

环境科学、安全科学

杭州市 2014 年城区大气污染物浓度变化特征观测分析

于 洲 刘寿东* 王咏薇 胡 凝

(南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044)

摘 要 为了研究杭州市城区大气污染物的浓度变化特征,选取了 2014 年杭州市环境监测中心站空气质量自动监测站的大气污染物浓度数据;并结合地面气象要素资料进行分析。结果表明,在观测期间,杭州市城区大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况最严重,日平均浓度的超标率达 30.7%;各污染物全年分布呈现明显的季节变化: O_3 浓度呈现与该季节气温和太阳辐射强度在全年中的排列相一致的夏、秋、春和冬季依次递减的分布, NO_2 则呈现冬高夏低,春秋介于两者之间的分布, SO_2 浓度从高到低依次为冬季>春季>秋季>夏季, CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度都呈现出冬高夏季、春秋季节变化平缓的季节变化特征;各污染物浓度日变化呈现不同变化规律: O_3 和 O_x 浓度四季的日变化都呈单峰型分布,浓度峰值都出现在 13:00~15:00, SO_2 也呈现单峰型分布,在 09:00~10:00 左右达到峰值,于次日 04:00 左右达到谷值, NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的日变化特征类似,呈现双峰型变化,且峰值都与早晚高峰时间基本重合,冬季相对于其他季节首峰值时间推迟一小时左右;利用成对样本 T 检验进行比较,结果表明: NO_2 浓度在 17:00~次日 09:00 工作日均明显高于周末,而在 09:00~14:00 工作日略低于周末,14:00~17:00 浓度基本相等, O_3 浓度则在工作日的各时刻均高于周末;气象要素是大气污染物分布的重要影响因子, O_3 与气温和风速呈极显著正相关关系,与湿度呈极显著负相关关系, NO_2 与之相反, SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 与风速呈现一致的显著负相关关系外,与其他气象要素在不同季节差异性较大, SO_2 和 PM_{10} 与相对湿度呈现极显著负相关关系, CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 与气温和湿度的相关性在不尽相同。

关键词 杭州 大气污染 O_3 NO_2 SO_2 CO $\text{PM}_{2.5}$ PM_{10}

中图法分类号 X511; **文献标志码** B

自上世纪 50 年代以来,全球性矿石燃料的使用急剧增长,由于人类活动而向大气中排放的污染物随之与日俱增,对于大气环境造成的损害也日益加剧,其对生态以及人类健康造成的一系列负面效应已经引起国内外学者以及公众的普遍关注^[1-2]。近地面 O_3 是前体污染物(如氮氧化物和挥发性有机化合物)在大气中发生光化学反应形成的,城市大气中的 O_3 高于一定的浓度时就会对人体健康产生不利影响^[3]。 NO_x 和 SO_2 是能溶于雨滴形成酸雨,对生态系统造成伤害,且过量吸入会对对呼吸系统造成伤害,长期吸入甚至会影响到肺部结构^[4,5]。 CO 污染是常见的空气污染之一,在城市污染中程度相对较低,但随着交通等排放源日益增强,其危害亦不容

忽视。 $\text{PM}_{2.5}$ 是指大气中固体和液体粒子混合而成的粒径小于等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物,不仅对人呼吸系统有直接的刺激作用,而且还能作为病毒、细菌的载体传播疾病^[6-8],是现今我国城市首要的大气污染物^[9,10]。 PM_{10} 粒子是指动力学直径小于或等于 $10\ \mu\text{m}$ 的大气颗粒物,也会对人体健康产生不利影响,但相对小于 $\text{PM}_{2.5}$,有研究表明气溶胶越小对人体健康的影响越大^[11,12]。

近年来,环境问题已成为人们关注的热点,保护环境,抑制环境恶化的呼声越来越高,大气污染作为人们最直接接触的污染,也日益受到重视,国内的学者也对大气污染物做了大量的研究。张敏等^[13]利用南京北郊大气 SO_2 、 NO_2 和 O_3 观测资料,分析了南京北郊大气中 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的变化特征。郑瑶等^[14]以郑州市 2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 颗粒物连续自动监测数据为基础,分析了郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的变化特征和它们之间的相关关系。张宝贵等^[15]则分析了秦皇岛市的空气污染与气象要素之间的关系。此外在北京^[3]、上海^[16]、广州^[17]等地也都对大气污染物的变化与特征开展了相关研究。

2016 年 1 月 15 日收到 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)、教育部长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)资助
第一作者简介:于 洲(1991—),男,硕士研究生。研究方向:大气环境。E-mail: 379122046@qq.com。

* 通信作者简介:刘寿东(1963—),男,教授。研究方向:大气环境。E-mail: lsd@nuist.edu.cn。

杭州是长三角地区的经济发达城市之一,还是著名的旅游城市,随着城市化大潮的迅猛发展,城市空气质量明显下降,污染日趋严重。目前已有一些关于杭州市大气污染的研究,比如利用洪盛茂等^[18]利用 2002~2007 年杭州市区空气污染物监测资料分析,发现市区环境空气质量正在好转,首要污染物 PM_{10} 的浓度呈现逐年降低的趋势,几年来 SO_2 和 NO_2 这两种污染物均未超出国家环境空气二级标准。李震宇等^[19]分析了杭州市区空气中的 SO_2 浓度及变化,结果表明,不同季节 SO_2 的浓度高值中心位置不同,夏季大气扩散条件好,高值中心南移,冬季逆温层厚,高值中心区变大。此外,还有研究分析了杭州市污染物排放清单及特征、污染物的化学组成、酸雨的现状以及成因等^[20-22]。但总体上来说,自 2013 年雾霾等污染我国得到巨大重视以来,杭州市已有的关于大气污染物的研究还是不够深入和全面,其中一些较为基础性研究还未开展。

本文选取了杭州市环境监测中心站空气质量自动监测站的 2014 年大气污染物浓度数据,并结合地面气象要素资料,对杭州市城区大气污染物的浓度变化特征及气象因子的影响进行分析,以期为我国大气污染物产生机理、演变过程和时空分布研究的参考,为大气污染物的控制政策和对策提供数据。

1 资料与方法

分析资料的选取包括 2014 年杭州市国家基本气象站($30^{\circ}14'N$ 、 $120^{\circ}10'E$,海拔 41.7 m)的常规地面观测的逐时和逐日气象要素资料。观测方法与仪器均符合中国气象局对于气象要素观测的规范与要求,以及 2014 年杭州市环境监测中心站空气质量自动监测站($30^{\circ}16'N$ 、 $120^{\circ}8'E$,海拔 19 m)的大气污染物(包括 O_3 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10})的逐时和逐日浓度资料,此空气质量自动监测站隶属于国家环境空气自动监测控制点位。环境监测中心站与杭州国家基本气象站与之间水平距离约为 5 km,观测站处在城区的地势较为平坦,周围多为住宅区以及行政区,相对于整个杭州城区,周边高大建筑极少且无明显的局地排放源,具有较好的代表性。

2 结果与讨论

2.1 污染物变化特征

2014 年杭州市 O_3 、 O_x 、 $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度逐日变化趋势,如图 1 所示,其中 O_x 指 NO_2 和 O_3 的浓度和, $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 指 O_3 的 8 小时滑动均值最大值。在观测期间, O_3 的小时平均浓度有效观测数据为 8 534 h,其中超过国家《环境空气质量

