典型城市空气污染特征对比分析

燕　丽[1*]，杜小申[2]

（1.生态环境部环境规划院，北京 100012；2.郑州大学化学与分子工程学院，环境科学研究院，河南郑州 450001）

【摘　要】本文以聊城和宁波为典型城市案例，利用两市国家环境空气质量自动监测站监测数据以及环境质量公告数据，分析南北城市大气污染特征与影响因素差异，在此基础上，提出我国南北城市大气污染防治策略。结果表明：①2016年宁波市仅$\rho(PM_{2.5})$超出二级标准11%，$\rho(SO_2)$和$\rho(NO_2)$均已达标；2016年聊城市$\rho(SO_2)$低于二级标准，$\rho(NO_2)$仍超出二级标准2.5%，$\rho(PM_{2.5})$超出二级标准限值1.46倍。②聊城市空气污染呈现出煤烟型污染与机动车尾气污染共存的复合型大气污染特征，而宁波市空气质量呈现出明显的二次污染特征。③较低的经济发展水平是造成聊城市较高的污染物浓度以及较多的重污染天数的主观原因；而产业结构的差异是两市首要污染物不同的主观原因，地理位置与扩散条件差异是两市空气质量差异的客观原因。④建议今后在城市空气质量防治过程中，构建有针对性的城市大气污染防治策略，形成精细化管理的理念，积极开展“一市一策”研究。

【关键词】典型城市；污染特征；对比分析；防治对策

【中图分类号】X51　　【文章编号】1674-6252（2018）06-0092-007

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki 1674-6252. 2018.06.092

近年来随着世界工业化和城镇化进程的加快，化石燃料的大量消耗，一系列环境问题逐渐凸显出来[1-3]。有研究表明，过高的SO_2、NO_2、$PM_{2.5}$及PM_{10}浓度会提升人类循环系统和呼吸系统的发病率[4-8]。随着人们对空气质量状况的逐渐关注[9,10]，空气质量的改善已经成为当前亟需解决的关键问题。但我国地域广阔，各地空气污染特征差异大[11-14]，污染成因也不尽相同[15-19]，这给空气污染防治带来了诸多困难。聊城市为京津冀大气污染传输通道“2+26”城市之一，是典型的北方污染程度较重城市；而宁波市地处东南沿海，位于长三角南翼，是长江经济带126个城市之一，属于典型的南方空气质量相对较好的城市。国际环保组织绿色和平与上海闵行区青悦环保信息技术服务中心联合发布的《2016年中国366个城市$PM_{2.5}$浓度排名》中，聊城市的$PM_{2.5}$浓度排在第9位，而宁波市的$PM_{2.5}$浓度则位于第241位（排名按照$PM_{2.5}$浓度从高到低的顺序排列）。因此选取宁波市与聊城市为案例，分析南北城市空气污染特征与治理防治策略差异，具有重要意义。本文将从各项污染物浓度变化、首要污染物差异、重度污染变化、季节性特征以及污染类型等几个方面对聊城市和宁波市的空气污染状况进行研究，归纳产业结构、经济发展水平、地理位置与扩散条件等影响因素，进而得出南北城市在大气污染防治方面的重点问题与相应策略。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域概况

聊城市（115°16′E～116°32′E、35°47′N～37°02′N）位于山东省西部，是横跨冀、鲁、豫三省的最大交通物流枢纽，是山东省重要的工业城市，主要以有色金属和化工为支柱产业。聊城地处黄河故道，降尘量较大，属于温带季风气候区，具有显著的季节变化和季风气候特征，属半干旱大陆性气候。春季干旱多风，回暖迅速，光照充足，辐射强；夏季湿热多雨，雨热同步；秋季天高气爽，气温下降快，辐射减弱；冬季寒冷干燥，雨雪稀少，常有寒流侵袭。主要依靠燃煤供暖，全年供暖期为四个月（11月15日至次年3月15日）。

宁波市（120°55′E～122°16′E、28°51′N～30°33′N）地处东南沿海，位于中国大陆海岸线中段，属于典型的江南水乡兼海港城市，主要以化工、纺织服装和机械工业为三大支柱产业。宁波市地处宁波平原，纬度适中，属亚热带季风气候，温和湿润，四季分明。宁波市位于“秦岭—淮河”以南，无集中供暖期。

1.2 数据来源

聊城市和宁波市近年来年均$\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$、$\rho(PM_{2.5})$及$\rho(PM_{10})$数据分别来源于聊城市和宁波市2013—2016年空气质量公告。聊城市重度污染及首要污染物数据来源于聊城市环境保护局，聊城市各县（市）

基金项目：国家重点研发计划“全国和重点区域大气污染控制技术和政策路线图研究”（2016YFC0207505）；国家重点研发计划“中原城市群大气污染联防联控机制和整体技术方案研究”（2017YFC0212406）。

