

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016120701

周焱博, 竺夏英, 潘月鹏, 等. 城市近地层气态污染物的垂直分布特征[J]. 环境化学, 2017, 36(8): 1752-1759.

ZHOU Yanbo, ZHU Xiaying, PAN Yuepeng, et al. Vertical distribution of gaseous pollutants in the lower atmospheric boundary layer in urban Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(8): 1752-1759.

城市近地层气态污染物的垂直分布特征*

周焱博^{1,2} 竺夏英³ 潘月鹏^{2**} 田世丽² 刘全⁴ 孙扬²
安俊琳¹ 王跃思²

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与

评估协同创新中心/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京, 210044;

2. 中国科学院大气物理研究所 LAPC, 北京, 100029; 3. 国家气候中心, 北京, 100081; 4. 北京市气象局, 北京, 100089)

摘 要 为研究大气污染物在近地层内的垂直分布规律, 2009 年 2 月 10—25 日利用被动采样器在北京 325 m 气象铁塔 10 个高度 (8、15、47、80、120、160、200、240、280、320 m) 对 SO₂、NO₂、O₃、NH₃ 和苯系物 (苯 benzene、甲苯 toluene、乙苯 ethylbenzene 和二甲苯 xylene) 共 8 种大气污染物浓度进行了同步观测. 结果表明, 北京城区冬季污染物浓度具有明显的垂直变化特征, 污染物浓度从近地面开始逐渐上升, 在 80—160 m 以内的某一高度到达峰值后逐渐下降; 200—300 m 范围内, 大气污染物浓度的垂直变化幅度相对较小, 浓度值与地面接近; 200 m 以下各种污染物浓度的变化比较剧烈, 浓度极大值出现的高度有所不同, O₃、SO₂ 和 NH₃ 极大值位于 160 m, 苯和 NO₂ 极大值出现在 120 m, 甲苯、乙苯和二甲苯极大值在 80 m 处. 污染物在不同高度富集可能与污染源排放高度、城市冠层的热动力作用和气象因素有关, 区分这些因素的各自贡献尚需进一步研究.

关键词 气态污染物, 城市边界层, 垂直分布, 逆温层, 北京.

Vertical distribution of gaseous pollutants in the lower atmospheric boundary layer in urban Beijing

ZHOU Yanbo^{1,2} ZHU Xiaying³ PAN Yuepeng^{2**} TIAN Shili² LIU Quan⁴
SUN Yang² AN Junlin¹ WANG Yuesi²

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China;

2. LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029, China;

3. National Climate Centre, Beijing, 100081, China; 4. Beijing Meteorological Service, Beijing, 100089, China)

Abstract: To examine the vertical distribution of air pollutants in the lower atmospheric boundary layer, the concentrations of SO₂, NO₂, O₃, NH₃ and BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene and xylene) were measured simultaneously by passive samplers on a 325 m meteorological tower at ten heights (8, 15, 47, 80, 120, 160, 200, 240, 280 and 320 m), during February 10—25, 2009 in urban

2016 年 12 月 7 日收稿 (Received: December 7, 2016).

* 国家自然科学基金 (41405144), 国家重点研发计划专项 (2016YFD0800302, 2016YFC0201802, 2017YFC0210103) 和北京市科委科技创新中心建设战略研究及专家咨询专项研究课题 (Z171100003217064) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41405144), the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0800302, 2016YFC0201802, 2017YFC0210103) and Beijing Municipal Science & Technology Commission (Z171100003217064).

* ** 通讯联系人, E-mail: panyuepeng@mail.iap.ac.cn

Corresponding author, E-mail: panyuepeng@mail.iap.ac.cn

Beijing. The results show that the highest concentration of aforementioned air pollutants along the vertical profile was always observed at 80—160 m height, decreasing toward the surface and toward higher altitudes. The concentrations of these pollutants between 200—300 m varied insignificantly, with values close to those at the surface. In contrast, the concentrations of these pollutants changed dramatically below 200 m, with the maximum values at 160 m for O_3 , SO_2 and NH_3 ; at 120 m for benzene and NO_2 ; and at 80 m for toluene, ethylbenzene and xylene. The elevated concentrations of gaseous pollutants coincided with the inversion layer and were likely influenced by the emission heights of point sources and the meteorological conditions, as well as the dynamic and thermal effects of urban canopy combined. The individual contribution of these factors needs to be separated in future work.

Keywords: gaseous pollutants, urban boundary layer, vertical distribution, inversion layer, Beijing.