标准》(GB 3095—2012)二级标准中浓度限值的为 124 h,超标率为 1.4%,最高值达到 $283 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 超过国家二级标准的有 47 d,超标率为 12.9%,最高值达到 $249 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从图 1 中可以看出,2014 年全年 O_3 、 $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 的逐日变化呈现出一致的变化规律,即单峰型变化;具体表现为,从 1 月份开始浓度逐渐升高,到 6 月份时达到最高值,之后逐渐降低,一直到 10 月份都保持高值,而后开始迅速下降,并在 12 月份达到最低值。 O_3 在 6 月份的月平均浓度分别为 $(74.0 \pm 60.69) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。杭州市 O_3 浓度呈现明显的季节变化,如表 1,其大小依次排列为夏季、秋季、春季和冬季。与该季节气温和太阳辐射强度在全年中的排列相一致,在其他学者的研究中北京^[23-24]、成都^[25]、济南^[26]、上海^[27]等地也都表现为夏季的近地面臭氧浓度较高,而冬季很低。高温和强太阳辐射等气象条件能有利于光化学反应的进行,因而是促进臭氧生成的重要因素 O_x 的全年逐日变化表现为,1 月份浓度较高,而后逐渐降低,到 2 月份达到全年最低值,之后又逐渐升高到 6 月份到达最高值,一直到年底都保持较高的浓度水平。 O_x 是 NO_2 和 O_3 的浓度和,即反映了大气的氧化性,从表 1 中可以看到,除了冬季,杭州市大气都处于较高的水平,说明了在这些季节里杭州市都是高浓度臭氧生成和储存的地区。

在观测期间, NO_2 的 8 702 h 的小时平均浓度全部达到国家二级标准中浓度限值;日平均浓度超过国家二级标准的有 19 d,超标率为 5.2%,最高值达到 $107.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,超标时间集中在 1、11 和 12 月份;年平均浓度为 $(50.2 \pm 22.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,高于国家二级标准年浓度限值 $40 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图 1 中可以看出, NO_2 浓度的逐日变化与 O_3 呈现明显的相反的变化规律,具体表现为,1 月份到 2 月份浓度下降较快,在 2 月份达到最低值后,小幅升高并且平稳保持到 6 月份,开始逐渐降低,在 9 月份又出现转折持续升高直到年底。最高值出现在 1 月 2 日,浓度为 $107.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,最低值出现在 2 月 4 日,浓度为 $14.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从表 1 中也可以看到, NO_2 也呈现明显的季节变化,浓度最高的冬季 $[(59.1 \pm 24.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 比浓度最低的夏季 $[(38.4 \pm 15.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 高出 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,春秋两季介于两者之间,分别为 $(52.2 \pm 20.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(51.3 \pm 22.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。该结果与尉鹏等对中国东南部中心城市 NO_2 季节演变特征的研究结果一致。另外 Zhang Q 等^[28]研究表明,在自然源排放占主导的地区, NO_2 浓度最大值一般出现会在夏季;在人为源排放占主导的地区, NO_2 浓度最大值一般出现在冬季。由此

可见,杭州市 NO_2 污染排放是以人为源为主导的。

在观测期间, SO_2 小时平均、日平均和年平均浓度均达到国家二级标准中浓度限值。如表 1 所示,年平均浓度为 $(20.7 \pm 13.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,显著低于国家二级标准年浓度限制 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,接近于国家一级标准年浓度限制 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。日平均浓度除了出现在 1 月 4 日的最高值,为 $81.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其他时间的浓度均低于 $60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从图 1 中可以看到, SO_2 浓度的逐日变化总体上呈现先降低后升高的变化规律,具体表现为,年初时 SO_2 浓度较高,随后开始降低,一直到 8 月份左右到达谷底,并保持一段时间低值后,浓度开始上升,到年底又恢复高值。 SO_2 浓度季节变化,如表 1,浓度从高到低依次为冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,夏季的浓度只为其他季节浓度的一半左右。究其原因,夏季湿度较大,且由于降水清除与转化作用的影响,因而 SO_2 的浓度一般低于其他季节^[29]。相比于其他污染物,杭州市大气 SO_2 浓度的属于较低水平。

在观测期间,CO 小时平均浓度、日平均浓度都达到国家二级标准中浓度限值。小时平均浓度除了出现在 2 月 25 日 15 时的最高值,为 $5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,其他时间的浓度均低于 $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,不到国家二级标准的浓度限值 $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的一半;日平均浓度最高值为 $1.93 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,也不到国家二级标准的浓度限值 $4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的一半。由图 1,CO 浓度的逐日变化呈现为 1、2、11、12 月份浓度高,其他时间浓度变化较为平缓,其中 8 月和 10 月出现低值,结合表 1,可以看出冬季最高,夏季最低,春秋季节介于两者之间。一方面夏季的热力条件、大气湍流运动、水平输送和垂直扩散条件均比冬季更好;另一方面夏季的太阳辐射强、气温高,大气光化学反应效率更高,因而 CO 作为光化学前提物,经过光化学反应后浓度下降^[30]。

在观测期间, $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度超过国家二级标准浓度限制 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的有 112 d,超标率为 30.7%,其中超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的高值全部集中在 1 月份和 2 月份。如表 1 所示,年平均浓度为 $(20.7 \pm 13.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,低于国家二级标准年浓度限制 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 PM_{10} 日平均浓度超过国家二级标准浓度限制 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的有 39 d,超标率为 10.7%,超过 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的高值分布在 1 月份、2 月份和 5 月份。由此可见,2014 年杭州市城区大气中颗粒物污染最严重,污染程度远高于其他污染物。从图 1 中可以看到, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度的逐日变化呈现基本一致的变化规律,都呈现了中间低两边高的“U”型分布,即 1、2、11、12 月份浓度高,7、8、9 月浓度

低,3~9 月浓度变化较为平缓,呈现出明显的冬季高、夏季低、春秋季节介于两者之间的季节变化,这与深圳、常州、郑州^[31,32,14] 的研究结果一致,原因可能与冬季气温低、静风频率高,易形成逆温天气有关^[10]。而在 10 月份前后颗粒物呈现的高值,与在蔡惠文^[32] 在常州地区对颗粒物质量浓度变化特征研究一致,可能与秸秆的燃烧有关。

表 1 2014 年各季节的污染物浓度值 $\pm$ 标准偏差/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$

Table 1 Seasonal concentrations of some atmospheric pollutants in 2014/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$