* 作者简介：燕丽（1977—），女，副研究员，博士，主要从事环境规划与管理、能源与环境政策研究，E-mail:yanli@caep.org.cn。

空气质量数据来源于聊城市环境保护局；宁波市重度污染及县（市）空气质量数据来源于宁波市 2013—2016 年空气质量公告，首要污染物数据来源于宁波市环境保护局。

2 环境空气质量现状

2.1 各项污染物浓度

以国家空气质量二级标准（以下简称二级标准）为依据判断两市历年大气污染物的达标情况，年均 $\rho(SO_2)$、$\rho(NO_2)$ 和 $\rho(PM_{2.5})$ 二级标准值分别为 60μg/m^3、40μg/m^3 和 35μg/m^3。2013—2016 年两市各项污染物浓度见图 1，可见 2013—2016 年两市各项污染物年均浓度均呈下降趋势。2016 年聊城市 $\rho(SO_2)$ 为 31μg/m^3、$\rho(NO_2)$ 为 41μg/m^3，较 2013 年分别下降 54% 和 24%，其中 $\rho(SO_2)$ 已低于二级标准限值，NO_2 浓度也已经趋近二级标准限值。而 NO_2 主要由化石燃料的利用以及机动车排放而来。聊城市机动车保有量大，尤其是重型货车保有量大，且呈逐年增长趋势，其对于聊城市氮氧化物排放贡献突出。此外，聊城市又是我国重要的交通枢纽，过境车辆对其贡献也不容忽视。可见随着聊城市城市化进程的加快和机动车保有量的增加，以金属冶炼业等重工业为主的工业结构和以燃煤为主的能源结构 [20] 尚未改善，当地逐步呈现出煤烟型污染与机动车尾气污染共存的复合型大气污染特征。2016 年聊城市 $\rho(PM_{2.5})$ 为 86μg/m^3，较 2013 年下降 34%，但仍超出二级标准限值 1.46 倍。

2016 年宁波市 $\rho(SO_2)$ 为 13μg/m^3、$\rho(NO_2)$ 为 39μg/m^3、较 2013 年分别下降 41% 和 11%，且均已低于二级标准限值。可见随着宁波市大气污染治理工作的大力开展，其传统煤烟型污染已得到有效控制。2016 年宁波市 $\rho(PM_{2.5})$ 为 39μg/m^3，超出二级标准 11%，但 $\rho(O_3)$ 近年来逐渐增高，尤其是夏季表现更为突出，2013 年 O_3 超标 17 天，2016 年 O_3 超标 26 天。对比两市污染物浓度差异，根据美国环境学家提出的环境库兹涅茨曲线理论 [21] 以及虞依娜等对中国环境库兹涅茨曲线研究进展的总结 [22]，本文认为两市经济发展水平的差异可能是造成两市污染物浓度差异较大的一个重要原因。

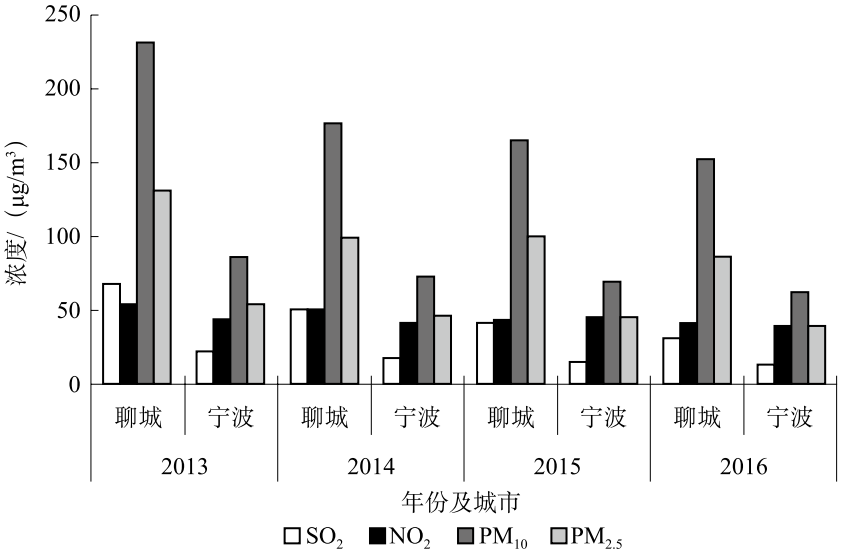

图 1　2013—2016 年两市 SO_2、NO_2、PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度对比

注：数据来自 2013—2016 年两市环境质量公告

2.2 首要污染物

近年来聊城市首要污染物天数变化见图 2。由图 2 可知，近年来聊城市以 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 为首要污染物的污染天数均呈下降趋势，而以 O_3 为首要污染物的污染天数逐年增加，2016 年聊城市以 O_3 为首要污染物天数上升至 84 天，占总污染天数的 23%，较 2013 年增长 15.8 倍。2016 年聊城市以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物天数共计 185 天，占总污染天数的 51%，可见近年来聊城市首要污染物仍然主要为 $PM_{2.5}$，而以 O_3 为首要污染物的污染天数虽然占比较小，但呈逐年增加态势。

