

APEC 会议前后京津冀空气污染物时空变化特征

张媛媛¹, 吴立新², 任传斌¹, 项程程¹, 李佳乐¹, 柴曼¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083

摘要 以2014年北京APEC会议前后京津冀地区的PM_{2.5}、SO₂、NO₂监测数据为基础,通过最优空间插值得到该地区空气污染物质量浓度的空间分布变化图,采用空间自相关与核密度分析法研究了污染物分布的空间差异和变化规律。结果表明,京津冀空气污染物质量浓度具有显著的空间正相关与空间集聚特性,城市群空气污染空间关联密切,PM_{2.5}热点集中在北京南部、天津、石家庄和保定等地,SO₂热点集中在保定、天津、唐山和石家庄等地,NO₂热点集中在北京-天津-唐山片区和保定-石家庄-邢台片区;不同时段空气污染物质量浓度差异显著,APEC会议前及期间,在冷空气活动与减排措施的双重作用下,污染物质量浓度显著降低,高密度热点区均逐渐向中、低密度区转化,而APEC会议后,受冷空气影响良好空气质量得以短期维持,但污染反弹现象较快出现,高密度热点区污染迅速加强并扩展。

关键词 空气污染;空间分析;时空变化;APEC会议;京津冀

2014年11月5—11日,亚太经济合作组织(APEC)峰会在北京召开。APEC会议期间,北京及周边5省市按“两圈、两阶段”总体部署,实施了多项减排措施^[1],有效地保障了北京空气质量,实现了“APCE蓝”。该事件是继2008奥运之后,研究人为控制与政策干预下京津冀(简称BTH)城市间空气污染物空间分布与演变特征的又一典型案例。BTH地理环境特殊,气象条件影响下区域城市间空气污染相互作用明显^[2],研究APEC会议前后BTH地区主要空气污染物的时空变化特征,具有学术价值和现实意义。

目前针对北京APEC会议期间空气污染物特征变化已有较多研究。程念亮等^[3]运用统计分析方法评估减排措施对APEC会议期间PM_{2.5}质量浓度的影响,表明减排措施对PM_{2.5}质量浓度具有明显的消峰降速作用。Huang等^[4]利用地面监测和遥感观测数据对比分析APEC会议前后北京地区污染物的变化情况,表明APEC会议期间NO₂柱状浓度和气溶胶光学厚度(AOD)相比于会议前后均明显下降。Li等^[5]对挥发性有机化合物(VOC)观测分析后指出,APEC会议期间VOC浓度下降44%,机动车对VOC的贡献率下降最为显著,其次是工业和溶剂使用。魏金来等^[6]分析APEC会议期间天津空气

污染特征和成因时指出,天津市空气质量明显改善,NO₂、PM_{2.5}、SO₂平均质量浓度同比分别消减20.3%、23.6%、52.2%。高庆先等^[7]、李文涛等^[8]研究指出,APEC会议期间采取的强力措施对改善北京空气质量贡献显著。王浩等^[9]分析指出,即使是在气象条件非常不利情况下,由于采取了减排措施,APEC会议期间石家庄空气质量仍明显改善。上述研究主要针对APEC会议期间某一特定城市进行时间序列分析,未从空气污染物迁移扩散的角度考察区域性空气污染空间差异,未能揭示城市群之间空气污染的关联关系。本文采用空间自相关与核密度分析方法,通过对2014年10~11月BTH地区及周边42个城市291个环境监测站点PM_{2.5}、NO₂、SO₂质量浓度监测数据进行空间插值,探究空气污染物分布的空间差异与变化规律,以期直观揭示APEC会议前后BTH主要空气污染物的时空演变特征。

1 数据与方法

1.1 数据资料来源

采用的空气质量指数(AQI)值及PM_{2.5}、SO₂、NO₂逐小时质量浓度数据来源于青悦开放环境数据中心(<https://wat.epmap.com>)。

收稿日期:2016-01-16;修回日期:2016-11-09

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB707102);江苏省优势学科(PAPD)及双创团队项目

作者简介:张媛媛,硕士研究生,研究方向为地图学与地理信息系统,电子信箱:13120388205@163.com;吴立新(通信作者),教授,研究方向为空间信息、灾害观测与协同感知,电子信箱:awulixin@263.net

引用格式:张媛媛,吴立新,任传斌,等. APEC会议前后京津冀空气污染物时空变化特征[J]. 科技导报, 2016, 34(24): 115-121; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.24.017

org/),统计时间为2014年10月22日—11月21日,共31天。为进行对照分析,以APEC会议召开的时段(C:2014年11月5—11日,共7天)为标准,依次前推7天分别为APEC会议准备期(B:10月29日—11月4日)与APEC会议前期(A:10月22—28日),后推时考虑到风速变化的显著作用(图1),分别

依次以5天为标准将APEC会议后期分为会后前5天(D:11月12—16日)与会后后5天(E:11月17—21日)两个时段进行分析,并取各站点各时段的质量浓度均值作为插值点的属性值。行政边界矢量数据来自1:400万中国基础地理信息数据库;气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn>)。