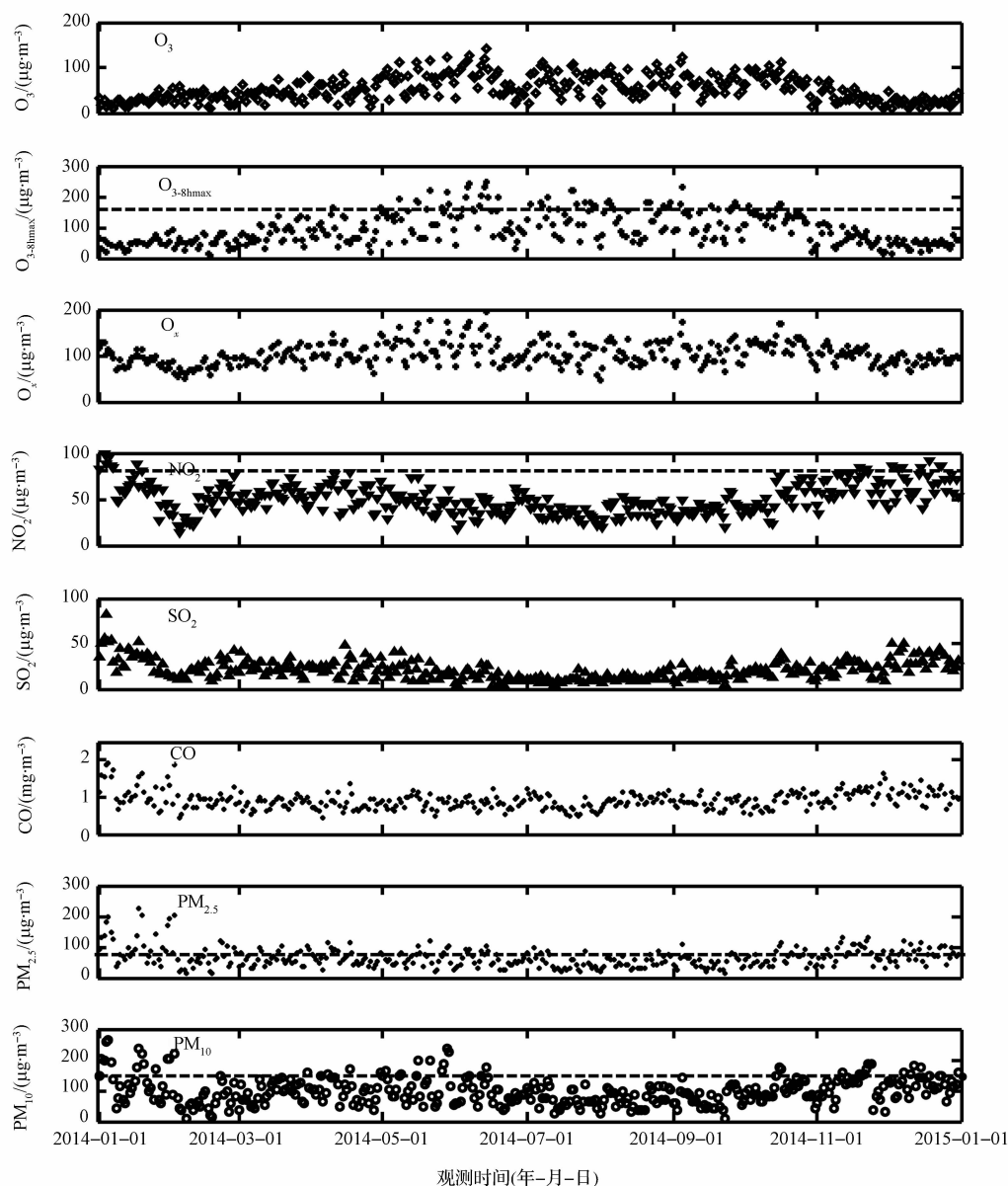
项目	春	夏	秋	冬	年平均
O_3	56.6 ± 44.3	70.9 ± 56.3	58.6 ± 47.9	28.1 ± 21.0	53.7 ± 47.1
O_x	108.7 ± 37.5	109.1 ± 51.4	109.5 ± 40.7	86.8 ± 22.0	103.6 ± 40.6
NO_2	52.2 ± 20.4	38.4 ± 15.3	51.3 ± 22.1	59.1 ± 24.5	50.2 ± 22.1
SO_2	22.2 ± 12.9	11.9 ± 7.0	19.3 ± 10.3	29.6 ± 16.7	20.7 ± 13.8
CO/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.85 ± 0.24	0.83 ± 0.24	0.95 ± 0.28	1.05 ± 0.40	0.92 ± 0.31
$\text{PM}_{2.5}$	62.3 ± 30.5	50.9 ± 26.5	63.7 ± 33.2	82.8 ± 52.3	64.8 ± 38.6
PM_{10}	106.1 ± 55.0	79.4 ± 42.1	96.1 ± 46.4	113.7 ± 66.7	98.8 ± 54.8

注:春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月和1月)。

2.2 不同季节污染物浓度日变化分析

图 2 展示的是 2014 年春、夏、秋、冬季杭州市 O_3 、 O_x 、 NO_2 、 SO_2 、CO、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度日变化趋势。从图中可以看到, O_3 和 O_x 浓度四季的日变化都呈单峰型分布,浓度峰值都出现在 13:00~15:00, O_3 谷值出现在 05:00~07:00, O_x 谷值则出现在 04:00~06:00,各时刻浓度的季节变化从高到低依次是夏季、秋季、春季、冬季, O_3 和 O_x 日变化振幅都是夏季最大,分别是 $112.52 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $100.16 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,冬季最小,分别是 $40.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $34.27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。近地面 O_3 是其前体物经过光化学反应生成的二次污染物,因而其浓度日变化主要受太阳辐射强度变化的影响。日出前 O_3 浓度随着时间变化的幅度很小,呈现缓慢的下降的趋势;日出后初期太阳辐射较弱,且出现交通早高峰,NO 浓度升高,作为还原物质消耗了 O_3 ,使的 O_3 在 06:00~07:00 出现一天中的最低值;而后随着太阳辐射的增强, O_3 的浓度逐渐升高,在 13:00~14:00 出现的峰值;随后直到午夜 O_3 浓度逐渐下降^[33]。

NO_2 浓度的日变化呈双峰型变化,如图 2 上午的峰值都出现在 07:00~09:00,下午的峰值出现在 17:00~21:00,谷值则出现在 13:00~15:00。上午出现的峰值主要来自早高峰汽车尾气的排放,以及汽车尾气和工业源产生的大量的 NO 与 O_3 发生反应,使 NO 转化为 NO_2 ;但随着太阳辐射的增强和温度的逐渐升高, NO_2 光解生成 O_3 ,大量消耗了 NO_2 ,



图中虚线表示该污染物在《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准中浓度限值, $O_{3-8hmax}$ 指 O_3 8 h 滑动均值最大值

图1 2014年 O_3 、 O_x 、 $O_{3-8hmax}$ 、 NO_2 、 SO_2 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度逐日变化

Fig. 1 Concentration variation of O_3 , O_x , $O_{3-8hmax}$, NO_2 , SO_2 , CO , $PM_{2.5}$ and PM_{10} in 2014

因而在中午时分 NO_2 浓度出现了谷值;随着傍晚太阳辐射强度的逐渐减弱, NO_2 的光解反应受到了抑制,但 NO 转化为 NO_2 的反应并没有停止,因而大气中的 NO_2 浓度会逐渐上升,并在 18:00 左右(季节不同,时间有所不同)达到最高值;18:00 以后,大气中 NO_2 光解反应停止,但由于汽车尾气等排放源也在逐渐减弱, NO 的排放随之减少,因而总体上 NO_2 浓度也随之降低,直到次日的凌晨^[34]。