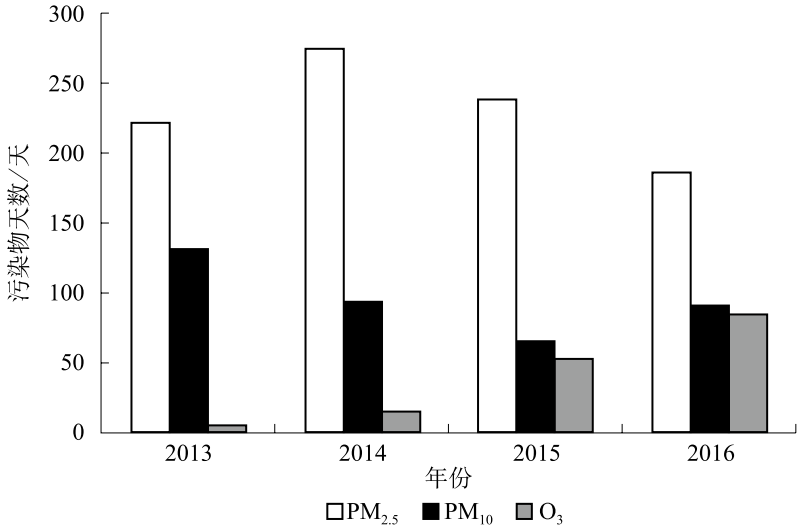

图 2　近年来聊城市首要污染物天数

注：数据来自聊城市环境保护局

近年来宁波市首要污染物见图 3，可见宁波市 2013 年与 2014 年的首要污染物主要以 $PM_{2.5}$ 为主，而 2015 年以来以 O_3 为首要污染物天数均大于

以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数，说明宁波市 O_3 污染问题已经逐渐凸显出来。而对流层 O_3 污染一般是由 VOC 及 NO_x 等前体物转化而来[23]，说明宁波市空气污染呈现出明显的二次污染特征。此外，通过对宁波市 VOC 排放清单的研究，发现化学原料及化学制品制造业中的合成材料制造是宁波市 2010 年 VOC 排放量最高的行业，占 VOC 总量的 18.6%，占工业源总排放的 30%，石油加工业中精炼石油产品的制造位于第二位，占 2010 年 VOC 总排放量的 13.1%，占工业源总排放的 21.1%[24]。可见，化学原料及化学制品制造业和石油加工业较多的 VOC 排放是宁波市 O_3 污染的主要原因。对比两市污染类型与主导产业差异，推断造成两市首要污染物不同的主要原因可能是两市产业结构的差异。

2.3 重污染天数

图 4 为近年来聊城市与宁波市重度污染及以上天数对比。聊城市位于黄河故道，常年风沙较大，秋冬季常发生重污染天气。不过自 2014 年以来，经过聊城市人民的不懈努力，重污染天数明显减少，尤其是严重污染天数明显减少，2016 年聊城市重污染天数为 36 天，较 2013 年下降 47%，严重污染天数为 4 天，较 2013 年减少 91%。同时，2016 年聊城市重度污染天数基数仍然较大，空气质量形势不容乐观；宁波市地理位置优越，且当地民众对于环境保护的意识较强，城市管理水平较好，空气质量相对较好，且呈逐年改善趋势。此外，宁波市自 2014 年起已无严重污染天气发生，2016 年已无重度污染天气发生。根据环境库兹涅茨曲线理论，两市这种重污染天数的差异可能也是两市经济发展水平不同，所处发展阶段的差异导致的。

2.4 季节性特征

聊城市空气质量状况呈现明显的季节性特征，如图 5 所示，2013—2016 年秋冬季 $\rho(PM_{2.5})$ 较春夏季高 74%。2016 年聊城市空气质量已经明显改善，但秋冬季 $\rho(PM_{2.5})$ 仍高达 108μg/m^3。这可能是我国北方秋冬季采暖过程大量的化石燃料（尤其是煤炭）燃烧以及夏季较为集中的降雨造成的[25-27]。

宁波市虽然年均 $\rho(PM_{2.5})$ 较低，也不存在集中供暖期，但也呈现明显的季节性特征。如图 6 所示，2013—2016 年秋冬季 $PM_{2.5}$ 平均浓度较春夏季高 76%。2016 年宁波市秋冬季 $\rho(PM_{2.5})$ 为 47.5μg/m^3，较 2016 年年均 $\rho(PM_{2.5})$ 高出 22%。

可见两市 $\rho(PM_{2.5})$ 均呈现较强的季节性差异，且秋冬季浓度均高出春夏季 70% 以上，这种情况可能是秋冬季混合层高度降低造成的[28]。

3 影响因素差异分析

3.1 经济发展水平差异

近年来，聊城市经济持续增长，从 2010 年到 2016 年，地区生产总值由 1 606.5 亿元上升至 2 859.2 亿元，增长速率呈下降趋势，由 2010 年的 18.6% 下降至 2015 年的

