

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.08.2016011104

葛跃, 王明新, 孙向武, 等. 长三角地区秋冬季大气 PM_{2.5} 含量空间变异特征[J]. 环境化学, 2016, 35(8): 1698-1706

GE Yue, WANG Mingxin, SUN Xiangwu, et al. Spatial variations of atmospheric PM_{2.5} concentration in autumn and winter in Yangtze River Delta [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(8): 1698-1706

长三角地区秋冬季大气 PM_{2.5} 含量空间变异特征*

葛 跃 王明新** 孙向武 赵亚男 朱峥嵘

(常州大学环境与安全工程学院, 常州, 213164)

摘 要 利用长三角地区的 128 个国控大气监测站 2014 年 11 月到 2015 年 1 月的 PM_{2.5} 浓度逐时数据, 采用地统计学方法进行了 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的空间异质性分析, 并讨论了其动态变化的影响因素. 结果表明, 研究时段内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的基底效应值在 0.07—0.26 之间, 空间自相关性较强. 块金值呈逐步变大趋势, 表明 PM_{2.5} 人为源对其空间异质性的影响逐渐加强. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变程值在 217.1—336.2 km 之间, 东-西方向大于南-北方向. 可依据各季节空气 PM_{2.5} 含量空间自相关距离的 1/4—1/2 进一步优化环境空气质量监测网点. 根据普通克里格法空间插值结果得出, 研究区 PM_{2.5} 污染呈片状分布, 且 PM_{2.5} 污染程度持续加重, 污染重心在苏锡常都市圈、南京都市圈和徐州都市圈, 是空气 PM_{2.5} 污染防治的关键区域. 南京都市圈和徐州都市圈可能受到 WSW 上风向外源输送的强烈影响, 苏锡常都市圈则对 SSE 下风向的城市群构成较大的潜在影响. PM_{2.5} 还与 SO₂、CO、NO₂ 均呈显著正相关, 表明研究区空气 PM_{2.5} 污染与化石能源燃烧和机动车尾气均有较大关系, 也可能与 SO₂ 或 NO₂ 在不利气象条件下形成的二次气溶胶有关.

关键词 PM_{2.5}, 长三角地区, 地统计, 空间异质性, 影响因素.

Spatial variations of atmospheric PM_{2.5} concentration in autumn and winter in Yangtze River Delta

GE Yue WANG Mingxin** SUN Xiangwu ZHAO Yanan ZHU Zhengrong

(College of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou, 213164, China)

Abstract: The real-time PM_{2.5} concentration data of 128 state-controlled monitoring stations from November 2014 to January 2015 in Yangtze River Delta Region were used to analyze spatial heterogeneity based on geostatistics method, and the factors affecting the dynamic were discussed. The results indicate that the base effect values of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ were between 0.07 and 0.26, and the degree of spatial autocorrelation was strong. The nugget values showed an increasing trend, which indicated that the anthropogenic PM_{2.5} source gradually enhanced the impact on the spatial heterogeneity. The range values of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ were between 217.1 km and 336.2 km, and the range value of the east-west direction was larger than that of north-south. The air quality monitoring network can be further optimized according to the 1/4—1/2 autocorrelation distance of each season PM_{2.5} concentration. The spatial interpolation results with ordinary kriging showed a patchy distribution of air PM_{2.5} pollution in the study area, and the pollution level continued to increase. The bary center of

2016 年 1 月 11 日收稿. (Received: January 11, 2016).

* 国家自然科学基金 (41302025) 和江苏省研究生培养创新工程项目 (KYLX15_112) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41302025) and Graduate Student Training Innovation Project of Jiangsu Province (KYLX15_112).

** 通讯联系人, Tel: 0519-86330086, E-mail: wmxcau@163.com

Corresponding author, Tel: 0519-86330086, E-mail: wmxcau@163.com

air PM_{2.5} pollution was in Su-xi-chang metropolitan area, Nanjing metropolitan area and Xuzhou Metropolitan area, which are the key areas of air PM_{2.5} pollution control. Nanjing metropolitan area and Xuzhou metropolitan area may be affected by the external PM_{2.5} transmission from WSW direction, while Su-xi-chang metropolitan area had a great potential impact on cities in the SSE direction. PM_{2.5} showed a significant positive correlation with SO₂, CO, NO₂, which indicated that the air PM_{2.5} pollution in the study area may be not only affected by emission of fossil energy combustion and vehicle exhaust, but also affected by the secondary aerosols related to SO₂ or NO₂ under adverse weather conditions.

Keywords: PM_{2.5}, Yangtze River Delta region, geostatistics, spatial heterogeneity, factors.

目前我国雾霾污染较为严重且呈区域性特征,机动车尾气排放、化石燃料大量燃烧以及工矿业发展使得空气质量愈发恶化^[1],对资源、环境的巨大冲击威胁着可持续发展的基础.雾霾的特征污染物是 PM_{2.5},其来源较为复杂,既有直接排放也有部分大气污染物的二次转化^[2].影响 PM_{2.5}污染状况的因素较多,涉及到下垫面类型^[3-4]、人类活动^[5-8]以及气象因素^[9-10]等,使得 PM_{2.5}在区域分布上存在很大的时空变异性^[11].国内外许多学者针对典型城市或区域 PM_{2.5}污染的时空特征方面开展了大量研究^[12-16],但大部分研究的尺度往往较小,监测点数量也较少,且主要关注空气 PM_{2.5}污染的动态变化特征,很少关注区域尺度的 PM_{2.5}污染空间变异特征和空间自相关性.

