

无锡市大气污染物污染特征及影响因素研究*

王涛 陈梦平 周梦翩 李晶 吴松峻 罗敏 夏忠欢[#]

(江苏省物质循环与污染控制重点实验室, 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要 利用2014年无锡市区的6种大气污染物浓度和气象因子等监测数据,研究了无锡市各种大气污染物的污染特征及其影响因素。结果表明:(1)无锡市PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO浓度的季节变化特征为冬季最高,夏季最低;O₃浓度表现为夏季最高,冬季最低。就全年的综合情况而言,颗粒物污染,尤其是PM_{2.5}污染最严重。(2)PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO浓度间两两呈正相关;PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO浓度均与O₃浓度呈负相关。(3)温度与PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO浓度呈负相关,与O₃浓度呈正相关;相对湿度与PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃浓度呈负相关,与CO浓度无相关性;风级与PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO浓度呈负相关,与O₃浓度无相关性。降水有利于PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃浓度的降低,但对CO浓度影响不大。(4)无锡市空气质量周末比工作日差。NO₂、SO₂浓度周末低于工作日,O₃浓度周末高于工作日,呈现明显的“周末效应”;PM_{2.5}、CO浓度周末高于工作日,未出现“周末效应”。

关键词 大气污染物 相关性 气象因子 “周末效应” 无锡

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.12.015

Pollution characteristics and influence factors of air pollutants in Wuxi City WANG Tao, CHEN Mengping, ZHOU Mengpian, LI Jing, WU Songjun, LUO Min, XIA Zhonghuan. (School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Jiangsu Provincial Key Laboratory of Materials Cycling and Pollution Control, Nanjing Jiangsu 210023)

Abstract: The pollution characteristics and influence factors of 6 kinds of air pollutants in Wuxi City were studied by analyzing the monitoring data of both air pollutant concentrations and meteorological factors in 2014. The results showed that: (1) the seasonal change feature of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ and CO concentrations was highest in winter and lowest in summer while the feature of O₃ was highest in summer and lowest in winter. As far as the whole year concerned, atmospheric particulates pollution, especially PM_{2.5} pollution was the most serious. (2) PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO concentrations were positively correlated with each other and PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO concentrations were negatively correlated with O₃ concentrations. (3) Temperature had negative correlations with PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO concentrations, but positive correlation with O₃ concentrations. Relative humidity had negative correlations with PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ concentrations, but no correlation with CO concentrations. Wind scale had negative correlations with PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO concentrations, but no correlation with O₃ concentrations. Rainfall was able to lower PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃ concentrations while had no effect on CO concentrations. (4) Air quality in Wuxi City was worse on weekends than on weekdays. NO₂ and SO₂ concentrations were lower on weekends than on weekdays while O₃ concentrations were higher on weekends than on weekdays, indicating “weekend effect”. PM_{2.5} and CO concentrations were higher on weekends than on weekdays, not indicating “weekend effect”.

Keywords: air pollutants; correlation; meteorological factor; “weekend effect”; Wuxi City

近年来,我国能源消耗量的持续攀升导致大气中污染物的种类和浓度不断增加,对人体健康产生诸多危害。目前,已有许多针对PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO、O₃等大气污染物的浓度特征及影响因素的研究。但这些研究大多面向某种污染物或某一季

节的污染情况,少有针对多种污染物的全年浓度特征的研究。此外,目前国内外关于大气污染物的浓度特征及影响因素的研究多以北京、天津、上海、南京等特大城市为对象,鲜有对无锡大气污染物的相关研究。

第一作者:王涛,男,1994年生,本科,研究方向为污染物的环境行为及生态与健康风险评价。[#]通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No.41001344);中国博士后科学基金资助项目(No.2013M541696);江苏省高校自然科学基金项目(No.13KJB610008);江苏省博士后科研资助计划项目(No.1301040C);南京师范大学高层次人才科研启动基金资助项目(No.2012105XGQ0102);南京师范大学研究生教育教学改革研究与实践课题(No.1812000002A479);环境基准与风险评估国家重点实验室课题(No.SKLECR2013OFF07)。

表 1 6 种大气污染物质量浓度季节变化特征
Table 1 Concentrations of 6 kinds of air pollutants in different seasons