随着社会经济的快速发展和能源消耗的持续攀升,人类活动向大气环境中排放的污染物已经或正在严重影响着居民身体健康、生态环境质量和全球气候变化.污染物离开排放源之后,将会在边界层内发生一系列的物理扩散、化学反应和干湿沉降等大气过程,从而造成大气污染物浓度在垂直方向上呈现出不均匀性.

飞机航测或激光雷达是研究大气污染物浓度垂直分布的常用手段^[1-2],测量高度一般在 1 km 以上,对于 500 m 以下污染物垂直分布的认知有限^[3].系留艇可以对边界层 1 km 内不同高度进行密集观测,受气象条件的限制,观测时间较短^[4].借助城市建筑物对污染物进行梯度观测也是一种可行手段^[5],但建筑物本身会对气流产生扰动,难以反映近地层污染物的垂直变化特征^[6-7].高塔可以定位连续观测近地层污染物的垂直分布^[8-10],尤其是在冬季逆温天气条件下,高塔可测量边界层内以及残留层内的污染物浓度^[11],对于认知大气污染形成机制具有重要参考价值.

基于中国科学院大气物理研究所 325 m 气象铁塔,近些年陆续开展了 SO_2 、 NO_2 和 O_3 等污染物的垂直分布研究^[12-17],但以往设置的观测高度一般是 4 层或 2 层.作为重要的碱性污染物, NH_3 对云雨酸化起到缓冲作用^[18],也是二次颗粒物污染物的主要前体物^[19].迄今,国内外对 NH_3 垂直观测研究仍相对缺乏.

本文利用 325 m 气象铁塔对 10 个不同高度的大气污染物 NO_2 、 SO_2 、 O_3 、 NH_3 和苯系物 (BTEX, 包括苯、甲苯、乙苯和二甲苯) 进行了 16 d 的连续同步观测.研究结果有助于揭示城市近地层污染物的垂直分布及形成机制,为卫星反演近地层污染物浓度梯度提供验证资料.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集方法

观测实验利用中国科学院大气物理研究所 325 m 气象铁塔开展.气象铁塔位于北京市北三环路 with 北四环路之间,距三环路约 1 km,其东 200 m 为南北走向的 G6 高速,北 50 m 为东西走向的北土城西路.在气象铁塔上设置了 10 个观测高度,分别是 8、15、47、80、120、160、200、240、280、320 m.观测时段选择了污染较为严重的冬季供暖期,采样时段为 2009 年 2 月 10—25 日,共 16 d.

研究期间,在上述 10 个高度安装了意大利“分析家”(Analyst)被动采样器,用以观测 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 NH_3 和 BTEX 的大气浓度.该采样器是基于气体分子扩散/渗透原理累积采集气态污染物,监测结果代表采样期间大气污染的平均状态.前期方法学评估验证了该被动采样器的可靠性和重复性,与主动采样结果一致性较好^[20].不同采样器的吸收膜上涂有特定的吸收物质(表 1),污染物通过分子扩散与吸收膜上物质发生化学反应而被捕获,通过化学方法进行定量^[21].同时,收集了观测期间 325 m 气象铁塔 15 层梯度的气象资料.气象资料的观测方法见文献[22].

表 1 不同被动采样器的吸收物质、萃取液及检测物质
Table 1 Sorbents and analytes of different passive samplers

采样器 Sampler	吸收物质 Sorbent	萃取溶液 Extracted solution	检测物质 Analytes
NO ₂	Na ₂ CO ₃ +甘油	Na ₂ CO ₃ +NaHCO ₃	NO ₂ ⁻
SO ₂	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃ +NaHCO ₃ +H ₂ O ₂	SO ₄ ²⁻
O ₃	NaNO ₂	Na ₂ CO ₃ +NaHCO ₃	NO ₃ ⁻
NH ₃	H ₃ PO ₄	去离子水	NH ₄ ⁺
BTEX	活性炭	CS ₂	BTEX

1.2 样品分析方法

将采集 NO₂、SO₂、O₃ 和 NH₃ 的被动采样器恢复至室温后注入 5 mL 萃取液(表 1),萃取 1 h,使吸收膜上的化学物质与萃取液充分反应.萃取液用美国戴安(Dionex)公司生产的 ICS-90 离子色谱仪分析,检测目标物质见表 1.NH₄⁺ 和 NO₂⁻ 最低检测限均小于 0.01 μg·m⁻³,NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 最低检出限均小于 0.03 μg·m⁻³.萃取 BTEX 时使用玻璃注射器将 3 mL CS₂注入样品,静置萃取 6 h 后用移液枪转移 1.5 mL 萃取液至样品瓶中封存;分析时用微量注射器取 1.5 μL 萃取液注射到气相色谱-质谱仪(GC-MS)进行定量分析,检出限及方法验证见参考文献[23].