由于目前我国广大区域的空气 PM_{2.5}污染呈显著的区域性污染特征,因此迫切需要对大尺度的空气 PM_{2.5}空间变异特征进行深入分析.目前,我国已经建成了全球最大的大气污染连续监测网络,自 2013 年开始,国家环境监测总站开始向社会每小时公布各个城市和各观测站点的常规污染物监测数据.截至目前,已经有 369 个城市和 1400 多个站点的数据在每小时公布.如何充分利用该监测网络数据必将成为今后我国大气污染研究中一个非常重要的研究方向.

本文基于长三角地区空气质量监测网络数据,采用地统计方法分析该区域内 PM_{2.5}污染特征的空间变异特征及其季节变化,旨在为长三角地区雾霾污染防治提供科学依据和决策参考.

1 实验部分 (Experimental section)

1.1 数据收集与处理

长三角地区目前共设有 128 个国控大气环境质量监测站,各监测站位置分布见图 1.本研究通过在线云收集获取这些站点的 PM_{2.5}质量浓度逐时数据,数据起止时间为 2014 年 11 月 1 日至 2015 年 1 月 31 日,每个月份对应的有效数据样本量达 10×10^4 条以上,风向数据主要摘自中国天气网.在 PM_{2.5}数据搜集过程中,因传输网络不稳定、断点及气象条件等因素都会产生一些异常值和缺失值^[17],为了更好地实现大气污染物质量浓度时间序列数据的连续性和保持数据序列的长度和分布统一,必须补充缺失数据.分段三次插值函数具有连续一阶导数,插值后的轨迹在控制点处十分光滑,消除了棱角,并且其它部分非常接近于直线,避免了因过度光滑而造成误差,所以采用分段三次 Hermite 插值方法在数据基本发展趋势不变的情况下对缺失数据进行补充.本文利用 MATLAB R2012b 软件中的 interp1() 函数实现了大气污染物质量浓度时间序列的分段三次插值.对插值后的数据进行整理计算,得到 2014 年 11 月至 2015 年 1 月各监测点 PM_{2.5}质量浓度的月均值.

1.2 分析方法

采用地统计分析长三角地区 PM_{2.5}含量的空间自相关性.地统计学认为区域化变量具有结构性和随机性两种基本性质,以随经、纬度变化的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 作为区域化变量处理时,能同时反映其空间分布的随机性和结构性^[11].为了全面了解区域化变量在整个区域的变异性,需要进行结构分析,即构造一个综合的变异函数模型,对全部有效结构信息作定量概括^[18].常用的变异函数如下.

球状模型公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (1)$$

高斯模型公式如下:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}) & h > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_0 为块金值, a 为空间自相关距离, C 为偏基台值, $C_0 + C$ 为总基台值.

模型中的 C_0 和 C 分别描述了由随机性和结构性因素引起的变异, $C_0 + C$ 反应了总变异特征. C_0 与 $C_0 + C$ 之比称为基底效应^[19], 记为 Q , 可用其来描述污染物变异的性质和空间自相关程度. 根据 Q 值的大小可对空间变异性质进行分级^[20], 分级标准如下: $<25\%$, 相关性程度为强, 区域化变量受自然因素影响较大; $25\% - 75\%$, 相关性程度为中等, 区域化变量受人为因素和自然因素影响相当; $>75\%$, 相关性程度为弱, 区域化变量受人为因素影响较大.