指标	春季(3/11—5/20)		夏季(5/21—9/17)		秋季(9/18—11/30)		冬季(12/1 至次年 3/10)		全年	
	平均值± 偏差	最大日 平均值	平均值± 偏差	最大日 平均值	平均值± 偏差	最大日 平均值	平均值± 偏差	最大日 平均值	平均值± 偏差	最大年 平均值
PM _{2.5} /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	65.3±21.2	123.3	56.8±24.2	132.7	64.2±27.6	150.4	83.5±43.6	224.9	67.3±32.7	224.9
PM ₁₀ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	108.7±37.6	269.0	89.6±41.7	276.3	103.9±38.7	225.4	123.8±60.5	340.5	105.6±48.3	340.5
SO ₂ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	25.6±8.3	47.6	20.5±6.5	39.0	31.1±10.1	54.6	37.7±14.8	88.3	28.2±12.4	88.3
NO ₂ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	51.5±13.3	95.0	33.1±8.8	59.2	43.2±14.0	81.3	53.5±19.1	131.0	44.3±16.6	131.0
CO /($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.107±0.257	2.235	1.006±0.244	1.812	1.045±0.293	1.904	1.259±0.419	2.735	1.103±0.330	2.735
O ₃ /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	64.3±21.5	149.7	79.1±30.2	157.7	54.4±25.1	101.9	33.6±13.9	71.4	58.8±29.9	157.7

本研究以 2014 年无锡市区各类大气污染物浓度、温度、相对湿度、风级的日平均值和天气状况等数据为基础,探究了无锡市区各类大气污染物的浓度特征及影响因素,力争为无锡地区的大气污染防治提供科学性参考。

1 区域特征及数据

1.1 研究区域的特征

无锡市(31°7′~32°2′N,119°33′~120°38′E)位于江苏省南部,长江三角洲平原腹地,是太湖流域的交通中枢,包括无锡市区和江阴、宜兴两个县级市。无锡市属典型的亚热带季风气候,四季分明、气候温和、雨水充沛、日照充足,常年平均气温 16.2℃,年均降水量 1 121.7 mm,年均雨日 123 d,年均日照时数 1 924.3 h。

1.2 数据来源和数据处理

数据资料来自中国环境空气质量在线监测分析平台,包括 2014 年无锡市区 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度日平均值,O₃ 日最大 8 h 平均值,温度、相对湿度、风级日平均值和天气状况。利用 SPSS 19.0 对各组变量进行 K-S 统计检验。由于部分样本数据及其变换值不服从正态分布,故采用 Spearman 秩相关分析和相关系数双侧检验来判定变量间的相关性。

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度季节变化特征

利用候温法划分季节,划分方法详见《气候季节划分》(QX/T 152—2012)。6 种污染物在各季节及全年的质量浓度见表 1。将污染物浓度与《环

境空气质量标准》(GB 3095—2012)的二级标准作比较。

PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的季节变化特征均为冬季最高(83.5、123.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),春季次之(65.3、108.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),秋季(64.2、103.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)与夏季(56.8、89.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)较低,分别与南京市^[1]和湛江市^[2]相同。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的年平均值依次为 67.3、105.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分别是 GB 3095—2012 二级标准的年平均(35、70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的 1.9、1.5 倍,均低于无锡市 2011 年的监测值^[3]。

NO₂ 与 CO 的季节变化特征与颗粒物相似,也是冬季最高(53.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1.259 mg/m^3),春季次之(51.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1.107 mg/m^3),秋季(43.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1.045 mg/m^3)与夏季(33.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1.006 mg/m^3)较低。两者年平均值依次为 44.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 1.103 mg/m^3 ,其中 NO₂ 年平均值是 GB 3095—2012 二级标准的年平均(40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的 1.1 倍,四季 CO 日平均值均低于 GB 3095—2012 二级标准的 24 h 平均值(4 mg/m^3)。

SO₂ 的季节变化特征与其他指标略有不同,为冬季最高(37.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),秋季次之(31.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),春季(25.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)和夏季(20.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)较低,与泸州市^[4]相同。SO₂ 年平均值为 28.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,低于 GB 3095—2012 二级标准的年平均(60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