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 Benzene 和 NO₂浓度的垂直廓线

图 1 为 2009 年 2 月观测期间苯和 NO₂ 的浓度垂直廓线.从图 1 可以看出,苯和 NO₂ 浓度的垂直分布相似:在 100 m 范围内均呈现上升趋势,在 120 m 高度出现最大值(分别是 14.3 μg·m⁻³和 97.3 μg·m⁻³),然后持续降低至 200 m.两者的不同之处在于:在 200—320 m 之间,苯的浓度缓慢上升,但 NO₂ 呈现持续下降趋势.另外,320 m 处苯的浓度值与 8 m 处相近,而 NO₂ 浓度在 320 m 处低于 8 m.

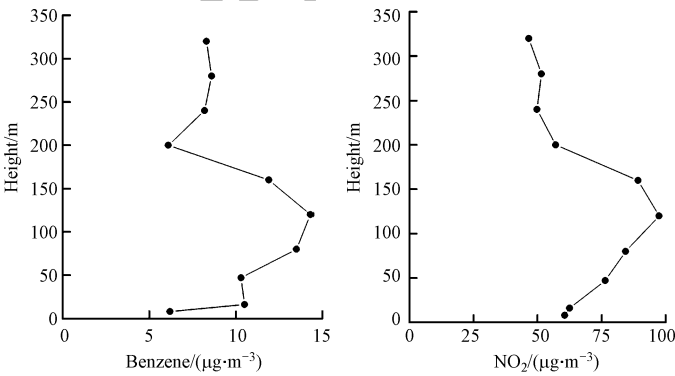


图 1 2009 年 2 月苯和 NO₂ 浓度垂直廓线

Fig.1 Vertical distribution of benzene and NO₂ concentrations in February 2009

本研究的 NO₂ 浓度廓线与 2001 年 1—3 月在该气象铁塔的廓线观测结果相似,但 2001 年 NO₂ 浓度峰值出现在 80 m 处^[14],而本研究出现在 120 m 处,这可能与不同观测时段逆温层出现的高度有关.另外,2001 年的研究未在 120 m 高度进行观测,也可能未捕捉到此高度上的浓度峰值.

对于苯的浓度廓线,2005 年 9—10 月于该塔 8、32、140、280 m 高度进行了观测分析,发现苯浓度随高度的增加先降低后增加,与本研究结果不一致^[12].由于 2005 年只设置了 4 个高度,垂直分层较少,可能难以全面反映污染物浓度的垂直变化.

2.2 O₃、SO₂ 和 NH₃ 浓度的垂直廓线

图 2 为 O₃、SO₂ 和 NH₃ 的浓度垂直廓线.从图 2 可以看出,O₃、SO₂ 和 NH₃ 浓度垂直分布有相似的变化趋势,但这种变化趋势与苯和 NO₂ 不同,最大的差异在于峰值浓度出现的高度:O₃、SO₂ 和 NH₃ 出现在

160 m,而苯和 NO₂则在 120 m.从图 2 看出,O₃、SO₂和 NH₃浓度在 160 m 范围内随着高度的增加而增加,但在 160—200 m 之间迅速降低.在 250 m 以上,O₃、SO₂和 NH₃浓度都有波动,但变化幅度相对较小,呈现混合均匀的状态.另外,SO₂和 NH₃在 280 m 处的浓度与 8 m 处的浓度值接近,而 O₃在 8 m 的浓度显著低于 280 m.

本研究 SO₂浓度廓线与 2001 年 1—3 月于该气象铁塔研究的廓线规律基本一致,但 2001 年观测的峰值浓度出现在 80 m^[14],而本次在 160 m,这与前面 NO₂的差异相似.2004 年秋天在该塔 8、47、120、280 m 的 4 个高度也进行了观测,发现 SO₂浓度由上向下递减^[15],这与本研究的规律不同,原因可能来自 2004 年观测高度设置较少以及气象条件的差异.

关于 O₃的垂直分布观测较多.2000 年夏季和 2004 年秋季在该气象铁塔 8、120、280 m 的 3 个不同高度进行了观测,发现 O₃浓度皆是随着高度的增加而增加^[13].另外,2007—2008 年于天津气象观测塔 40、120、220 m 的 3 个高度的监测也发现 O₃浓度随着高度的增加而增加^[24].这些结果与本研究不一致,可能与观测高度的设置密度有关.另外,1990 年于上海观测到 O₃浓度在 52 m 以下随着高度而增加^[25],与本研究 60 m 以下廓线变化规律相对一致.