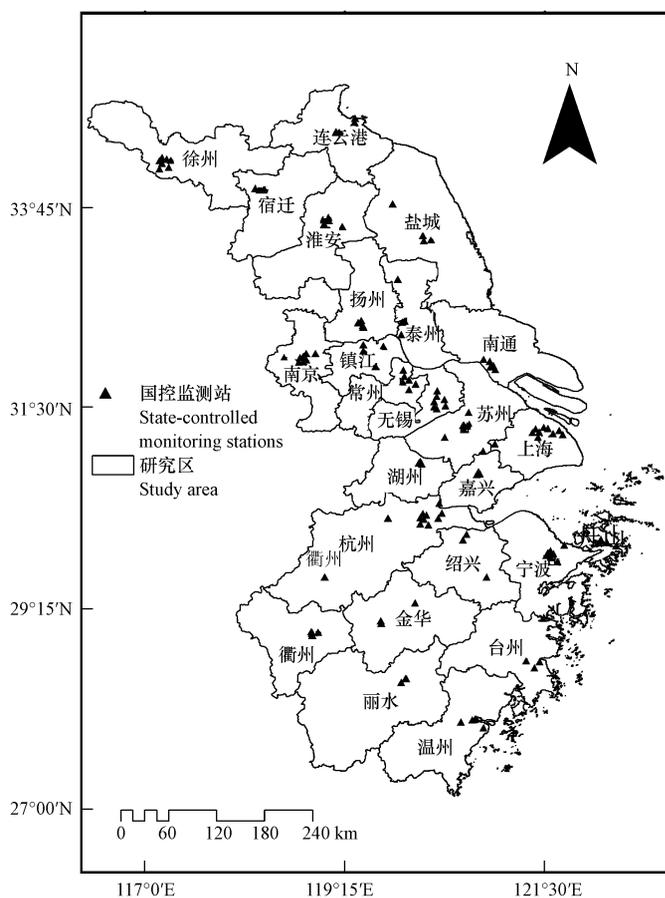


图 1 长三角地区大气污染物国控监测站分布

Fig.1 Distribution of state-controlled air pollutants monitoring stations in Yangtze River Delta region

由于空气质量环境监测站位置不是连续的而是离散的, $PM_{2.5}$ 质量浓度数据只有在这些监测点位才是比较准确的, 其余的未监测处均无具体的数值, 为反映长三角地区 $PM_{2.5}$ 含量的空间差异, 需要对其进行空间插值以得到未监测点的空气 $PM_{2.5}$ 含量模拟值. 当数据分布是正态时, 克里格法是最优的估计方法^[21], 普通克里格插值法是其中应用较为广泛的一种. 本文利用 GS+ 9.0 软件进行地统计分析, 获得整个长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度的空间变异特征, 采用 ArcGIS 10.1 软件对研究区 $PM_{2.5}$ 浓度普通克里格插值分析, 从而分析其区域差异和影响因素.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 PM_{2.5} 质量浓度数据基本情况

表 1 为长三角地区 PM_{2.5} 质量浓度数据的描述性统计分析结果, 2014 年 11 月、12 月和 2015 年 1 月 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的最小值分别为 $24.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $40.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $50.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值分别为 $96.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $107.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $121.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 总体上看, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值呈上升趋势. 根据变异系数 (CV) 的大小可以估计变量的变异程度^[22]: $\text{CV} < 10\%$ 为弱变异性; $10\% < \text{CV} < 100\%$ 为中等变异性; $\text{CV} > 100\%$ 为强变异性, 可以看出该地区研究时段内 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 都属于中等变异. 对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 数据采用 SPSS 20 中的非参数检验模块 (K-S 检验), 发现 P 均大于 0.05, 全部符合正态分布, 因此可采用地统计学进行空间变异分析.

表 1 长三角地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 描述性统计 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Table 1 Descriptive statistics of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in Yangtze River Delta region ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

日期 Date	最小值 Min	最大值 Max	均值 Means	标准差 Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 Variation coefficient/%	K-S 值 K-S values	P 值 P values
2014-11	24.94	96.01	65.90	14.02	-0.53	0.04	21.27	0.984	0.287
2014-12	40.09	107.80	75.07	12.40	-0.19	0.55	16.52	0.587	0.881
2015-01	50.40	121.12	89.93	14.09	-0.57	0.35	15.67	0.843	0.475

2.2 PM_{2.5} 空间变异特征分析

对于 PM_{2.5} 质量浓度数据的常规统计分析能够概括出变量的整体特征, 但是不能反映其局部的变化特征, 即只是在某种程度上反映样本本体, 而不能定量刻画出其随机性和结构性^[23]. 为了更好地了解 PM_{2.5} 的空间变异特征, 需要采用地统计对 PM_{2.5} 的空间变异特征进行分析. 本文按照 GS⁺ 9.0 自动生成的步长作为理论步长, 对长三角地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 进行半变异函数计算, 其步长数为 15, 步长大小为 27.22 km. 根据残差越小越好和决定系数越大越好的原则, 选出最优拟合模型, 拟合模型结果以及参数见表 2.

地统计分析结果表明, 2014 年 11 月和 2015 年 1 月的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 选择球形模型作为拟合模型效果最佳, 2014 年 12 月的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 则是高斯模型拟合效果最好. 偏基台值反映区域化变量的变异强度, 块金值反应了区域化变量内部随机性的可能程度, 变程反映了区域化变量空间自相关性的范围, 基底效应反映随机部分占总空间异质性的可能程度, 即人为因素对区域化变量空间异质性的影响大小. 本研究中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 偏基台值呈下降后上升趋势, 表明研究时段内其变异强度先减少后上升; 块金值呈上升趋势, 表明研究时段内人为源的影响逐渐增强; 2014 年 11 月的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 基底效应只有 0.07, 空间自相关性强; 2014 年 12 月上升到 0.26, 空间自相关性中等, 2015 年 1 月回落至 0.19, 空间自相关性弱. 研究时段内基底效应呈先上升后下降趋势, 表明其空间自相关性呈先降低后上升趋势.