SO_2 浓度的日变化曲线呈单峰型变化,05:00 浓度开始上升,而大气扩散条件还未充分发展,导致了浓度的堆积,因而在 09:00 ~ 10:00 左右达到峰值;10:00 后交通排放源的减弱以及大气处于不稳定状

态,有利于 SO_2 的稀释、输送,在 16:00 前后达到最低值;16:00 以后大气扩散能力减弱,源的排放量逐渐减少,于次日 04:00 左右达到谷值。由图 2 可以看出, SO_2 日变化幅度春冬季节高于夏秋季节,其中夏季变化幅度最小,季节的差异是由杭州市城区的排放源、大气扩散能力以及光化学反应的差异共同作用形成的^[35]。

CO 浓度的日变化趋势呈现双峰型,分别在早上 08:00 和傍晚 18:00 出现峰值,结果与天津等城市的 CO 日变化特征一致^[36]。从 0:00 到 05:00,夜间混合层高度较低,阻碍了大气扩散,且夜间交通以及其他污染源排放较少, CO 浓度维持中游水平;从

06:00 开始 CO 浓度逐渐上升,到 08:00 出现峰值,且为全天最高值,主要是由于城市交通机动车尾气的排放,导致 CO 浓度快速升高^[36];而从 08:00 开始随着行车早高峰的结束,CO 排放源减少,且伴随着太阳辐射的增强,CO 结合空气中的 HO 自由基生成 CO₂的光化学反应增强,因而 CO 浓度逐步下降;到 14:00 出现谷值,且为全天中最低值,此后维持低值,直至傍晚 16:00,随着行车晚高峰的到来和太阳辐射强度的减弱,CO 浓度又开始上升,至 18:00 开始维持在中游水平。

PM_{2.5}和 PM₁₀浓度的日变化特征与 CO 类似,如图 2,都呈现双峰型变化。春、夏、秋季上午的峰值都出现在 08:00,冬季上午的峰值则推迟一小时,出现在 09:00;春、秋、冬季下午的峰值出现在 18:00~19:00,夏季下午的峰值不明显;早上的峰值都略高于晚上。PM_{2.5}谷值则出现在午后 13:00~15:00,PM₁₀谷值则出现在午后 13:00~14:00。两次峰值分别对应于早晚高峰,冬天早高峰会出现推迟,相应的细颗粒物浓度峰值也出现了推迟;这主要是因为这段时间城市交通机动车尾气排放的贡献较大,而在其他时间段里,因为没有显著的机动车尾气的排放,而仅受稳定输送的影响,因此细颗粒物浓度相对较低且比较稳定^[37]。

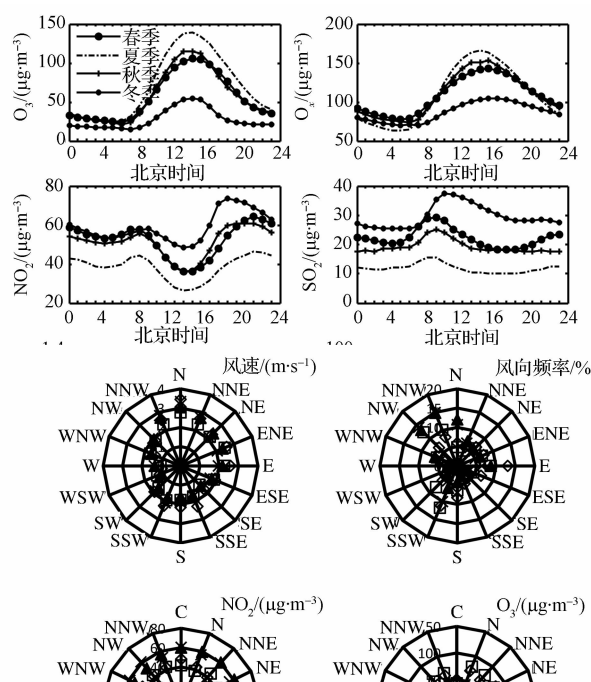


图2 2014 年春、夏、秋、冬季杭州市 O₃、O_{3x}、NO₂、SO₂、CO、PM_{2.5}和 PM₁₀浓度日变化趋势

Fig. 2 Daily variation of O₃, O_{3x}, NO₂, SO₂, CO, PM_{2.5} and PM₁₀ during different seasons in 2012

2.3 工作日和周末 NO₂和 O₃浓度日变化分析

受排放源周期变化的影响,一周内 O₃及其前体物会在工作日和周末呈现不同的变化规律^[38,39]。表 2 是 2014 年杭州市 NO₂和 O₃浓度周变化统计特征(缺少 NO 观测数据,未进行对比分析),从表中可以看出,NO₂和 O₃一周浓度变化存在一定的变化规律,浓度的日均值在周四时出现极大值,分别达到 53.3 μg·m⁻³和 56.1 μg·m⁻³;日峰值的最大值也都在出现在了周四,分别为 81.3 μg·m⁻³和 121.2 μg·m⁻³。图 3 给出了 2014 年杭州市工作日和周末 NO₂和 O₃浓度的日变化趋势对比,从图中可以看出 NO₂浓度在 17:00~次日 09:00 工作日均明显高于周末,这段时间工作日与周末的光化学反应对于 NO₂的消耗的差异性较少;而在 09:00~14:00 工作日略低于周末,这是由于工作日交通排放 NO₂更多,光化学反应的增强消耗了大量的 NO₂;14:00~17:00 浓度基本相等,光化学反应强度的进一步变化导致周末多消耗掉的 NO₂与工作日多排放的 NO₂相等;O₃浓度则在工作日的各时刻均高于周末。

为了分析 NO₂和 O₃浓度在工作日与周末之间的差异是否存在普遍性,利用成对样本 T 检验进行比较,结果表明 NO₂浓度工作日和周末对比,工作日显著高于周末($P < 0.002$),这与 Solomon 等^[40]结果相似,即工作日大气中的 NO_x浓度一般高于周末,并认为这是工作日的交通与工厂等排放源强于周末造成的,但安俊琳等^[41]通过对北京大气资料的分析却发现了相反的研究现象,即周末大气中 NO_x的浓度高于工作日,并认为这是由工作日与周末车辆出行时间差异造成的;而对于 O₃浓度则是工作日极显著高于周末($P < 0.001$),这与 Atkinson-Palombo 等^[42]利用美国亚利桑那州观测资料和徐鹏等^[43]在重庆市北碚区得到的结果相反,即工作日 O₃浓度极显著低于周末。此外安俊琳等^[41]利用通过对北京大气资料的分析,则发现工作日与周末 O₃浓度并不存在显著性的差异。而殷永泉等^[39]利用济南市观测资料,得到 12:00~19:00 工作日 O₃体积分数浓度低于周末,20:00~次日 11:00 工作日 O₃体积分数高于周末的结果。可见,不同城市的大气环境变化规律以及 O₃前体物排放源的各异性,造成了 NO_x和 O₃浓度的变化差别^[41]。

2.4 污染物浓度与气象要素相关性分析

气象要素是大气污染物地面浓度分布的主要影响因子之一^[44],污染物浓度的变化程度依赖于气象要素的变化^[45]。

表 2 2014 年杭州市 NO₂ 和 O₃ 浓度周变化/(μg·m⁻³)
Table 2 Weekly concentrations of NO₂ and O₃ in
2014/(μg·m⁻³)

