

曾艺芳,张秋月,金致凡,等.福州市AQI时空分布特征及影响因素研究[J].环境科学与技术,2017,40(10):131-137. Zeng Yifang, Zhang Qiuyue, Jin Zhifan, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and impact factors of AQI in Fuzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(10):131-137.

福州市AQI时空分布特征及影响因素研究

曾艺芳¹, 张秋月², 金致凡^{3*}, 张鹏帅¹, 王晓洁¹, 刘常青⁴

(1.福建师范大学环境科学与工程学院,福建 福州 350007; 2.中国科学院西双版纳热带植物园,云南 西双版纳 666303;
3.福州市环境监测站,福建 福州 350010; 4.福建师范大学地理科学学院,福建 福州 350007)

摘要:对福州市2013年4月-2016年3月空气质量指数AQI(Air Quality Index)数据进行小时变化、逐日变化、逐月变化、季节变化、空间分布及其影响因素分析,探讨引起AQI时间变化及空间分布差异的原因,找出最重要的影响因子。结果表明,福州市AQI在夜间较低,白天由于人类最活动增强,AQI增大;四季中春、冬季AQI较高,夏秋季季节次之;通过对首要污染物进行统计分析得到,NO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、O₃对AQI的贡献大,空气质量达到优的天数表现为秋季>夏季>冬季>春季;福州市内各监测点中快安始终作为空气质量较为不好的监测点,而杨桥西路在四季中多表现为AQI较低,空气质量较好。

关键词:福州市; AQI变化; 空间分布; 空气质量

中图分类号:X511 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.10.022 文章编号:1003-6504(2017)10-0131-07

Temporal-spatial Distribution Characteristics and Impact Factors of AQI in Fuzhou

ZENG Yifang¹, ZHANG Qiuyue², JIN Zhifan^{3*}, ZHANG Pengshuai¹,
WANG Xiaojie¹, LIU Changqing⁴

(1.College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
2.Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Xishuangbanna 666303, China;
3.Fuzhou Municipal Environmental Monitoring Station, Fuzhou 350010, China;
4.College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: By analyzing air quality index (AQI) of hourly average changes, daily average changes, monthly average changes, seasonal changes, spatial distribution and impact factors from April 2013 to March 2016 in Fuzhou, the tendency of AQI changes over time was obtained, different spatial distribution of AQI was studied, and the causes of these changes were investigated for the purpose to find out the main impact factors. The results showed that AQI was lower during the night, however because of the increase of human activities during the daytime, AQI also increased. AQI was higher in spring and winter, and followed by autumn and summer. Through the statistical analysis of main pollutants, NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ were the largest contribution of AQI, and the air quality to achieve the best performance of the number of days was autumn > summer > winter > spring. The air quality of Kuai'an was always relatively worse compared with all of monitoring points in Fuzhou, while AQI of Yangqiaoxilu was lower and showing good air quality.

Key words: Fuzhou; AQI changes; spatial distribution; air quality

AQI被定义为用来反映空气质量对人体健康影响的数字指数^[1-2]。1999年EPA(美国环保局)对污染标准指数(PSI)进行改进,并定义为空气质量指数(AQI)。我国环保部于2012年颁布空气质量新标准,

将空气质量指数(AQI)取代空气污染指数(API),使其成为空气质量评判的直接依据。相比API,AQI新增加了PM_{2.5}、CO、O₃指标的监测与报告,评价的污染物种类更多,浓度阈值更广,相应的评价结果更为客观且

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2016-11-25;修回 2017-03-15

基金项目:福建省科技厅重大专项(2014YZ0002-1);福建省自然科学基金项目(2015J01187);省科技厅软科学研究计划(2014R0041)

作者简介:曾艺芳(1991-),女,硕士研究生,主要从事环境科学方面研究,(电子信箱)zhution45@163.com;*通讯作者,(电子信箱)19486487@qq.com。

