

山东省大气环境污染时空特征及其原因分析

刘延荣¹, 韩美¹, 倪娟², 卢少勇³

1. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014
2. 山东城市建设职业学院, 济南 250014
3. 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要 利用大气例行监测数据,分析了2014年山东省大气污染进行时空特征。从空间看,淄博、济南、枣庄等是山东省大气污染最严重的城市,日照、青岛、威海等城市的污染最轻,东部沿海城市的污染程度明显轻于内陆城市;各地市SO₂的达标情况较好,超过50%,其余污染物的达标率均较低,PM_{2.5}甚至出现各地市均超标的现象。从时间看,污染物冬季浓度高夏季浓度低;PM₁₀和NO₂浓度在3月有小高峰;8月份,SO₂、NO₂浓度略有升高;从全年来看,NO₂污染物排放浓度变化不大。通过灰色关联法分析可知,能源消费与污染物空间分布相关性最大,风速与污染物时间分布相关性最大。

关键词 大气环境污染;时空特征;山东省

大气污染是一个全球性的问题,直接影响人类的生存环境,降低大气能见度,并对人的身体健康造成威胁^[1]。近年来,国内外众多学者在城市大气环境污染方面展开了多角度研究,并取得了一定成果。芬兰Smear及Biofor项目、美国匹兹堡观测项目等主要针对大气颗粒物进行观测,结果表明,在对流层、近云层和接近对流层顶区域均有浓度较高的凝结核模态颗粒物的存在^[2];Arto等^[3]研究欧洲颗粒物数量和质量的的时间变化,并发现某一城市的平均浓度不能用单点的数量浓度值来表示;Gupta等^[4]研究了印度4个城市颗粒物的变化趋势,结果显示,实行严格的机动车尾气排放标准并关闭部分工厂能有效控制PM₁₀和TSP的污染水平;Hang等^[5]分析了韩国4个不同类型的空气质量监测点1998—2003年SO₂的浓度值,用以评价SO₂的时空分布;Sotiris等^[6]利用巴黎中心位置连续7个月的监测数据分析了监测点附近空气污染的时空变化规律。部分课题组在大气颗粒物浓度、粒径分布、新颗粒物生成-增长等的观测和研究做出了较大贡献,主要有美国明尼阿波利斯大学的McMurry小组、美国Brookhaven国家实验室的Weber小组、芬兰赫尔辛基大学的Kulmala小组等,这些研究主要集中在欧洲和美国^[7]。

中国的部分高校和科研院所的专家、学者利用数据分

析、软件模拟等方法对中国的大气污染进行了研究,山东大学刘新玲等^[8]对山东省中西部5个城市(济南、济宁、德州、淄博、泰安)2000—2004年主要大气污染物的年际变化、季节变化特征趋势进行分析,并进行区域间比较和原因分析,结果显示,5年间SO₂和PM₁₀呈逐年下降趋势,NO₂无明显变化,至2004年,PM₁₀仍然为这些地区最主要的大气污染物,且污染物浓度变化是地形、污染源和气象条件等因素共同作用的结果;宋艳玲等^[9]结合气象资料对2000—2002年北京市主要大气污染物的污染特征进行分析,发现污染物浓度与气象因子之间存在明显的相关性;王长科等^[10]通过研究发现,北京市1995—2000年的CO₂污染浓度逐渐降低,且日变化强烈、季节变化明显;马雁军等^[11]研究了1987—2002年辽宁中部城市群大气污染物的变化特征,表明大气污染存在着明显的季节变化,冬季污染最重,夏季最轻,且16年来TSP、PM₁₀、SO₂浓度呈逐年下降趋势,NO₂年际变化不明显;王淑英等^[12-13]较为系统地分析了北京地区PM₁₀污染的时空分布特征及其与地面气象要素的相关关系;杜世勇等^[14]开发了济南市空气质量数值预报系统模型,并在实践中取得了较好的应用效果;刘恩莲等^[15]分析了济南市空气中颗粒物来源,并提出防治对策;史聆聆等^[16]利用统计数据分析了2005—2012年河南省大气污染