	日期(周一至周日)							极值(出现日期)	
	一	二	三	四	五	六	日	最小值	最大值
日均值									
NO ₂	47.7	49.7	51.4	53.3	52.0	50.5	47.6	46.1(日)	53.3(四)
O ₃	55.6	52.5	53.3	56.1	55.6	51.6	51.2	51.2(日)	56.1(四)
日峰值									
NO ₂	70.4	73.8	77.0	81.3	77.3	73.4	68.5	68.5(日)	81.3(四)
O ₃	110.8	104.9	114.0	121.2	114.2	108.2	104.2	104.2(日)	121.2(四)

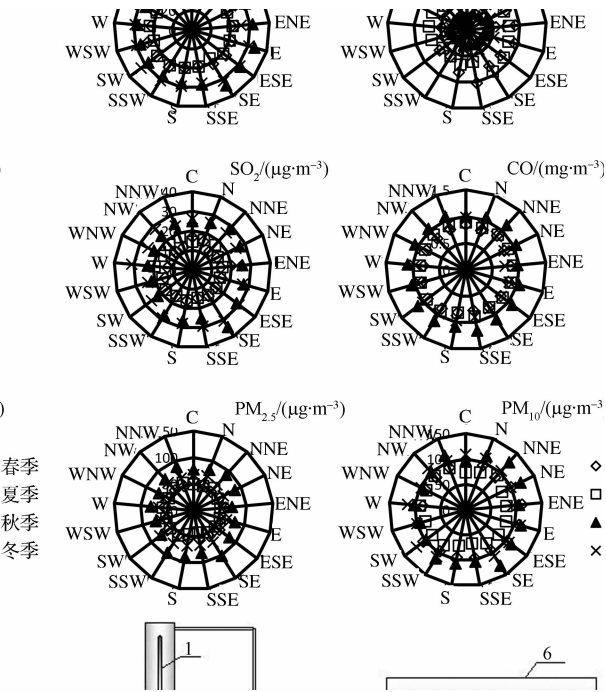
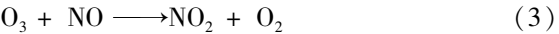
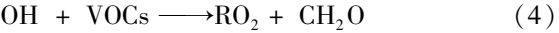


图 3 2014 年工作日和周末 NO₂ 和 O₃ 浓度的日变化趋势
Fig. 3 Daily variation of NO₂ and O₃ in weekdays and
on weekends in 2014

表 3 为 2014 年春、夏、秋、冬季杭州市污染物浓度小时均值以及气象要素小时均值相关系数的统计。从表中可以看出,对于近地面 O₃ 浓度,在四个季节中,气温、风速和相对湿度都是重要的影响因素,根据贡献率大小排列,分别为相对湿度>气温>风速,且相对湿度和气温贡献值远大于风速,说明局地气象要素对于近地面 O₃ 浓度的影响更大。其中气温和风速为正相关,相对湿度为负相关,即在高温干燥的天气条件下,更易出现 O₃ 浓度的高值。而除了冬季的气温和相对湿度,在春夏秋季, O₃ 的前提物之一的 NO₂ 和气象要素之间的相关关系均与 O₃ 相反,即在低温湿润静风的天气条件下,更易出现 NO₂ 浓度的高值。对流层中 O₃ 是由其前提物 NO_x 发生如下一系列光化学反应生成的^[46]:

$$\text{NO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{NO} + \text{O} \quad (1)$$


而真实环境中存在的氧化性更强的自由基会与 NO 反应,导致式 1 至 3 的零循环反应终止,从而形成 O₃ 浓度的积累^[46],如式(4)和式(5)。



从以上的反应可以看出, O₃ 最根本产生的原因是 NO₂ 的光解^[47]。因而 NO₂ 作为 O₃ 的前提物之一,与浓度呈现很好的负相关关系。相对湿度较高时,空气中的水汽削弱了到达地面的太阳辐射,而紫外辐射是 O₃ 产生的一个重要原因,因此湿度较小天气下 O₃ 浓度明显高于湿度较大的天气状况。气温高时太阳辐射也相应较强,都能够促进光化学反应的进行。SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 除了与风速呈现一致的显著负相关关系外,与其他气象要素在不同季节差异性较大,如表 3。SO₂ 和 PM₁₀ 与相对湿度呈现极显著负相关关系,与气温的则在不同季节不同;CO 和 PM_{2.5} 与气温和湿度的相关性在不同季节差别较大。究其原因,可能是由于大气环境条件的不同,使得气象要素对于污染物的排放、传输、扩散以及转化等方面的影响机制不同^[43]。

为了对污染物浓度在各风向上的分布状况进行分析,将 2014 年春夏秋冬季节杭州市污染物浓度以及风速在各风向上分布进行统计分析,如图 4。从风向频率的分布来看,杭州市四季的主导风向春季为东风和西南偏南风,夏季为西南偏南风和西北风,秋季为北风、西北风和西北偏北风,冬季为西北风和西北偏北风。同一风向上的不同季节之间的风速的差异很小,但不同风向上的同一季节的风速则差异较大。总体上全年风速大小按季节分布为春季>冬季>秋季>夏季。从表 3 也可以看出,风速与不同污染物浓度呈现出不同相关关系,风速除了与 O₃ 呈现正相关关系,与其他污染物均呈现极显著的负相关关系,这也说明了近地面臭氧的另一个重要来源,即动力输送导致的浓度堆积。气流的来源不同,也是影响污染物浓度的一个重要因素^[48,49]。如图 4,将静风风向上污染物的浓度作为此污染物的局地排放,由此,估算各方向上污染物浓度的区域输送值。从图中可以看出,除了 O₃ 在静风方向上浓度远小于主导风向上的浓度,其他污染物静风浓度与主导风向上的浓度相差不大,表明其他污染物主要由局地排放产生,而 O₃ 除了是局地生成,动力输送也是一个重要源。图中还可以看到,所有季节的东边尤其是东南方向上污染排放浓度均明显大于其他方向,可能是观测点东面由南向北的公路输送过来的。

表 3 2014 年各季节的污染物浓度和气象要素的小时均值的相关系数统计

Table 3 Correlation coefficients between pollutants and meteorological parameters based on hourly mean data during different seasons in 2014

季节	气象要素	NO ₂	O ₃	SO ₂	CO	PM _{2.5}	PM ₁₀
春季	气温	-0.20 **	0.59 **	-0.10 **	0.03	0.07 **	0.33 **
	风速	-0.44 **	0.36 **	-0.15 **	-0.24 **	-0.20 **	-0.11 **
	相对湿度	0.17 **	-0.68 **	-0.23 **	0.32 **	0.06 **	-0.26 **
夏季	气温	-0.37 **	0.65 **	0.06 **	-0.24 **	0.10 **	0.21 **
	风速	-0.44 **	0.26 **	-0.19 **	-0.28 **	-0.21 **	-0.17 **
	相对湿度	0.37 **	-0.81 **	-0.23 **	-0.28 **	-0.22 **	-0.33 **
秋季	气温	-0.52 **	0.60 **	-0.23 **	-0.39 **	-0.29 **	-0.21 **
	风速	-0.46 **	0.31 **	-0.22 **	-0.28 **	-0.31 **	-0.29 **
	相对湿度	0.11 **	-0.69 **	-0.37 **	0.27 **	-0.03	-0.24 **
冬季	气温	0.07 **	0.41 **	0.08 **	0.04	0.19 **	0.22 **
	风速	-0.44 **	0.40 **	-0.11 **	-0.24 **	-0.21 **	-0.15 **
	相对湿度	-0.14 **	-0.45 **	-0.38 **	0.15 **	0.02	-0.23 **

