

# 北京市大气污染治理现状及面临的机遇与挑战\*



王跃思<sup>1</sup> 宋涛<sup>1</sup> 高文康<sup>1</sup> 吉东生<sup>1</sup> 王莉莉<sup>1</sup> 姚利<sup>1</sup> 李昕<sup>1,2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所 北京 100029

2 北京市门头沟区政府 北京 102300

**摘要** “大气十条”实施以来，全国城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度呈下降趋势，预期能够实现国家规定的 2017 年空气质量改善目标。若按现有力度措施，北京市 2017 年  $\text{PM}_{2.5}$  浓度达到年均值  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右的目标难以实现，同时臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 污染迅速抬头。未来两年必须下决心采取超常规措施破解北京大气污染防治中的若干难点问题，才能突破大气污染治理瓶颈，达到预定目标。

**关键词**  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{O}_3$ , 治理, 挑战, 北京

## 1 北京市空气质量改善情况

### 1.1 $\text{PM}_{2.5}$

据中科院站点长期观测，北京市近 12 年  $\text{PM}_{2.5}$  的年平均值为  $92.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2006 年  $\text{PM}_{2.5}$  年均值最高，达到  $110.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，此后  $\text{PM}_{2.5}$  浓度逐年下降，平均每年下降  $3.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。综合环保部和北京市 2013 年以来公布的数据，以 2015 年北京市  $\text{PM}_{2.5}$  年均值  $80.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  为基准，如按目前下降速度，预计北京市在 2021 年以后才能达到  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右的年均值。

最近 3 年，即 2013—2015 年，全国 74 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度总体呈下降趋势，京津冀、长三角、珠三角和成渝地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分别下降了 27.4%、20.9%、27.7% 和 27.7%。北京市从  $89.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  降至  $80.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，仅下降 9.9% (图 1)。

2015 年北京  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度为  $80.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，为全国 31 个省市自治区直辖市年均值之首位 (与河南省  $80.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  相当)，全国 338 个地级及以上城市有 24 个城市年均值高于北京 (除去受自然沙尘影响严重的新疆和田、喀什和克城)，而且均分布在北京偏南区域的河北、河南和

\*项目资助：北京市科技计划“京津冀地面臭氧污染来源与控制策略研究”，中科院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB05020000)

修改稿收到日期：2016 年 7 月 28 日

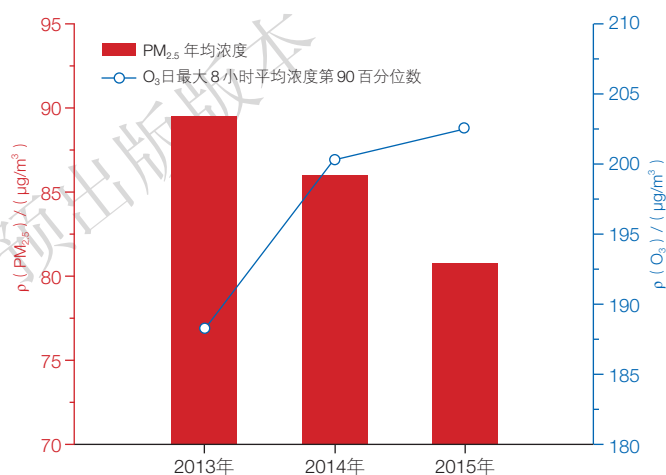


图1 2013—2015年北京PM<sub>2.5</sub>年均浓度和O<sub>3</sub>日最大8小时平均浓度第90百分位数

山东3省,其中与北京西南部接壤的河北保定市为京津冀及周边地区最高城市,2015年PM<sub>2.5</sub>年均值为107 μg/m<sup>3</sup>,高出北京33%;省会城市石家庄、郑州和济南2015年的PM<sub>2.5</sub>年均值分别为89 μg/m<sup>3</sup>、96 μg/m<sup>3</sup>和90 μg/m<sup>3</sup>,分别高出北京10%、19%和12%。与北京东南部接壤的河北廊坊PM<sub>2.5</sub>年均值也比北京高5%以上。北京周边区域高浓度的细颗粒物对北京重霾污染形成具有重要影响,但这一影响一直在被低估<sup>[1,2]</sup>。