表 2 长三角地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的半方差函数理论模型和相关参数

Table 2 Semivariogram theoretical model and related parameters of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in Yangtze River Delta region

日期 Date	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget	偏基台值 Partial sill	变程 Range/km	基底效应 Substrate effect	决定系数 Determination coefficient	残差 Residual
2014-11	球状模型	14.9	199.9	217.1	0.07	0.836	10023
2014-12	高斯模型	44.3	124.5	290.0	0.26	0.878	3975
2015-01	球状模型	46.2	195.4	336.2	0.19	0.846	10114

变程反映了区域化变量存在空间自相关性的范围, 因此可以作为监测网络布点优化的参考依据. 一般情况下, 为了了解区域化变量的空间变异特征, 采样点的布点距离不能超过半变异函数的变程, 最佳距离应该为变程值的 1/4 至 1/2^[24]. 从表 2 可以看出, 3 个月中半变异函数模型的最小空间变程为 217.1 km, 可作为研究区内监测站间隔的布设依据, 布点间隔应考虑设置为 54—109 km, 但还应根据不

同方向的变程进行适当调整.从图 1 中 $PM_{2.5}$ 监测站点的分布情况来看,监测站基本集中在城区内,而实际上并不是只有城区受到 $PM_{2.5}$ 污染的影响,随着大量工厂搬离城区、城镇化快速发展等因素下,城郊乃至农村地区的 $PM_{2.5}$ 污染问题也开始较为严重.虽然目前城区内空气质量监测点间距较小,但城区间监测点间距普遍大于 109 km,因此扩大监测站分布网络对于更准确估计城郊和农村地区的空气 $PM_{2.5}$ 含量具有重要意义.由于大气污染物种类较多以及不同季节污染情况有所差异,因此空气质量监测点实际布设中还应综合考虑各不同季节多种污染物的空间变异特征和空间自相关距离,从而进一步优化监测网络.

2.3 各向异性

$\rho(PM_{2.5})$ 空间分布特征是多种影响因素在不同空间方向尺度上共同作用的结果,为了更加准确地反映出 $PM_{2.5}$ 的空间变异特征,就需要对研究区域 $\rho(PM_{2.5})$ 在不同方向上的变化趋势进行分析.表 3 为三个月的南-北(0°)、东-西(90°)、西北-东南(45°)和东北-西南(135°)四个方向的半变异函数模型参数.三个月的东北-西南方向与西北-东南方向之块金值大于东-西方向和南-北方向,这可能与研究区该时段内盛行西北风和东北风有较大的关系.

表 3 $\rho(PM_{2.5})$ 四个方向上的半变异函数参数值
Table 3 The parameters of theory models of $\rho(PM_{2.5})$ in four directions

日期 Date	方向 Direction	理论模型 Theoretical model	变程 Range/km	块金值 Nugget	偏基台值 Partial sill	基底效应 Substrate effect
2014-11	0°	指数模型	408.3	27.7	193.8	0.13
	45°		228.0	33.4	190.2	0.15
	90°		217.5	27.7	193.8	0.13
	135°		408.3	33.4	190.2	0.15
2014-12	0°	指数模型	351.6	45.1	127.6	0.26
	45°		275.4	46.6	131.3	0.26
	90°		262.7	45.1	127.6	0.26
	135°		365.7	46.6	131.3	0.26
2015-01	0°	指数模型	408.3	66.8	184.0	0.27
	45°		317.3	74.5	171.7	0.30
	90°		222.7	66.8	184.0	0.27
	135°		291.0	74.5	171.7	0.30

不同方向的空间自相关距离也有所不同,2014 年 11 月空间自相关距离为南-北 = 东北-西南 > 西北-东南 > 东-西,2014 年 12 月空间自相关距离为东北-西南 > 南-北 > 西北-东南 > 东-西,而 2015 年 1 月空间自相关距离为南-北 > 西北-东南 > 东北-西南 > 东-西.南-北方向的空间自相关距离(351.6—408.3 km)最大,东-西方向(217.5—262.7 km)最小.长三角地区研究时段内的主导风向为北风、东北风和西北风,来自这些方向的大气污染物输送、迁移的距离要大于其他方向.

2.4 $PM_{2.5}$ 空间分布特征

2.4.1 整体分布特征

运用 ArcGIS 10.1 中的普通克里格插值法对研究区域 $\rho(PM_{2.5})$ 进行插值(图 2).图例中 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为《环境空气质量标准》(GB3095—2012) $PM_{2.5}$ 日均二级浓度限值.2014 年 11 月到 2015 年 1 月长三角地区的 $\rho(PM_{2.5})$ 的空间分布均呈现出连片化分布和集中污染的特点, $PM_{2.5}$ 污染程度和范围均呈扩大趋势.2014 年 11 月的 $PM_{2.5}$ 污染严重地区主要分布在江苏的西部、中部以及浙江的北部,其中浙江北部地区 $PM_{2.5}$ 污染最为严重,波及范围较广,杭州市的南部小部分地区、舟山群岛以及上海市的东部地区污染情况较轻,整体呈现出四周低、中间高的污染特征.2014 年 12 月,长三角地区的 $PM_{2.5}$ 污染开始加剧,污染范围向北扩散,几乎遍及整个江苏省,苏北地区污染最为严重,上海市的西部地区、浙江的北部以及南部地区也有不同程度的污染.2015 年 1 月,整个长三角大部分地区都在 $PM_{2.5}$ 的影响范围之内,苏锡常地区此时期的 $PM_{2.5}$ 质量浓度值已经远远超过《环境空气质量标准》(GB3095—2012) $PM_{2.5}$ 日均二级浓度限值.