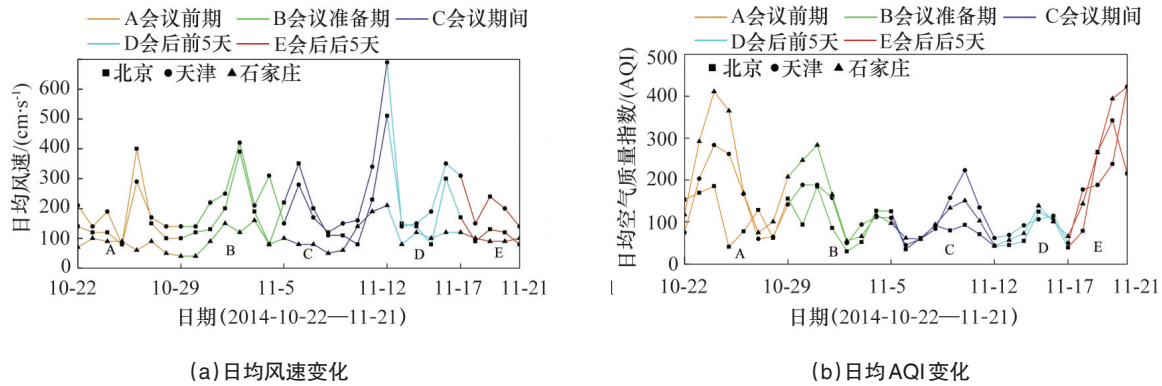


图1 APEC会议前后BTH首府城市的日均风速与日均AQI变化

Fig. 1 Sequences of daily wind speed and daily AQI in BTH capital cities around APEC cummit

1.2 研究方法

1.2.1 空间插值

空间插值的实质是通过已知样点的观测值来估算未知点的值。不同插值方法应用于不同研究对象(不同污染物)与区域时,效果不尽相同。为寻找适合不同污染物质量浓度变化的最优空间插值方法^[10],分别采用反距离加权法、多项式法、样条函数法和普通克里金的圆模型、高斯模型、指数模型及球面模型对PM_{2.5}、NO₂、SO₂进行空间插值,并采用交叉验证法对插值效果进行检验。交叉验证的目标是:标准平均值预测误差与标准化误差均值接近于0,均方根预测误差较小,平均标准误差接近于均方根预测误差,标准均方根预测误差接近于1。检验表明,PM_{2.5}、NO₂、SO₂分别适合采用普通克里金球面模型、普通克里金高斯模型和自然邻域法进行插值。

1.2.2 空间自相关

空间自相关反映的是某单元的属性值与邻区单元同一属性值的相关程度。空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关。

全局空间自相关是对整个区域内属性值空间特征的总体描述,可采用Global Moran I 来表征^[11],即

$$I = \frac{n}{s_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

式中, $s_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$; $z_i = x_i - \bar{x}$; x_i 为污染物质量浓度观测值; \bar{x} 为 x_i 的平均; w_{ij} 为 i, j 之间的空间连接矩阵; n 为观测点总数。

Moran $I \in [-1, 1]$,当Moran $I > 0$ 时,空气污染物呈聚集分布;Moran $I < 0$ 时,污染物呈扩散或均匀分布;Moran I 接近0

时,污染物呈离散分布,不存在空间自相关性。从动态变化上看,若Moran I 值变高,则空气污染物分布更为聚集,说明区域性传输的作用增强;反之变低,则污染物分布更均匀,说明局地性污染的作用增强^[12]。

局部空间自相关用于揭示全局空间自相关分析所掩盖的局部特征,判定空气污染物质量浓度高值或低值的局部空间聚集情况。空间位置 i 的局部Moran I_i 指数^[13]与局部 G_i^* 系数^[14]的计算式分别为

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{s^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

$$G_i^* = \frac{\sum_j w_{ij} x_j}{\sum_j x_j} \quad (3)$$

式中, s^2 为属性值的方差,其他参数同前。

通常按

$$Z(I_i) = \frac{I_i - E(I_i)}{\sqrt{V(I_i)}} \quad Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{V(G_i^*)}}$$

对 I_i, G_i^* 进行标准化计算。其中, $Z(I_i), Z(G_i^*)$ 为空间自相关的显著性水平; $E(I_i), E(G_i^*), V(I_i), V(G_i^*)$ 分别为 I_i, G_i^* 的期望和方差。

研究表明^[15,16], $Z(I_i)$ 能较好地表征局部区域内污染物的空间聚集程度, $Z(I_i) > 1.96$ 表示显著聚集, $Z(I_i)$ 为1.65~1.96表示较显著聚集, $Z(I_i)$ 为-1.64~1.64表示随机分布, $Z(I_i)$ 为-1.96~-1.65表示分散分布, $Z(I_i) < -1.96$ 表示显著分散分布。 $Z(G_i^*)$ 可进一步判定空间聚集程度较高的区域的聚集类型是高浓度聚集还是低浓度聚集, $Z(G_i^*) > 1.96$ 表示显著的高浓度聚集,说明该区域为高污染灾难区, $Z(G_i^*)$ 为1.65~1.96表示聚集浓度较高, $Z(G_i^*)$ 为-1.64~1.64表示空间聚集不显著, $Z(G_i^*)$ 为-1.96~