更加贴近人的真实感受,因此更能够反映环境空气质量情况。Liu^[3]在对空气质量进行分析时发现当增加 PM_{2.5} 这项指标后,空气质量指数高于 100 且发生的频率增加了 3 倍。目前,世界各地大多使用 AQI 反应包含 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5} 以及 PM₁₀ 6 项主要污染指标综合污染状况^[4]。对于相关机构以及普通公众,可通过监测平台发布的 AQI 了解到空气污染水平,从而采取相应措施以保证健康出行^[5]。Poursafa 等^[6]在研究 AQI 对青少年心血管代谢危险的影响分析中发现, AQI 与收缩压、空腹血糖、总胆固醇等人体健康指标呈现显著的相关性。高庆先等^[7]研究了中美空气质量指数之间存在的差异,指出两国的污染物指标和计算方法存在差异。采用新标准后,针对地区 AQI 的研究逐渐增多。高庆先等^[8]对 APEC 期间背景及周边城市 AQI 区域特征进行分析,发现强化减排后空气质量得到了改善。吕继强等^[9]研究了西安市 6 项空气污染物的空气质量指数的时空变化特征,发现在城市供暖时期,SO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 的浓度明显高于年内其它时间段。崔虎熊等^[10]对上海浦东城区的大气颗粒物浓度及其谱分布进行监测并分析了颗粒物浓度与空气质量之间的关系。

福建省位于我国东南沿海,属于典型的亚热带季风气候,雨量充沛,光照充足,季节变化明显,湿度、光照、风速等气象条件对空气质量的变化存在不同程度的影响。福州市作为福建省会于 2012 年已开始实施新标准,但目前福州市对大气污染的研究主要集中在 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ 等单项污染物污染情况与气象关系^[11-14]以及以空气污染指数为指标考量空气质量与气象条件的关系,而对于福建地区乃至福州城市 AQI 的变化特征分析及空间分布情况还鲜有研究。因此,本文旨在探讨福州市在新标准下 AQI 的时间变化与空间分布情况,并确定影响 AQI 最主要的影响因素,为福州市的环境空气保护与污染防治提供科学依据。对分析福州市空气质量状况和人们的出行指引以及通过确定主要污染因子提出有针对性的防治措施都有重要的意义。

1 资料与方法

1.1 福州市空气质量监测站点分布

福州市现有鼓山、快安、师大、五四北路、杨桥西路、紫阳 6 个国控监测点。其中有 5 个城市评价点,分别是福建中医药大学屏山校区的五四北路监测点、上三路福建师范大学仓山校区的师大监测点、福州大学怡山校区的杨桥西路监测点、海潮路省机械科学研究所的紫阳监测点和马尾区快安马江路的快安监测点,

另外还有 1 个为清洁对照点,即鼓山风景区管理处的鼓山监测点。

1.2 数据来源

数据主要来源于中华人民共和国环境保护部网站(网址: <http://www.zhb.gov.cn/>)公布的空气质量监测数据,记录福州市 2015 年 2 月实时监测的 AQI 小时浓度值。福州市 2013 年 4 月-2016 年 3 月 AQI 由环保部数据中心提供,有效数据有 1 081 个,数据收集率达 98.63%,福州市近 20 年风频数据由福州气象局提供。

1.3 研究方法

1.3.1 AQI 计算方法

《环境空气质量指数(AQI)日报技术规定》(HJ 633-2012)依据 6 种污染物监测数据统计出 6 项空气质量分指数(IAQI),污染物 p 的分指数(IAQI _{p})采用公式(1)计算:

$$IAQI_p = \frac{IAQI_{Hh} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hh} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式(1)中:IAQI _{p} 为染物项目 p 的空气质量分指数; C_p 为污染物项目 p 的质量浓度值; BP_{Hh} 为相应地区的空气质量分指数及对应的污染物项目浓度指数表中与 C_p 相近的污染物浓度限值的高位值; BP_{Lo} 为相应地区的空气质量分指数及对应的污染物项目浓度指数表中与 C_p 相近的污染物浓度限值的低位值; $IAQI_{Hh}$ 为相应地区的空气质量分指数及对应的污染物项目浓度指数表中与 C_p 对应的空气质量分指数; $IAQI_{Lo}$ 为相应地区的空气质量分指数及对应的污染物项目浓度指数表中与 C_p 对应的空气质量分指数。基于分指数 IAQI 指标的计算结果采用函数为“=ROUNDUP(IAQI, 0)”向前取整,最后以 $AQI = \{IAQI_1, IAQI_2, IAQI_3, \dots, IAQI_n\}$ 确定 AQI^[15]。