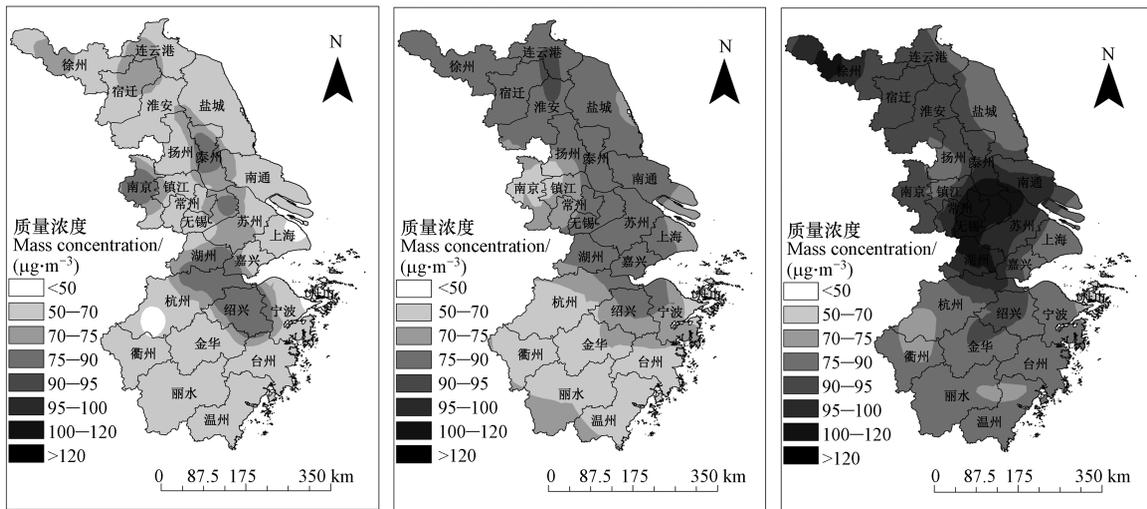


图 2 长三角地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 普通克里格插值图

Fig.2 Ordinary Kriging interpolation map of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in Yangtze River Delta region

2.4.2 区域分布特征

为考察城市群内部 PM_{2.5} 污染的差异, 本文将研究区划分为 7 大区域. 这 7 大区域分别是: 南京都市圈(包括南京、南通、镇江、扬州、泰州)、苏锡常都市圈(包括苏州、无锡、常州)、徐州都市圈(包括徐州、盐城、连云港、宿迁、淮安)、上海市、环杭州湾城市群(包括杭州、宁波、嘉兴、湖州、舟山、绍兴)、温台沿海城市群(包括温州、台州)和浙中城市群(包括金华、丽水、衢州)^[25], 区域之间在地理位置、社会经济等方面存在一些差异, 区域内部较为相似.

图 3 为长三角地区研究时段内各城市群的 PM_{2.5} 浓度变化图. 2014 年 11 月各区域的 PM_{2.5} 浓度数据的中位数靠近下四分位数, 呈现显著的正偏态分布, 四分位距存在明显的差别, 而 2014 年 12 月和 2015 年 1 月各区域的 PM_{2.5} 浓度数据呈现近似的正态分布, 四分位距在各月较为类似. 由此说明, 2014 年 11 月各区域之间的 PM_{2.5} 浓度数据分布不平衡, 区域内部之间也存在一定的差异性. 2014 年 12 月和 2015 年 1 月各区域的 PM_{2.5} 浓度分布较为平衡, 但是污染都有所加剧. 各城市群 PM_{2.5} 浓度数据的中位数都在逐渐上升, 数值越来越靠近上四分位数, 四分位距也变得较为狭长, 表明研究时段内各城市群空气 PM_{2.5} 污染水平均呈逐渐升高趋势, 尤其是到 2015 年 1 月呈集中爆发趋势.