从观测数据分析,北京市大气PM<sub>2.5</sub>下降缓慢的原因有两个。(1)冬季PM<sub>2.5</sub>污染未得到有效控制。近3年冬季浓度一直高于其他3个季节平均浓度的20%左右,并且近10年来一直呈上升趋势,平均每年上升1.3 μg/m<sup>3</sup>;(2)PM<sub>2.5</sub>导致的重霾污染天数减少缓慢。2015年,北京市共发生重度、严重污染31天次、15天次,与2014的32天次、15天次基本持平;比2013年45天次、13天次相比,重污染减少了14天,但严重污染天数增加了2天。2015年,全国重度及以上污染天数超过30天的有13个城市,北京位居7位,而其他6个城市也在北京偏南区域,包括保定、廊坊、石家庄、郑州和济南等。

北京2015年共发生46天次重度及严重污染,其中冬季22天、秋季13天、春季8天和夏季1天,分别占50.0%、29.5%、18.2%和2.3%。与全国大多数城市相比有所不同的是,北京不仅冬季PM<sub>2.5</sub>污染严重,而且秋季

污染也十分严重,“秋高气爽”和“金秋十月”已经成为北京的回忆。造成北京秋季重霾锁城的重要客观原因之一是风速减小。2006—2015年北京全年风速波动下降显著,平均每年下降0.03 m/s,其中北风风速平均每年下降0.028 m/s;风频统计显示大于2 m/s的南风 and 北风频次显著下降,而弱风(风速≤2 m/s)频次显著增加。仅秋季,近10年平均风速每年下降0.028 m/s,主要缘于弱风(≤2 m/s)频次从70%上升至79%,并且弱风中南风频次显著增加,北风频次显著减小。

而主观原因除了整个区域巨大的工业排放基数外,北京偏南区域秋收换播季节秸秆燃烧起到了推波助澜的作用<sup>[3]</sup>。对近年来北京及京津冀秋季重霾污染形成过程的机理研究表明,高架源的高排高放和大面积的秸秆燃烧造成大量细颗粒物的排放,在弱偏南风或静风的气象条件下,污染水平扩散微弱,弥漫在大气较高层中的原始排放颗粒物造成对阳光的散射和吸收,一方面耗散辐射能量造成上部空气升温,另一方面阻挡了部分太阳辐射到达地面造成地面温度下降,更易形成稳定的大气边界层逆温结构。这个逆温层就像一个“大罩子”罩住了京津冀城市群,造成局地污染排放难以对流扩散,并且“大罩子”中的各种化学物质相互反应,生成了大量新的粒子——“二次颗粒物”。不难想象,此时哪里的地面污染源排放越多,哪里的空气污染就会越加严重。北京的机动车排放污染最多,因此重度污染红色预警时停驶部分机动车能在一定程度上缓解大气污染的严重程度。但这一秋季重污染形成的始作俑者却是区域高架源和秸秆燃烧。作为应急措施可以停驶部分机动车辆,但从根本上解决污染问题必须从区域联防联控着手,消减大型点源和面源污染的原始排放量。

卫星资料显示,2013—2015年,全国NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>垂直柱浓度年均值总体呈下降趋势,与地面监测数据分析结果一致,气溶胶光学厚度(AOD)呈现波动变化。北京市NO<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>柱总量分别下降15%和48%,卫星观测

的北京大气 AOD 2014 年比 2013 年增加 9%，2015 年又降至 2013 年水平。地面遥测 AOD 变化与卫星观测值总体趋势一致，但绝对值高于卫星观测值，其原因是由于探测技术的局限性，卫星观测 AOD 结果有效值的平均低于实际的 20%—30%，有些地区的观测偏差更大（如四川盆地）。卫星 AOD 数据仅能作为地面观测数据趋势判断的一个参考。