-1.65 表示聚集, $Z(G_i^*) < -1.96$ 表示显著的低浓度聚集, 说明该区域为空气优良的净土区。

1.2.3 核密度分析

核密度方程^[17]为

$$f(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (4)$$

式中, $k(x-x_i)/h$ 为核函数; x 为网格中心处的核密度; x_i 为其他点的核密度; h 为阈值, km; n 为样本数; d 为维数。

核密度方程的几何意义为, 在每个点 x_i 中心处的密度最高, 向外不断降低, 当距离中心达到一定阈值范围处密度为 0, 网格中心 x 处的核密度为阈值范围内的密度之和。本文运用 ArcGIS 核密度方法对污染物高密度热点区的空间分布情况进行可视化探测时, 输出栅格大小为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 搜索范围采用默认值。

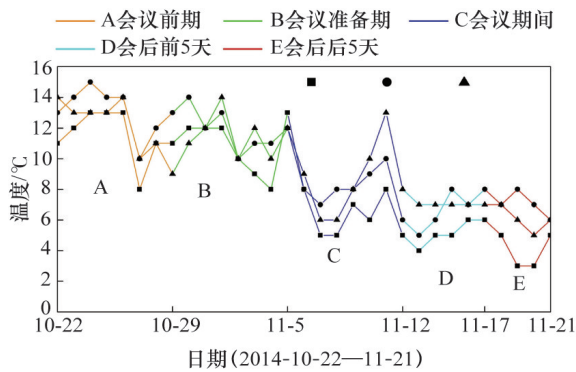
2 污染物时空分布特征及成因

2.1 天气条件与减排措施

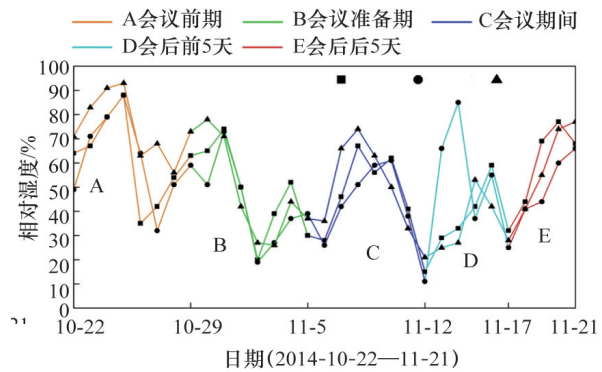
APEC 会议前后 BTH 地区的主要气象参数变化如图 2 所示。APEC 会议前期, 受高空偏西南气流和地面低压系统控制的影响^[18] (10月24—25日), BTH 地区出现了低风速、高湿度、强逆温、正变温等不利于污染扩散的气象条件。APEC 会议准备期, 受 10月31日—11月2日中等强度冷空气活动影响^[19], 低层风速增大, 湿度降低, 空气污染扩散条件较好, 为随

后 APEC 会议期间空气质量的保障奠定了基础。APEC 会议期间, 在 11月5—6日和 11日前后有 2次冷空气活动影响 BTH 地区, 期间空气污染扩散条件较好; 而在冷空气活动的间歇期 (7—10日), 受高空偏西、南气流及地面低压辐合区控制影响, 气象条件向有利于污染物累积的趋势演变, 低层风速减小, 相对湿度增加, 整体扩散条件不利^[20]; 11月11日, 在较强冷空气影响下, 空气扩散条件转好。APEC 会议后的前 5 天, 受强冷空气的后续影响 (11月11—12日), 空气污染扩散条件维持良好。APEC 会议后的后 5 天, 受高压后部偏南风 and 地面辐合区影响 (11月18—20日)^[21], BTH 地区低层风速减小, 湿度增加, 空气污染扩散条件较差。

APEC 会议期间, 北京及周边省市采取了多种减排措施, 几乎对每一种污染源都有针对性的控制方案。北京机动车实行单双号限行, 有效控制了机动车尾气排放; 在京事业单位放假 6 天, 出行人数减少; 市内的所有工地被要求停工, 有效抑制了扬尘; 全市 40% 燃煤机组一度停止运行^[22], 严格控制了燃煤排放量。同时, 周边 5 省市也分别采取了各种控煤、控车、控工业、控扬尘的强制性减排措施, 严防其排放的污染物对首都的“区域输送”。山西省重点加强燃煤电厂、燃煤锅炉的排放监管。河北省采取强制性减排措施, 确保主要空气污染物排放量减少 30% 以上。天津、山东、内蒙古等地也通过停产、检修、限产、强化管理等措施, 确保各项污染物排放量再减少 30%。



(a) 日均温度变化



(b) 日均相对湿度变化

图 2 APEC 会议前后 BTH 首府城市日均温度与日均相对湿度变化

Fig. 2 Sequences of daily temperature and daily relative humidity in BTH capital cities around APEC summit

2.2 污染物时空分布特征

采用普通克里金球面模型插值生成的 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布如图 3 所示。APEC 会议前, 受不利气象条件影响, 北京以南地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均 $> 115 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 西南部分区域质量浓度 $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。APEC 会议准备期, 受冷空气影响, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度自北向南梯次降低。APEC 会议期间, 尽管遇到静稳天气条件, 但在减排措施和弱冷空气活动的共同作用下, 北京空气