关于 NH₃的垂直廓线研究非常少.1989 年在上海 3 个高度连续 20 d 的观测发现 NH₃浓度 18 m > 1.5 m > 52 m^[18],该研究垂直分层较少,难以捕捉到较为完整的近地层 NH₃廓线分布特征.本研究首次给出了北京地区近地层 NH₃廓线分布特征,发现其在 50—100 m 高度内富集,佐证了城市 NH₃主要来自局地而非区域农业源排放的观点^[19].未来有必要深入开展 NH₃廓线研究,不仅有助于理解城市 NH₃的垂直分布和形成机制,也可作为卫星反演近地层 NH₃浓度提供验证资料.

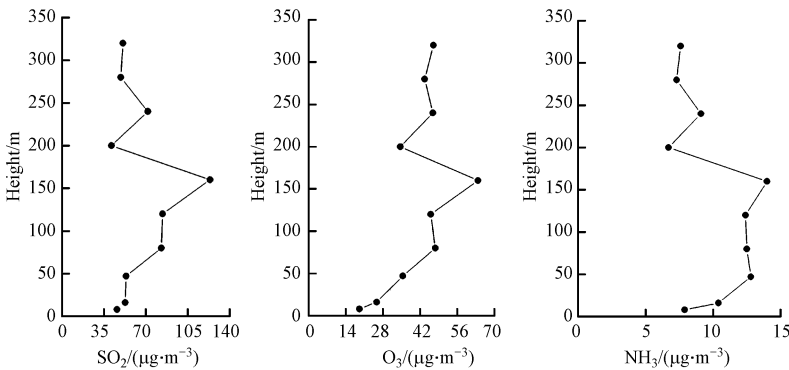


图 2 2009 年 2 月 O₃、SO₂和 NH₃浓度垂直廓线

Fig.2 Vertical distribution of O₃, SO₂ and NH₃ concentrations in February 2009

2.3 苯系物浓度的垂直廓线

图 3 为甲苯、乙苯、二甲苯 (包括 *M*-xylene、*O*-xylene 和 *P*-xylene) 和 BTEX 的浓度垂直廓线.从图 3 中看出它们的变化特征比较相似:从地面开始,大气浓度随着高度的增加而增加,并在 80 m 处达到峰值.在高度 80—200 m 范围内,浓度随着高度的增加而降低;200 m 以上,它们的浓度变化幅度较小.另外,甲苯、二甲苯和 BTEX 的浓度在 320 m 与 8 m 的差距很小;而乙苯的浓度在 320 m 处低于 8 m,类似于 NO₂.2005 年 9—10 月于该气象铁塔 8、32、140、280 m 等 4 个高度的观测了甲苯、乙苯和二甲苯浓度,发现它们的浓度在清洁天随着垂直高度的增加而下降,而在霾污染天先降低后增加^[12].

2.4 大气污染物垂直分布特征及形成原因

通过上面分析得知,320 m 高度内,不同大气污染物的垂直廓线特征相似:1) 浓度都是从近地面开始逐渐上升,在某一高度到达峰值后开始下降;2) 200 m 以上,大气污染物浓度的垂直变化幅度相对较小;3) 200 m 以下,污染物浓度的变化比较剧烈,不同污染物浓度的极大值均在此高度范围内出现(O₃、SO₂和 NH₃位于 160 m;苯和 NO₂出现在 120 m;甲苯、乙苯和二甲苯在 80 m 处).影响近地层污染物垂直廓线分布的主要原因如下.

