

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0105

肖建能 杜国明 施益强 等. 2016. 厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析[J]. 环境科学学报, 36(9): 3363–3371

Xiao J N, Du G M, Shi Y Q, et al. 2016. Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Xiamen City[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(9): 3363–3371

# 厦门市环境空气污染时空特征及其与气象因素相关分析

肖建能<sup>1</sup> 杜国明<sup>1,\*</sup> 施益强<sup>2</sup> 温宥越<sup>1</sup> 姚杰<sup>2</sup> 高宇婷<sup>2</sup> 林锦耀<sup>1</sup>

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275

2. 集美大学理学院, 集美大学影像信息工程技术研究中心, 厦门 361021

收稿日期: 2015-12-02 修回日期: 2016-02-25 录用日期: 2016-03-15

**摘要:** 利用 2014 年 3 月—2015 年 2 月厦门市 18 个监测站点实测数据, 运用 GIS 技术、相关分析以及统计分析等方法, 进行空气质量指数(AQI)及其污染因子的时空分析, 结合厦门市土地利用分类专题图和主要重工业企业分布图进行厦门市环境空气质量状况污染源的分析。结果表明: 厦门市首要污染物为 PM<sub>10</sub>, 其天数占全年的 48%, PM<sub>2.5</sub> 紧随其后占到 36%; 厦门市空气质量较好时间段主要集中在夏季, 其中 7 月份是厦门市空气质量最好的月份, 而厦门市秋冬两季的空气质量较差; AQI 与温度相关系数达 -0.813, 具有极显著负相关性( $p < 0.01$ ), 与气压相关系数达 0.835, 具有极显著正相关性( $p < 0.01$ ), 而与风速和相对湿度气象因素相关性都不显著( $p > 0.05$ ); PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 污染因子存在明显的空间分布差异, 海沧区和集美区南部的空气污染比厦门其他地方明显更为严重; 从土地利用图和主要重工业企业的分布图可以看出, 污染最为严重的地区土地利用类型主要是建筑用地, 而且这些地区还分布着许多钢铁厂和发电站。

**关键词:** 空气质量指数(AQI); PM<sub>2.5</sub>; 污染因子; 气象因素; 相关分析; 厦门市

文章编号: 0253-2468(2016)09-3363-09 中图分类号: X51 文献标识码: A

## Spatiotemporal distribution pattern of ambient air pollution and its correlation with meteorological factors in Xiamen City

XIAO Jianneng<sup>1</sup>, DU Guoming<sup>1,\*</sup>, SHI Yiqiang<sup>2</sup>, WEN Youyue<sup>1</sup>, YAO Jie<sup>2</sup>, GAO Yuting<sup>2</sup>, LIN Jinyao<sup>1</sup>

1. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275

2. Research Center of Image Information Engineering and Technology, School of Science, Jimei University, Xiamen 361021

Received 2 December 2015; received in revised form 25 February 2016; accepted 15 March 2016

**Abstract:** In this paper, we analyze the distribution of air quality index (AQI) in Xiamen based on the data of 18 monitoring sites from March 2014 to February 2015 by using GIS, correlation analysis and statistical analysis. We also analyze the source of pollution based on land use classification map and the distribution of major heavy industry. The results show that PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> are the primary pollutants in Xiamen. For these two pollutants, the number of polluted days accounts for 48% and 36% of the year, respectively. The air quality in Xiamen is better in summer and the best in July. In comparison, the air quality in autumn and winter is poor. The correlation coefficient between AQI and temperature is -0.813, which shows a very significant negative correlation ( $p < 0.01$ ). The correlation coefficient between AQI and air pressure is 0.835, which shows a very significant positive correlation ( $p < 0.01$ ). However, the correlations between AQI and wind speed, relative humidity are not significant ( $p > 0.05$ ). The spatial distributions of these pollution factors, including PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>, are quite different in Xiamen. In addition, the air pollutions in Haicang and the south of Jimei are much more severe than the rest areas of Xiamen. According to the land use classification map and the distribution map of major heavy industry, we can see that the most seriously polluted area, Haicang and south of Jimei Districts, contain many steel plants and power stations.

**Keywords:** air quality index(AQI); PM<sub>2.5</sub>; pollution factors; meteorological factor; correlation analysis; Xiamen City

基金项目: 国家科技支撑计划项目(No. 2015BAK11B02); 广东省科技计划国际科技合作项目(No. 2014A050503031); 中山大学本科教学改革研究课题(No. 37000-16300012)

**Supported by** the National Key Technology R&D Program(No. 2015BAK11B02), the Science and Technology Program for International Scientific Cooperation Project of Guangdong Province(No. 2014A050503031) and the Undergraduate Teaching Reform Research Subject of Sun Yat-sen University(No. 37000-16300012)

作者简介: 肖建能(1992—), 男, E-mail: xjn724@126.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: eesdgm@mail.sysu.edu.cn

**Biography:** XIAO Jianneng(1992—), male, E-mail: xjn724@126.com; \* **Corresponding author**, E-mail: eesdgm@mail.sysu.edu.cn