收稿日期:2016-01-20;修回日期:2016-04-03

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371537);山东省科技计划项目(2013GSF11706)

作者简介:刘延荣,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理,电子信箱:liuyanrong256@163.com;韩美(通信作者),教授,研究方向为环境演变与可持续发展及流域水资源与湿地生态评价,电子信箱:hanmei568568@126.com

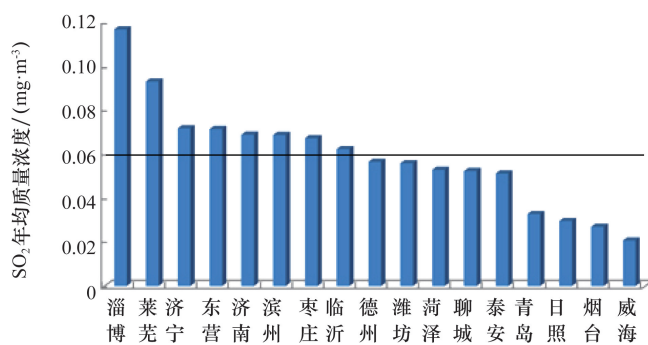
引用格式:刘延荣,韩美,倪娟,等.山东省大气环境污染时空特征及其原因分析[J].科技导报,2016,34(22):62-67;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.22.008

和能源消费之间的关系,并提出推进产业结构调整、加快能源结构调整、实施大气污染物协同控制等对策;高明美等^[17]基于超标倍数赋权法对济南市 2001—2011 年的大气质量进行模糊动态评价,结果表明,济南市的大气污染正由燃煤型逐步向燃气型过渡,但目前(至 2011 年)PM₁₀仍是济南市的首要污染物;杜改芳等^[18]基于综合污染指数评价法和 ArcGIS 平台空间插值法研究了济南市“十一五”期间主要大气污染物的时空特征及发展趋势,结果发现,济南市大气污染冬季最重、夏季最轻,较严重的区域为城市的东北部地区,且污染物变化受地理气候条件、产业结构和能源结构影响较大。除以上研究外,中国科学院大气物理研究所、北京大学、南京大学、中山大学等都在大气污染方面做了大量研究,但由于目前中国大气污染的来源、归趋和变化特征等都十分复杂,相关研究还需要进一步开展。

针对目前的大气污染现状,中国积极制定新的法律法规和污染物排放标准,各省市也根据其具体情况制定了一系列地方标准。山东省作为中国的人口大省和资源消费大省,各项大气污染物排放量巨大,污染较为严重,因此,根据相关统计数据,利用统计学方法对山东省目前大气污染的时空特征及成因进行分析,对山东省大气环境质量的改善有积极影响。

1 山东省大气污染总体现状

目前,山东省的大气污染类型是以燃煤型为主的混合型



(a) 年均质量浓度

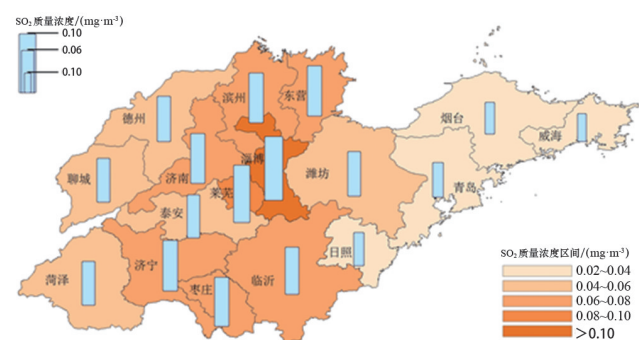
污染。在各类大气污染物中,PM_{2.5}是目前山东省大气的首要污染物,也是重污染天气的主要成因;SO₂、NO₂的污染同样较为严重,SO₂污染保持在较高水平,NO₂污染呈加重趋势。山东省的大气环境质量有较强的区域性和季节性。区域上,烟台、威海和青岛等沿海地区,大气环境质量明显好于西北内陆地区。空间上,大气污染程度从沿海到内陆逐渐加剧。山东省地形大致为中间高、四周低,省内各地区的大气环境质量与此有着密切关系——中部山地西侧的鲁西北地区 and 鲁西南地区的大气污染明显要比其他地区严重。同时,由于区域输送的影响,与河北省、河南省交界的地区,大气污染也比较严重。季节上,冬季大气污染最严重,春秋季节次之,夏季最轻^[8]。