质量依然得到保障, 北京及河北北部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均 $< 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。APEC 会议后的前 5 天, 受强冷空气影响, 风速较大, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度持续降低。APEC 会议后的后 5 天, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度急剧反弹, 北京、天津及河北中南部 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均 $> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 石家庄—保定—邢台地区超过 $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。全期 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $< 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的清洁区域很少, 主要位于张家口。

采用自然邻域法插值生成的 SO_2 空间分布如图 4 所示。APEC 会议前与 APEC 会议期间, BTH 的 SO_2 质量浓度总体 $<$

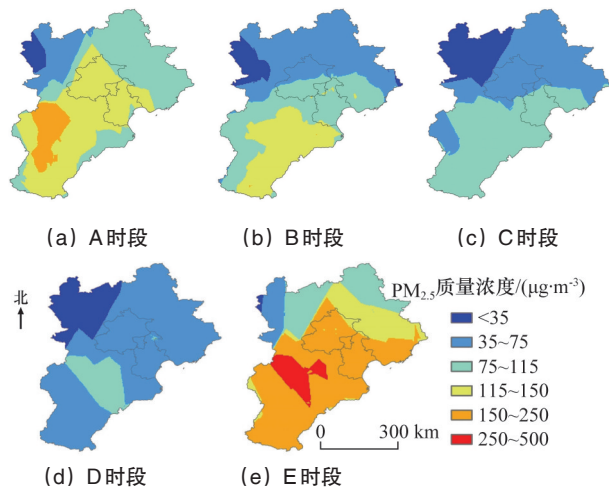


图3 APEC会议前后不同时间段BTH的PM_{2.5}空间分布变化
Fig. 3 Maps of PM_{2.5} spatial distribution changing in BTH around APEC summit

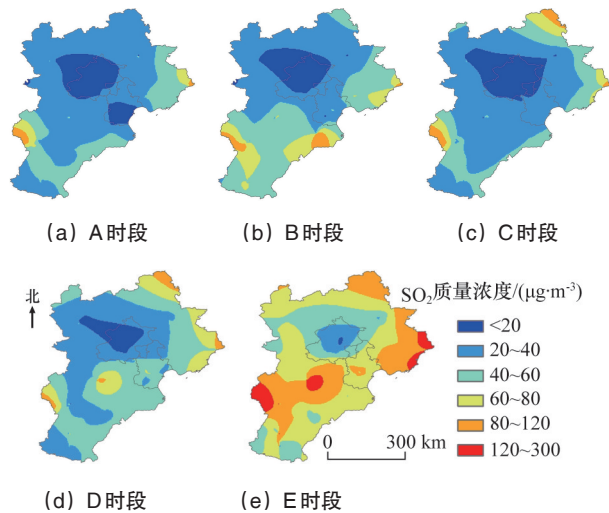


图4 APEC会议前后BTH地区的SO₂空间分布变化
Fig. 4 Maps of SO₂ spatial distribution changing in BTH around APEC summit

60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 仅在河北东北边境及南部局部地区出现 60~120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的富集区, 应与周边农村、城乡结合部等地燃烧散煤取暖有关。APEC会议后的前5天, 虽受强冷空气影响, 但由于工业生产恢复, 廊坊、保定等地SO₂质量浓度仍略有回升。APEC会议后的后5天, 河北、天津SO₂质量浓度急剧反弹, 并对北京形成包围之势; 河北局部地区SO₂质量浓度超过120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。全期北京地区SO₂质量浓度变化较小且始终保持低值。

采用普通克里金高斯模型插值生成的BTH地区NO₂空间分布如图5所示。APEC会议前期, 受不利气象条件影响, 北京西南地区NO₂质量浓度超过80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。APEC会议准备期, 受冷空气活动影响, 空气质量明显好转, >80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的污染区域完全消失。APEC会议期间, 受车辆限行等措施和2次冷空气活动影响, BTH地区的NO₂总体质量浓度<60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

APEC会议后的前5天, 虽然风速较大, 但由于车辆限行措施解除, 汽车尾气排放量增加, 河北廊坊、保定、承德的NO₂略有回升。APEC会议后的后5天, 受极端不利气象条件与行车恢复的共同影响, NO₂质量浓度急剧反弹, 除张家口、承德外, BTH地区大部NO₂质量浓度均>60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 石家庄-保定地区超过120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。全期NO₂高浓度地区主要位于石家庄、保定和唐山。