## 1 引言( Introduction)

我国当前空气污染特征已经从传统的煤烟型污染向“复合型”污染转变( Ma *et al.* 2010; 胡敏等, 2011; Guan *et al.* 2014). 区域性大气颗粒物和臭氧污染不断加重, 一些城市长时间出现雾霾天气, 已成为重要环境问题( 张伟等 2015; 刘永红等 2011; Cheng *et al.* 2013; 赵秀娟等 2013; 王丛梅等 2013; 吴兑, 2012; 王芳芳等, 2014; 龚识懿和冯加良, 2012). 雾霾天气一般是指水平能见度小于 10 km, 它在大气边界层乃至对流层低层会出现整体的大气浑浊现象( Cesur *et al.* 2007; 洪也等 2011). 近年来很多研究表明雾霾天气对人们的身体健康具有重大的损害( 戴海霞和宋伟民 2001; 白志鹏等 2006; Ruzer and Harley 2005; 阚海东等 2004). 随着民众健康和环保意识的增强, 人们对空气质量提出了更高的要求. 原有发布的空气污染指数( API), 其评价结果与人民群众主观感受存在差异( 周生贤, 2012). 为了应对霾污染频繁发生这种现状, 国家环境保护部( 2016) 出台了新的《环境空气质量标准》( GB3095—2012). 新的评价指标空气质量指数 AQI ( air quality index, AQI) 较 API 监测的污染物指标更多, 包含有  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $O_3$  6 种污染因子. 其中的  $PM_{2.5}$  最引起科学学者以及民众的关注( 张伟等 2015; 刘永红等 2011; Cheng *et al.* 2013; 张彩艳 2014). 研究表明  $PM_{2.5}$  与人类呼吸道疾病、心肺疾病引起的死亡率呈正相关关系( Berico *et al.* 1997; Peters *et al.* 2001).

近年来有“海上花园”之称的厦门市伴随着城市化和工业化的迅速发展, 空气质量下降趋势显著( 王坚等 2014). 厦门市空气质量优良天数比例已从 2000 年的 75% 下降到 2010 年 42.7% ( 周挺进等 2012). 在 2013 年全国实施新空气质量标准的 74 个城市中, 有 71 个城市“超标”, 仅有拉萨、海口、舟山 3 个城市达标, 而厦门却在未完全达标之列. 这就亟需我们加强对厦门市空气质量的研究从而为改善厦门市空气质量和治理空气污染等提供科学依据.

一些学者对厦门市环境空气质量已经有不少研究, 如方宏达等研究了厦门市郊区大气中的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  含有的重金属的形态特征( 方宏达等, 2015), 周挺进等用模糊综合评价的方法来反映环境空气污染及其变化规律( 周挺进等 2012), 郑美

秀等利用相关统计方法来分析厦门市空气质量( 郑美秀和周学鸣 2010), 叶翠杏等( 2006) 分析厦门 4 个不同功能区的冬季  $PM_{10}$  中环芳烃污染特征, 钱冉冉等研究了厦门市冬春雾霾期间湖里工业区的  $PM_{10}$  中多环芳烃污染特征和来源( 钱冉冉等, 2012), 张学敏利用主因子分析法定量求得 2004—2005 年厦门市 5 个站点  $PM_{10}$  的主要来源( 张学敏, 2007), 庄马展等研究了厦门市冬春夏 3 季可吸入颗粒物的成分( 庄马展等 2006), 王坚等通过同位素监测分析厦门岛内空气中  $NO_2$ 、 $SO_2$  来源及传输特征( 王坚等 2014). 之前对厦门市空气质量研究使用旧的空气质量评价指标 API 指数来研究地区空气质量( 范新强和孙照渤 2009; 郑美秀和周学鸣, 2010). 除此之外, 对于厦门市的研究分析也大都是只是集中在岛内( 张学敏, 2007; 林长城等 2009; 王坚等 2014), 缺少对整个厦门市的区域研究; 并且对于污染来源的空间分布情况分析较为缺少.

本研究利用覆盖在整个厦门市 18 个站点 2014 年 3 月—2015 年 2 月数据, 并采用 IDW 空间插值方法和相关性分析等方法, 对厦门市的 AQI 以及  $PM_{2.5}$  等污染因子及其来源的时空分布情况进行了分析.

## 2 材料与方法( Materials and methods)

### 2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源 空气质量资料来自于 2014 年厦门市环保局设置在厦门市的 18 个空气质量监测站点 2014 年 3 月—2015 年 2 月份 AQI 值、6 种污染物(  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $CO$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 、 $O_3$ ) 和 4 种气象因素( 风速、温度、湿度、气压) 的每日 24 时逐时监测浓度实测值数据, 以及从地理空间数据云网站( 网址: <http://www.gscloud.cn/>) 下载的 2013 年厦门市 Landsat TM 影像数据作为土地利用分类的数据源.