北京市  $\text{PM}_{2.5}$  治理初见成效，但 2017 年难以达到  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，有当初对治理进程过于乐观的估计，也有治理过程中难以预料的难题，尤其是区域协同治理的问题，其对北京重霾污染过程形成的作用一直在被低估。例如，不能仅从近地面  $\text{PM}_{2.5}$  的源解析结果判断北京周边高架工业源和生物质燃烧源对北京重霾形成的作用大小，其对整个区域大气边界层的影响和对大气污染物容量的降低作用一直在被低估，很可能影响到整个京津冀及周边区域大气污染联合防控措施的制定和效果的评估，也有可能是北京“力气下的很大，但收效不显著”的重要原因。

## 1.2 臭氧 ( $\text{O}_3$ )

全国城市大气  $\text{O}_3$  问题日渐显现。2015 年，全国 74 个重点城市  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数在 95— $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均为  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2013 年上升 7.9%；超标城市由 2013 年的 17 个升至 2015 年的 28 个，超标城市的比例达 37.8%，升高 14.8 个百分点。与 2014 年相比，2015 年 161 个城市  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数上升了 3.6%，日均值超标天数上升了 0.8 个百分点，超标城市增加了 9 个。

北京大气  $\text{O}_3$  问题更为严峻。2015 年，北京大气  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数为  $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2014 年、2013 年的  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$  分别上升 1.5% 和 8.0%（图 1、图 2）；以  $\text{O}_3$  8 小时日最大浓度为指标，2013—2015 年北京大气  $\text{O}_3$  8 小时日最大浓度分别为  $267 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $311 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $283 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。近 3 年北京大气  $\text{O}_3$  浓度水平高、增长速度快，并且以  $\text{O}_3$  为首要污

染物污染天数也持续增加。2015 年，北京以  $\text{O}_3$  为首要污染物污染天数为 56 天，较 2014 年、2013 年的 50 天和 43 天分别上升 12% 和 30%；同样，2015 年北京  $\text{O}_3$  超标天数为 69 天，较 2014 年的 59 天上升 17%。北京大气颗粒物污染严重，但相对周边城市浓度水平并不是最高； $\text{O}_3$  污染则不同，不但夏季超标天数多，而且浓度水平在京津冀乃至全国均处最高水平。2013—2015 年，无论是  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数还是  $\text{O}_3$  8 小时日最大浓度，北京均是京津冀区域内浓度水平最高的城市，分别较区域平均浓度水平高 23% 和 16%，相应地，北京也是京津冀地区以  $\text{O}_3$  为首要污染物污染天数和  $\text{O}_3$  超标天数最多的城市，分别较区域平均天数高 73% 和 102%。与国内其他城市相比，北京大气  $\text{O}_3$  浓度除 2013 年低于济南的  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$  外，2014 年和 2015 年北京大气  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数均为全国 74 个重点城市之最。

北京大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度呈现冬秋季“高”，夏春季季节低；而  $\text{O}_3$  在“春末-夏季-秋初”都会出现超标的“高”值。“双高”污染的反季节出现，造成全市居民全年均生活在较差质量的空气环境中（图 2）。2016 年上半年，北京入夏以来  $\text{O}_3$  污染高值频现，将北京市空气质量拖入了全国地级及以上城市（338 个）空气质量排名的后 10 名。