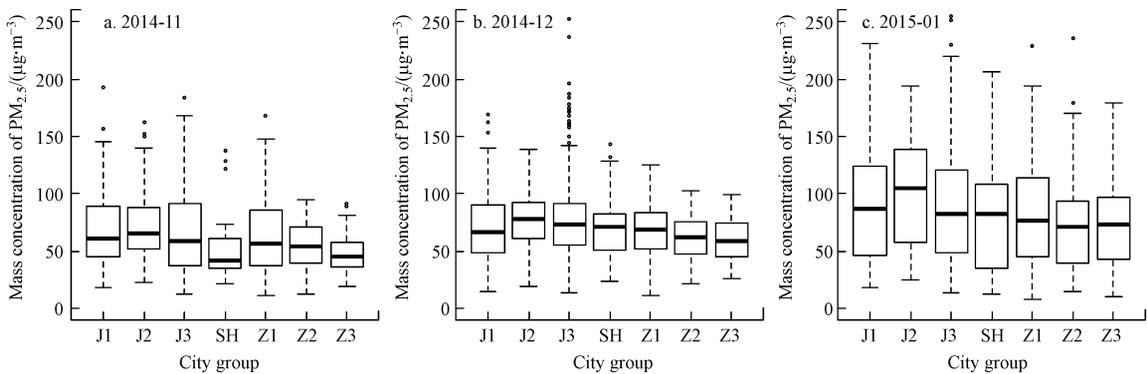


图 3 区域 PM_{2.5} 浓度变化图

J1. 南京都市圈; J2. 苏锡常都市圈; J3. 徐州都市圈;
SH. 上海市; Z1. 环杭州湾城市群; Z2. 温台沿海城市群; Z3. 浙中城市群

Fig.3 The changes of PM_{2.5} concentrations in the study region

J1. Nanjing metropolitan area; J2. Su-Xi-Chang metropolitan area; J3. Xuzhou metropolitan area; SH. Shanghai;
Z1. Hangzhou Bay city group; Z2. Wen-Tai coastal city group; Z3. Zhe-Zhong city group

2.4.3 影响因素分析

不利的气候因素是 $PM_{2.5}$ 产生的诱因,粗放的生产生活方式则是 $PM_{2.5}$ 天气持续发酵的深层次原因^[26].根据上文分析,江苏省 $PM_{2.5}$ 污染的程度要较浙江省和上海市严重,其中苏锡常都市圈和南京都市圈污染形势尤为严重.这与江苏省的炼化、钢铁、石油化工、水泥等高耗能、高污染企业较多、人为源 $PM_{2.5}$ 直接排放量远大于上海和浙江有着直接的关系^[27],而苏州、无锡、南京和常州又是江苏省 $PM_{2.5}$ 人为源 $PM_{2.5}$ 排放量最多的 4 个城市^[28].

除了 $PM_{2.5}$ 人为源直接排外, SO_2 、 NO_x 和 NH_3 等气态污染物转换而来的二次气溶胶也是大气 $PM_{2.5}$ 形成的重要物质^[29].本文利用 SPSS 20 对 $PM_{2.5}$ 与 NO_2 、 SO_2 和 CO 等空气污染物质量浓度进行了 Spearman 秩相关分析(表 4).结果表明,3 个月的 $PM_{2.5}$ 与 SO_2 和 CO 质量浓度均呈显著正相关;2014 年 11 月 $PM_{2.5}$ 还与 NO_2 呈极显著相关.由于 SO_2 和 CO 主要来自电厂、工业锅炉及其他工业部门燃烧(分散燃烧)排放, NO_2 排放主要来自电厂及其他工业燃料燃烧排放和机动车尾气.表明研究区 $PM_{2.5}$ 污染与化石能源燃烧和机动车尾气均有较大关系.长三角地区进入 12 月以后空气 $PM_{2.5}$ 含量持续增加可能主要与进入冬季以后需要消耗更多的化石能源用于发电供暖有关,此外进入冬季以后静稳气象条件较多,不利于污染物扩散,比较容易形成二次气溶胶.

表 4 $\rho(PM_{2.5})$ 与其他 3 种大气污染物浓度数据的相关性

Table 4 The correlation between $\rho(PM_{2.5})$ and the other three kinds of air pollutants concentration data

日期 Date	污染物 Contaminants	$PM_{2.5}$	日期 Date	污染物 Contaminants	$PM_{2.5}$	日期 Date	污染物 Contaminants	$PM_{2.5}$
	CO	0.45 **		CO	0.42 **		CO	0.46 **
2014-11	NO_2	0.46 **	2014-12	NO_2	0.12	2015-01	NO_2	0.13
	SO_2	0.39 **		SO_2	0.50 **		SO_2	0.40 **

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关.

Note: ** indicates a significant correlation at the 0.01 level.

空气中 $PM_{2.5}$ 不仅来自本地排放源,也不可避免要受到周边地区外源输送的影响.风对污染物有运输和稀释扩散的作用^[30],对上下风向地区污染影响显著.图 4 分析了各城市群不同风向上 $PM_{2.5}$ 含量特征,总体上偏西方向的 $PM_{2.5}$ 浓度要高于其它方向的 $PM_{2.5}$ 浓度,不同城市群略有差异.南京都市圈、徐州都市圈 WSW 风向的 $PM_{2.5}$ 浓度较高,表明 WSW 上风向安徽境内的外源输送影响较大.苏锡常都市圈 SSE 风向 $PM_{2.5}$ 浓度很高,可能对下风向的南京都市圈造成影响.浙中城市群主导方向比较单一, N 和 SSE 风向下空气 $PM_{2.5}$ 含量接近 $140 \mu g \cdot m^{-3}$,其它风向下污染很小,可能受到北部苏常都市圈和南部福建省的外源 $PM_{2.5}$ 输送的影响.东风、东南和东北风向下各城市群 $PM_{2.5}$ 含量普遍较低,这是由于长三角的东北方向为大海,污染源较小,空气质量较好,该风向有利于稀释本地污染源的影响.