2.1.2 数据处理 利用厦门市 18 个监测站每日 24 时逐时监测数据, 求出每种污染因子以及气象因素的日均值; 统计出 2014 年 3 月—2015 年 2 月份这一一年中的每日首要污染物并求出每种污染物所占全年的比值; 再根据日均值求出每种污染因子以及气象因素的月均值; 利用 Office 软件的数据处理功能, 制作出 AQI、污染因子及气象因素的月季变化折线图; 利用 SPSS 软件相关分析求出 AQI 同气象因素的相关性; 根据日均值求出每个站点污染因子及气象因素的年均值, 利用 ArcGIS10.1 进行空间插值

分析和空间叠加分析。

## 2.2 研究方法

**2.2.1 相关分析** 相关分析的任务就是揭示地理要素之间、研究现象之间是否存在某种依存关系,并对具体有依存关系的现象探讨其相关方向以及相关程度。其计算公式见式(1)

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中  $r_{xy}$  为要素  $x$  与  $y$  之间的相关系数;  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别表示两个要素样本的平均值。相关系数  $r_{xy}$  值介于  $[-1, 1]$  区间, 当  $r_{xy} > 0$  表示正相关, 即两要素同向相关; 当  $r_{xy} < 0$  表示负相关, 即两要素异向相关。

**2.2.2 反距离权重 (IDW) 法** 通过空间插值的方法可以将离散点转化为连续的曲面以便进行空间分布的分析。通过采用空间插值的方法, 可以研究厦门市整个区域的 AQI 及污染因子的分布。

反距离权重 (IDW) 法插值是一种简便、常用的空间插值方法, 它在研究区域性环境污染物质的空间分布方面具有很好的应用 (阳文锐和王如松, 2007; 汪旻等, 2009; 詹长根等, 2014)。它以插值点与样本点之间的距离维权中进行加权平均, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大。但 IDW 法插值依赖于距离, 当样本点之间的距离较大时, 会产生较大误差。此处设置距离的幂值为默认值 2。指定较小的幂值会对距离较远的周围点产生更大影响, 从而导致更加平滑的表面 (池建, 2011)。

## 2.3 研究区概况

厦门市位于东经  $118^{\circ}04'04''$ 、北纬  $24^{\circ}26'46''$ , 地处我国东南沿海, 陆地面积  $1699.39 \text{ km}^2$ , 海域面积约  $390 \text{ km}^2$ , 由思明区等 6 个行政区构成 (图 1)。土地利用状况 (图 2) 主要有建设用地、耕地、林地、滩涂等, 其中, 建设用地主要分布在海沧区、集美区、同安区南部、翔安区西北部以及整个厦门岛, 林地主要分布在厦门北部地区 (主要是同安区)。厦门市属亚热带气候, 温和多雨, 年均降雨量约  $1600 \text{ mm}$ , 年均气温约  $21^{\circ}\text{C}$ , 冬无严寒, 夏无酷暑。

厦门市能源以石油和煤炭为主, 全市规模以上工业企业实现总产值  $4716.21 \times 10^8$  元, 增长  $13.1\%$ 。全市实现工业增加值  $1212.17$  亿元, 占地区生产总值的  $40.1\%$ , 重点产业链共完成工业总产值  $3199.98 \times 10^8$  元, 占全市规模以上工业总产值的

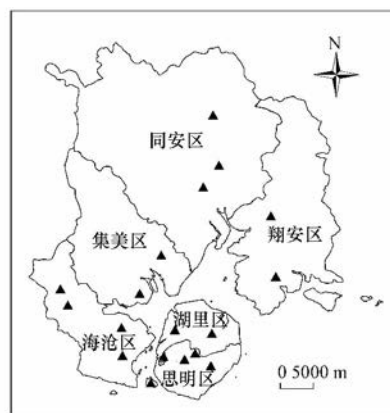


图 1 18 个站点研究区域及监测站点示意  
Fig.1 Map of the study area and 18 monitor sites

68.4% (康涛, 2014), 而主要污染型重工业企业如发电厂、钢铁厂等大多集中在海沧区及集美区南部 (图 3)。厦门市作为海峡西岸经济区的龙头城市, 经济和城市建设快速发展的过程, 空气污染形势却不容乐观。

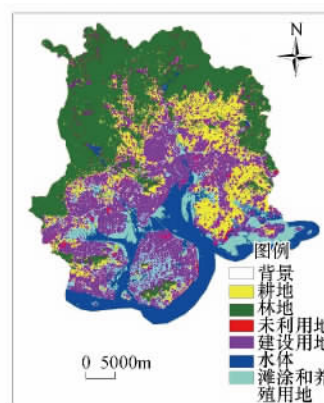


图 2 2013 年厦门市土地利用分类专题图  
Fig.2 Land use classification in Xiamen city in 2013



图 3 厦门市主要重污染企业分布  
Fig.3 Distribution of major heavy polluting factories in Xiamen city

### 3 结果与讨论(Results and discussion)

#### 3.1 厦门市首要污染物情况

统计 2014 年 3 月—2015 年 2 月厦门市这一一年期间每天的首要污染物情况,并求出每种首要污染物所占的比例,结果如图 4 所示.从图 4 中可以看出 2014 年 3 月—2015 年 2 月这一一年期间,厦门市以  $\text{PM}_{10}$  为首要污染物的天数最多有 175 d,占 48%;以  $\text{PM}_{2.5}$  为首要污染物的天数有 130 d,占 36%;以  $\text{NO}_2$  为首要污染物的天数有 55 d,占 15%;以  $\text{O}_3$  为首要污染物的天数仅有 5 d,占全年 1%;而 CO 在这一年期间内,没有出现作为厦门市首要污染物的天数.这表明 CO、 $\text{O}_3$  对厦门市环境空气污染贡献较小,影响厦门市环境空气质量的污染物因子主要为  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  作为灰霾天气的重要成分之一,对人体健康也会造成很大影响.在全年首要污染物的天数中所占比值也达到了 36%,表明  $\text{PM}_{2.5}$  对厦门市环境空气污