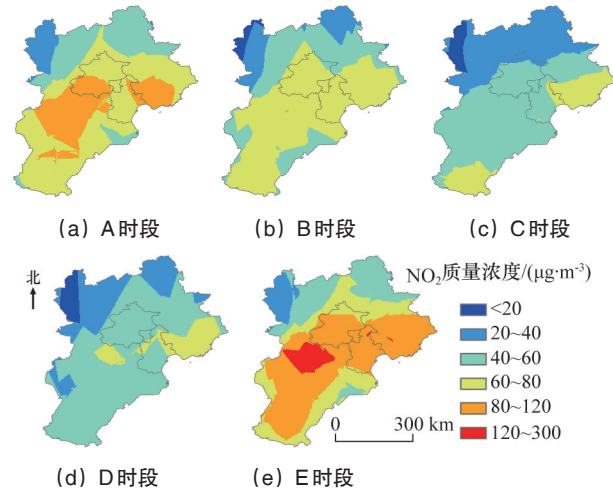


图5 APEC会议前后BTH地区的NO₂质量浓度空间分布变化
Fig. 5 Maps of NO₂ spatial distribution changing in BTH around APEC summit

总体而言, APEC会议期间采取的各项减排措施是行之有效的且成效显著的。APEC会议前至APEC会议期间, 北京地区PM_{2.5}、NO₂质量浓度明显降低, SO₂质量浓度变化较小但始终保持低值, 北京以南地区各种污染物质量浓度也显著降低。“APEC蓝”是气象条件与污染物排放两个变量综合作用的结果, APEC会议期间尽管出现了静稳天气, 但在减排措施与冷空气活动的双重作用下, 北京空气质量依然得到保障。APEC会议后管控措施停止, 在遇到静稳天气时, 污染物质量浓度反弹现象十分突出。气象条件变化对APEC会议前后污染物质量浓度变化影响显著, 11月2日的冷空气活动为APEC会议期间空气质量保障奠定了基础, 11月11日袭来的冷空气和大风, 延缓了APEC会议后的反弹现象, 11月18-20日的静稳天气助推了灰霾的卷土重来。

3 污染物空间自相关特征

3.1 全局自相关特征

APEC会议前后BTH监测点3类空气污染物质量浓度的全局Moran I指数如表1所示。所有I值均通过了1%水平下的随机性检验($P < 0.001$), 且全局Moran I指数均>0, 表明BTH地区PM_{2.5}、SO₂及NO₂均呈现显著的全局空间正相关。其中, PM_{2.5}的空间自相关程度最高, SO₂与NO₂次之且近似。SO₂与PM_{2.5}的空间相关性变化一致, APEC会议前至APEC会议期间, Moran I指数升高, 空间相关性增强, 表明污染物分布更为

表 1 APEC 会议前后 BTH 监测点空气污染物质量浓度全局 Moran *I* 指数

Tab.1 Global Moran *I* for the concentrations of air pollutants in BTH around APEC summit

污染物 类型	A-会议前期		B-会议准备期		D-会议期间		E-会后前5天		C-会后5天	
	<i>I</i> 指数	<i>P</i> 值	<i>I</i> 指数	<i>P</i> 值	<i>I</i> 指数	<i>P</i> 值	<i>I</i> 指数	<i>P</i> 值	<i>I</i> 指数	<i>P</i> 值
PM _{2.5}	0.78	1.92×10 ⁻⁴	0.80	2.21×10 ⁻⁴	0.90	3.32×10 ⁻⁴	0.82	2.1×10 ⁻⁴	0.70	3.12×10 ⁻⁴
SO ₂	0.55	2.03×10 ⁻⁴	0.59	1.96×10 ⁻⁴	0.65	2.31×10 ⁻⁴	0.57	3.02×10 ⁻⁴	0.43	2.61×10 ⁻⁴
NO ₂	0.55	2.92×10 ⁻⁴	0.40	6.07×10 ⁻⁴	0.45	3.54×10 ⁻⁴	0.50	2.47×10 ⁻⁴	0.72	3.16×10 ⁻⁴

聚集,区域性传输的作用增强。APEC 会议后, Moran *I* 指数变低,空间相关性减弱,表明工业复产使得局地性污染作用增强。NO₂的空间相关性变化不同于 SO₂ 与 PM_{2.5}, APEC 会议准备期及 APEC 会议期间, Moran *I* 指数降低,而 APEC 会议后 Moran *I* 指数上升。其原因可能与车辆限行、化工企业排放变化等有关,有待进一步研究。

3.2 局部自相关特征

APEC 会议前后 BTH 地区 PM_{2.5}、SO₂ 及 NO₂ 的局部 Moran *I* 与 *G** 系数标准化 Z 值分布变化如图 6 所示。APEC 会议前后, BTH 地区 PM_{2.5}、NO₂ 及 SO₂ 的质量浓度分布空间聚集性明显。APEC 会议前至 APEC 会议期间,在冷空气活动与减排措施共同影响下, BTH 地区 PM_{2.5}、SO₂ 净土区(低浓度聚集)不断扩大,高污染区(高浓度聚集)逐渐缩小, APEC 会议期间 PM_{2.5} 高污染区完全消失; BTH 中南部的 NO₂ 显著聚集区逐渐演变为

随机分布区,其净土区也从无到有,于 APEC 会议期间出现在张家口地区。APEC 会议后,管控措施解除, PM_{2.5}、SO₂ 高污染区急剧扩张,净土区迅速缩小, PM_{2.5} 净土区完全消失, BTH 地区中南部的 NO₂ 显著聚集区也迅速恢复。受产业布局影响, SO₂ 高污染区稳定分布于石家庄与山西省接壤的重工业区,而净土区始终位于北京境内。气象条件对污染物的局部空间自相关特征有显著影响, 11 月 11 日的大风天气有效延缓和抑制了高污染区的扩展现象。

