次日 23 时达到 48.89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

图 5 显示 BG 时段  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异日变化的峰、谷并不十分明显,差异最大的时间点出现在 13 时,为 47.48  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;次高峰出现在 00 时,为 44.30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。CNY 时段  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异与 ALL 时段、BG 时段相比,在峰值的数值、最高峰出现的时间上则存在着很大的不同。CNY 时段内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异在 01 时出现最高峰,为 103.46  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而次高峰出现在 11 时,为 27.10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,且两个峰值间差值更大。

从 BG 时段  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异与 CNY 时段  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异间的差别来看, $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异在两个时段的表现特征完全不同于  $\text{NO}_x$  浓度相应的结果。 $\text{PM}_{2.5}$  浓度城、郊差异在 BG 时段内的 05—19 时高于 CNY 时段,而其余时间均低于 CNY 时段。其中,在 01 时出现了最大差值为 -62.42  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,早高峰期间平均差值为 12.82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,晚高峰期间平均差值为 8.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其它时间段平均差值为 -7.35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。BG 时段与 CNY 时段城、郊两站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异的差值利用 t 检验方法进行检验,结果未通过 0.01 的显著性检验,这一结果与前文得到的热岛效应、 $\text{NO}_x$  浓度差异的结果存在着明显不同,说明  $\text{PM}_{2.5}$  的变化规律更复杂,除了大规模交通出行以外, $\text{PM}_{2.5}$  的局地源排放(烟花爆竹燃放等)、相对湿度、气粒转化以及远程输送等综合作用都会影响  $\text{PM}_{2.5}$  的日变化规律<sup>[41-43]</sup>,具体原因有待进一步深入研究。

大规模的人口早高峰出行活动在 CNY 时段内大幅减少, $\text{PM}_{2.5}$  浓度来源减轻,结合前文 ALL 时段得到的研究结论,即城市早高峰出行对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的影响是有一定的滞后作用,导致了图 5 中表现出来的 CNY 时段内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度城郊差异自早高峰起至晚高峰之前低于 BG 时段。

此外,从 CNY 时段内 20 时起,虽然大规模人口出行活动减少,交通来源上的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度减轻,但是

在 CNY 时段内夜间由于北京本地烟花爆竹的燃放,叠加夜间相对静稳的大气条件,往往会使  $\text{PM}_{2.5}$  的最大小时平均质量浓度在短短的几个小时内浓度增加数倍<sup>[4,35]</sup>,因而导致了图 5 中夜间至凌晨期间城区站的颗粒物增长速度快于郊区,且远高于 BG 时段。考虑到不同天气过程对结论的影响,尝试剔除大风、降雨天气过程之后,对城、郊两站  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度进行相同方法的计算,所得结果并无明显差别(图 5)。

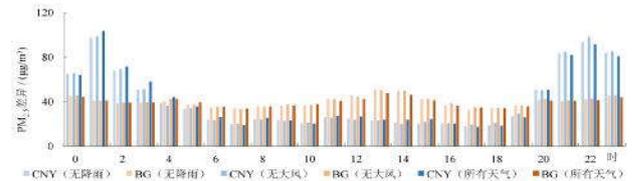


图 5 多年平均下 CNY 与 BG 时段宝联站与上甸子站间的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度差异

### 3 结论与讨论

城市热岛效应、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度、 $\text{NO}_x$  浓度在城、郊站间的差异与局地天气条件、大气污染物浓度、城市下垫面性质、人口密度及城市化程度均有一定程度的关系。本文以北京地区为例,试图剥离出超大城市人类出行规律的影响,得到的主要结论如下:

(1) 城市热岛效应在 CNY 时段与 BG 时段的差异最大值和次大值为别为 19 时的 0.75  $^{\circ}\text{C}$  和 08 时的 0.57  $^{\circ}\text{C}$ ,说明早晚高峰期间的人群出行活动的确对城市热岛效应造成影响,而且晚高峰时期的影响程度还要超过早高峰期间。CNY 时段与 BG 时段的城、郊热岛效应差异在早高峰期间平均为 0.30  $^{\circ}\text{C}$ ,在晚高峰期间平均为 0.43  $^{\circ}\text{C}$ ,在其它时段平均为 0.26  $^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 郊区站  $\text{NO}_x$  浓度无明显的日变化特征,而城区站则出现了 08 时的最高峰和 23 时的次高峰。CNY 时段  $\text{NO}_x$  的浓度城、郊站之间的差异明显低于 BG 时段,差异最大的时间点出现在 08 时。城市内晚高峰出行活动对  $\text{NO}_x$  浓度的贡献量随着夜间的不利扩散条件而延迟出现峰值,早高峰出行对  $\text{NO}_x$  浓度的增大作用更明显。