综上,各季节 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 均为冬季最高,夏季最低。冬季因为取暖消耗大量化石燃料,春运期间交通运输量急剧增加,都会提升大气中 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 的含量。同时,冬季温度低,大气层易出现辐射逆温现象,不利于污染物的扩散迁移,使污染物浓度上升^[5-7]。夏季高温时

段,工厂和企业停工,化石燃料消耗量减少;多数人选择在家休息或外出休闲旅行,城市交通量明显减少,导致这 5 种污染物浓度下降。同时,夏季的气候状况有利于污染物的扩散。

O₃的季节变化特征为夏季最高(79.1 μg/m³),春季次之(64.3 μg/m³),秋、冬季较低(54.4、33.6 μg/m³)。O₃的季节变化特征与前 5 类污染物大致相反,最高和最低值分别出现在夏季和冬季,这与新疆部分地区^{[8][15]}和石家庄^[9]的情况相似。夏季太阳辐射强烈,有利于生成 O₃的光化学反应进行;秋季过后太阳光减弱,生成 O₃的光化学反应速率减缓。此外,夏季植被茂盛,能产生大量挥发性有机物(VOCs,O₃的前体物)^[16]。

此外,无锡夏季高温多雨、冬季低温少雨的气象特征也影响污染物的浓度变化。

2.2 污染物浓度相关性分析

对 6 种大气污染物浓度进行相关性分析,结果见表 2。PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度间两两呈正相关($P<0.01$)。这 5 种污染物具有同源性:汽车尾气排放^[11-14]和工业生产过程大量化石燃料消耗^[15]对大气中的颗粒物、SO₂、NO_x和 CO 浓度有较高的贡献率。

O₃浓度与 PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 浓度均呈负相关,这与一些研究结果^[16-17]相似。城市中的 O₃主要是其前体物 NO_x、CO、VOCs 等在合适的气象条件下反应生成的^[18]。日间 NO_x、CO 等在太阳光照射下不断被消耗,导致 NO_x、CO 浓度下降,O₃浓度上升;夜间 NO_x、CO 等不断积累并消耗 O₃,导致 O₃

浓度下降^[19]。CO 与 O₃浓度的相关性($r=-0.315$)弱于 NO₂与 O₃浓度的相关性($r=-0.410$),这是因为 CO 在大气化学反应中惰性相对较大,对 O₃浓度变化的影响不及 NO₂^[20]。PM_{2.5}、SO₂因为与 NO₂、CO 具有同源性,故分别与 O₃浓度呈负相关,只是相关性较弱。而无锡市的 PM₁₀主要来自土壤和扬尘^[21],与 NO₂和 CO 的同源性较弱,故其浓度与 O₃浓度无相关性。

2.3 气象因子对污染物浓度的影响

2.3.1 温度、相对湿度和风级对污染物浓度的影响

确定各种大气污染物浓度与气象数据间的相关性,结果见表 3,其中相关系数的置信度(双侧)均为 0.01。

温度与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度呈负相关。温度较高时,大气对流层内垂直对流运动强烈,有利于污染物的运输扩散;温度较低时,大气对流作用减缓,导致大气污染物的长期滞留^[22]。此外,温度升高还有助于颗粒物的布朗运动^[23]。温度与 O₃浓度呈正相关。高温环境中紫外辐射强烈,有利于 O₃的生成。

关于相对湿度对大气污染物浓度的影响,一般认为,在相对湿度<65%的情况下,随着相对湿度的升高,硫酸盐转化率(SOR)和硝酸盐转化率(NOR)升高^[24-25],导致 SO₂和 NO₂浓度降低,二次颗粒物浓度升高;颗粒物在相对湿度较高的环境下还能吸收空气中的水分,使自身的浓度升高。而在相对湿度>65%的情况下,颗粒物凝结成大粒子沉降、部分气态污染物溶于空气中的液态水、局部的湿沉降对

表 2 大气污染物浓度间的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among air pollutant concentrations

指标	PM _{2.5}		PM ₁₀		SO ₂		NO ₂		CO		O ₃	
	相关系数(r)	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平
PM _{2.5}	1.000		0.926 **	0	0.621 **	0	0.654 **	0	0.702 **	0	-0.126 *	0.016
PM ₁₀			1.000		0.724 **	0	0.660 **	0	0.619 **	0	-0.069	0.189
SO ₂					1.000		0.683 **	0	0.409 **	0	-0.284 **	0
NO ₂							1.000		0.432 **	0	-0.410 **	0
CO									1.000		-0.315 **	0
O ₃											1.000	