图1 福州市各监测点分布地形图
Fig.1 The topographic map of monitoring points in Fuzhou

1.3.2 反距离加权(IDW)空间插值法

反距离加权空间插值法,是以插值点与样本点之间的距离为权重进行加权平均,也称作距离倒数乘方法,插值点与样本点之间的权重与距离成反比,即距离越小所赋予的权重贡献越大。在本研究中,插值点越接近监测点,权重越大,AQI 越接近监测点的真实值,且已知监测点分布较为均匀,插值效果好,符合 IDW 的基本原理和最适条件。本研究中采用加权幂指数 $p=2$,样本点 $n=6$ 进行 IDW 空间插值。

1.3.3 数据处理

运用 Excel 2003 批量计算 AQI,绘制 AQI 变化趋势折线图及四季风向玫瑰图;运用 SPSS 17.0 对 AQI 进行方差分析和多重比较,采用最小显著差数法(Least-significant difference, LSD)进行显著性差异分析,将因变量 AQI 与自变量 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 逐步剔除变量后进行多元线性回归分析;运用 ArcGIS 10.1 采用反距离加权(IDW)空间插值法做 AQI 空间分布图^[6]。

2 结果与讨论

2.1 福州市 AQI 小时变化

图 2 为福州市 2015 年 2 月份各监测点的小时变化情况。可看出,作为对照点的鼓山在 24 h 内变化幅度较大,其在 6:00 达到最低值,而在 16:00 和 17:00 达到最高值。鼓山夜间 AQI 较低的原因可能是鼓山监测点位于风景区,植被茂密,而植被能够通过植物表面拦截颗粒物,叶孔可吸收气态污染物^[7],且鼓山在夜晚人类活动少,各类污染源明显减少,再加上经过森林植被和空气负离子的净化^[18-19],在清晨空气质量达到最优;6:00 以后,各类生活生产活动逐渐增多,城市开始繁华喧闹,车流量人流量增多,从而使得 AQI 逐渐增大;接近 16:00 和 17:00 傍晚时,一天的工作基本接近尾声,各种生活生产活动开始减缓,因此, AQI 自傍晚开始下降。师大和五四北路变化趋势却与鼓山不同,在 0:00-10:00 时段, AQI 保持在较高水平, 9:00-14:00 时段呈现下降趋势, 17:00-21:00 时段又呈现上升趋势, PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 为其首要污染物。造成师大和五四北路 AQI 变化趋势的原因可能是师大和五四北路 2 个监测点当时正处于建筑建设过程当中,施工粉尘和夜间施工材料的运输导致颗粒污染物的增加,从而使得 AQI 较大。同时,因为 7:00-9:00 是上学上班高峰期,汽车尾气以及餐饮废气使得早晨 AQI 偏高, 9:00 之后进入工作学习时间,废气排放以及人类影响减弱,因而造成五四北路和师大在 9:00 之后 AQI 值呈现下降趋势。17:00 后,进入下班下课高峰

期,同时夜晚活动增多,各种娱乐以及餐饮业活跃,人类负影响增大,且从一天的温度层结来看,由于夜晚地面较快冷却,形成了自地面开始的逆温层,使得污染物不易扩散^[20],这些因素的存在导致了 AQI 呈现上升趋势。另外,紫阳、快安和杨桥西路 AQI 在 24 h 内变化平缓,基本在 60 线上波动,除早上与傍晚有明显的峰值外,其余变化不明显。