2 2014年山东省大气污染时空特征分析

2.1 空间特征分析

为更直观地说明 2014 年山东省的大气污染空间变化状况,本文整理、分析天气后报的统计数据,并对 SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}等主要污染物的排放情况和污染特征进行简要分析。

由图 1 可知,威海、烟台、日照、青岛、泰安、聊城、菏泽、潍坊和德州的 SO₂ 年均质量浓度能够达到国家二级空气质量标准(0.06 mg·m⁻³),城市达标率为 52.9%,其余地市均超标。淄博的 SO₂ 年均质量浓度最高,莱芜次之,威海、烟台、日照等地的 SO₂ 年均质量浓度相对较低,东部沿海地市达标情况较好。



(b) 空间分布

图 1 2014年山东省各地市 SO₂ 年均质量浓度和空间分布

Fig. 1 Annual average concentration and spatial distribution of SO₂ in Shandong Province in 2014

由图 2 可知,山东省 2014 年各地市 NO₂ 年均质量浓度达到国家二级空气质量标准(0.04 mg·m⁻³)的城市有威海、烟台、青岛、日照和潍坊,城市达标率 29.4%,其余 12 地市均超标。淄博和临沂的 NO₂ 年均质量浓度相对较高,威海最低。

由图 3 可知,山东省 2014 年 PM₁₀ 年均浓度能达到国家空气质量二级标准(0.07 mg·m⁻³)的只有威海和烟台,达标率为 11.8%,其余 15 地市均超标。济南、聊城、临沂和枣庄等几个地市的 PM₁₀ 年均质量浓度处于较高水平,沿海地市总体 PM₁₀

质量浓度较低,但日照、青岛两地没有达到国家二级标准。

由图 4 来看,山东省各地市的 PM_{2.5} 年均质量浓度均未达到国家二级空气质量标准(0.035 mg·m⁻³),污染现象严重,且德州、菏泽、聊城等地的 PM_{2.5} 年均质量浓度处于较高水平,威海、烟台、青岛等地的 PM_{2.5} 年均质量浓度在省内处于较低水平;东部沿海地市的 PM_{2.5} 质量浓度低于内陆城市,这与其他污染物的规律一致,但可以发现,与 PM₁₀ 类似,德州、菏泽、聊城等 SO₂ 和 NO₂ 质量浓度不是很高的地市,PM_{2.5} 质量浓度却在