注:1) **表示在置信度(双侧)为 0.01 时相关性显著;*表示在置信度(双侧)为 0.05 时相关性显著。

表 3 大气污染物浓度与气象因子的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients between air pollutant concentrations and meteorological factors

气象因子	PM _{2.5}		PM ₁₀		SO ₂		NO ₂		CO		O ₃	
	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平	r	显著水平
温度	-0.214	0	-0.214	0	-0.463	0	-0.471	0	-0.289	0	0.633	0
相对湿度	-0.259	0	-0.498	0	-0.649	0	-0.307	0			-0.202	0
风级	-0.314	0	-0.237	0	-0.219	0	-0.262	0	-0.367	0		

大气污染物产生冲刷作用,都使颗粒物、 SO_2 、 NO_2 的浓度降低^[26-27]。此外,较高的相对湿度也不利于 O_3 的生成^{[8]1153}。2014 年无锡市区的相对湿度均值为 72%,总体来说对空气污染物的去除有积极意义。故相对湿度与各种大气污染物(除 CO)浓度呈负相关。因 CO 极难溶于水,且其作为 O_3 的前体物在高相对湿度情况下的光化学反应速率缓慢,故相对湿度的变化对其浓度影响不大,其浓度与相对湿度无相关性。

风级与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 浓度呈负相关。风对空气污染物有稀释扩散和运输的作用^[28]。但风级与 O_3 浓度无相关性。一般认为,紫外辐射才是影响 O_3 生成的关键性因素^{[8]1153}。

2.3.2 降水对污染物浓度的影响

根据天气资料,将 2014 年 3—12 月划分为降水日和非降水日(缺 1—2 月天气资料)。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 日平均值在降水日均低于非降水日(见图 1)。一般认为,湿沉降对大气污染物起到清除和冲刷作用,能改善空气质量^[29-30];同时,湿沉降会减少人类的户外活动,从而减少人为活动对大气质量的消极影响^{[31]104}。 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度在降水日分别比非降水日低 19.8%、28.3%、36.1%、12.9%、24.6%。降水对 PM_{10} 的去除率高于 $\text{PM}_{2.5}$,说明 PM_{10} 比 $\text{PM}_{2.5}$ 更容易在湿沉降中被去除,与北京^{[31]104} 的情况一致。降水对 SO_2 浓度的影响最大,与南京^[32] 的情况相似。此外, CO 在降水日和非降水日的日平均值分别为 1.096、1.092 mg/m^3 ,两者差别不大。 CO 极难溶于水,在湿沉降中难以被清除。

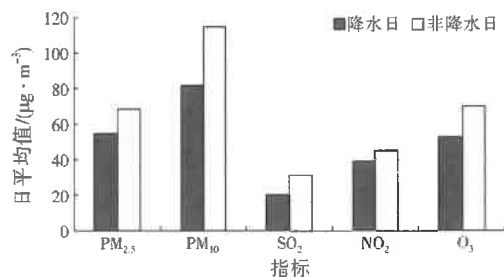


图 1 大气污染物日平均值在降水日和非降水日的比较
Fig.1 Air pollutant concentrations on rainy days and not rainy days

2.4 污染物浓度周内变化特征及“周末效应”研究

考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度间呈显著正相关($r=0.926$, $P<0.01$ (见表 2)),故在此只探讨 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 浓度的周内变化。如图 2 所示,工作日(周一至周五)期间, $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 CO 、

O_3 浓度均在周三出现谷值,而 NO_2 浓度的最小值出现在周一。 NO_2 主要来自机动车尾气排放^[33],部分城市上班族周末加班,选择周一休息,导致城市交通量在每周初始阶段未达到高峰。在周末(周六、周日), $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 浓度均表现为周六高于周日,可能是城市居民习惯周六外出娱乐休闲,而周日时选择在家休息,导致周六的交通量较大;部分工业企业周六正常生产营业,而周日休息。 O_3 浓度变化表现为周日略大于周六,这可用之前得出的 O_3 浓度与其他污染物浓度呈负相关的结论解释。