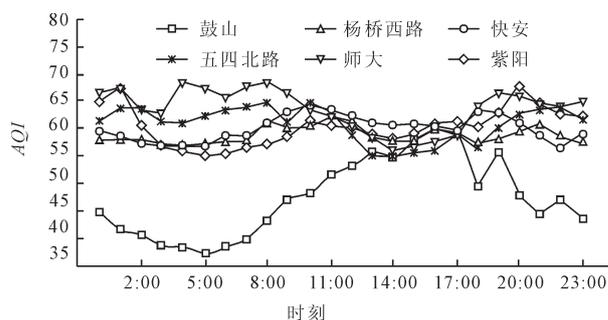


图2 福州市各监测点AQI小时变化趋势
Fig.2 Hourly changes of AQI in monitoring points of Fuzhou

2.2 福州市 AQI 月变化

图 3 为福州市 2013 年 4 月-2016 年 3 月共 36 个月的 AQI 月平均变化,其中 3-5 月代表春季,6-8 月代表夏季,9-11 月代表秋季,12 月-次年 2 月代表冬季。1-12 月 AQI 变化总体呈现“凹”型,即春冬季节高,夏秋季节低。从图 4 可知,1 月、8 月、10 月和 12 月的标准偏差较大。查询相应年份的 AQI 值可以发现,对于 1 月份 AQI,从 14 到 16 年逐年递减,2016 年 1 月份 AQI 为 61.5,相比于 2014 年下降 24。2015 年和 2016 年 1 月份的主要污染因子为颗粒物,2014 年的主要污染因子则为 NO_2 和颗粒物,2014 年到 2016 年空气质量达到“优”的天数分别为 2 d、4 天和 11 d,空气质量有所改善。8 月和 10 月份标准偏差大的原因是 2014 年 8 月份的 AQI 大于 2013 和 2015 年,达到 70.6,相对提高 26.1。2014 年 8 月份福州的臭氧 8 h 浓度连连超标,超标天数达 16 d,其中达到轻度污染有 5 d,其中臭氧 8 h 为首要污染物,10 月份臭氧 8 h 超标的天数达到 19 d。王宏等^[21]分析了福州 2009-2010 年近地层的臭氧浓度分布规律,结果显示 8 月份福州的臭氧浓度为最低值,往后则是逐月上升,而 2014 年 8 月和 10 月臭氧 8 h 为其主要污染物。查询气象数据可知,2014 年 12 号台风在 8 月 1 号移入东海,并对福建省造成影响。在臭氧成为首要污染物且达到轻度污染的几天均观测到了降水迹象,但降水均为阶段性且持续时间较短,在太阳光紫外短波辐射较强的时段无降水现象,云量也较少,这些气象条件有利于光化学反应的发生,从而使得臭氧浓度升高。同时受到热带辐合带外围的影响,在暖性系统控制下,下沉气流加

强,臭氧堆积在近地层;也有可能偏东大风将海上的臭氧前体物或臭氧输送过来,而福州地势呈西北高,东南低,臭氧因此堆积,造成臭氧浓度升高^[13,22-23]。2014年10月份的气温相比2013和2015年的气温高,降水量和云量均较少,因此发生了较长时间的臭氧污染。12月份AQI标准偏差较大的原因是2013年AQI值相对于2014和2015年增加了25.5。造成2013年12月份AQI与2014年12月份有所差异的原因则可能是雾霾。根据中国气象局发布的《2013年12月国内重大天气气候事件回顾》,2013年12月我国共出现了2次较大范围的雾霾天气,分别出现在2013年12月1日-7日和2013年12月22日-25日,该雾霾也波及到福州市,对福州市空气质量造成影响,PM_{2.5}污染天数达到19d,从而使2013年福州市AQI在12月份明显上升^[24]。