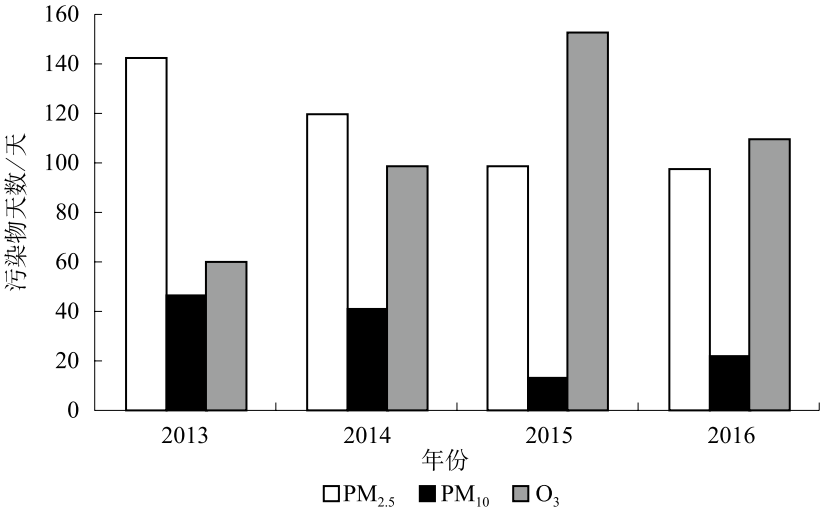

图 3　近年来宁波市首要污染物天数

注：数据来自宁波市环境保护局

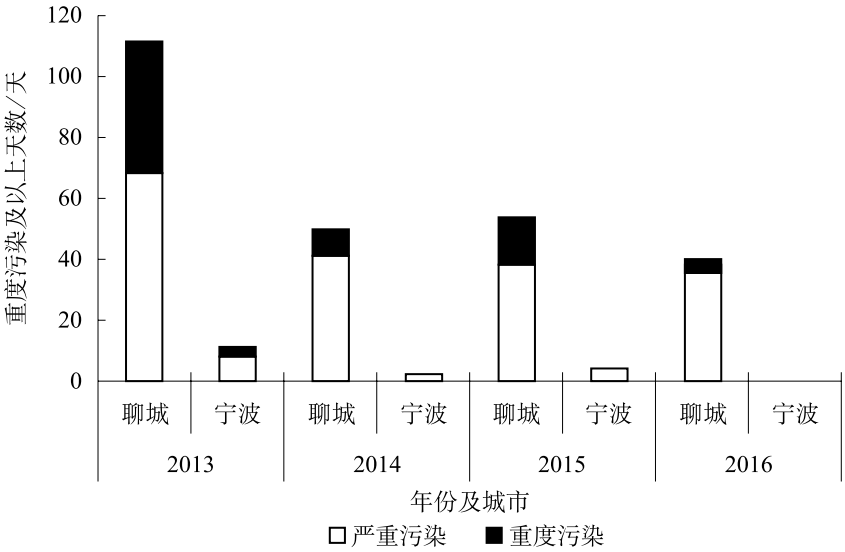

图 4　近年来聊城市与宁波市重度污染及以上天数对比

注：聊城市重度污染数据来自聊城市环境保护局，宁波市重度污染数据来自 2013—2016 年宁波市环境质量公告

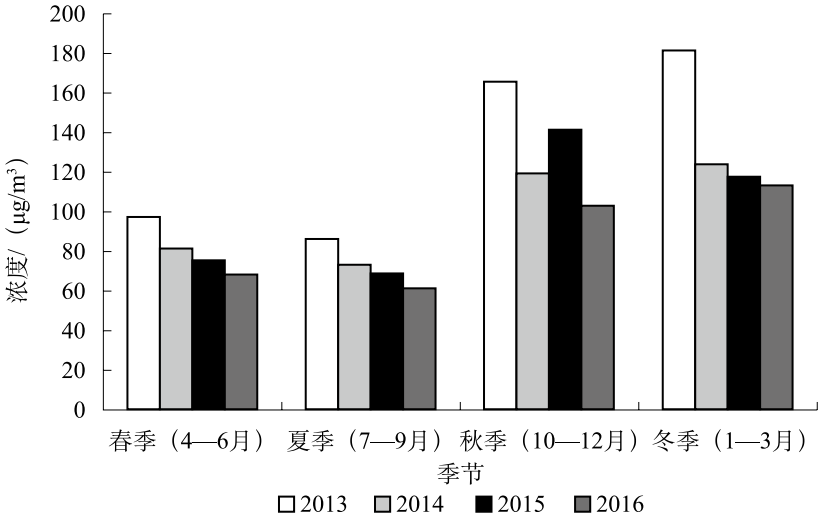

图 5　聊城市近年来分季节 $PM_{2.5}$ 平均浓度

注：聊城市分季节 $PM_{2.5}$ 平均浓度来自聊城市环境保护局

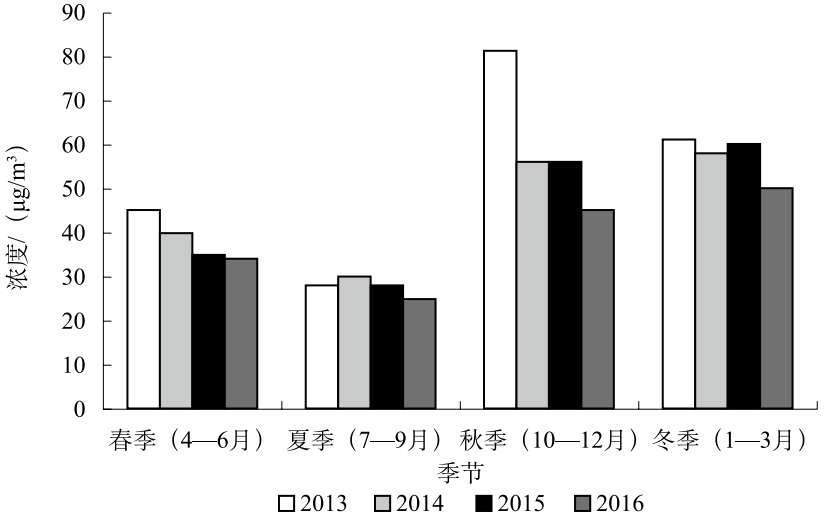

图 6　宁波市近年来分季节 $PM_{2.5}$ 平均浓度

注：数据来自宁波市环境保护局

5.8%，2016 年有回升趋势，为 7.3%。2016 年聊城市人均生产总值 67 706 元，按年均汇率折算为 10 193 美元 [29]。

宁波市经济总量较大，2016 年地区生产总值达 8 541.1 亿元，2012—2016 年增长速度总体呈小幅下降趋势，增速稳定在 7.5% 左右。2016 年宁波市人均生产总值 108 804 元，按年均汇率折算为 16 380 美元 [30]。

对比两市经济总量及人均生产总值，可见聊城市经济发展水平相对滞后，城市建设及管理水平相对较差。不同研究表明，我国环境库兹涅茨曲线“拐点”将在人均国民收入达到 5 000—20 000 美元区间到来，而聊城市相对落后的经济发展水平可能是其污染物浓度相对较高以及重度污染天数较多的一个重要人为因素。

3.2 产业结构差异