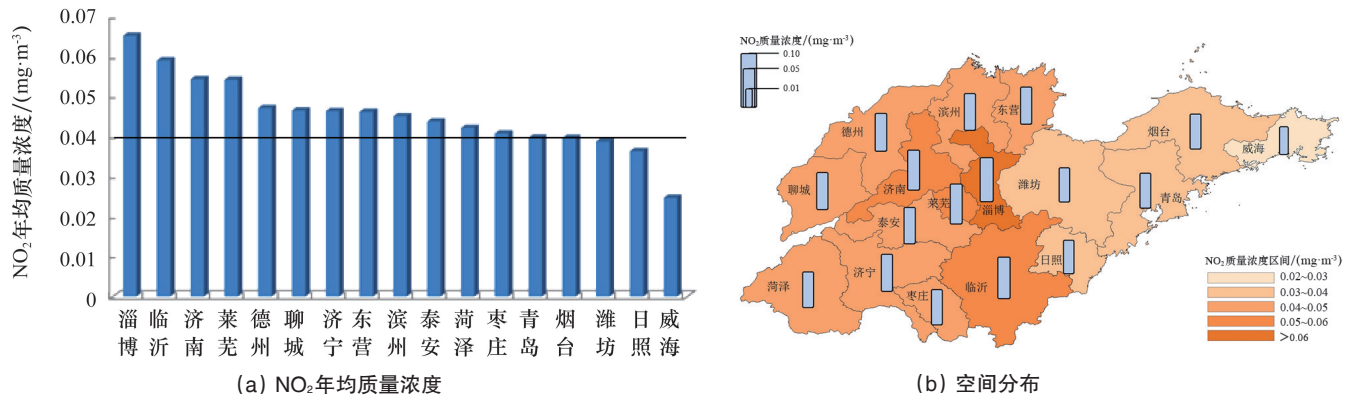


图2 2014年山东省各地市NO₂年均质量浓度及空间分布

Fig. 2 Annual average concentration and spacial distribution of NO₂ in Shandong Province in 2014

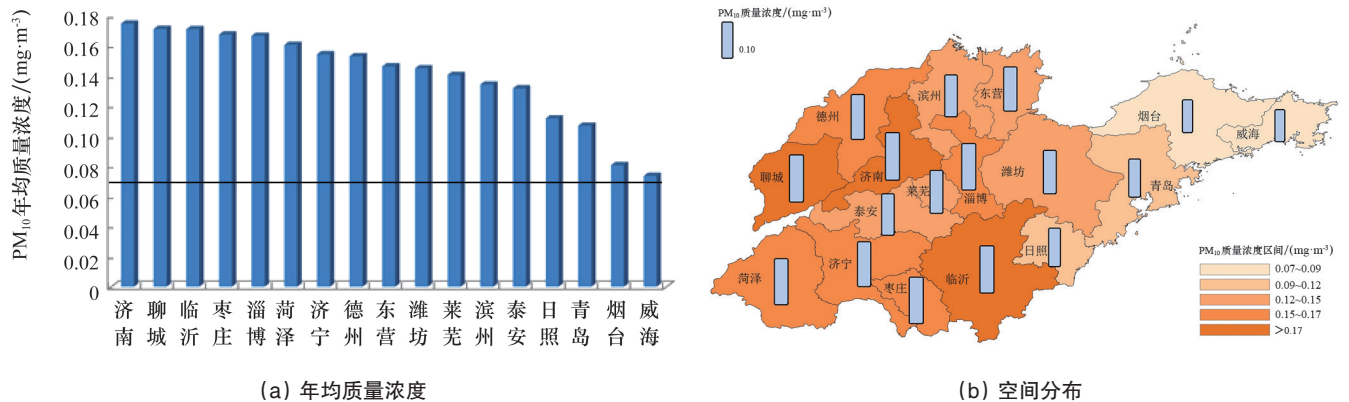


图3 2014年山东省各地市PM₁₀年均质量浓度及空间分布

Fig. 3 Annual average concentration and spacial distribution of PM₁₀ in Shandong Province in 2014