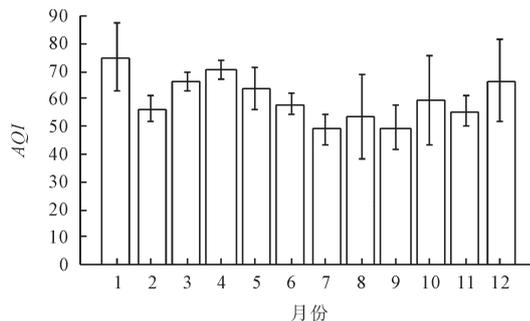


图3 福州AQI月际变化图
Fig.3 AQI change of monthly average in Fuzhou

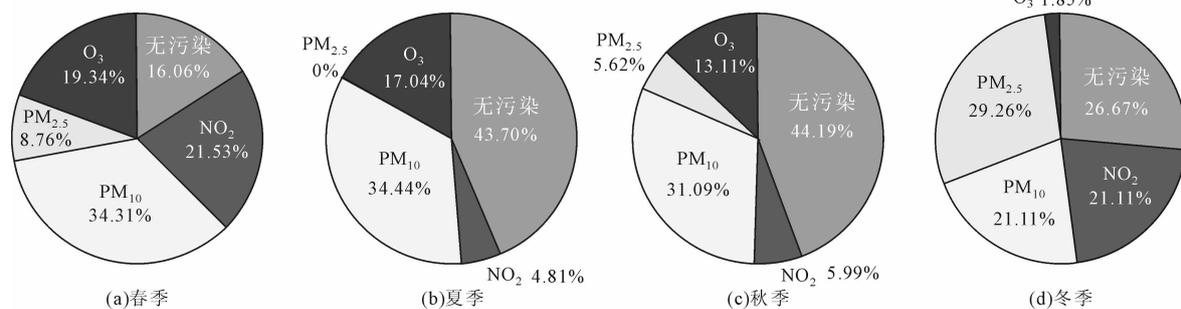


图4 首要污染物季节变化
Fig.4 Seasonal variation of primary pollutant

2.4 福州市AQI季节变化空间特征

图5为鼓山、快安、师大、五四北路、杨桥西路、紫阳6个监测点2013年4月-2014年3月春、夏、秋、冬四季AQI的空间分布图,空间分布数据采用“反距离加权空间插值法”。

从监测点位看,春季,紫阳、师大和快安AQI较五四北路和杨桥西路大;在一定区域内,随着与紫阳、师大和快安3个监测点距离逐渐增大,AQI逐渐减小,而距离五四北路、杨桥西路越远,AQI则越大。夏季,紫阳、五四北路、师大以及快安的AQI较杨桥西路大,较差的空气质量相对集中于城区中心地带。秋季,快

2.3 首要污染物季节变化特征

图4为2013年4月到2016年3月共3a时间,首要污染物出现天数季节变化特征。可以看出福州市首要污染物主要为PM₁₀、PM_{2.5}、NO₂、臭氧8h等4项,各项污染物所占比例呈明显的季节变化特征。PM_{2.5}3a的季度平均值排列顺序为冬>春>秋>夏,且3a内在夏季均未发生超标现象;PM₁₀是春>夏>秋>冬;NO₂是春>冬>秋>夏;O₃则是春>夏>秋>冬;空气质量达到“优”的则为秋>夏>冬>春。可吸入颗粒物出现的天数在四季中均以较大比例出现,在冬季尤为突出。工矿业发展、汽车尾气排放是造成颗粒污染物增加,冬季由于冷湿气流的影响,易形成逆温层,污染物不易扩散,从而加剧空气污染^[25]。NO₂的生成主要是由于化石燃料的燃烧和汽车尾气的排放,O₃作为二次污染物与氮氧化物浓度紧密相关。从图4可以看出,春、夏两季臭氧8h的超标日较多,与王宏^[26]的研究相一致。夏、冬两季NO₂和O₃呈现相反的季节变化,NO₂通过光化反应生成O₃,而夏季紫外短波辐射较强,易发生光化学反应,导致O₃浓度升高,从而出现超标现象。从空气质量达到优的天数看,夏、秋最多,春、冬次之,与李飞^[26]、余晔^[27]等不同区域的研究一致,这种季节变化特征与天气气候条件有关,冬季容易出现逆温层抑制污染物的扩散,夏、秋降水多,空气对流活跃,有利于污染物的稀释和扩散,空气质量也相对较好。

安监测点AQI最大,并且所影响的范围也较其他监测点大,其次是五四北路,再次为紫阳,而杨桥西路AQI最低,师大介于杨桥西路与紫阳之间,说明在秋季,快安空气质量最差,而杨桥西路的空气质量仅次于对照点,空气质量明显优于其他各监测点。冬季,师大AQI最大,杨桥西路依旧是除对照监测点外空气质量最优的,五四北路次于杨桥西路,紫阳和快安介于其中。比较各监测点的AQI发现,无论春、夏、秋、冬,鼓山作为对照点,其AQI都为最低,空气质量最优。结合福州市地形可知(图1),鼓山监测点位于多山地带,植被较为丰富,污染较少,空气清洁,因此AQI较低;而其余各