产业结构是影响城市空气质量状况的关键因素。近五年来聊城市产业结构并未发生根本性变化，依然是以第二产业为主，第三产业次之，第一产业最低，但第三产业比例呈逐年上升趋势。聊城市近年来产业结构状况见图 7，2016 年聊城市第一、二、三产业结构比例为 11.8∶49.5∶38.7，同年山东省的三产比值为 7.3∶45.4∶47.3，可见聊城市目前第三产业贡献低于全省平均，而第一、二产业占比明显高于全省。此外，2016 年轻、重工业比例分别为 28.7% 和 71.3%。从 2013 年开始，重工业占工业总产值的比例较大且逐步增加，由 62.7% 上升到 71.3%。以山东信发集团为代表的大型金属冶炼企业与以鲁西化工集团为代表的化工企业占据了第二产业的较大比重。

宁波市近年来产业结构状况见图 8，可见，近年来宁波市第一产业占比保持稳定，第二产业占比在 2013—2015 年呈下降趋势，2016 年稍有回升，而第三产业占比呈明显增长趋势。2016 年宁波市三次产业之比为 3.6 ∶ 49.6 ∶ 46.8。2012 年宁波工业中产值前十位产业依次是石油加工（12.5%）、电器机械（11.7%）、化学工业（10.4%）、电子通信（7.1%）、电力热力（7%）、通用设备（5.6%）、服装（4.9%）、汽车（4.9%）、黑色金属（4.6%）和有色金属（4.3%）[31]，可见宁波市工业结构中，以石油化工和电器机械为代表的重工业占据主导地位。

对比两市产业结构，可见差异明显：聊城市第一产业占比明显偏高，第二产业差异不大，第三产业差异明显但差距正在逐步缩小。而两市较高的第二产业占比尤其是重工业占比也决定了两市较大的能源消耗量与污染物排放量，但两市重工业中组成结构又有较大差异，聊城市以有色金属冶炼与化工为支柱产业，排放的污染物以细颗粒物为主，而宁波市以石油化工与化学工业等为主的工业以 VOCs 排放为主。因此，两市产业结构差异成为首要污染物差异的主要人为因素。

3.3 地理位置及扩散条件差异

聊城市位于沂蒙山西北部、华北平原中部，而华北平原空气质量通常呈现不同程度的污染特征。在重污染天气频发的秋冬季，我国以西北风偏多，随着距离的增加，风速逐渐减小，到达聊城市时已经相当微弱，而聊城市东南部是连绵起伏的沂蒙山，又阻止了污染物的稀释和扩散，易造成污染物的累积。此外，聊城市周围的邯郸、菏泽、濮阳、德州等市均易发生污染物的累积，