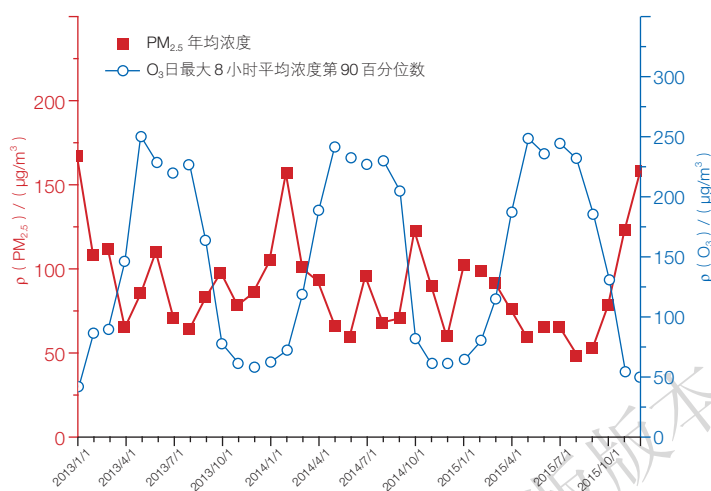


图 2 2013—2015 年  $\text{PM}_{2.5}$  月平均浓度和  $\text{O}_3$  日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数

中科院大气物理所 2006—2015 年长期定点观测显示, 北京大气  $O_3$  前体物之一, 挥发性有机物 ( $VOC_s$ ) 总浓度 ( $TVOC_s$ ) 最近 10 年平均为 31.4 ppbv, 其中烷烃所占比例 (39%) 最高, 其次是芳香烃 (26%)、烯烃 (13%) 及卤代烃等 (24%);  $TVOC_s$  呈波动缓慢下降趋势, 平均每年下降 0.46 ppbv, 烷烃下降明显, 但活性更强的芳香烃和烯烃呈上升趋势。最近 3 年, 即 2013—2015 年, 3 类  $VOC$  均呈显著上升趋势, 与北京大气  $O_3$  总体上升趋势具有一致性。

北京夏季大气  $O_3$  污染治理面临极大的挑战, 同时也为北京市大气污染全方位治理带来了机遇。 $O_3$  浓度持续升高的原因首先在于  $O_3$  前体物未能得到合理控制<sup>[4]</sup>, 此外颗粒物浓度下降, 大气紫外辐射恢复增强,  $O_3$  产生率也会有所提高。解决的途径仍然是源头减排, 减少  $O_3$  前体物向大气中排放。目前多数研究结果表明, 我国城市区域的  $O_3$  浓度水平均为  $VOC_s$  所控制<sup>[5,6]</sup>, 要极大消减  $VOC_s$  才能遏制不断增长  $O_3$  污染, 同时要等比消减  $NO_x$  排放, 才能最终使空气  $O_3$  浓度达标。目前我国  $O_3$  标准与  $PM_{2.5}$  标准采用的是 WHO (世界卫生组织) 不同阶段的标准,  $O_3$  标准已经与发达国家标准基本接轨, 但  $PM_{2.5}$  标准采用的仅是 WHO 第一阶段目标值, 如果采用 WHO 指导值作为标准, 则北京在  $O_3$  作为首要污染物的超标天,  $PM_{2.5}$  往往也超标。因此, 要正确理解目前北京夏季  $O_3$  超标现象,  $O_3$  作为首要污染物超标, 并不意味着  $PM_{2.5}$  治理有了显著的效果、不用再治理了, 而是治理进入了更加复杂的僵持阶段, 必须将单一治理大气污染目标调整为多目标协同治理。因此, 现阶段在努力控制  $PM_{2.5}$  使其达到 2017 年阶段性目标 ( $60 \mu g/m^3$  左右) 的同时, 要协同控制日渐增长的大气  $O_3$  浓度。 $VOC_s$  中活性强的物质对  $O_3$  产生有更强的作用, 但活性低的物质可能直接导致  $PM_{2.5}$  中 OC (有机碳) 浓度的增加, 因此要全面源头减排;  $NO_x$  的消减可能造成某些区域  $O_3$  的阶段性浓度升高, 但其对大气中硝酸及硝酸盐的增加乃至二次有机气溶胶 (SOA) 的形成, 均具有极其重要的