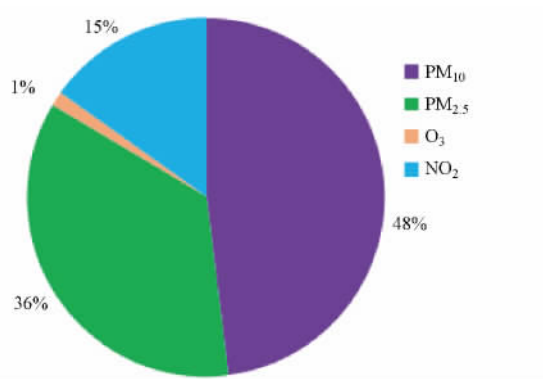


图 4 厦门市首要污染物组成比例

Fig.4 Proportion of primary pollutant in Xiamen city

染的贡献也较大.  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  的排放主要来源于城市扬尘、煤烟尘、机动车尾气等(叶翠杏等, 2006; 钱冉冉等, 2012; 肖致美等, 2012). 近年来厦门市的经济迅速发展, 能源消耗量大, 使得厦门市大气中  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  含量增加.

#### 3.2 AQI、污染因子的月际变化分析

由图 5 可以看出 2014 年 3 月—2015 年 2 月期间, AQI 及污染因子(除  $\text{SO}_2$  外)变化趋势明显. 其中 AQI 与  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{NO}_2$  的月均浓度逐月变化趋势相近. 从 3 月份起 AQI 值开始下降, 到 7 月份 AQI 值达到最低值, 因而厦门市在夏季的 7 月份空气质量最好. 随后 AQI 值逐月升高到次年 1 月份达到峰值, 也是全年的最大值;  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  都在 9 月份达到最低的值, 而在 12、4 月都有一个小峰值,  $\text{O}_3$  浓度则在 4 月份开始呈上升趋势, 到 6 月份有一个峰值, 随后浓度开始降低到 9 月份达到谷底, 而后浓度又开始增加, 到次年 12 月份达到最高峰值. 这种状况与其他南方沿海城市的研究结果一致(王宏等, 2012; 邓雪娇等, 2011). 厦门市处于亚热带湿润区域(刘光明, 1998), 主要受季风气候影响, 具有亚热带海洋性气候特征, 夏季盛行偏南风, 冬季盛行偏北风. 厦门市夏季风主要来自海洋, 海面上空气受污染较小且湿度大, 加之温度较高风速较大, 有利于污染物的扩散; 而冬季厦门市主导的风来自内陆, 空气质量较为污浊且干燥, 加之温度较低风速较小, 不利于污染物的扩散. 因此, 厦门市夏季的 AQI 值较低, 而冬春两季 AQI 值较高(王斌和高会旺, 2008; 孙丹等, 2012; 郑秋萍等, 2013).

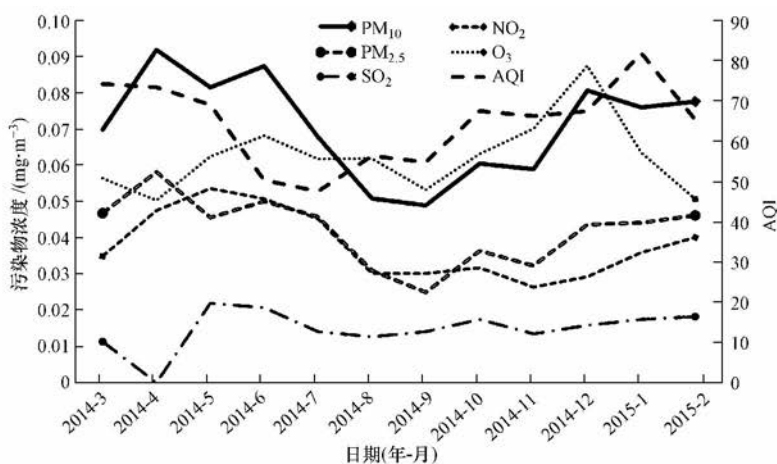


图 5 厦门市 AQI、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度月际变化

Fig.5 Monthly variation of AQI and concentrations of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  in Xiamen city

2014 年 3 月—2015 年 2 月期间, 厦门市全年空气质量为优级别占 19.5%, 良级别占 73.7%, 轻度污染及以上级别占 6.5%, 优良率达 93.5%。图 6 是通过分别统计每月 AQI 级别得到的柱状图, 由图 6 可以看出: AQI 级别受时间变化明显, 在 6、7 月份中有一半以上天数的 AQI 级别为优, 都在夏季, 表明夏季是厦门市的空气质量较好的季节。其中, 在 7 月份达到 19 d AQI 级别为优, 12 d AQI 级别为良且没有出现轻度污染, 厦门市空气质量最佳月份是在 7