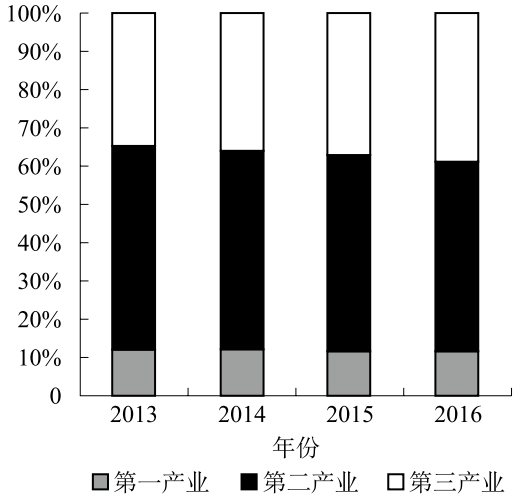

图 7　2013—2016 年聊城市产业结构状况

注：数据来自 2013—2016 年聊城市国民经济和社会发展统计公报

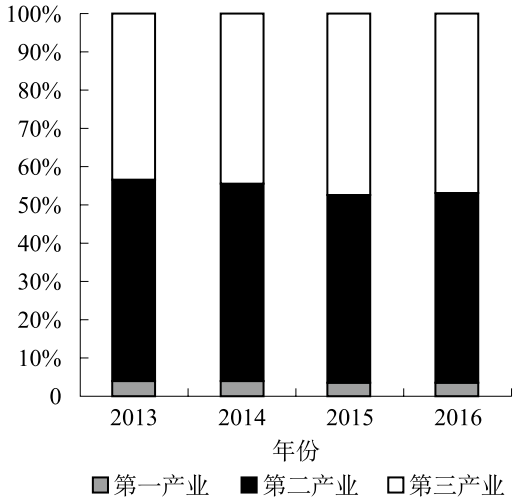

图 8　2013—2016 年宁波市产业结构状况

注：数据来自 2013—2016 年宁波市国民经济和社会发展统计公报

而这些城市之间又容易发生污染物的传输，这在一定程度上加剧了当地的污染状况 [32,33]。而宁波市地处我国海岸线中段、长江三角洲南翼，污染物扩散条件较好，环境容量较大。而这种扩散条件的差异在污染物排放总量与污染物年均浓度的对应关系上表现尤为显著。

聊城市近年来积极推进气代煤、电代煤工程，加强重型柴油车监管力度，认真落实煤炭压减任务，主要大气污染物减排效果显著。2016 年聊城市 SO_2、NO_x、烟粉尘的排放量分别为 6.30 万吨、7.40 万吨及 1.73 万吨 [34]。近年来宁波市全面推进工程减排、结构减排和监管减排，深入开展各类污染防治，强化环境监管，主要大气污染物减排成效明显。2016 年宁波市 SO_2、NO_x、烟粉尘排放量分别为 5.02 万吨、6.76 万吨和 2.68 万吨 [35]。对比两市污染物排放总量，可见两市二氧化硫及氮氧化物排放量较为接近，而聊城市 2016 年烟（粉）尘排放量仅为同年宁波市的 65%，但 2016 年聊城市 $PM_{2.5}$ 浓度达到了宁波市的 2.2 倍，可见扩散条件对城市空气质量的影响巨大。因此，两市地理位置及扩散条件的差异便成为两市空气质量差异较大的一个重要客观因素。

对两市污染影响因素进行归纳，聊城市较低的经济发展水平是导致聊城市较高的污染物浓度以及较多的重污染天数的人为因素；而产业结构的差异是导致两市首要污染物不同的人为因素；地理位置与扩散条件差异是导致两市空气质量差异的客观因素。

对两市区域差异性（数据均为 2016 年值）进行总结，见表 1。

表 1　南北区域差异性汇总

指标	宁波	聊城
污染类型	二次污染	煤烟型污染与机动车尾气污染共存的复合型大气污染
污染物超标情况	$PM_{2.5}$ 超标 11%，O_3 超标 26 天	$PM_{2.5}$ 超标 1.46 倍，NO_2 超标 2.5%
首要污染物	O_3 和 $PM_{2.5}$，且以 O_3 为首要污染物天数大于以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物天数	$PM_{2.5}$
重度污染情况（含严重污染）	无	40 天
经济发展水平	较高	较低
产业结构	第二产业占比高	第二产业占比高，同时第一产业占比也高于全省平均水平
扩散条件	好	差

4 对策建议

对比两市污染的影响因素，可知今后两市的工作重点也有较大差异。聊城市要把控制对象从以往的只关注高架源治理转变为全面开展固定源、移动源、面源等多污染源综合防治，强化固定源排污许可证管理，建立车—油—路全过程移动源综合防治体系，创新管理机制，强化重型柴油车管控，全面提升扬尘、秸秆焚烧、餐饮油烟等面源精细化管理水平。强化对企业环保设施和污染物排放达标审核，严格开展违规项目环保认定和备案，实施违规在建项目清理，利用环保统一监管倒逼产能过剩行业加快环境污染治理和转型升级。对钢铁、水泥、玻璃、化工、金属冶炼等重点行业进行清洁生产审核，针对节能减排关键领域和薄弱环节，推进企业能源系统优化管理、余热余压发电等清洁生产技术改造。提高钢铁、水泥、焦化等行业原料破碎、运输、贮存、加工等环节除尘器的配置率，有效控制无组织排放；开展原料场封闭和烟气捕集及配套处理技术升级，确保厂界污染