作用<sup>[7,8]</sup>。因此, 建议北京大气污染防治策略, 应优先减排  $NO_x$ , 不能应其对  $O_3$  暂时性的增加影响而放松对  $NO_x$  的严格控制。对北京及我国  $O_3$  和  $PM_{2.5}$  协同控制的科学研究势在必行。在治理  $PM_{2.5}$  的同时, 兼顾  $O_3$  的治理, 双管齐下, 寻找突破口, 循序渐进, 科学综合治理, 才可能最终有效控制空气污染。

### 1.3 其他污染物

2015 年, 北京市大气  $SO_2$ 、 $NO_2$  和 CO 及  $PM_{10}$  浓度均已达到国家制定的 2017 年目标。但大气中  $VOC_s$ 、 $NH_3$  和 EC (元素碳) 浓度偏高, 变化趋势不稳定, 将成为进一步治理的挑战。预计 2030 年前后, 当我国碳排放出现拐点时,  $VOC_s$  和 EC 会出现全面持续下降; 而  $NH_3$  的问题, 不仅取决于农牧业的发展和管理, 也涉及到越来越多的工业  $NH_3$  排放。氨中 N 同位素研究表明, 北京在空气质量优良的天气条件下, 大气中  $NH_3$  主要来自于周边农牧业排放的传输, 而在重霾污染积累加强过程中,  $NH_3$  的主要来源则为机动车尾气和工业燃煤脱硝过程中的氨逃逸<sup>[9]</sup>。

北京市空气污染治理工作一直走在全国的前列, 工作扎实有效不反弹, 但“双高”污染给北京空气污染治理带来了前所未有的挑战, 同时也带来了极大的机遇, 如何突破治理瓶颈实现绿色北京的梦想, 是对政府部门领导、全市环保工作者和全市人民的考验。率先行动, 成功治理, 将给我国其他城市治理大气污染提供经验和样板。

## 2 建议采取的措施

(1) 结合冬季取暖燃烧过程管理, 最大限度地消减冬季重霾污染天数。治理散烧煤, 有条件地煤改电和有条件地限制机动车出行数量, 仍是北京降低冬季重霾污染程度的最有效措​​施; 加强对大气  $NH_3$  的来源研究, 尤其是工业脱硝  $NH_3$  逃逸和机动车尾气排放, 研究有效的控制技术方法。

(2) 优先控制  $NO_x$  的同时, 全面控制  $VOC_s$  排放



量。重点排放源包括机动车、加油站、工业喷涂、石化产业、印刷和有机溶剂使用等。实现 VOCs 的业务化观测，是减少夏季 O<sub>3</sub> 超标的<sup>1</sup>关键。

(3) 调控高架点源、高强度面源。研究区域高架点源（燃煤烟囱）和高强度面源（秸秆燃烧）排放的污染物对整个区域大气边界层结构的影响，特别是对北京大气混合层高度和大气容量的影响，提前预测预警，调控收获季节秸秆燃烧时间和燃烧量，加大秸秆的利用率，降低北京及区域秋季重霾污染爆发频次。

(4) 治理扬尘，保护植被。坚持不懈地治理道路扬尘、建筑工地扬尘和工业粉尘，重点保护北京西北广大区域水源涵养地的植被，并杜绝任何污染企业进驻，是保障北京地区春季空气污染逐步改善的重要方面。

(5) 精细规划，科学评估。加强科学研究的投入，对每一项环保措施进行效益评估，特别对预警措施的有效性进行科学评估，探索精确预报预警的可行性，在达到污染控制预期目标的同时，应尽可能地减少经济损失，尽可能地减少对社会正常秩序的扰动。需要政府部门更加精细化的工作。

(6) 加强科普宣传，提高公众环保意识，保障环保工作者的权益。鼓励环保科学工作者定期走进社区、学校和企事业单位进行环保科普知识讲解，宣传环保政策，传授简单易行的家庭环保技术方法。我国大气污染的治理进程、空气质量的改进速度，在某种程度上取决于公众公共环保意识的成长速度，取决于全民文化素养的全面提高。