月份; 在 1 月份出现 AQI 级别为优、良、轻度污染以及中度污染这 4 种级别的天气, 表明厦门市在 1 月份的空气质量变化最大。

由图 5 图 6 可以看出, 厦门总体空气质量随季节变化明显, 在夏季空气质量最好, 而春冬两季空气质量较差, 这与厦门市地处亚热带季风区, 且城市地处沿海有很大关系。而且温度的变化、气压等气象因素对厦门市的空气质量污染也有一定的影响。

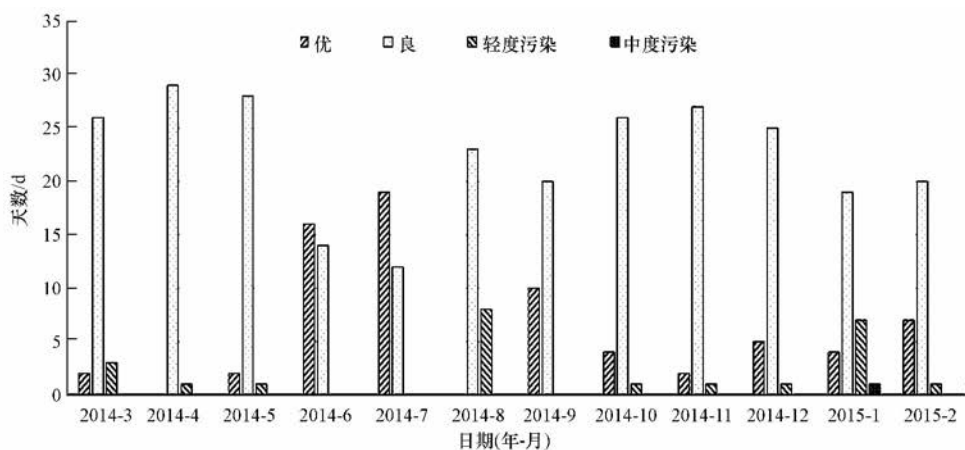


图 6 厦门市空气质量指数 AQI 级别

Fig.6 Air quality index levels in Xiamen city

### 3.3 厦门市气象因素分析

气象条件对污染物的扩散和积累起着重要的控制作用, 即在污染源排放一定时, 污染物浓度大小主要取决于气象条件 (Jaffe *et al.*, 1999; Hurley *et al.*, 2001; Tai *et al.*, 2010; 刘宁微等, 2010; 汪伟峰等, 2010), 而且某些不利气象条件会显著加重颗粒物污染过程 (赵晨曦等, 2014)。所以有必要对厦门市环境空气质量与气象因素的关系进一步进行研究。图 7 是 2014 年 3 月—2015 年 2 月厦门市的温度、气压、相对湿度、风速的月季变化图, 由此可以看出: ①温度: 厦门市全年温度呈抛物线状, 在 6、7、8、9 月份月平均温度达到 25℃ 以上, 其中 7 月份的平均温最高达 30.5℃; ②气压: 厦门市全年气压大致呈反抛物线状, 2014 年中有 3、10、12 月, 2015 年有 1、2 月气压高于 1013.25 hPa (1 标准大气压), 其余月份气压值均在 1 标准大气压以下, 其中在 8 月份厦门市平均气压达到最低值。③相对湿度: 厦门市地处沿海, 全年大气相对湿度较高, 都达到 60% 以上, 但月份之间的波动变化较明显, 其中相对湿度最大是 5 月份相对湿度达 78.9%, 而相对湿度最低是在 12 月份相对湿度为 61.3%。这主要是因为

5 月份开始厦门市降雨开始变得频繁, 尤其 5—9 月份厦门时常受台风天气带来强降水的影响, 增加了大气的相对湿度; 而在 10 月份后降水次数相对较少, 故而大气相对湿度较低; ④风速: 厦门市全年风速起伏变化较大, 在 5 月份风速达到最低的 1.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 除 5 月份外, 厦门市全年风速在 1.5 ~ 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 3.4 AQI 与气象因素相关分析

对 2014 年 3 月—2015 年 2 月的厦门市 AQI 值以及气象因素进行相关性分析, 分析结果如表 1 所示。从表 1 可以看出: AQI 与温度相关系数为 -0.813, 具有极显著的负相关性 ( $p < 0.01$ )。由 3.3 节可知, 7 月份平均温度达到最高的 30.5℃, 而 7 月份是厦门市全年 AQI 值最低的月份, 冬、春季节厦门市平均温度较低, 对应 AQI 值相对较高。这与所分析出的温度与 AQI 存在极强负相关性相符合; AQI 与气压相关系数为 0.835, 具有显著正相关性 ( $p < 0.01$ )。由 3.3 节可知, 夏季厦门市气压达到谷底, 而夏季厦门市 AQI 值也相对较小, 冬、春季节厦门市气压相对较高, 而 AQI 值也相对较大。这与所分析出 AQI 与气压成显著正相关性相一致; AQI 与

湿度相关系数为  $-0.47$ , AQI 与风速相关系数为

$-0.24$  相关性都不显著 ( $p > 0.05$ ) .