*表示显著; **表示极显著。

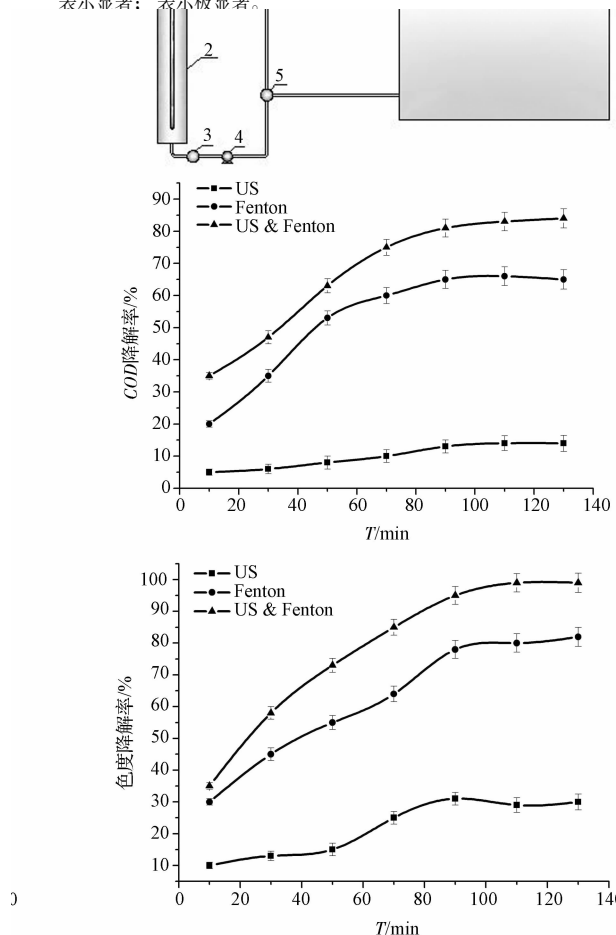


图 4 2014 年各季节污染物浓度与风向的关系

Fig. 4 Relationship between the atmospheric pollutants and wind directions during different seasons in 2014

3 结论

(1) 在 2014 年观测期间, 杭州市城区大气中的

PM_{2.5} 污染状况最严重, PM₁₀ 和 O₃ 次之, NO₂ 污染较轻, SO₂ 和 CO 则均全年均达到国家二级标准。

(2) 各污染物浓度日变化呈现 O₃ 和 O_x 浓度四季的日变化都呈单峰型分布, 浓度峰值都出现在 13:00 ~ 15:00; SO₂ 也呈现单峰型分布, 在 09:00 ~ 10:00 左右达到峰值; NO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的日变化特征类似, 都呈现双峰型变化, 且峰值都与早晚高峰时间基本重合, 冬季相对于其他季节早高峰时间推迟一小时左右。

(3) 工作日 NO₂ 和 O₃ 浓度均显著高于周末。NO₂ 浓度在 17:00 ~ 次日 09:00 工作日均明显高于周末, 而在 09:00 ~ 14:00 工作日略低于周末, 14:00 ~ 17:00 浓度基本相等, 夜间浓度差较大; O₃ 浓度则在工作日的各时刻均高于周末。

(4) 气象要素是大气污染物分布的重要影响因素。在高温、大风和条件下容易出现的 O₃ 高值, NO₂ 与之相反; SO₂、CO、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 与风速呈现一致的显著负相关关系外, 与其他气象要素在不同季节差异性较大; SO₂ 和 PM₁₀ 与相对湿度呈现极显著负相关关系; CO 和 PM_{2.5} 与气温和湿度的相关性在不同季节差别较大。

(5) 本研究仅就 2014 年杭州市城区大气污染物的时间分布特征进行了基础性分析, 而未涉及城市其他区域大气污染物的排放以及更大时间跨度比如年际变化等方面, 在进一步的工作中会着重对杭州市大气污染物的区域分布和年际变化进行研究, 以期能够掌握近年来杭州市大气污染物的时空分布特征, 为城市大气污染的防治提供依据和参考。

参 考 文 献

- 1 庞 杨, 韩志伟, 朱 彬, 等. 利用 WRF-Chem 模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变. 南京气象学院学报, 2013; 36(6): 674—682
Pang Yang, Han Zhiwei, Zhu Bin, et al. A model study on distribution and evolution of atmospheric pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei region in summertime with WRF-Chem. Trans Atmos Sci, 2013; 36(6): 674—682
- 2 潘月鹏, 王跃思, 胡 波, 等. 北京奥运时段河北香河大气污染观测研究. 环境科学, 2010; 31(1): 1—9
Pan Yuepeng, Wang Yuesi, Hu Bo, et al. Observation on atmospheric pollution in xianghe during Beijing 2008 Olympic Games. Environ Science, 2010; 31(1): 1—9
- 3 West J J, Szopa, Hauglustaine D A. Human mortality effects of future concentrations of tropospheric ozone. Comp Rend Geos, 2007; 339(11—12): 775—783
- 4 Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. Environ Pollution, 2008; 151(2): 362—367
- 5 刘吉福. 空气中悬浮颗粒物与呼吸系统疾病关系研究进展. 环境与健康杂志, 2007; 24(11): 933—935