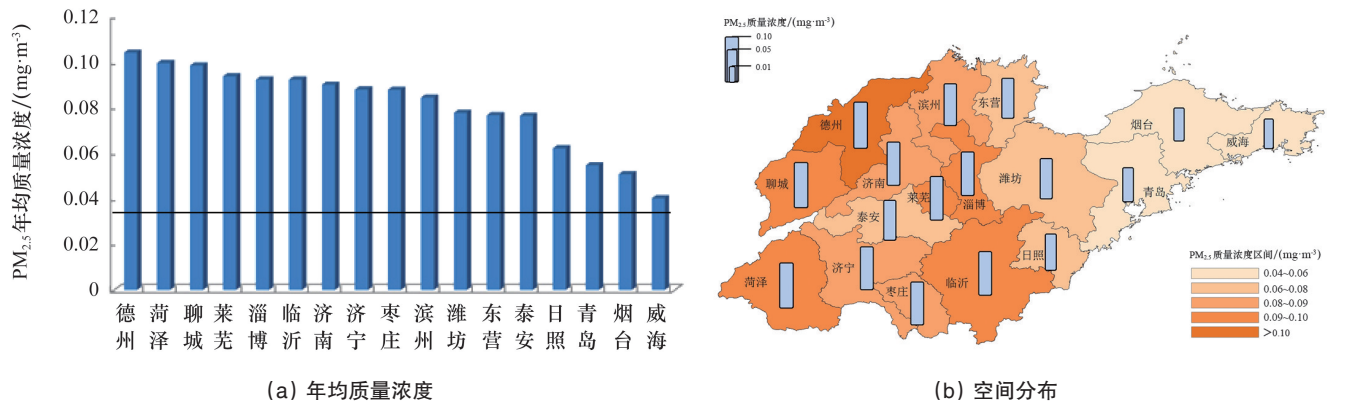


图4 2014年山东省各地市PM_{2.5}年均质量浓度及空间分布

Fig. 4 Annual average concentration and spacial distribution of PM_{2.5} in Shandong Province in 2014

山东省居于前列。

对比分析图1~图4,可得如下结论:

1) 山东省整体的大气污染现象严重,各地市的各大气污染物质量浓度均处于较高水平,且各地市间差异明显,不同污染物之间也有一定的差异。

2) 根据2014年山东省空气质量指数(AQI)排名^[9],淄

博、济南、枣庄等是2014年山东省大气污染相对严重的几个城市,日照、青岛、威海等城市的污染相对轻;东部沿海城市的污染程度明显轻于内陆城市,且在工业更为密集的地市,大气污染也更为严重。同时可以发现,聊城、德州、菏泽等地的SO₂、NO₂污染现象并不明显,但PM₁₀和PM_{2.5}年均质量浓度却排在省内前列。

从污染物达标情况看,山东省各地市SO₂的达标率超过了50%,其余污染物的达标率均较低,PM_{2.5}甚至出现各地市均超标的现象;且从超标程度看,PM₁₀和PM_{2.5}的超标倍数明显高于SO₂和NO₂,这表明目前山东省的颗粒物污染的严重程度高于气态污染物,这也与目前普遍认同的“PM_{2.5}已成为山东省的首要污染物”这一结论相适应。

2.2 时间特征分析

对天气预报的统计数据进行处理、分析,对SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}等主要污染物的排放情况和时间污染特征进行简要分析。

由图5可知,污染物浓度变化线大致呈U型,即冬季质量浓度最高,春秋季节次之,夏季质量浓度最低。具体来看,各污染物最大质量浓度皆出现在1月,其次为12月(PM_{2.5}为11月);最低质量浓度值出现在不同月份:PM_{2.5}和PM₁₀ 9月质量浓度最低,NO₂和SO₂ 7月质量浓度最低;8月SO₂、NO₂质量浓度略有升高;PM₁₀和NO₂质量浓度在3月有个小高峰;从全年角度看,NO₂质量浓度变化不大。

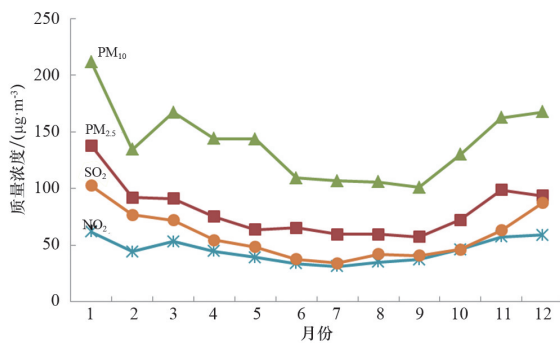


图5 2014年山东省大气污染物质量浓度月变化

Fig. 5 Monthly variation of air pollutant concentration in Shandong Province in 2014

2.3 空间特征原因分析

利用灰色关联分析法对山东省17地市的AQI与其影响因子的关联性进行分析,将各地市AQI作为目标序列,气温、降水量、风速、相对湿度等自然因素和绿化率、人口密度、百人汽车拥有量、人均工业产值和能源消费量等人为因素作为比较序列。分析结果显示,各项因子的关联度都较大,均大于0.84,表明上述因子都与大气质量有较好的关联性。