(3) 郊区站  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最高峰出现在 23 时前后,次高峰平均出现在 14 时前后。城区站的次高峰、最高峰出现时间点与郊区站相同,只是日变化特征更加明显。 $\text{PM}_{2.5}$  的快速增长阶段没有完全对应于早晚高峰的出行规律,是因为  $\text{PM}_{2.5}$  来源复杂,除了工业、扬尘等一次排放,二次转化也非常重要。 $\text{PM}_{2.5}$  浓度受到局地源排放(烟花爆竹燃放等)、相对湿度、气粒

转化以及远程输送等因素的综合作用,其日变化规律表现得较不规则,但是早晚高峰这样的人口大规模出行对于  $PM_{2.5}$  的延迟影响作用仍然是不可忽视的。

本文通过分析城市热岛效应和城、郊两站  $NO_x$  浓度在春节期间(CNY 时段)和背景期间(BG 时段)的差异,证实了大规模的人口活动的确对城市环境产生了一定的影响。但由于  $PM_{2.5}$  浓度的变化规律非常复杂,将在下一步研究工作中,继续收集人为活动的具体数据,客观地解释采暖、机动车、烟花爆竹燃放等其他源在一天中不同时刻对  $PM_{2.5}$  的贡献,同时结合颗粒物的成分进行更深入的分析。

#### 参考文献:

- [1] 吴可军,王兴荣,王善型.利用卫星资料分析气温的城市热岛效应[J].气象学报,1993,51(2):203-208.
- [2] Morris C G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(2):169-182.
- [3] 季崇萍,刘伟东,轩春怡.北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J].地球物理学报,2006,49(1):69-77.
- [4] 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等.北京地区冬春  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学,2014,35(2):418-427.
- [5] 王颖,梁依玲,王丽霞.复杂地形气象场对污染物浓度空间分布影响的研究 [J]. 沙漠与绿洲气象,2015,9(2):69-74.
- [6] 李霞.复杂地形城市多尺度气流对大气污染影响的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):1-10.
- [7] Mayer H. Air pollution in cities [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(24-25):4029-4037.
- [8] KAN H D, CHEN B H. Particulate air pollution in urban areas of Shanghai, China: health based economic assessment [J]. Science of the Total Environment, 2004, 322(1):71-79.
- [9] Wise E K, Comrie A C. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(16):2969-2980.
- [10] 王跃思,王长科,郭雪清,等.北京大气  $CO_2$  浓度日变化、季变化及长期趋势 [J]. 科学通报,2002,47(14):1108-1112.
- [11] Englert N. Fine particles and human health a review of epidemiological studies [J]. Toxicology Letters, 2004, 149(1):235-242.
- [12] ZHANG Q H, ZHANG J P, XUE H W. The challenge of improving visibility in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(3):7821-7827.
- [13] 秦世广,石广玉,陈林,等.利用地面水平能见度估算并分析中国地区气溶胶光学厚度长期变化特征 [J]. 大气科学,2010,34(2):449-456.
- [14] 赵娜,刘树华,虞海燕.近48年城市化发展对北京区域气候的影响分析[J].大气科学,2011,35(2):373-385.
- [15] David Y H, CHEN S C, ZUO Z L.  $PM_{2.5}$  in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation[J]. Particuology, 2014, 13(2):1-26.
- [16] 刘伟东,尤焕苓,孙丹.1971—2010年京津冀大城市热岛效应多时间尺度分析 [J]. 气象,2016,42(5):598-606.
- [17] WU L Y, ZHANG J Y, SHI C X. Mass human migration and the urban heat island during the Chinese New Year holiday: A case study in Harbin City, Northeast China[J]. Atmospheric Oceanic Letter, 2015, 82(6):63-66.
- [18] DOU J J, MIAO S G. Impact of mass human migration during Chinese New Year on Beijing urban heat island[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37:4199 - 4210.
- [19] 人民政协网综合.春节期间北京人口减少4成,848万人返乡 [EB/OL]. [2017-02-04]. [http://www.rmzxb.com.cn/c/2017-02-04/1316904\\_2.shtml](http://www.rmzxb.com.cn/c/2017-02-04/1316904_2.shtml)
- [20] ZHANG J Y, WU L Y. The influence of population movements on the urban relative humidity of Beijing during the Chinese Spring Festival holiday [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 170:1508-1513.
- [21] Oke T R, East C. The urban boundary layer in Montreal[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1971, 1(4):411-437.
- [22] Kim Y H, Baik J J. Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004, 79(3-4):151-164.
- [23] WU L Y, ZHANG J Y. Assessing population movement impacts on urban heat island of Beijing during the Chinese New Year holiday: effects of meteorological conditions [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 131(3-4):1203-1210.
- [24] ZHANG J Y, WU L Y, YUAN F et al. Mass human migration and Beijing's urban heat island during the Chinese New Year holiday[J]. Science Bulletin, 2015, 60:1038-1041.
- [25] ZHANG J Y, WU L Y. Modulation of the urban heat island by the tourism during the Chinese New Year holiday: A case study in Sanya City, Hainan Province of China[J]. Science Bulletin, 2015, 60(17):1543-1546.
- [26] 金丽娜,李雄飞,杜萌萌,等.基于FY-3卫星数据的西安市城市热岛特征分析 [J]. 气象与环境科学,2019,42(4):74-82.
- [27] 蒙伟光,张艳霞,李江南,等.在广州高温天气及城市热岛模拟研究中的应用 [J]. 热带气象学报,2010,26(3):