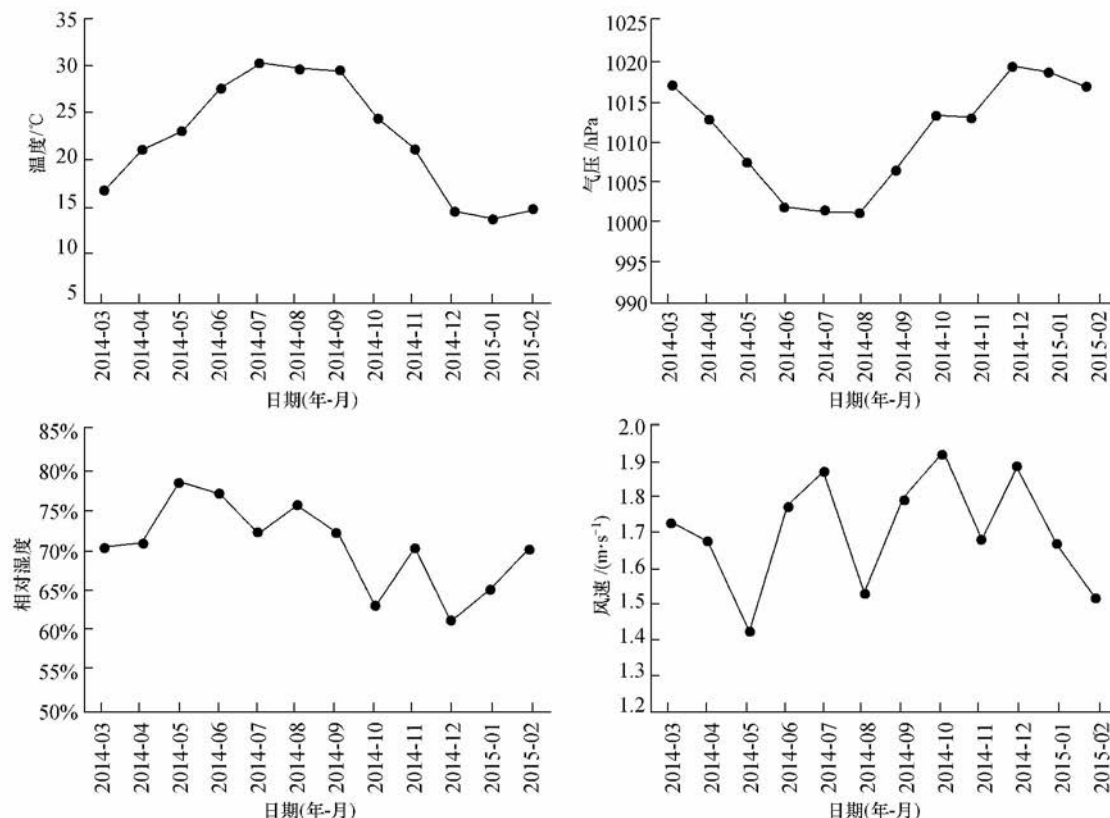


图 7 厦门市气压、温度、湿度、风速月份变化

Fig.7 Monthly variation of air pressure, temperature, humidity and wind speed in Xiamen city

综上,厦门市全年相对湿度、风速与 AQI 之间相关性较小,而厦门市 AQI 与温度和气压这两种气象因素具有显著正相关关系.厦门市因所处的环境与内地以及其它北方城市(银川、成都、杭州、北京)不同,使得各气象因素与环境空气质量相关性差异较大(严晓瑜等,2015;洪盛茂等,2010;赵建忠等,2014).影响厦门市 AQI 的主要气象因素为温度和气压.

表 1 AQI 与气象因素相关分析

Table 1 Correlation analysis of AQI and meteorological factors

	AQI	温度	湿度	气压	风速
1					
温度	$-0.813^{**}$	1			
湿度	$-0.47$	$0.576^*$	1		
气压	$0.835^{**}$	$-0.939^{**}$	$-0.751^{**}$	1	
风速	$-0.24$	$0.151$	$-0.579^*$	$0.06$	1

注:  $**p < 0.01$  水平上显著相关.  $*p < 0.05$  水平上显著相关.

### 3.5 污染因子及气象因素的 IDW 法插值和空间叠加分析

由于区域的空间插值误差随着监测站点个数

的增加而减小(沈艳等,2012),用目前设在厦门市最多的 18 个站点的空气质量数据进行污染分布分析,将增加研究区域的插值研究精确性.图 8 是 2014 年 3 月—2015 年 2 月厦门市 18 个监测站点的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  进行 IDW 法的空间插值结果图,从图中可以看出,这 5 种污染因子的空间污染分布差异明显,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  污染因子主要分布在海沧区,而  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$  污染因子主要分布在海沧区、集美区南部以及翔安区.但是在海沧区  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  浓度不高,而  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  都在该局部有高浓度的情况.  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  大气颗粒物与  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  等污染因子的成因不同.而  $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  在两者存在密切关系,在一定时间尺度上存在着长期的时序性(李思川等,2015;陆克定等,2010).  $\text{O}_3$  主要是由人类活动排放的挥发性有机物、氮氧化物等在太阳光的作用下经过一系列复杂的光化学反应而生成的(Carpenter et al., 1998),而  $\text{NO}_2$  在同安区和翔安区浓度较低,在一定程度上会减弱同安区和翔安区的  $\text{O}_3$  的光化学反应,所以导致这两个地区  $\text{O}_3$  浓度较低.