由图6可知,在各项因子当中,能源消费量的关联度最大(0.94)。山东省燃煤在总能源消费中占到80.75%,表明山东省的能源消费依然以燃煤为主《山东省统计年鉴2015》。煤的燃烧会产生大量灰分、烟尘和SO₂,根据《全国第一次污染物普查》数据,燃烧1 t煤约产生10 kg烟尘和SO₂,因此,在能源消费总量和燃煤总量都较高的山东,空气质量与能源消费有着密切的关系。

关联度排在第二位的是风速。风速主要影响污染物在大气中的迁移和扩散,在发生重污染过程时,风速的加大对

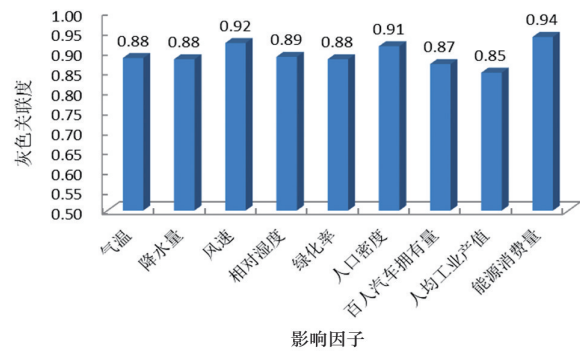


图6 山东省AQI与各因子关联性比较

Fig. 6 Correlation between AQI and various factors in Shandong Province

于空气质量的改善有着十分明显的作用,风速的变化在各项自然要素中最为频繁,在1 h或者更短的时间内都可能发生很大的变化;同时,风速的大小对污染物的区域输送有着重要的作用,故相比于其他的自然因素,风速与空气质量有着更为密切的关系。但风速对大气污染的削减作用并不是绝对的,在春季,反而会因为风速较大造成地表扬尘加剧,这也是风速的关联度略小于能源消费的原因。

人口密度同样与空气质量有着明显的关联性,因为在人口密集地区,能源消费量更大,产生的污染物也就更多。绿化率则主要体现了某地区对扬尘的固态颗粒物的滞留能力,在以颗粒物为首要污染物的山东,绿化率同样和空气质量有较大的关联。气温、降雨量和相对湿度对于空气质量的影响也十分明显,从地区看,平均温度较高的地市,空气质量也就较好,气温影响的主要是热通量,从而影响到污染物的扩散。降雨则主要是通过雨除和冲刷作用使空气中的污染物沉降到地面,同时,在降雨量较大的地区,相对湿度也会较大;从山东省具体情况看,降雨量较大、相对湿度较大的地市主要分布在沿海地区,故这些地区的污染程度也较轻。

各项因子中,百人机动车拥有量和人均工业产值的关联度较小。虽然在汽车拥有量较大的地区,会因为机动车排放使得大气中的污染物增多,但由于各地市国I~国V标准机动车的所占比例难以统计,道路和城建也很难量化,故使得汽车拥有量和空气质量的关联度偏小。人均工业产值虽然可以表征某地市的经济发展状况,但由于各地市产业结构的差异、工业生产工艺差异、治污设备的差异和监督管理的差异难以用量化指标统一体现,故人均工业产值和空气质量的关联度也偏小。

2.4 时间特征原因分析

由于人为因素的月变化数据难以获取,故在使用灰色关联法分析山东省大气污染时间特征的原因时只考虑自然因素。将山东省各月的AQI平均值作为目标序列,气温、降水量、风速和相对湿度的各月份均值作为比较序列,得到的灰色关联度如图7所示。