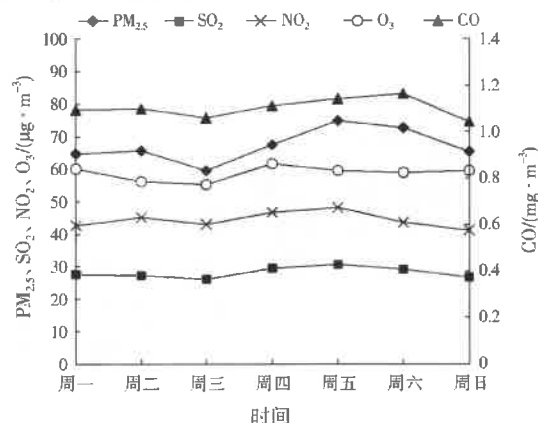


图 2 大气污染物周内质量浓度变化特征
Fig.2 Change features of air pollutant concentrations in a week

分析污染物浓度在工作日和周末的关系,可探讨污染物浓度的“周末效应”。“周末效应”由 CLEVELAND 等^[34]于 1974 年首次提出,即在周末 O_3 的前体物(NO_x 、 CO 、 VOCs 等)浓度低于工作日浓度的情况下 O_3 浓度反而高于工作日浓度的现象^[35]。我国许多学者在此基础上研究了空气质量指数(AQI)和其他大气污染物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 浓度周末低于工作日, O_3 浓度周末高于工作日。表 3 给出了 AQI 和上述 5 种大气污染物浓度在工作日和周末的均值,同时根据式(1)可得两者偏差(Dev ,%)。AQI 在周末大于工作日, Dev 为 4.2%,说明无锡市区的空气质量在周末普遍比工作日差,与宣城^[36]的情况相似。 NO_2 浓度周末低于工作日($Dev=-6.2\%$);而 O_3 浓度周末却高于工作日($Dev=0.9\%$),存在“周末效应”,这与北京^[37]、上海^[38]、南京^[39]、南通^[40]的情况相同。 CO 浓度周末略高于工作日($Dev=0.4\%$),不存在“周末效应”,与上海市郊^{[41]89}的情况相似。 SO_2 浓度周末低于工作日($Dev=-1.4\%$),存在“周末效应”,与南京^[42]的情况相似。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度周末高于工作日($Dev=$

表 4 AQI 及 5 种大气污染物质量浓度
Table 4 AQI and concentrations of 5 air pollutants

时间	AQI	NO ₂ /(μg·m ⁻³)	CO /(mg·m ⁻³)	O ₃ /(μg·m ⁻³)	SO ₂ /(μg·m ⁻³)	PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)
工作日	95	45.1	1.101	58.6	28.3	66.4
周末	99	42.3	1.105	59.1	27.9	68.9

3.8%),与天津^[43]的情况相似,不存在“周末效应”。CO 和 PM_{2.5} 的浓度特征与周末一次污染物排放少于平日这一规律相悖,说明无锡市区各监测点受外来污染物影响较大,而污染物迁移所需时间造成了这种“反周末效应”^{[41]88}。

$$Dev=(c_1-c_2)/c_2\times 100\% \quad (1)$$

式中: c_1 、 c_2 分别为大气污染物周末、工作日的均值,μg/m³(除 CO 单位为 mg/m³外)。

3 结 论

(1) 无锡市区 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度的季节变化特征为冬季最高,夏季最低;O₃ 浓度表现为夏季最高,冬季最低。就全年的综合情况而言,颗粒物污染,尤其是 PM_{2.5} 污染最严重。

(2) 相关性分析表明,PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度间两两呈正相关,其来源途径相似;PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 浓度均与 O₃ 浓度呈负相关。

(3) 气象因子影响污染物浓度特征:温度与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度呈负相关,与 O₃ 浓度呈正相关;相对湿度与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 浓度呈负相关,与 CO 浓度无相关性;风级与 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、CO 浓度呈负相关,与 O₃ 浓度无相关性。降水有利于 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 浓度的降低,但对 CO 浓度影响不大。

(4) 无锡市区空气质量周末比工作日差。NO₂、SO₂ 浓度周末低于工作日,O₃ 浓度周末高于工作日,呈现明显的“周末效应”;PM_{2.5}、CO 浓度周末高于工作日,未出现“周末效应”。

参考文献:

- [1] 魏玉香,银燕,杨卫芬,等.南京地区 PM_{2.5} 污染特征及其影响因素分析[J].环境科学与管理,2009,34(9):29-34.
- [2] 张羽,牛生杰,于华英.湛江市 PM₁₀ 质量浓度变化特征及时频分析[J].广东工业大学学报,2009,26(1):68-74.
- [3] 杨起超,曾立民,唐静明,等.无锡冬季和春季大气中细粒子化学组分及其特性分析[J].环境化学,2014,33(9):1501-1513.
- [4] 黄璐,李展,王斌.基于被动采样监测泸州市大气污染物 SO₂、NO₂ 浓度时空分布特性研究[J].四川环境,2014,33(4):47-52.
- [5] YANG Yiru, LIU Xingang, QU Yu, et al. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013[J]. Atmospheric Research, 2015,

- 155:192-203.
- [6] 车瑞俊,刘大猛,袁杨森.北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):556-563.
- [7] PÄIVI A, MARTIKAINEN J, HUSSEIN T, et al. Analysis and evaluation of selected PM₁₀ pollution episodes in the Helsinki Metropolitan Area in 2002 [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(17):3992-4005.
- [8] 刘新春,钟玉婷,何清,等.塔克拉玛干沙漠腹地与北缘城市近地面臭氧质量浓度分布特征[J].生态环境学报,2014,23(7).
- [9] 杜吴鹏,王跃思,宋涛,等.夏秋季石家庄大气污染变化特征观测研究[J].环境科学,2010,31(7):1409-1416.
- [10] 黄爱葵,李楠.植物源挥发性有机物的生态意义[J].亚热带植物科学,2011,40(3):81-86.
- [11] 王燕军,吉喆,尹航,等.重型柴油车污染物排放因子测量的影响因素[J].环境科学研究,2014,27(3):232-238.
- [12] 杨红龙,李磊,饶华炎,等.深圳大运会期间车辆限行对空气污染物浓度的影响[J].环境与健康杂志,2012,29(8):718-721.
- [13] 胡环,董洁霜.典型城市道路区域空气 TSP 和 PM₁₀ 污染特征研究——以上海市为例[J].天津师范大学学报:自然科学版,2013,33(4):44-48.
- [14] 孙峰,张大伟,孙瑞雯,等.北京地区冬季典型 PM_{2.5} 重污染案例析[J].中国环境监测,2014,30(6):1-12.
- [15] 何敏,王幸锐,韩丽.四川省大气固定污染源排放清单及特征[J].环境科学学报,2013,33(11):3127-3137.
- [16] 周勤迁,潘月鹏,王剑,等.黑龙江海伦农业区冬春 PM_{2.5} 和气象污染物污染特征[J].中国环境科学,2014,34(4):844-851.
- [17] 薛莲,孙杰,林云,等.深圳冬季霾日的大气污染特征[J].环境科学研究,2011,24(5):505-511.
- [18] WANG Yungang, HOPKE P K, XIA Xiaoyan, et al. Source apportionment of airborne particulate matter using inorganic and organic species as tracers[J]. Atmospheric Environment, 2012,55(3):525-532.
- [19] 刘晔,甘小兵,邱坚.镇江市臭氧浓度特征分析[J].镇江高专学报,2014,27(1):52-55.
- [20] 王占山,李云婷,陈添,等.北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J].中国环境科学,2014,34(12):3001-3008.
- [21] 韩博,冯银厂,毕晓辉,等.无锡市环境空气中 PM₁₀ 来源解析[J].环境科学研究,2009,22(1):35-39.
- [22] 袁杨森,刘大猛,车瑞俊,等.北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究[J].生态环境,2007,16(1):18-25.
- [23] 韩道文,刘文清,张玉钧,等.温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):619-624.
- [24] 温维,韩力慧,代进,等.唐山夏季 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J].北京工业大学学报,2014,40(5):751-758.
- [25] 岳利,钟流举,张涛,等.珠三角地区大气 PM_{2.5} 理化特性季节规律与成因[J].环境污染与防治,2015,37(4):1-6.
- [26] 黄虹,曾宝强,曹军骥,等.广州大学城大气 PM_{2.5} 质量浓度与影响因素[J].环境科学与技术,2009,32(5):103-106.

(下转第 95 页)