### 参考文献

- 1 Li P F, Yan R C, Yu S C, et al. Reinstate regional transport of PM<sub>2.5</sub> as a major cause of severe haze in Beijing. PNAS, 2015, 112(21): 2739-2740.
- 2 Zheng G J, Duan F K, Su H, et al. Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(6): 2969-2983.
- 3 Huang R J, Zhang Y, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. Nature, 2014, 514(7521): 218-222.
- 4 Ou J, Yuan Z, Zheng J, et al. Ambient ozone control in a photochemically active region: short-term despiking or long-term attainment. Environmental Science & Technology, 2016, 50(11): 5720-5728.
- 5 Xue L K, Wang T, Gao J, et al. Ozone production in four major cities of China: sensitivity to ozone precursors and heterogeneous processes. Atmos Chem Phys Discuss, 2013, 13(10): 27243-27285.
- 6 Tang G, Wang Y, Li X, et al. Spatial-temporal variations in surface ozone in Northern China as observed during 2009–2010 and possible implications for future air quality control strategies. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(5): 2757-2776.
- 7 Pan Y, Wang Y, Zhang J, et al. Redefining the importance of nitrate during haze pollution to help optimize an emission control strategy. Atmospheric Environment, 2016, 141: 197-202.
- 8 Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(1): 14-25.
- 9 Pan Y, Tian S, Liu D, et al. Fossil fuel combustion-related emissions dominate atmospheric ammonia sources during severe haze episodes: Evidence from <sup>15</sup>N-stable isotope in size-resolved aerosol ammonium. Environmental Science & Technology, 2016, 50(15): 8049–8056

## The Challenge and Opportunity on Preventing and Controlling Air Pollution of Beijing

Wang Yuesi<sup>1</sup> Song Tao<sup>1</sup> Gao Wenkang<sup>1</sup> Ji Dongsheng<sup>1</sup> Wang Lili<sup>1</sup> Yao Li<sup>1</sup> Li Xin<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

<sup>2</sup> Mentougou District People's Government of Beijing Municipality, Beijing 102300, China )

**Abstract** In most China cities, fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentration has decreased after implementation of Air Pollution Prevention and Control Action Plan in past three years, and the goals of overall national air quality improvement listed in the plan is expected to be achieved by 2017. However, the specific goal of that PM<sub>2.5</sub> annual concentration in Beijing shall be controlled below 60 micrograms per cubic meter by 2017 is difficult to be accomplished. Meanwhile, ozone (O<sub>3</sub>) pollution is emerging quickly in Beijing. Regarding the present situation in air pollution in Beijing, a number of extraordinary measures of air pollution prevention and control must be carried out immediately during the next two years.

**Keywords** PM<sub>2.5</sub>, O<sub>3</sub>, air pollution control, challenge, Beijing

**王跃思** 中科院大气物理所研究员，博士生导师。1961年出生于北京，理学博士，大气化学专业。国家杰出青年基金和政府特殊津贴获得者。《Atmospheric Research》杂志副主编，最高人民法院环境资源审判咨询专家，北京市人民政府专家咨询委员会委员。主要从事大气化学与环境研究工作，发表学术论文350篇，创建实验观测技术系统获国家专利16项，获得国家科技进步奖二等奖3项。研究团队2010年获“中央国家机关五一劳动奖状先进集体”，2015年获“首都环境保护奖”。E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

**Wang Yuesi** Professor of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP-CAS), was born in 1961 in Beijing. Awarded as the outstanding young scholarship of NSFC, and the special government subsidy from the State Council. Associate editor of the journal *Atmospheric Research* and Expert consultant of Supreme People's Court for environmental resources. He is mainly engaged in atmospheric chemistry and environment sciences. He has published more than 350 articles and authorized 16 patents, and won three awards of second class prize of National Science and Technology Progress of China. His research group has been awarded "Advanced group for Labor Award of China's State organs" in 2010 and "Environmental protection certificate for the capital" in 2015. E-mail: wys@mail.iap.ac.cn