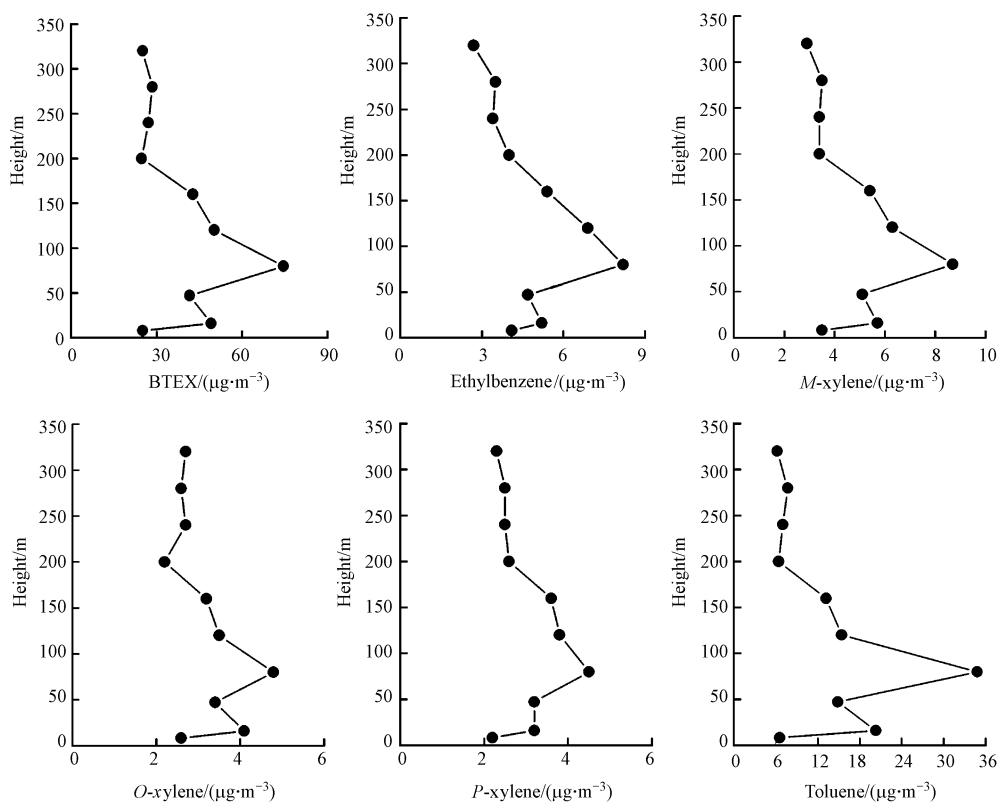


图 3 2009 年 2 月 BTEX、乙苯、二甲苯和甲苯浓度垂直廓线
Fig.3 Vertical distribution of BTEX, ethylbenzene, xylene and toluene concentrations in February 2009

2.4.1 气象因子

逆温层会限制污染物的扩散,进而影响近地层污染物的垂直分布^[4].当逆温层形成时,大气层结稳定,扩散能力较弱,污染物堆积在该层结中不易扩散,从而造成污染物高浓度值^[26].对 325 m 气象铁塔气温垂直廓线统计后发现,观测期间污染物浓度垂直廓线和逆温层分布有明显关系.图 4 给出了采样期间的日平均温度廓线,可以看出观测初期在多个高度均存在逆温层,2 月 10 日近地面(8—32 m)出现了浅薄较强逆温层(持续至 12 日消失),同时在 100—240 m 和 280—320 m 分别短暂出现了较深厚的强逆温层和较弱逆温层;2 月 11 日在高度 47—80 m 和 100—120 m 处均存在弱的逆温层;观测中期 2 月 16 日在 65—100 m 和高层 240—280 m 均存在较弱的逆温层;2 月 17 至 20 日在 160—180 m 一直存在浅薄的弱逆温层;观测后期 2 月 21 日和 25 日在 80—100 m 和 240—280 m 均存在浅薄的弱逆温层;2 月 23 日则在 160—180 m 出现浅薄的弱逆温层.对比图 1—4,可以看出污染物垂直廓线的浓度峰值均落在逆温层出现的高度范围内.此外,观测期间 200 m 高度以上较大的风速(图 5)有利于污染物的扩散,导致污染物浓度较低且呈现混合均匀状态.

2.4.2 其它影响因素

冬季建筑屋顶对城市摩擦副层的冷却作用会抑制冠层内污染物向上的扩散,也会导致污染物在冠层内的累积.气象铁塔附近城市冠层高度约 50 m^[27],而摩擦副层的高度约 120 m^[13].因此,在城市冠层动力和热力作用下,近地层排放的大气污染物恰好富集在 80—120 m 高度内.

另外,排放源高度对污染物浓度的垂直分布也有一定影响.典型供热锅炉的烟囱一般高 80 m,烟气的抬升高度可达 180 m^[28],这可能是造成 SO₂ 浓度峰值出现在高度 160 m 处的原因.对于 BTEX 而言,除了燃煤排放,机动车尾气、生物质的燃烧和溶剂挥发等均有一定贡献^[29],这些排放源的高度低于烟囱,造成 BTEX 累积在 80—120 m 的范围内.