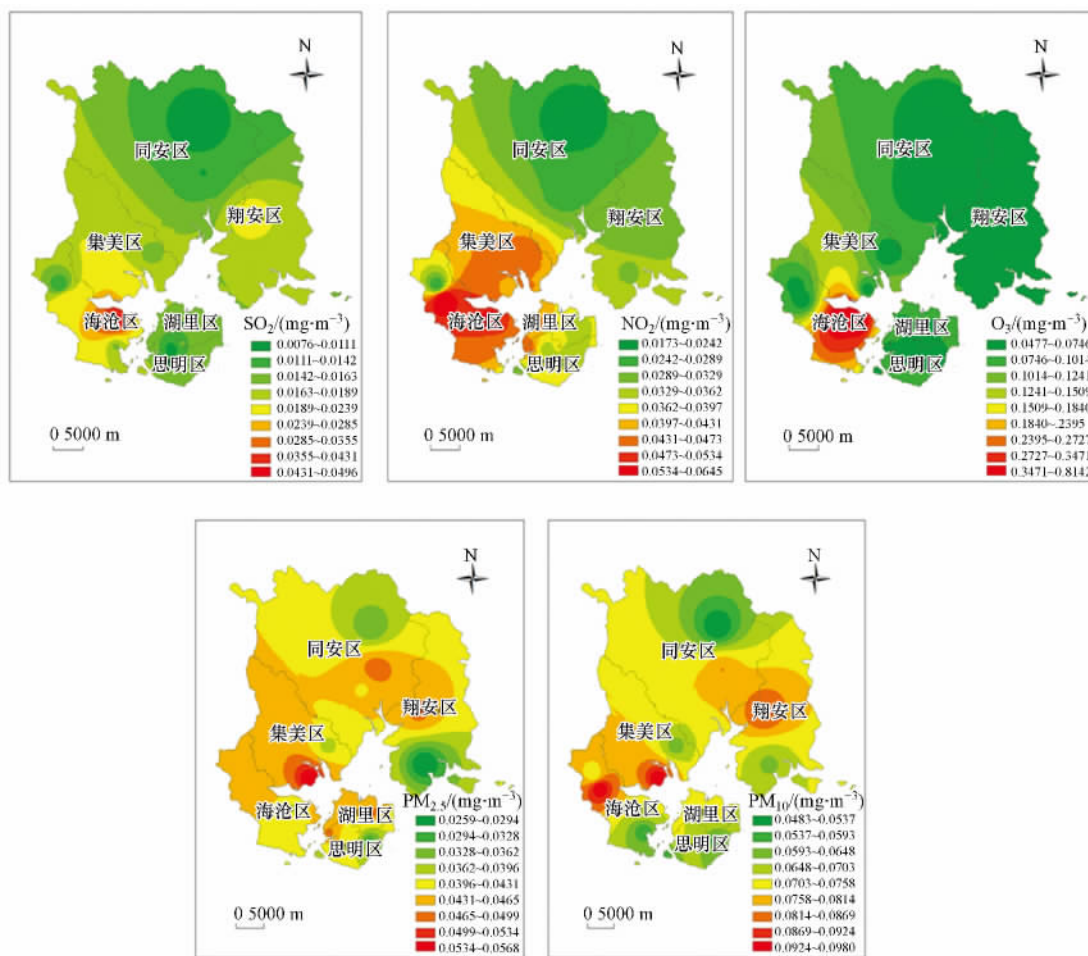
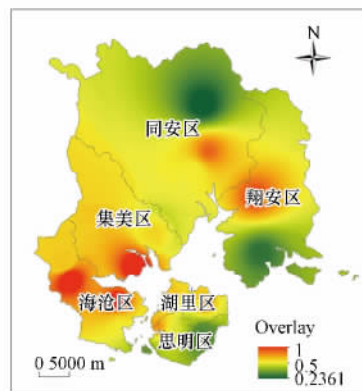


图 8 18 个站点污染因子空间插值图

Fig.8 Space interpolation of pollution factors at the 18 sites

将 5 种污染因子的数据图层做归一化处理, 然后再把 5 种污染因子的数据图层进行空间叠加, 可以在空间上分析出 5 种污染因子对厦门市环境空气的综合影响. 从图 6 的 18 个站点的 5 种污染因子叠加图中可明显看出海沧区和集美区南部空气污染最严重.