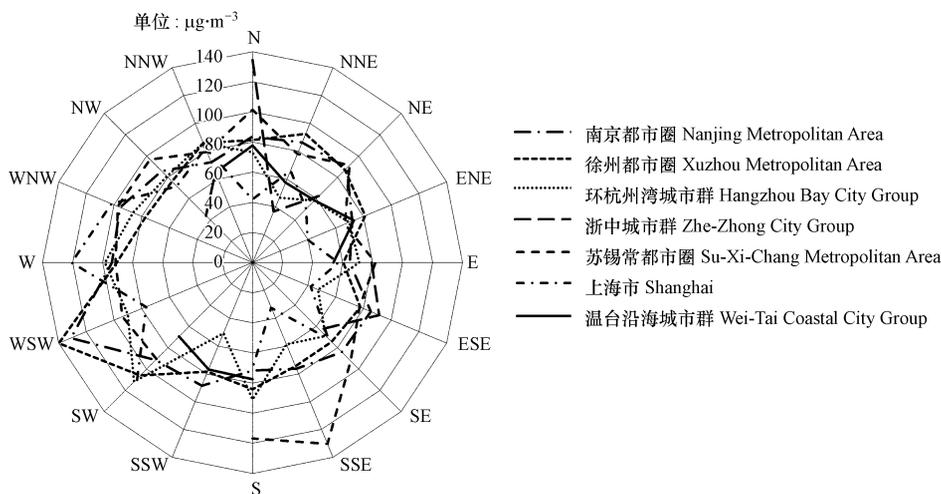


图 4 风向与 $\rho(PM_{2.5})$ 浓度的关系

Fig.4 Relationship between wind direction and $\rho(PM_{2.5})$

3 结论 (Conclusion)

(1) 长三角地区秋冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变异系数介于 10%—100% 之间, 变异性程度属于中等水平; 进入冬季后 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 基底效应逐渐增加, 人为源影响逐渐加强. 不同方向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变程差异明显, 东-西方向大于南-北方向, 可按照 PM_{2.5} 变程的 1/4—1/2 对环境空气质量监测网络进一步优化.

(2) 长三角地区秋冬季 PM_{2.5} 污染呈集中连片趋势, 污染重心主要位于苏锡常都市圈、南京都市圈和徐州都市圈. 进入冬季后污染程度逐渐加剧, 可能与冬季需要消耗更多化石能源发电取暖有关, 还可能受到 SO₂ 或 NO₂ 在不利气象条件下形成的二次气溶胶的重要影响.

(3) 长三角地区秋冬季不同方向 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 差异较大, 可能受到外源气流输送的强烈影响. 污染重心中苏锡常都市圈受东南风向气流输送的影响较大, 南京都市圈和徐州都市圈则是偏西风向下污染较为严重.

参考文献 (References)

- [1] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 [J]. 环境科学, 2014, 35 (2): 418-427.
ZHAO C X, WANG Y Q, WANG Y J, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, 35 (2): 418-427 (in Chinese).
- [2] 孙玉伟, 周学华, 袁琦, 等. 济南市秋末冬初大气颗粒物和气体污染物污染水平及来源 [J]. 环境科学研究, 2012, 25 (3): 245-252.
SUN Y W, ZHOU X H, YUAN Q, et al. Particle and gaseous pollutant levels and sources in the late fall and early winter in Ji'nan City [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25 (3): 245-252 (in Chinese).
- [3] ATSUDA K, WATANABE I, MIZUKAMI K, et al. Dry deposition of PM_{2.5} sulfate above a hilly forest using relaxed eddy accumulation [J]. Atmospheric Environment, 2015, 107: 255-261.
- [4] JIN S, GUO J, WHEELER S, et al. Evaluation of impacts of trees on PM_{2.5} dispersion in urban streets [J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 277-287.
- [5] KONG S, LI X, LI L, et al. Variation of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{2.5} during winter haze period around 2014 Chinese Spring Festival at Nanjing: Insights of source changes, air mass direction and firework particle injection [J]. Science of the Total Environment, 2015, 520: 59-72.
- [6] LI Y C, SHU M, HO S S H, et al. Characteristics of PM_{2.5} emitted from different cooking activities in China [J]. Atmospheric Research, 2015, 166: 83-91.
- [7] CHEN W, TANG H, ZHAO H. Diurnal, Weekly and monthly spatial variations of air pollutants and air quality of Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119: 21-34.
- [8] FERM M, SJÖBERG K., Concentrations and emission factors for PM_{2.5} and PM₁₀ from road traffic in Sweden [J]. Atmospheric Environment, 2015, 119: 211-219.
- [9] TIWARI S, SRIVASTAVA A K, BISHT D S, et al. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: influence of meteorology [J]. Atmospheric Research, 2013, 125: 50-62.
- [10] PATERAKI S, ASIMAKOPOULOS D N, FLOCAS H A, et al. The role of meteorology on different sized aerosol fractions (PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}) [J]. Science of the Total Environment, 2012, 419: 124-135.
- [11] 徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域 PM_{2.5} 时空变异特征 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 (9): 951-957.
XU W J, HE F F, LI H X, et al. Spatial and temporal variations of PM_{2.5} in the Pearl River Delta [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27 (9): 951-957 (in Chinese).
- [12] 张懿华, 段玉森, 高松, 等. 上海城区典型空气污染过程中细颗粒物污染特征研究 [J]. 中国环境科学, 2011, 31 (7): 1115-1121.
ZHANG Y H, DUAN Y S, GAO S, et al. Characteristics of fine particulate matter during a typical air pollution episode in Shanghai urban area [J]. Chinese Environmental Science, 2011, 31 (7): 1115-1121 (in Chinese).
- [13] 云慧, 何凌燕, 黄晓锋, 等. 深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 [J]. 环境科学, 2013, 34 (4): 1245-1251.
YUN H, HE L Y, HUANG X F, et al. Characterising seasonal variation and spatial distribution of PM_{2.5} species in Shenzhen [J]. Environmental Science, 2013, 34 (4): 1245-1251 (in Chinese).
- [14] HUANG P, ZHANG J, TANG Y, et al. Spatial and temporal distribution of PM_{2.5} pollution in Xi'an City, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12 (6): 6608-6625.