于夏、秋两季。

表 1 福州市四季 AQI 显著性差异表
Table 1 Significant difference of AQI at seasons in Fuzhou

季节	平均值	显著性差异($p=0.05$)
冬季	76	a
春季	70	b
秋季	56	c
夏季	53	c

注:不同字母表示有显著差异,相同字母表示无显著差异。

3 结论

(1)福州市 AQI 的日变化表现为在凌晨后的下半夜维持在较低浓度,而在 6:00 后呈现上升趋势。AQI 达到日变化和月变化特征都表现出了与人类活动的密切相关性。季节变化显示出明显的差异性,比较四季的 AQI 值,夏、秋季节的空气质量优于春、冬季节。

(2)福州市各监测点 AQI 根据月份不同,季节不同,会出现交叉变化的现象,但植被丰度高的鼓山清洁对照监测点 AQI 较 6 个监测点中低。春、师大、快安两个监测点的 AQI 相较于其它 3 个监测点大,杨桥西路的 AQI 仅次于鼓山对照点。AQI 的季节变化特点表现为夏、秋两季优于春、冬。

(3)通过对 AQI 首要污染物季节变化分析发现,PM₁₀、PM_{2.5} 的颗粒污染物在四季中为首要污染物出现频次均较高,同时 NO₂、O₃ 对 AQI 有所贡献。在 4 个季节中,空气质量达到优的天数秋季>夏季>冬季>春季。

[参考文献]

- Bishoi B, Prakash A, Jain V K. A comparative study of air quality index based on factor analysis and US-EPA methods for an urban environment[J]. Aerosol & Air Quality Research, 2009,9(1):1-17.
- Bortnick S M, Coutant B W, Eberly S I. Using continuous PM_{2.5} monitoring data to report an air quality index[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003,53(5):104-112.
- Liu C M. Effect of PM_{2.5} on AQI in Taiwan[J]. Environmental Modelling & Software, 2002,17(1):29-37.
- Hu J, Qi Y, Wang Y, et al. Characterizing multi-pollutant air pollution in China: comparison of three air quality indices [J]. Environment International, 2015(84):17-25.
- Kyrkilis G, Chaloulakou A, Kassomenos P A. Development of an aggregate air quality index for an urban Mediterranean agglomeration: relation to potential health effects [J]. Environment International, 2007,33(5):670-676.
- Poursafa P, Mansourian M, Motlagh M E, et al. Is air quality index associated with cardiometabolic risk factors in adolescents The CASPIAN-III study [J]. Environmental Research, 2014(134C):105-109.
- 高庆先,刘俊蓉,李文涛,等.中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示[J].环境科学,2015(4):1141-1147. Gao Qingxian, Liu Junrong, Li Wentao, et al. Comparative analysis and inspiration of air quality index between China and America[J]. Environmental Science, 2015(4):1141-1147.
- 高庆先,刘俊蓉,王宁,等. APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析[J].环境科学,2015,36(11):3952-3960. Gao Qingxian, Liu Junrong, Wang Ning, et al. Analysis on regional characteristics of air quality index and weather situation in Beijing and its surrounding cities during APEC [J]. Environmental Science, 2015,36(11):3952-3960.
- 吕继强,李兆炜,赵丹,等.西安市空气污染现状及治理对策[J].环境工程,2015(33):345-350. Lyu Jiqiang, Li Zhaowei, Zhao Dan, et al. Study on the air pollution and countermeasures in Xi'an City [J]. Environmental Engineering, 2015(33):345-350.
- 崔虎雄,任小龙,张华.上海市浦东新区冬季颗粒物数浓度及其谱分布特征[J].中国环境监测,2014,30(6):62-66. Cui Huxiong, Ren Xiaolong, Zhang Hua. Size distribution properties of atmospheric aerosol particles during winter in the downtown of Pudong, Shanghai [J]. Environmental Monitoring in China, 2014,30(6):62-66.
- Zhang F, Xu L, Chen J, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} during haze episodes in the urban of Fuzhou, China [J]. Particology, 2013,11(3):264-272.
- 陈晓秋,冯宏芳,余华.福州市春冬季灰霾天气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染水平和气象特征分析[J].环境科学与管理,2009,34(9):44-47. Chen Xiaoqiu, Feng Hongfang, Yu Hua. The pollution degree of aerosols PM₁₀ and PM_{2.5} during haze period of spring and winter in Fuzhou and analysis of characteristic of the weather [J]. Environmental Science and Management, 2009,34(9):44-47.
- 王宏,林长城,陈晓秋,等.天气条件对福州近地层臭氧分布的影响[J].生态环境学报,2011,20(8):1320-1325. Wang Hong, Lin Changcheng, Chen Xiaoqiu, et al. Effects of weather condition on surface ozone distribution in Fuzhou [J]. Ecology and Environmental Science, 2011,20(8):1320-1325.
- 陈彬彬,林长城,杨凯,等.福州市大气污染时空变化及其与气象条件关系[J].环境科学与技术,2009,32(6):125-128. Chen Binbin, Lin Changcheng, Yang Kai, et al. Spatial-temporal characteristics of air pollution and the relationship with meteorological conditions in Fuzhou City [J]. Environmental Science & Technology, 2009,32(6):125-128.
- 姚玉刚,朱燕玲,邹强.环境空气质量指数(AQI)的 EXCEL