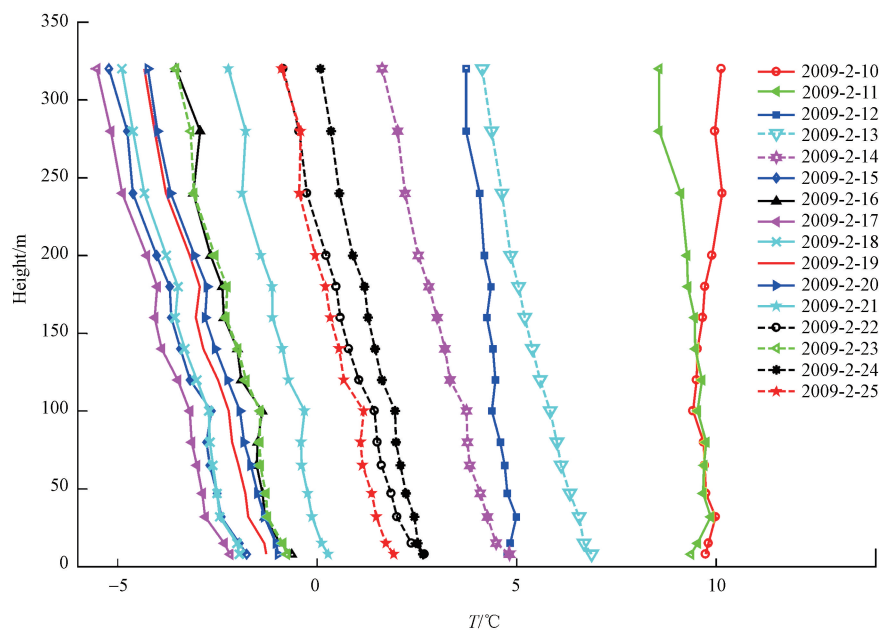


图 4 2009 年 2 月温度垂直廓线
Fig.4 Vertical distribution of temperature in February 2009

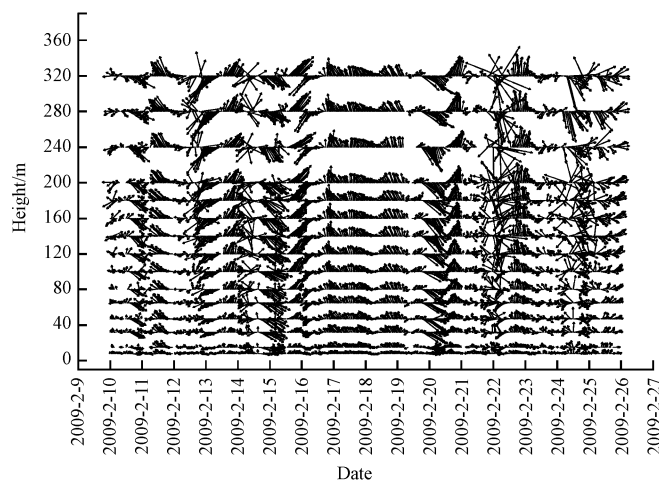


图 5 2009 年 2 月风速风向垂直分布
Fig.5 Vertical distribution of the wind speed and direction in February 2009

3 结论 (Conclusion)

2009 年 2 月在北京 325 m 气象铁塔布设 10 个高度利用被动采样器对气态污染物 SO₂、NO₂、O₃、NH₃和 BTEX 浓度进行了 16 d 的同步观测,发现北京城区冬季污染物浓度的垂直分布具有明显的分层现象,8 种污染物浓度在 320 m 高度内具有 3 个相似的廓线分布规律:1) 污染物浓度从近地面开始逐渐上升,在 200 m 以内的某一高度到达峰值后逐渐下降;2) 200—300 m 范围内,大气污染物浓度的垂直变化幅度相对较小,浓度值与地面接近;3) 200 m 以下各种污染物浓度的变化比较剧烈,浓度的极大值均在此高度范围内出现.8 种污染物在近地层的峰值浓度出现在不同高度,其中 O₃、SO₂和 NH₃峰值位于 160 m;苯和 NO₂在 120 m;甲苯、乙苯和二甲苯则在 80 m 处.大气污染物在 80—200 m 高度内累积可能与污染源排放高度、城市冠层的热力/动力作用和逆温层等气象因素有关,区分这些因素的各自贡献还需进一步研究.

致谢:感谢中国科学院大气物理研究所 325 m 气象铁塔研究组提供气象资料.