4 核密度空间特征

APEC 会议前后 BTH 地区 PM_{2.5}、SO₂ 及 NO₂ 的核密度空间分布变化如图 7 所示。

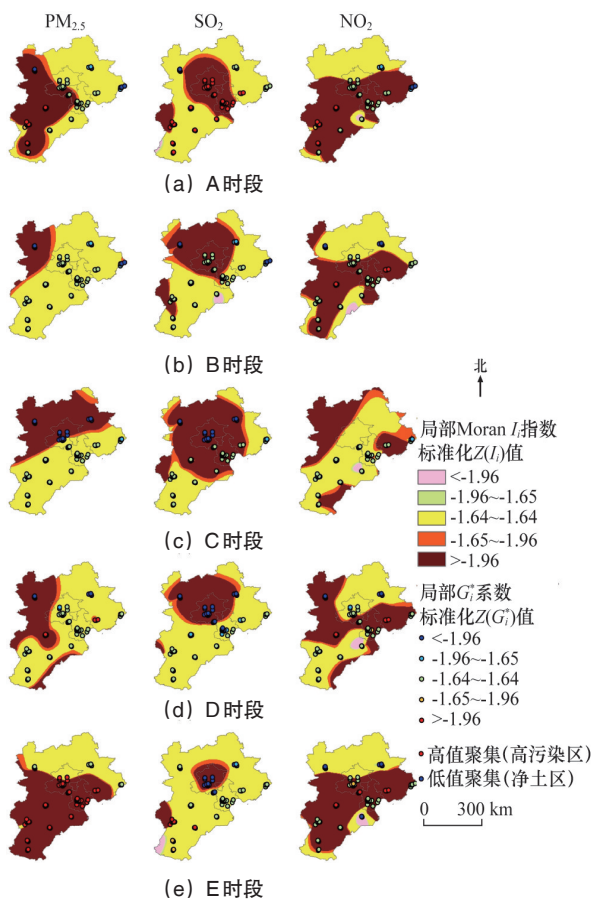


图 6 APEC 会议前后 BTH 地区的 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 局部 Moran *I* 与 *G** 系数标准化 Z 值分布变化

Fig. 6 Maps of standardized local Moran *I* and Getis-Ord *G** of PM_{2.5}, SO₂, NO₂ changing in BTH around APEC summit

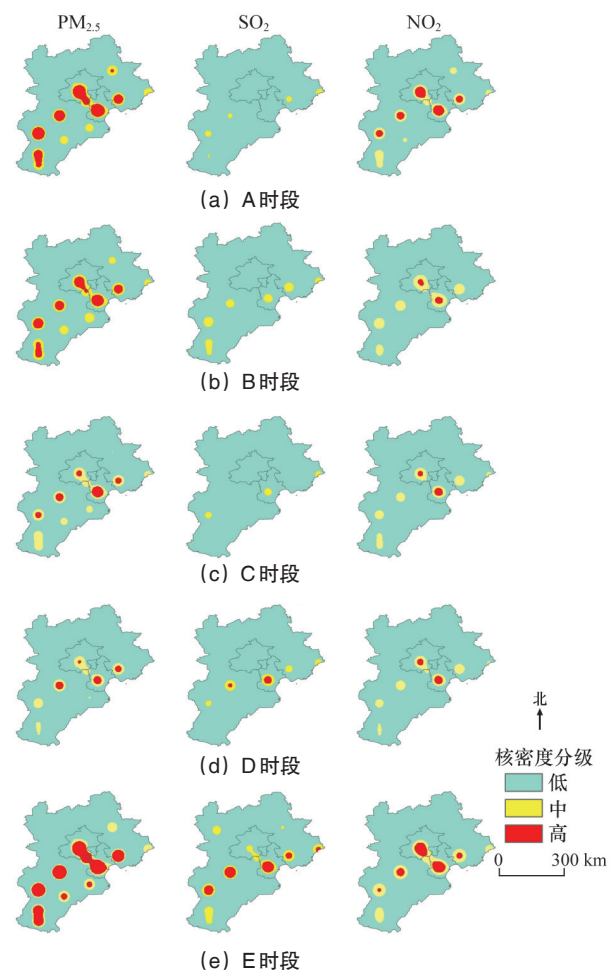


图 7 APEC 会议前后 BTH 地区 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 核密度空间分布变化

Fig. 7 Maps of kernel densities of PM_{2.5}, SO₂ and NO₂ changing in BTH around APEC summit

PM_{2.5}高密度热点区始终广泛存在,主要集中于北京南部、天津、廊坊、唐山、石家庄和保定等地,而张家口地区则始终是PM_{2.5}低密度区。SO₂高密度热点区出现于APEC会议之后(与燃煤有关,11月5日BTH开始供暖),主要集中于石家庄、保定、天津、唐山,而张家口、北京、廊坊、承德在供暖后才成为SO₂热点区。NO₂热点区的分布类似于PM_{2.5}(沧州、衡水除外),在APEC会议期间减少、减弱,而张家口始终是NO₂低密度区。