- Liu Jifu. Relationship between suspended particles in air and respiratory diseases. *Environ Health*, 2007; 24(11): 933—935
- 6 谢 媚, 刘 涛, 陆小安, 等. 广州市 SARS 传播与空气污染相关性研究. *安全与环境学报*, 2004; 4(3): 73—76
Xie Mei, Liu Tao, Lu Xiaolan, *et al.* Correlation research between SARS' propagation incidence and concentration of inhalable particulates in air in Guangzhou. *Journal of Safety and Environment*, 2004; 4(3): 73—76
- 7 童尧青, 银 燕, 钱 凌, 等. 南京地区霾天气特征分析. *中国环境科学*, 2007; 27(5): 584—588
Tong Yaoqing, Yin Yan, Qian Ling, *et al.* Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area. *China Environmental Science*, 2007; 27(5): 584—588
- 8 於 方, 过孝民, 张衍桑, 等. 2004 年中国大气污染造成的健康经济损失评估. *环境与健康杂志*, 2007; 24(12): 999—1003
Yu Fang, Guo Xiaoming, Zhang Yanshen, *et al.* Assessment of the loss of health and economy caused by air pollution in China in 2004. *Environ Health*, 2007; 24(12): 999—1003
- 9 Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games. *Atmos Environ*, 2007; 41(3): 480—492
- 10 Aneja V P, Agarwal A, Roelle P A, *et al.* Measurements and analysis of criteria pollutants in New Delhi, India. *Environ Internat*, 2001; 27(1): 35—42
- 11 Schwartz S E, Andreae M O. Uncertainty in climate change caused by aerosols. *Science*, 1996; 272(5256): 1121—1122
- 12 黄辉军, 刘红年, 蒋维楣, 等. 南京市 PM_{2.5} 物理化学特性及来源解析. *气候与环境研究*, 2006; 11(6): 713—722
Huang Hui Jun, Liu Hongnian, Jiang Wei Mei, *et al.* Physical and chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing. *Climatic and Environmental Research*, 2006; 11(6): 713—722
- 13 张 敏, 朱 彬, 王东东, 等. 南京北郊冬季大气 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的变化特征. *南京气象学院学报*, 2009; 32(5): 695—702
Zhang Min, Zhu Bin, Wang Dongdong, *et al.* Characteristics of SO₂, NO₂ and O₃ over north suburb of Nanjing in winter. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009; 32(5): 695—702
- 14 郑 瑶, 邢梦林, 李 明, 等. 郑州市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度变化特征分析. *干旱环境监测*, 2014; 28(3): 104—108
Zheng Yao, Xing Menglin, Li Ming, *et al.* Analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration variation characteristics in Zhengzhou. *Arid Environmental Monitoring*, 2014; 28(3): 104—108
- 15 张宝贵, 孙丽华. 秦皇岛市空气污染与气象要素的关系. *气象与环境学报*. 2009; 25(4): 43—47
Zhang Baogui, SUN Lihua. Relationship between air pollution and meteorological elements in Qinhuangdao, Hebei province. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009; 25(4): 43—47
- 16 王杨君, 董亚萍, 冯加良, 等. 上海市 PM_{2.5} 中含碳物质的特征和影响因素分析. *环境科学*, 2010; 31(8): 1755—1761
Wang Yangjun, Dong Yaping, Feng Jialiang, *et al.* Characteristics and influencing factors of carbonaceous aerosols in PM_{2.5} in Shanghai, China. *Environmental Science*, 2010; 31(8): 1755—1761
- 17 朱李华, 陶 俊, 张仁健, 等. 冬、夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O₃ 和气象条件的关联. *环境科学学报*, 2010; 30(10): 1942—1949
Zhu L H, Tao J, Zhang R J, *et al.* Characteristics of the carbonaceous aerosol in PM_{2.5} and its relation to O₃ and meteorological conditions in the urban Guangzhou area in winter and summer. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010; 30(10): 1942—1949
- 18 洪盛茂, 焦 荔, 何 曦, 等. 杭州市区空气污染物变化特征及其与气象条件的关系. *气象*, 2010; 36(2): 93—101
Hong Shengmao Jiao Li, He Xi, *et al.* Variation of air pollutants and meteorological conditions their relation with in Hangzhou. *Meteorological Monthly*, 2010; 36(2): 93—101
- 19 李震宇, 董 亮, 朱荫渭. 杭州市区空气中 SO₂ 时空分布与变化. *应用生态学报*, 2003; 14(12): 2285—2288
Li Zhenyu, Dong Liang, Zhu Yinwei. Spatial-temporal distribution and variation of atmospheric SO₂ concentration in Hangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003; 14(12): 2285—2288
- 20 叶贤满, 徐 昶, 洪盛茂, 等. 杭州市大气污染物排放清单及特征. *中国环境监测*, 2015; 31(2): 5—11
Ye Xianman, Xu Chang, Hong Shengmao, *et al.* Emission inventory and characteristics of air pollutants in hangzhou. *Environmental Monitoring in China*, 2015; 31(2): 5—11
- 21 祁国伟, 曹军骥, 卓里欣, 等. 杭州市空气中 PM₁₀ 的化学组成特征. *环境化学*, 2005; 24(5): 603—608
Qi Guowei, Cao Junji, Zhuo Lixin, *et al.* Chemical Composition of PM₁₀ in Hangzhou Atmosphere. *Environmental Chemistry*, 2005; 24(5): 603—608
- 22 林丰妹, 焦 荔, 盛 侃, 等. 杭州市酸雨污染现状及成因分析. *环境监测管理*与技术, 2004; 16(3): 17—20
Lin Fengmei, Jiao Li, Sheng Kan, *et al.* Acid Rain Pollution and Its Origin of Hangzhou. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2004; 16(3): 17—20
- 23 安俊琳, 王跃思, 李 昕, 等. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析. *环境科学*, 2007; 28(4): 706—711
An Junlin, Wang Yuesi, Li Xin, *et al.* Analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ Concentrations in Beijing. *Environmental Science*, 2007; 28(4): 706—711
- 24 刘玉彻. 北京夏、秋季地面 O₃ 特征观测研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2005
Liu Yuche. Characteristics of O₃ on the ground of Nanjing in summer and autumn. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2005
- 25 袁 野, 范 莉, 邹玉林, 等. 成都市大气中臭氧的分布及污染水平. *城市环境与城市生态*, 2003; 16(2): 44—45
Yuan Ye, Fan Li, Zou Yulin, *et al.* Ozone pollution level in the atmosphere of Chengdu. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2003; 16(2): 44—45
- 26 殷永泉, 李昌梅, 马桂霞, 等. 城市臭氧浓度分布特征. *环境科学*, 2004; 25(6): 16—20
Yin Yongquan, Li Changmei, Ma Guixia, *et al.* Ozone concentration distribution of urban. *Environmental Science*, 2004; 25(6): 16—20
- 27 尉 鹏, 任阵海, 苏福庆, 等. 中国 NO₂ 的季节分布及成因分析. *环境科学研究*, 2011; 24(2): 155—160
Wei Peng, Ren Zhenhai, SU Fuqing, *et al.* Seasonal distribution and cause analysis of NO₂ in China. *Research of Environmental Sciences*, 2011; 24(2): 155—160
- 28 Zhang Q, Geng G N, Wang S W, *et al.* Satellite remote sensing of changes in NO_x emissions over China; 1996—2010. *Chinese Sci-*