参考文献 (references)

- [1] 王思源,邵敏,王玮.北京市大气中 VOCs 垂直分布的航测研究[J].中国环境科学,2009,29(7):679-684.
WANG S Y, SHAO M, WANG W. The measurement of vertical distribution of airborne VOCs mixing ratios in Beijing[J]. China Environmental Science, 2009, 29(7): 679-684(in Chinese).
- [2] 汤大钢,刘红杰.中国华北地区冬季大气污染物航空测量(I):空中气态污染物污染特征研究[J].环境科学学报,2000,13(1):6-9.
TANG D G, LIU H J. Aircraft measurement of atmospheric pollutants in winter in North China(I): Research on pollution properties of gaseous pollutants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 13(1): 6-9(in Chinese).
- [3] 陈鹏飞,张蕾,权建农,等.北京地区 3500 m 高空内污染物的时空分布特征[J].中国环境科学,2012,32(10):1729-1735.
CHEN P F, ZHANG Q, QUAN J N, et al. Temporal and spatial distribution of atmospheric pollutants by aircraft sounding in 3500 m altitude of Beijing Area[J]. China Environmental Science, 2012, 32(10): 1729-1735(in Chinese).
- [4] 卞林根,程彦杰,王欣,等.北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究[J].应用气象学报,2002,13(S1):13-25.
BIAN L G, CHENG Y J, WANG X, et al. Observational study of wind and temperature profiles of urban boundary layer in Beijing winter[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(S1): 13-25(in Chinese).
- [5] VILLENA G, KLEFFMANN J, KURTENBANCH R et al. Vertical gradients of HONO, NO_x and O₃ in Santiago De Chile[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(23): 3867-3873.
- [6] 张宁,蒋维楣.建筑物对大气污染物扩散影响的大涡模拟[J].大气科学,2006,30(2):212-220.
ZHANG N, JIANG W M. A Large eddy simulation on the effect of building on atmospheric pollutant dispersion[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(2): 212-220(in Chinese).
- [7] 苗世光,蒋维楣,胡非,等.建筑物分布对市区流场及污染物扩散影响的数值模拟[J].气象科学,2004,24(2):137-144.
MIAO S G, JIANG W M, HU F, et al. Numerical simulation of the impact on meteorology and pollutant diffusion of urban area by building distribution[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2004, 24(2): 137-144(in Chinese).
- [8] SUN Y, DU W, WANG Q et al. Real-time characterization of aerosol particle composition above the urban canopy in Beijing: Insights into the interactions between the atmospheric boundary layer and aerosol chemistry[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11340-11347.
- [9] HURST D F, BAKWIN P S, MYERS R C et al. Behavior of trace gas mixing ratios on a very tall tower in North Carolina[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(D7): 8825-8835.
- [10] 徐宏辉,王跃思,温天雪,等.北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J].环境化学,2007,26(5):675-679.
XU H H, WANG Y S, WEN T X, et al. Size distributions and vertical distributions of metal elements of atmospheric aerosol in Beijing[J]. Environment Chemistry, 2007, 26(5): 675-679(in Chinese).
- [11] 王喜全,王自发,郭虎.城市边界层温度廓线及特征的季节变化[J].科学通报,2009,54(7):954-958.
WANG X Q, WANG Z F, GUO H. Seasonal variation of the temperature profile and its characteristics within urban roughness sublayer[J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54(7): 954-958(in Chinese).
- [12] MAO T, WANG Y S, JIANG J et al. The vertical distributions of VOCs in the atmosphere of Beijing in autumn[J]. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 97-108.
- [13] 刘烽,陈辉, Liu Y G. 北京市夏季低层大气 NO_x、O₃ 垂直分布观测研究[J]. 中国海洋大学学报, 2002, 32(2): 179-185.
LIU F, CHEN H, LIU Y G. Study on the vertical observations of NO_x and O₃ in the low level of ABL in Beijing area[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(2): 179-185(in Chinese).
- [14] 孟昭阳,丁国安,于海青,等.北京北部城区 SO₂ 和 NO₂ 浓度垂直分布特点初探[J].应用气象学报,2002, S1(z1): 109-112.
MENG Z Y, DING G A, YU H Q, et al. The preliminary research on the concentration vertical distribution of SO₂ and NO₂ in the northern part of Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, S1(z1): 109-112(in Chinese).
- [15] 孙扬,王跃思,刘广仁,等.北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析[J].环境科学,2006,27(3):408-414.
SUN Y, WANG Y S, LIU G R, et al. Analysis for vertical profile of atmospheric SO₂ during air seriously polluted days in Beijing[J]. Environment Science, 2006, 27(3): 408-414(in Chinese).
- [16] 修天阳,孙扬,宋涛,等.北京夏季灰霾天臭氧近地层垂直分布与边界层结构分析[J].环境科学学报,2013,33(2):321-331.
XIU T Y, SUN Y, SONG T, et al. The vertical distribution of ozone and boundary layer structure analysis during summer haze in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(2): 321-331(in Chinese).
- [17] SUN Y L, DU W, WANG Q Q, et al. Real-time characterization of aerosol particle composition above the urban canopy in Beijing: Insights into the interactions between the atmospheric boundary layer and aerosol chemistry[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11340-11347.