- [15] 蒲维维, 赵秀娟, 张小玲. 北京地区夏末秋初气象要素对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 716-723.
PU W W, ZHAO X J, ZHANG X L. Effect of meteorological factors on $PM_{2.5}$ in late summer and early autumn of Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22 (6): 716-723(in Chinese).
- [16] 郑晓霞, 赵文吉, 晏星, 等. 降雨过程后北京城区 $PM_{2.5}$ 日时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 797-805.
ZHENG X X, ZHAO W J, YAN X, et al. Spatial and temporal variation of $PM_{2.5}$ in Beijing City after rain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (5): 797-805(in Chinese).
- [17] 秦珊珊. 悬浮颗粒物 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的统计分析预测[D]. 兰州: 兰州大学学位论文, 2014.
QIN S S. Statistical analysis and forecasting of suspended particulate matters, PM_{10} and $PM_{2.5}$ [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014(in Chinese).
- [18] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
LIU A L, WANG P F, DING Y Y. An introduction to geostatistics [M]. Beijing: Science Press, 2012(in Chinese).
- [19] 赵文慧, 官辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2154-2163.
ZHAO W H, GONG H L, ZHAO W J, et al. Spatial and temporal variation of Beijing inhalable particulate matter and its meteorological factors based on geostatistical analysis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30 (11): 2154-2163(in Chinese).
- [20] 郭广慧, 张航程. 宜宾市城市土壤锌含量的空间分布特征及污染评价[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 125-133.
GUO G H, ZHANG H C. Spatial distribution and pollution assessment of Zn in urban soils of Yibin, Sichuan Province [J]. Geographical Research, 2011, 30 (1): 125-133(in Chinese).
- [21] STYTYZ M R, Parrott R W. Using kriging for 3d medical imaging [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 1993, 17(6): 421-442.
- [22] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 161-169.
WANG S Q, ZHU S L, Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. Geographical Research, 2001, 20 (2): 161-169(in Chinese).
- [23] 张淑娟, 何勇. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39-44.
ZHANG S J, HE Y. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19 (2): 39-44(in Chinese).
- [24] 张仁铎. 空间变异理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG R D. The theory and application of spatial variability [M]. Beijing: Science Press, 2005(in Chinese).
- [25] 沈正平, 马晓冬. 江浙两省城市群的空间格局比较[J]. 中国城市经济, 2009, 2: 44-47.
SHEN Z P, MA X D. Jiangsu and Zhejiang province city spatial pattern two group comparison [J]. Chinese Urban Economy, 2009, 2: 44-47(in Chinese).
- [26] 孙华臣, 卢华. 中东部地区雾霾天气的成因及对策[J]. 宏观经济管理, 2013, 6: 48-50.
SUN H C, LU H. The causes and countermeasures of haze weather in the eastern region [J]. Hong Guan Jing Ji Guan L, 2013, 6: 48-50 (in Chinese).
- [27] 杨文夷, 李杰, 朱莉莉, 等. 我国空气污染物人为源排放清单对比[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 703-711.
YANG W Y, LI J, ZHU L L, et al. Comparison of anthropogenic emission inventories of China [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26 (7): 703-711(in Chinese).
- [28] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1858-1871.
HUANG C, CHEN C H, LI L, et al. Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31 (9): 1858-1871(in Chinese).
- [29] 刀谱, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析[J]. 环境化学, 2015, 34(1): 60-69.
DAO X, ZHANG L L, WANG C, et al. Beijing, Tianjin and in winter and summer $PM_{2.5}/PM_{10}$ and water soluble ionic group sub regional pollution characteristics analysis [J]. Environmental Chemistry 2015, 34(1): 60-69(in Chinese).
- [30] 王涛, 施梦琦, 陈秀鹏, 等. 春运期间北京市 $PM_{2.5}$ 污染特征[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2127-2129.
WANG T, SHI M Q, CHEN X J, et al. During the Spring Festival in Beijing city $PM_{2.5}$ pollution characteristics of [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(11): 2127-2129 (in Chinese).