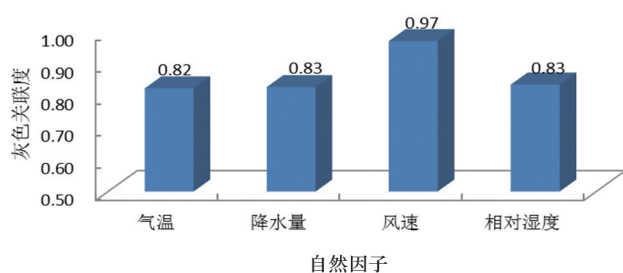


图7 山东省AQI与各自然因子关联性比较

Fig. 7 Correlation between AQI and various natural factors in Shandong Province

由图7可知,气温、降水量、风速和相对湿度等因素对空气质量均有一定影响。

当各种因素共同作用时,风速对于空气质量的影响最大,这是因为风速直接影响着大气中污染物的迁移扩散能力,当风速增大时,大气通常呈不稳定状态,大气中垂直和水平方向上的湍流增强,大气中的污染物浓度会显著降低。虽然在风速超过一定值时,会使地表扬尘加剧,但从时间角度看,平均风速较大的季节,污染物浓度明显较低。

相对湿度的影响主要表现为相对湿度较大时,大气中的水汽增加,已形成雾和霾,使得污染物附着在液滴表面,不易扩散。降雨量、相对湿度对空气质量的影响表现为降雨量对于空气质量有着明显的作用,随着雨除和冲刷作用,大气中的污染物会明显降低;从降雨量的时间变化特征上来看,降雨量在不同季节的差异很大,全年降雨量主要集中在夏季,其他季节的大气质量受到降雨量影响较小,因此,从全年各月来看,6—8月的空气质量相对较好。

温度对空气质量的影响表现为气温主要影响空气中分子的平均动能,平均动能越大,则越有利于污染物的扩散;从全年各月变化来看,气温变化有着较为明显的季节特征,且在气温较高的季节,污染程度也较轻。

3 结论

对2014年山东省17地市大气环境污染变化特征进行了研究,分析了17地市2014年空气质量现状及大气污染的时空特征,探讨了影响山东省大气污染变化的主要原因。

地区上,山东省整体上呈现从东部沿海到内陆城市污染逐渐加剧的趋势。城市年均值超标程度上,PM₁₀和PM_{2.5}的超标倍数明显高于SO₂和NO₂,这表明目前山东省的颗粒物污染更为严重。

季节上,污染物浓度冬季(1月)最高,春秋次之,夏季最低。具体来看,最低质量浓度值出现在不同月份:PM_{2.5}和PM₁₀在9月浓度最低,NO₂和SO₂7月浓度最低;8月SO₂、NO₂浓度略有升高;PM₁₀和NO₂浓度在3月有个小高峰;NO₂全年中浓度变化较小。

通过灰色关联法分析气温、降水量、风速、相对湿度等自

然因素与绿化率、人口密度、百人汽车拥有量、人均工业产值、能源消费量等人为因素和AQI空间分布相关性可知,能源消费量的相关性最大;利用灰色关联法分析气温、降水量、风速和相对湿度和AQI时间分布相关性可知,AQI与风速的相关性最大。

参考文献(References)