- ence Bull, 2012;57;(16): 1446—1453
- 29 刘 洁,张小玲,徐晓峰,等. 北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 变化特征的城郊对比分析. 环境科学,2008;29(4): 1059—1065
Liu Jie, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng, *et al.* Comparison Analysis of Variation Characteristics of SO_2 , NO_x , O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ between rural and urban areas, Beijing. Environmental Science, 2008;29(4): 1059—1065
- 30 王 宏,郑秋萍,余 华,等. 福州市 CO 时空分布特征与影响因素. 生态环境学报,2015;24(7):1191—1196
Wang Hong, Zheng Qiuping, Yu Hua, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics and the impact factors of CO in Fuzhou. Ecology and Environmental Sciences, 2015;24(7): 1191—1196
- 31 戴 伟,高佳琪,曹 昱,等. 深圳市郊区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的特征分析. 环境科学,2012;33(6):1952—1957
Dai Wei, Gao Jiaqi, Cao Gang, *et al.* Characterization of atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen. Environmental Science, 2012; 33(6): 1952—1957
- 32 蔡惠文,吴序鹏. 常州地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的变化特征. 中国环境科学学会学术年会论文集,2013:4470—4473
Cai Huiwen, Wu Xupeng. Characteristics of atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Changzhou. China Environmental Science Academic Essays, 2013: 4470—4473
- 33 郑 东,李 丹,纪德钰,等. 大连市近地面臭氧污染规律研究及与 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物的相关性分析. 环境与可持续发展, 2014;39(6):177—180
Zheng Dong, Li Dan, Ji Deyu, *et al.* Study on ozone in Dalian urban and Correlation Between Ozone and $\text{PM}_{2.5}$, other Pollutants. Environment and Sustainable Development, 2014; 39:(6): 177—180
- 34 秦 瑜,赵春生. 大气化学基础. 北京:气象出版社,2003
Qin Yu, Zhao Chunsheng. Atmospheric chemistry basis. Beijing: China Meteorological Press, 2003
- 35 吉东生,王跃思,孙 扬,等. 北京大气中 SO_2 浓度变化特征. 气候与环境研究,2009;14(1):69—76
Ji Dongsheng, Wang Yuesi, Sun Yang, *et al.* Characteristics of atmospheric SO_2 in Beijing. Climatic and Environmental Research, 2009;14(1): 69—76
- 36 杨继东,刘佳泓,杨光辉,等. 天津市环境空气中一氧化碳污染特征及变化趋势研究. 环境科学与管理,2012;37(6):89—90,104
Yang Jidong, Liu Jiahong, Yang Guanghui, *et al.* Analysis on pollution characteristics and variation trend of CO in Tianjin. Environmental Science and Management, 2012;37(6): 89—90,104
- 37 朱 珠,王 波,褚艳玲,等. $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 浓度变化规律及其气象条件分析—以深圳市龙岗区为例. 中国环境科学学会学术年会论文集,2014:5223—5229
Zhu Zhu, Wang Bo, Chu Yanling, *et al.* Variation of $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ and meteorological conditions their relation with in Longgang in Shenzhen. China Environmental Science Academic Essays, 2014: 5223—5229
- 38 Atkinson-Palombo C M, Miller J A, Robert C, *et al.* Quantifying the ozone “weekend effect” at various locations in Phoenix, Arizona. Atmospheric Environment, 2006; 40: 7644—7658
- 39 殷永泉,单文坡,纪 霞,等. 济南大气臭氧浓度变化规律. 环境科学,2006;27(11):2299—2302
Yin Yongquan, Shan Wenpo, Ji Xia, *et al.* Characteristics of atmospheric ozone in the urban area of Ji’nan. Environmental Science, 2006; 27(11): 2299—2302
- 40 Solomon P, Cowling E, Hidy G, *et al.* Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe. Atmospheric Environment, 2000; 34 (12—14): 1885—1920
- 41 安俊琳,王跃思,李 昕,等. 北京大气 O_3 与 NO_x 的变化特征. 生态环境,2008;17(4):1420—1424
An Junlin, Wang Yuesi, Li Xin, *et al.* Characteristics of atmospheric O_3 and NO_x concentrations in the urban area. Ecology and Environment, 2008; 17(4): 1420—1424
- 42 Atkinson-Palombo C M, Miller J A, Robert C Jr. Quantifying the ozone “weekend effect” at various location in Phoenix, Arizona. Atmospheric Environment, 2006;40(39): 7644—7658
- 43 徐 鹏,郝庆菊,吉东生,等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究. 环境科学,2014;35(3):820—829
Xu Peng, Hao Qingju, Ji Dongsheng, *et al.* Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei District, Chongqing. Environmental Science, 2014; 35(3): 820—829
- 44 王莉莉,王跃思,王迎红,等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响. 中国环境科学,2010;30(7): 924—930
Wang Lili, Wang Yuesi, Wang Yinghong, *et al.* Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn. China Environmental Science, 2010; 30(7): 924—930
- 45 周江兴. 北京市几种主要污染物浓度与气象要素的相关分析. 应用气象学报,2005;16(Z1):123—127
Zhou Jiangxing. Correlative analysis on relationship between changes of several main contaminations and some meteorological elements. Journal of Applied Meteorological Science, 2005; 16(Z1): 123—127
- 46 耿福海,刘 琼,陈勇航. 近地面臭氧研究进展. 沙漠与绿洲气象,2012;6(6):8—14
Geng Fuhai, Liu Qiong, Chen Yonghang. Discussion on the Research of Surface Ozone. Desert and Oasis Meteorology, 2012; 6(6): 8—14
- 47 唐孝炎,张远航,邵 敏. 大气环境化学(第二版). 北京:高等教育出版社,2006
Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. Atmosphere environmental chemistry. Beijing: Higher Education Press, 2006
- 48 Li C, Marufu R R, Dickerson Z, *et al.* Stehr (2007), In situ measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in Northern China during East Asian study of tropospheric aerosols: an international regional experiment 2005. J Geophys Res, 112, D22S04;doi:10.1029/2006JD007592
- 49 Wang W T, Primbs T, Tao S, *et al.* Atmospheric particulate matter pollution during the 2008 Beijing Olympics. Environmental Science and Technology, 2009;43(14): 5314—5320

Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Hangzhou

YU Zhou, LIU Shou-dong*, WANG Yong-wei, HU Ning

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P. R. China)

[**Abstract**] In order to study the characteristics of atmospheric pollutants in the urban area of Hangzhou, we analyzed the data of the concentrations of the atmospheric pollutants of 2014 provided by automatic air station of Hangzhou environmental monitoring center station, combining with local meteorological data. The results showed that of the atmospheric pollutants, $PM_{2.5}$ was the most serious in the urban area of Hangzhou, which the exceeding standard rate of daily average concentration of was 30.7%. It also showed that the concentrations of the atmospheric pollutants displayed noticeable seasonal variation. The concentrations of O_3 from highest to lowest were in summer, autumn, spring and winter. The seasonal change of the concentration of NO_2 is higher in winter and lower in summer. The concentrations of SO_2 from highest to lowest were in winter, spring, autumn and summer. The concentrations of CO, $PM_{2.5}$ and PM_{10} appeared higher in winter, lower in summer and changed smoothly in other seasons. The concentrations of the atmospheric pollutants showed different diurnal variation patterns. The curves of diurnal variations of O_3 , O_x and SO_2 all showed single peak. But the peak values time were different, 13:00 ~ 15:00 for O_3 and O_x , and 09:00 ~ 10:00 for SO_2 . The diurnal variations of NO_2 , CO, $PM_{2.5}$ and PM_{10} were similar to the two peaks that appeared at the morning and evening rush hours. The concentrations of NO_2 from 17:00 to 09:00 the next morning in weekdays were significantly higher than those on weekends. The situation from 09:00 to 14:00 was the opposite and the concentrations from 14:00 to 17:00 approximately equaled. But the concentrations of O_3 in weekdays were higher than those on weekends all the time. Meteorological factors were an important factor for pollutant concentration distributions. The correlation analysis indicated that the concentration of O_3 was the most significant positively correlations with temperature and wind speed, while the most significant negatively correlations with relative humidity. The situation with NO_2 was the opposite. The concentrations of SO_2 , CO, $PM_{2.5}$ and PM_{10} were the most significant negatively correlations with wind speed. The correlations between pollutant concentrations and other meteorological factors varied in different seasons.

[**Key words**] Hangzhou atmospheric pollutants O_3 NO_2 SO_2 CO $PM_{2.5}$ PM_{10}