- 273-282.
- [28] Tomita A. Suppression of nitrogen oxides emission by carbonaceous reductants[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 71(1-3):53-70.
- [29] 陈瑜, 于涛. 近年来广州市氮氧化物变化趋势分析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(2):47-48.
- [30] Na K, Cocker D R. Characterization and source identification of trace elements in PM<sub>2.5</sub> from Mira Loma, Southern California [J]. *Atmospheric Research*, 2009, 93(4):793-800.
- [31] SONG Y, TANG X, XIE S, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing in 2004 [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(1):124-130.
- [32] Vallius M, Janssen N A H, Heinrich J, et al. Sources and elemental composition of ambient PM<sub>2.5</sub> in three European cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1-3):147-162.
- [33] CHAN C K, YAO X. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(1):1-42.
- [34] CHAN C Y, XU X D, LI Y S, et al. Characteristics of vertical profiles and sources of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and carbonaceous species in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(28):5113-5124.
- [35] 于建华, 虞统, 魏强. 北京地区 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的变化特征[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(1):45-47.
- [36] 车瑞俊, 刘大锰, 袁杨森, 等. 北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 2007, 24(5):556-563.
- [37] 李旭芳, 初钧晗, 于令达, 等. 北京市城区单监测点 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化特征 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2011, 47(3):258-261.
- [38] 唐宜西, 张小玲, 徐敬, 等. 北京城区和郊区本底站大气污染物浓度的多时间尺度变化特征[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8):2783-2793.
- [39] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 等. 北京地区 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 变化特征的城郊对比分析 [J]. *环境科学*, 2008, 29(4):1059-1065.
- [40] Gulliver J, Briggs D J. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(1):1-8.
- [41] HAO J M, WANG L T, LI L, et al. Air pollutants contribution and control strategies of energy-use related sources in Beijing [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(4):138-146.
- [42] SONG Y, TANG X Y, FANG C, et al. Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(4):468-471.
- [43] ZHANG Q, QUAN J N, TIE X X, et al. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 5(2):578-584.

## The Traffic Pattern Effects on Heat Island and Air Pollution in Beijing during the Chinese Spring Festival Holiday

JIANG jiang, GUO Wenli, WANG Chunling  
(Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China)

**Abstract** The urban heat island effect,  $\text{NO}_x$  and  $\text{PM}_{2.5}$  concentration between urban and suburban stations have been analyzed to figure out the effects of morning peak and evening peak on them in Beijing, based on the data of the urban and suburban stations during CNY and BG 2006—2015. The results indicate that the intensity of population, transportation and social activities affect urban heat island and air pollutants. (1) The difference of urban heat island effect between BG and CNY is  $0.30\text{ }^\circ\text{C}$  in the morning peak period,  $0.43\text{ }^\circ\text{C}$  in the evening peak period and  $0.26\text{ }^\circ\text{C}$  in the other time. The influence of the evening peak on urban heat island effect is more obvious. (2) The maximum  $\text{NO}_x$  concentration difference between urban and suburban stations in BG and CNY appears at 08:00, which is  $54.95\text{ }\mu\text{g/L}$ . And it is  $48.55\text{ }\mu\text{g/L}$  in the morning peak and  $23.44\text{ }\mu\text{g/L}$  in the evening peak. The contribution of urban late peak travel activities in the evening peak to the  $\text{NO}_x$  difference between urban and suburban stations is delayed with the adverse diffusion at night. And the role in the morning peak is more prominent. (3) The  $\text{PM}_{2.5}$  concentration difference between urban and suburban stations in BG and CNY is positive from 05:00 to 19:00, which is  $12.82\text{ }\mu\text{g/m}^3$  in the morning peak and  $8.22\text{ }\mu\text{g/m}^3$  in the evening peak. Considering that the ultra-fine particles and polluting gases in automobile exhaust need to undergo chemical reaction or hygroscopic growth in the air in order to become  $\text{PM}_{2.5}$ , the change of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration does not completely correspond to the morning and evening peak travel time, but it is delayed.

**Key words** Beijing; heat island effect;  $\text{PM}_{2.5}$ ;  $\text{NO}_x$