总体而言,APEC会议前至APEC会议期间,受管控措施影响,BTH的PM_{2.5}、NO₂及SO₂的高密度热点区均逐渐弱化,而在APEC会议后则迅速加强并扩展。气象条件对污染物核密度变化影响显著,11月11日的大风天气使得热点区反弹现象得到抑制。与天津、河北显著不同,全期北京始终是SO₂低密度区,应与北京严格控制燃煤、提升燃油品质有关。

5 结论

1) 京津冀空气污染物质量浓度具有显著的空间正相关性,与空间集聚特性,城市群间空气污染空间关联密切,六省市协调联动是“APEC蓝”出现的重要原因。因此,BTH地区城市群应继续加强区域联防联控,并切实做好产业结构调整和高污染企业淘汰工作。

2) “APEC蓝”是有利气象条件和污染物排放控制两个变量综合作用的结果。尽管APEC会议期间出现了静稳天气,但区域减排措施有效控制了污染物排放,北京空气质量依然得到保障。因此,不利气象条件下BTH地区区域协同减排应成为常态。

3) 受益于区域协同减排,APEC会议前至APEC会议期间,BTH地区空气污染物质量浓度均显著降低,PM_{2.5}、SO₂净土区不断扩大,NO₂显著聚集区逐渐演变为随机分布区,三者的高密度热点区也逐渐弱化。因此,BTH地区应继续加强对燃煤排放、机动车尾气、工业废气和扬尘等主要污染源的控制,通过改变生产生活方式使“APEC蓝”永驻。

4) APEC会议后,区域减排措施解除,当遇到静稳天气时,BTH地区灰霾卷土重来,PM_{2.5}、SO₂净土区不断缩小,NO₂显著聚集区迅速恢复,三者热点区也迅速加强并扩展。这充分反映出京津冀人口分布、工业结构、企业布局与区域地理环境、气候条件不相适宜,导致空气环境问题积重难返。因此,BTH地区空气环境改善任务艰巨,不可能一蹴而就,今后不仅需要政府主导区域协同减排,而且需要社会倡导企业单位自律。

参考文献(References)

[1] 雷宇,宁森,孙亚梅.建立大气治理长效机制留住“APEC蓝”[J].环境保护,2014,24(1):36-39.
Lei Yu, Ning Miao, Sun Yamei. Establish long-term effective mechanism of atmospheric governance to keep "APEC Blue" [J]. Environmental Protection, 2014, 24(1): 36-39.

[2] 张志刚,高庆先,韩雪琴,等.中国华北区域城市间污染物输送研究[J].环境科学研究,2004,17(1):14-20.
Zhang Zhigang, Gao Qingxian, Han Xueqin, et al. The study of pollutant transport between the cities in North China[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(1): 14-20.

[3] 程念亮,李云婷,张大伟,等.2014年APEC期间北京市空气质量改善分析[J].环境科学,2016(1):66-73.
Cheng Nianliang, Li Yunting, Zhang Dawei, et al. Improvement of air quality during APEC in Beijing in 2014[J]. Environmental Science, 2016 (1): 66-73.

[4] Huang K, Zhang X, Lin Y. The "APEC Blue" phenomenon: regional emission control effects observed from space[J]. Atmospheric Research, 2015, 164: 65-75.

[5] Li J, Xie S D, Zeng L M, et al. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014[J]. Atmos. Chem. Phys., 2015, 15: 7945-7959.

[6] 魏金来,王浩,高健,等.天津市不同功能区APEC会议期间大气污染物特征及污染成因分析[J].环境工程技术学报,2016,01:26-34.
Wei Jinlai, Wang Hao, Gao Jian, et al. Observational study on characteristics of air pollutants and causes of pollution episodes during 2014 APEC in different function areas in Tianjin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016(1): 26-34.

[7] 高庆先,刘俊蓉,王宁,等.APEC期间北京及周边城市AQI区域特征及天气背景分析[J].环境科学,2015,11:3952-3960.
Gao Qingxian, Liu Junrong, Wang Ning, et al. Analysis on regional characteristics of air quality index and weather situation in Beijing and its surrounding cities during the APEC[J]. Environmental Science, 2015, 11: 3952-3960.

[8] 李文涛,高庆先,刘俊蓉,等.APEC期间北京空气质量改善对比分析[J].环境科学,2015,12:4340-4347.
Li Wentao, Gao Qingxian, Liu Junrong, et al. Comparative analysis on the improvement of air quality in Beijing during APEC[J]. Environmental Science, 2015, 12: 4340-4347.

[9] 王浩,李轶,高健,等.APEC会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J].环境科学研究,2016,29(2):164-174.
Wang Hao, Li Yi, Gao Jian, et al. Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in shijiazhuang city during the 2014 APEC meeting[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(2): 164-174.

[10] Price D T, Mckenney D W, Nalder I A. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 101: 81-94.

[11] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA[J]. Geographic Analysis, 1995, 27(2): 93-115.