- 实现研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(6):140-142.
- Yao Yugang, Zhu Yanning, Zou Qiang. Research on air quality index with EXCEL software [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(6):140-142.
- [16] 詹长根, 吴艺, 韦淑贞, 等. 基于 GIS 的武汉市 AQI 时空分布规律研究[J]. 地理空间信息, 2014(5):62-64.
- Zhan Changgen, Wu Yi, Wei Shuzhen, et al. Spatio-temporal distribution of AQI in Wuhan based on GIS[J]. Geospatial Information, 2014(5):62-64.
- [17] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, et al. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States [J]. Environmental Pollution, 2014, 193(4):119-129.
- [18] 冯鹏飞, 于新文, 张旭. 北京地区不同植被类型空气负离子浓度及其影响因素分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5):818-824.
- Feng Pengfei, Yu Xinwen, Zhang Xu. Variations in negative air ion concentrations associated with different vegetation types and influencing factors in Beijing [J]. Ecology and Environmental Science, 2015, 24(5):818-824.
- [19] 钟林生, 吴楚材, 肖笃宁. 森林旅游资源评价中的空气负离子研究[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6):56-60.
- Zhong Linsheng, Wu Chucai, Xiao Duning. Aeroanion research in evaluation of forest recreation resource [J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(6):56-60.
- [20] 许丽忠, 陈芳, 陈峰, 等. 中国八大经济区域 5 月与 7 月 CO 地面浓度时空分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(8):1934-1941.
- Xu Lizhong, Chen Fang, Chen Feng, et al. Spatial and temporal variation of near-ground CO concentration in the eight economic regions in China in May and July, 2013 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(8):1934-1941.
- [21] 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 福州近地层臭氧分布及其与气象要素的相关性[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4):176-181.
- Wang Hong, Chen Xiaoqi, Yu Yongjiang, et al. Distribution of ozone in land surface layer in Fuzhou and its relationship with meteorological factors[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(4):176-181.
- [22] 谈建国, 陆国良, 耿福海, 等. 上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报[J]. 热带气象学报, 2007, 23(5):515-520.
- Tan Jianguo, Lu Guoliang, Geng Fuhai, et al. Analysis and prediction of surface O₃ concentration related meteorological factors in summertime in urban area of Shanghai [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(5):515-520.
- [23] Fang S H, Chen H W. Air quality and pollution control in Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(5):735-741.
- [24] 中国气象局. 2013 年 12 月国内重大天气气候事件回顾[J]. 中国气象, 2014-01-02/2015-04-12.
- China Meteorological Administration. Domestic major weather and climate events review in December 2013 [J]. China Meteorological, 2014-01-02/2015-04-12.
- [25] 蒋展鹏. 环境工程学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- Jiang Zhanpeng. Environmental Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992.
- [26] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(6):1936-1943.
- Li Xiaofei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index [J]. Environmental Science, 2012, 33(6):1936-1943.
- [27] 余晔, 夏敦胜, 陈雷华, 等. 兰州市 PM₁₀ 污染变化特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2010, 31(1):22-28.
- Yu Ye, Xia Dunsheng, Chen Leihua, et al. Analysis of particulate pollution characteristics and its causes in Lanzhou, northwest China [J]. Environmental Science, 2010, 31(1):22-28.