- [1] Hyslop N P. Impaired visibility: The air pollution people see[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 182-195.
- [2] Kulmala M, Vehkamäki H, Petäjä T, et al. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(2): 143-176.
- [3] Puustinen A, Hameri K, Pekkanen J, et al. Spatial variation of particle number and mass over four European cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(31): 6622-6636.
- [4] Gupta I, Kumar R. Trends of particulate matter in four cities in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(14): 2552-2566.
- [5] Hang T N, Kim K H. Evaluation of SO₂ pollution levels between four different types of air quality monitoring stations[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(36): 7066-7081.
- [6] Vardoulakis S, Gonzalez-Flesca N, Fisher B E A, et al. Spatial variability of air pollution in the vicinity of a permanent monitoring station in central Paris[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(15): 2725-2736.
- [7] Hu Min, He Lingyan, Huang Xiaofeng, et al. Physicochemical properties, sources and formation mechanism of PM_{2.5} and PM_{0.1} in Beijing[M]. Beijing: Science Press, 2009: 159-161.
- [8] Liu Xinling, Wang Xiaoming, Li Xiaoming, et al. Analysis on variation characteristics of air pollution in five cities in central and western Shandong Province during 2000-2004[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(12): 3390-3396.
- [9] Song Yanling, Zheng Shuihong, Liu Yanju, et al. Research on characteristics of air pollution in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(B03): 116-122.
- [10] Wang Changke, Wang Yuesi, Liu Guangren. Characteristics of atmospheric CO₂ variations and some affecting factors in urban area of Beijing[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 13-17.
- [11] Ma Yanjun, Cui Jinsong, Liu Xiaomei, et al. Analyses on variation characteristics of atmospheric pollutant in a group of cities in central Liaoning from 1987 to 2002[J]. *Plateau Meteorology*, 2005, 24(3): 428-435.
- [12] Wang Shuying, Zhang Xiaoling. Meteorological features of PM₁₀ pollution in Beijing[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(S1): 177-184.
- [13] Zhao Yue, Pan Jun, Zhang Hongyuan, et al. Analysis of inhalable particles pollution in the atmosphere in Beijing area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(1): 67-69.
- [14] Du Shiyong, Tan Xiaozhe, Tian Yong, et al. Numerical forecast on air quality in Jinan City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(4): 20-23.
- [15] Liu Enlian, Yan Huaizhong. The source and prevention and control countermeasure on atmosphere granule in Jinan City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, 21(2): 84-87.
- [16] Shi Lingling, Li Xiaomin, Liu Jing, et al. Air pollution situation of Henan Province and ITS controlling measure[J]. *Environmental Technology*, 2015, 33(5): 104-108.

- [17] Gao Mingmei, Sun Tao, Zhang Kun. Dynamic fuzzy comprehensive evaluation on the atmosphere environmental quality of Jinan City based on the multiple super-scale weighting method[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(9): 150-154.
- [18] Du Gaifang, Ma Mintao, Liang Zengqiang. Research of spatial and tem-

poral characteristics of air pollution in Jinan City[J]. Sichuan Environment, 2014, 33(2): 58-64.

- [19] 空气质量指数查询(AQI)[EB/OL]. [2016-01-20]. <http://www.tianqihoubao.com/aqi/>.

Analysis of the space-time characteristics and causes of the atmospheric pollution in Shandong Province

LIU Yanrong¹, HAN Mei¹, NI Juan², LU Shaoyong³

1. Institute of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China
2. Shandong Urban Construction Vocational College, Jinan 250014, China
3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract The atmospheric routine monitoring data are used to analyze the characteristics of air pollution in 2014 in Shandong Province. From the point of view of the spatial distribution, the air pollution in Zibo, Jinan, Zaozhuang is the most serious as compared with other cities, while Rizhao, Qingdao, Weihai and other cities are under the lightest pollution condition, the pollution degree of the eastern coastal cities is significantly lighter than that of the inland cities; the compliance with respect to SO₂ among various cities is greater than 50%, which is a bit better than those with respect to all other pollutants, whose compliance rates are relatively low, and the compliance rate of PM_{2.5} of all cities do not satisfy the air quality standard. From the point of view of the time distribution, the concentration of pollutant concentration is high in winter and low in summer; the concentrations of PM₁₀ and NO₂ in March see a small peak; the concentrations of SO₂ and NO₂ increase slightly in August; as seen from the full year, the NO₂ pollutant emission concentration changes but little. This pollution situation is mainly related to the natural factors and the factors of human beings, with natural factors including the terrain, the climate, and the meteorology, and the factors of human beings including the policy, the supervision and management, the industrial emissions, the motor vehicle emissions, the resident living conditions and other factors. Through the gray correlation analysis, the correlation of the energy consumption is the largest with respect to the pollutant distribution, and the correlation of the wind speed is the largest with respect to the time distribution of pollutants.

Keywords atmospheric pollution; spatial and temporal; Shandong Province

(责任编辑 王媛媛)