[12] 张纯.中国城市形态对雾霾的影响及演化规律研究——基于地级市PM10年均浓度的分析[C]//城乡治理与规划改革——2014中国城市规划年会论文集.北京:中国城市规划学会,2014:15-19.
Zhang Chun. Effects of urban morphology on the distribution and variation characteristics of haze in the major cities of China--based on the annual mean concentrations of PM10[C]// Urban & Rural Governance and Planning Reform--Proceedings of the Annual Conference of China City Planning 2014. Beijing: China City Planning Review, 2014: 15-19.

[13] Hakan T L, Sermin T. Impact of urbanization on local air quality: differences in urban and rural areas of Balikesir, Turkey[J]. Clean-Soil Air Water, 2014, 42(11): 1489-1499.

- [14] Getis A, Ord J. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geogr. Anal.*, 1992, 24: 189–206.
- [15] 张松林, 张昆. 空间自相关局部指标 Moran 指数和 G 系数研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007(3): 31–34.
Zhang Songlin, Zhang Kun. Contrast study on moran and getis-ord indexes of local spatial autocorrelation and ices[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007(3): 31–34.
- [16] 潘竞虎, 张文, 李俊峰, 等. 中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3423–3431.
Pan Jinghu, Zhang Wen, Li Junfeng, et al. Spatial distribution characteristics of air pollutants in major cities in China during the period of wide range haze pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12) : 3423–3431.
- [17] 王法辉. 基于 GIS 的数量方法与应用[M]. 北京: 商务印书馆, 2009: 49–56.
Wang Fahui. *Quantitative methods applications in GIS*[M]. Beijing: Commercial Press, 2009: 49–56.
- [18] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2) : 163–170.
Cheng Nianliang, Li Yunting, ZhangDawei, et al. Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 163–170.
- [19] 于超, 张芳华. 2014 年 10 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 2015, 41(1): 126–132.
Yu Chao, Zhang Fanghua. Analysis of the October 2014 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(1) : 126–132.
- [20] 张小玲, 孙兆彬, 熊亚军, 等. APEC 会议前后空气污染扩散条件与减排效果分析[C]//第 32 届中国气象学会年会 S9 大气成分与天气、气候变化论文集. 北京: 中国气象学会, 2015: 2–7.
Zhang Xiaoling, Sun Zhaobin, Xiong Yajun, et al. On diffusion conditions of air pollution and effects of emission reduction related with APEC Summit in 2014[C]// The S9 of the 32th annual meeting of Chinese Meteorological Society concerning atmospheric composition and the change of weather and climate. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2015: 2–7.
- [21] 黄威, 张芳华. 2014 年 10 月大气环流和天气分析[J]. *气象*, 2015, 41(2): 254–260.
Huang Wei, Zhang Fanghua. Analysis of the October 2014 atmospheric circulation and weather[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(2): 254–260.
- [22] 董洁, 李梦茹, 孙若丹, 等. APEC 会议期间北京市空气质量状况监控及措施解析[J]. *环境工程*, 2016(2): 155–158.
Dong Jie, Li Mengru, Sun Ruodan, et al. Analysis on air quality monitoring and counter measures in Beijing during APEC conference[J]. *Environmental Engineering*, 2016(2): 155–158.

On the spatio-temporal features of air pollutants in Beijing–Tianjin–Hebei for the period of APEC summit

ZHANG Yuanyuan¹, WU Lixin², REN Chuanbin¹, XIANG Chengcheng¹, LI Jiale¹, CHAI Man¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2. School of Geosciences and Infor-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Based on air pollutant observations in the period from October to November (related with APEC summit), 2014 from meteorological stations of major cities in Beijing–Tianjin–Hebei (BTH) and the surrounding region, the maps of mean air pollutant concentrations every seven (or five) days are obtained with selected spatial interpolation methods. Global autocorrelation and local autocorrelation analysis methods are used to study the spatial heterogeneities of pollutant concentrations, and the spatio-temporal distribution characteristics of pollutants are explored by using kernel density (KD). The followings are revealed: there were significant positive spatial autocorrelations and spatial aggregating features on the mean concentrations of all pollutants; the hot spots of mean PM_{2.5} concentrations distributed in Tianjin, Shijiazhuang, Baoding, and south Beijing; the hot spots of mean SO₂ concentration concentrated mostly in Baoding, Tianjin, Tangshan and Shijiazhuang, while the hot spots of mean NO₂ concentrations distributed mainly along Beijing–Tianjin–Tangshan and Baoding–Shijiazhuang–Xingtai; variations of air quality were notable at different times. Before and during the APEC summit, the regional control/limiting measures and the cold air activity effectively improved the air quality of Beijing and its surrounds, and the KD high value zones transformed gradually into middle or low KD-value zones. With the help of cold air currents and high wind speeds, nice air quality maintained within the first 5 days after the APEC summit. However, air pollutions rebounded sharply and high KD-value zones gradually extended to most parts of the BTH region six days after the APEC summit. It is clear that spatial structure adjustment of industry and elimination of high air-pollution enterprises in BTH are imperative, and the regional synergic emission control in condition of poor meteorological period should be normalized.

Keywords air pollution; spatial analysis; spatio-temporal features; APEC summit; BTH region

(责任编辑 韩星明)