物浓度达到相关标准要求。开展粉磨站综合整治，提高无组织排放管理水平。此外，聊城市应着力推动第三产业发展，加大扬尘治理力度，严格控制煤炭消耗量，加强清洁能源使用，提升城市管理水平，提高县（市）污染物控制技术水平，减少排放量，在秋冬季应严格落实错峰生产，在此基础上加强对工业污染源以及机动车尤其是重型柴油车的监管力度，才能在空气质量改善方面取得更大的成效。

宁波市应在巩固重点源污染治理成果的基础上，协同推进多污染源综合控制。目前宁波市大气污染物减排主要来自工业源的贡献。但对于 $PM_{2.5}$ 和 O_3 生成前体物的 NO_x、VOCs，移动源、生活源等也是主要的排放来源。移动源是宁波市 NO_x、VOCs 的重要排放源，虽然完成了黄标车淘汰等一系列工作，并逐步开展了船舶污染控制，但机动车保有量大、增长迅速，集卡车货运车辆数量多，且对非道路移动源尚缺乏有效的监管和治理措施，移动源污染仍然突出。因此，要持续降低 $PM_{2.5}$ 浓度，协同推进 O_3 污染的防控，应巩固重点源污染治理成效，强化对机动车、船舶、非道路移动机械污染的防控，协同开展生活源 VOCs 治理和农业氨的排放控制。此外，宁波市应依托自身地理优势，加快第三产业发展，对“低小散”型企业进行排查并加强管控力度，及时跟进国内外对于 VOCs 治理的先进技术，积极推动宁波市空气质量进一步改善。

在今后城市空气质量防治的过程中，应根据其经济发展水平与产业结构特点、污染状况与季节性特点、排放量与扩散条件特点，有针对性地制定城市大气污染防治策略，形成精细化管理的理念，积极开展“一市一策”研究。

此外，本文对两市污染状况影响因素的归纳仍处于较为粗浅的阶段，且未能获取两市能源结构方面的数据，今后可进一步挖掘两市能源结构差异，归纳典型城市污染影响因素，从而研究其空气质量改善的有效途径。

参考文献

[1] HYSLOP N P. Impaired visibility: the air pollution people see[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(1): 182-195.

[2] CHAN C K, YAO X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric environment, 2008, 42(1): 1-42.

[3] KAN H D, LONDON S J, CHEN G H, et al. Differentiating the effects of fine and coarse particles on daily mortality in Shanghai, China[J]. Environment international, 2007, 33(3): 376-384.

[4] MENTZAKIS E, DELFINO D. Effects of air pollution and meteorological parameters on human health in the city of Athens, Greece[J]. International journal of environment and pollution, 2010, 40(1-2): 210-225.

[5] WENDT C H, RAMACHANDRAN G, LO C, et al. Increasing fine particulate air pollution in china and the potential use of exposure and biomarker data in disease prevention[J]. Chemical research in toxicology, 2015, 28(3): 319-324.

[6] GORAI A K, TULURI F, TCHOUNWOU P B. A GIS based approach for assessing the association between air pollution and asthma in New York State, USA[J]. International journal of environmental research and public health, 2014, 11(5): 4845-4869.

[7] GURJAR B R, JAIN A, SHARMA A, et al. Human health risks in megacities due to air pollution[J]. Atmospheric environment, 2010, 44(36): 4606-4613.

[8] XIE Y, DAI H C, DONG H J, et al. Economic impacts from $PM_{2.5}$ pollution-related health effects in china: a provincial-level analysis[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(9): 4836-4843.

[9] 徐鹏，郝庆菊，吉东生，等．重庆市北碚大气中 $PM_{2.5}$、NO_x、SO_2 和 O_3 浓度变化特征研究 [J]．环境科学学报，2016, 36(5): 1539-1547.

[10] 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.

[11] WANG Y G, QI Y, HU J L, et al. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013-2014[J]. Environment international, 2014, 73: 413-422.

[12] 孟晓艳，王瑞斌，张欣，等．2006—2010 年环保重点城市主要污染物浓度变化特征 [J]．环境科学研究，2012, 25(6): 622-627.

[13] XIE Y Y, ZHAO B, ZHANG L, et al. Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO_2, NO_2, CO and O_3[J]. Particuology, 2015, 20: 141-149.

[14] QU W J, ARIMOTO R, ZHANG X Y, et al. Latitudinal gradient and interannual variation of PM_{10} concentration over eighty-six Chinese cities[J]. Atmospheric chemistry and physics discussions, 2009, 9(6): 23141-23185.

[15] 张兴赢，张鹏，张艳，等．近 10a 中国对流层 NO_2 的变化趋势、时空分布特征及其来源解析 [J]．中国科学 D 辑：地球科学，2007, 37(10): 1409-1416.

[16] 任丽红，周志恩，赵雪艳，等．重庆主城区大气 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 来源解析 [J]．环境科学研究，2014, 27(12): 1387-1394.

[17] HUANG X F, YUN H, GONG Z H, et al. Source apportionment and secondary organic aerosol estimation of $PM_{2.5}$ in an urban atmosphere in China[J]. Science China earth sciences, 2014, 57(6): 1352-1362.

[18] TAO J, GAO J, ZHANG L, et al. $PM_{2.5}$ pollution in a megacity of southwest China: source apportionment and implication[J]. Atmospheric chemistry and physics, 2014, 14(16): 8679-8699.