- [18] 徐家骝,朱毓秀.大气中四种污染物的垂直梯度观测及其与气象参数关系[J]. 上海环境科学,1991,10(9):21-25.
XU J L,ZHU Y X.Analysis on vertical gradient measurement of air pollutants and their relation with meteorological factors[J].Shanghai Environment Sciences, 1991, 10(9): 21-25(in Chinese).
- [19] PAN Y P, TIAN S L, LIU D W, et al. Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: Evidence from ^{15}N -stable isotope in size-resolved aerosol ammonium[J]. Environmental Science & Technology, 2016,50 (15), 8049-8056.
- [20] 吴丹,王跃思,潘月鹏,等. 被动采样法观测研究京津冀区域大气中气态污染物[J]. 环境科学,2010,31(12):2844-2851.
WU D,WANG Y S,PAN Y P,et al.Application of passive sampler to monitor and study atmospheric trace gases in Beijing-Tianjin-Hebei area[J].Environment Science,2010, 31(12):2844-2851(in Chinese).
- [21] PAN Y P, WANG Y S, TANG G Q, et al. Wet and dry deposition of atmospheric nitrogen at ten sites in Northern China[J].Atmospheric Chemistry and Physics 12 (14), 6515-6535.
- [22] 洪钟祥. 北京 325 m 气象塔的测量系统[M].北京:科学出版社,1981.
HONG Z X.Beijing 325 meter weather tower measure system [M].Beijing:Science Press,1981(in Chinese).
- [23] 王跃思,孙扬,徐新,等. 大气中痕量挥发性有机物分析方法研究[J]. 环境科学,2005,26(4):18-23.
WANG Y S,SUN Y,XU X,et al.Measurement method research on trace volatile organic compounds in atmosphere[J]. Environment Science,2005, 26(4):18-23(in Chinese).
- [24] 黄鹤,孙玖玲,刘爱霞,等. 天津城市大气污染物浓度垂直分布特征[J]. 环境科学学报,2009,29(12):2478-2483.
HUANG H,SUN M L,LIU A X,et al.Vertical distribution of air pollutants in the atmosphere in Tianjing[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(12): 2478-2483(in Chinese).
- [25] 朱毓秀,徐家骝. 近地层臭氧及氮氧化物的垂直梯度观测及其和气象的关系[J]. 气象学报,1993,51(4):499-504.
ZHU Y X,XU J L.Measurement of vertical gradients of O_3 and NO_x and their relationships with meteorological factors[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1993, 51(4): 499-504(in Chinese).
- [26] 张蕾,赵淑艳,金永利. 北京地区低空风、温度层结对大气污染物垂直分布影响初探[J]. 应用气象学报,2002,13(S1): 153-159.
ZHANG Q,ZHAO S Y,JING Y L.A Preliminary study of impacts of wind in low level and temperature stratification on vertical distribution of atmospheric pollutants in beijing area[J].Journal of Applied Meteorological Science,2002, 13(S1): 153-159(in Chinese).
- [27] 胡非,程雪玲,赵松年,等. 城市冠层中温度脉动的硬湍流特性和相似性级串模型[J]. 中国科学,2005,35(S1):66-72.
HU F,CHENG X L,ZHAO S N,et al.Temperature fluctuation in the turbulence properties of hard and similarity model of the string in Urban canopy [J].Science in China, 2005, 35(S1): 66-72(in Chinese).
- [28] 陈瑞. 城市高架点源对空气质量的影响分析[J]. 浙江树人大学学报:人文社会科学版,2003,3(5):77-79.
CHEN R.Effect of high chimney emission on air quality in the urban area[J].Journal of Zhejiang Shuren University, 2003, 3(5): 77-79 (in Chinese).
- [29] 曹函玉,潘月鹏,王辉,等. 2008-2010年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O_3 生成潜势[J]. 环境科学,2013, 34(6):2065-2070.
CAO H Y,PAN Y P,WANG H,et al.Concentrations and ozone formation potentials of BTEX during 2008-2010 in urban Beijing, Ching[J]. Environment Science,2013, 34(6):2065-2070(in Chinese).