[19] JAYAMURUGAN R, KUMARAVEL B, PALANIVELRAJA S, et al. Influence of temperature, relative humidity and seasonal variability on ambient air quality in a coastal urban area[J]. International journal of atmospheric sciences, 2013, 2013: 264046.

[20] 王成祥，陈永金，刘加珍，等．聊城市大气污染现状与治理对策研究 [J]．环境工程，2016, 34(6): 114-118.

[21] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Economic growth and the environment[J]. The quarterly journal of economics, 1995, 110(2): 353-377.

[22] 虞依娜，陈丽丽．中国环境库兹涅茨曲线研究进展 [J]．生态环境学报，2012, 21(12): 2018-2023.

[23] 贝耐芳，冯添，吴佳睿，等．西安地区夏季臭氧的模拟研究 [J]．地球环境学报，2017, 8(6): 552-567.

[24] 李璇，王雪松，刘中，等．宁波人为源 VOC 清单及重点工业

行业贡献分析 [J]．环境科学，2014, 35(7): 2497-2502.
[25] 于阳春，胡波，王跃思．北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 [J]．环境科学，2013, 34(7): 2505-2511.
[26] 魏玉香，童尧青，银燕，等．南京 SO_2、NO_2 和 PM_{10} 变化特征及其与气象条件的关系 [J]．大气科学学报，2009, 32(3): 451-457.
[27] YOO J M, LEE Y R, KIM D, et al. New indices for wet scavenging of air pollutants (O_3, CO, NO_2, SO_2, and PM_{10}) by summertime rain[J]. Atmospheric environment, 2014, 82: 226-237.
[28] 俞科爱，陈磊，张晶晶，等．浙江省大气混合层高度变化特征分析 [J]．气象科技，2017, 45(4): 735-744.
[29] 聊城市统计局．2016 年聊城市国民经济和社会发展统计公报 [R]．聊城：聊城市统计局 2017.
[30] 宁波市统计局，国家统计局宁波调查队．2016 年宁波市国民经济和社会发展统计公报 [R]．宁波：宁波市统计局，2017.
[31] 刘兴景，李哲．宁波市“十三五”及中长期主导产业发展研究 [J]．中共宁波市委党校学报，2015, 37(4): 121-128.
[32] 程真，陈长虹，黄成，等．长三角区域城市间一次污染跨界影响 [J]．环境科学学报，2011, 31(4): 686-694.
[33] 郑海涛，刘建国，李杰，等．河南省一次 $PM_{2.5}$ 污染过程区域性影响数值模拟 [J]．环境科学研究，2016, 29(5): 617-626.
[34] 山东省统计局．2017 山东省统计年鉴 [EB/OL]．山东：山东省统计局 2017 [2018-04-25]. http://www.stats-sd.gov.cn/.tjnj/nj2017/indexch.htm.
[35] 宁波市环境保护局．2016 年宁波市环境质量公告 [R]．宁波：宁波市环境保护局，2016.

Comparative Analysis on the Characteristics of Air Pollution in Typical Cities

YAN Li[1*], DU Xiaoshen[2]
(1. Chinese Academy For Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 2. Institute of Environmental Sciences, School of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of economy, people's living standard has been improved significantly, and a series of environmental problems have emerged gradually. Studies have shown that high concentrations of SO_2, NO_2, $PM_{2.5}$, O_3 and PM_{10} increase the incidence of circulatory and respiratory systems in humans. As people pay more and more attention to air quality, the improvement of air quality has become a key problem that needs to be solved. Taking Liaocheng and Ningbo as typical city cases, using the monitoring data of national environmental air quality automatic monitoring station and environmental quality announcement data in the two cities, the characteristics of air pollution and the difference of influencing factors between north and south cities were analyzed. The strategies of air pollution prevention and control in north and south cities of China were put forward. The results showed that: ① the average annual $\rho(SO_2)$ and $\rho(NO_2)$ of Ningbo in 2016 were lower than the second class standard, and the average annual $\rho(PM_{2.5})$of Ningbo was above the limit of second order concentration by 11%; In Liaocheng in 2016, annual $\rho(SO_2)$ was below the second class standard, $\rho(NO_2)$ is still above the second class standard by 2.5%, annual $\rho(PM_{2.5})$ was still 1.46 times higher than the second class standard. ② The air pollution in Liaocheng was characterized by the coexistence of coal smoke pollution and motor vehicle exhaust pollution, while the air quality in Ningbo has obvious secondary pollution characteristics. ③ The lower level of economic development in Liaocheng was the subjective cause of higher pollutant concentration and more days of heavy pollution, while the difference of industrial structure was the subjective reason for the difference of primary pollutants between the two cities. The difference of geographical location and diffusion condition was the objective reason of air quality difference between the two cities. ④ It is suggested that in the process of urban air quality prevention and control in the future, a targeted urban air pollution prevention and control strategy should be constructed. We should form the concept of meticulous management, and carry out the “one city one policy” research actively.

Keywords: typical city; pollution characteristics; comparative analysis; control countermeasures