本文通过 2013 年厦门市的 TM 影像数据制成的土地利用分类(图 2)以及厦门市主要的重工业污染企业的分布(图 3)对厦门市的污染源来源进行分析. 从图 2 可以看出, 建设用地主要分布在厦门海沧区、集美区、同安区南部、翔安区西北部以及整个厦门岛, 林地主要分布在厦门北部地区(主要是同安区), 而海沧区、集美区、同安南部、翔安区以及整个厦门岛基本被建设用地覆盖, 林地面积稀少. 而林地具有制造氧气, 同时也有减少二氧化碳、吸尘、净化空气的作用, 因此同安区的空气质量较好与其

图 9 18 个站点( $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ ) 叠加Fig.9 Overlay of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  concentrations at the 18 sites

有必然的关系; 而建设用地包括交通道路、居民区和工业区等, 对空气均会造成不同程度的污染.

从图3可以看出厦门市主要的污染型重工业企业如发电厂、钢铁厂等大多集中在海沧区及集美区南部。大量化石燃料的燃烧不仅产生大量的大气颗粒物和SO<sub>2</sub>等污染气体,而且污染气体进入大气中也会进行复杂的二次转化从而进一步加重该地区的空气污染,因而导致厦门市海沧区及集美区南部成为厦门市污染最为严重的区域。

#### 4 结论(Conclusions)

1) 厦门市首要污染物为PM<sub>10</sub>,其作为首要污染物的天数占全年48%,PM<sub>2.5</sub>紧随其后占到36%;O<sub>3</sub>作为厦门市的首要污染物的天数仅占1%,而CO从未作为厦门市的首要污染物,CO、O<sub>3</sub>对厦门市环境空气质量的影响较小。

2) 在时间序列上,厦门市全年AQI及污染因子(除SO<sub>2</sub>外)变化趋势明显。而PM<sub>2.5</sub>与PM<sub>10</sub>的变化趋势与AQI基本相同,厦门市空气质量较好时间段主要集中在夏季,其中7月份是厦门市空气质量最好的月份。而厦门市秋冬两季的空气质量较差,其中厦门市1月份空气质量状况最差。

3) 厦门市AQI与温度相关系数为-0.813,具有显著的负相关性( $p < 0.01$ );AQI与气压相关系数为0.835,具有显著正相关性( $p < 0.01$ );AQI与湿度相关系数为-0.47,AQI与风速相关系数为-0.24,相关性都不显著( $p > 0.05$ )。

4) 对几种空气污染因子进行空间插值和空间叠加分析,结果表明:PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>污染因子在空间分布上差异明显,其中海沧区和集美区南部的空气质量比厦门市其余地方差;通过对厦门市近期的土地利用以及厦门市主要的重工业企业分布进行污染源分析可以发现:污染最严重的集美区南部和海沧区林地面积稀少基本都是建筑用地,而且还密集分布着厦门市的主要重工业企业。

#### 参考文献(References):

- 白志鹏,蔡斌彬,董海燕,等. 2006. 灰霾的健康效应[J]. 环境污染与防治, 28(3): 198-201
- Berico M, Luciani A, Formignani M. 1997. Atmospheric aerosol in an urban area-measurements of TSP and PM<sub>10</sub> standards and pulmonary deposition assessments [J]. *Atmospheric Environment*, 31(21): 3659-3665
- Carpenter L J, Clemitshaw K C, Burgess R A, et al. 1998. Investigation and evaluation of the NO<sub>x</sub>/O<sub>3</sub> photochemical steady state [J]. *Atmospheric Environment*, 32(19): 3353-3365
- Cesur M, Corapcioglu D, Gursay A, et al. 2007. A comparison of glycemic effects of glimepiride, repaglinide, and insulin glargine in type 2 diabetes mellitus during Ramadan fasting [J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 75(2): 141-147
- Cheng Z, Jiang J K, Fajardo O, et al. 2013. Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011) [J]. *Atmospheric Environment*, 65: 186-194
- 池建. 2011. 精通 ArcGIS 地理信息系统[M]. 北京: 清华大学出版社
- 戴海夏,宋伟民. 2001. 大气PM<sub>2.5</sub>的健康影响[J]. 国外医学卫生学分册, 28(5): 299-303
- 邓雪娇,周秀骥,吴兑,等. 2011. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 41(1): 93-102
- 范新强,孙照渤. 2009. 1953—2008年厦门地区的灰霾天气特征[J]. 大气科学学报, 32(5): 604-609
- 方宏达,陈锦芳,段金明,等. 2015. 厦门市郊区PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中重金属的形态特征及生物可利用性研究[J]. 生态学报, 24(11): 1872-1877
- 龚识懿,冯加良. 2012. 上海地区大气相对湿度与PM<sub>10</sub>浓度和大气能见度的相关性分析[J]. 环境科学研究, 25(6): 628-632
- Guan D B, Su X, Zhang Q, et al. 2014. The socioeconomic drivers of China's primary PM<sub>2.5</sub> emissions [J]. *Environmental Research Letters*, 9(2): 024010
- 国家环境保护部. 2016. GB 3095-2012 环境空气质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社
- 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 2010. 杭州市区空气污染物变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象, 36(2): 93-101
- 洪也,马雁军,李潮流,等. 2011. 沈阳冬季灰霾日大气颗粒物元素粒径分布特征[J]. 环境科学, 24(6): 637-644
- 胡敏,唐倩,彭剑飞,等. 2011. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. 环境与可持续发展, 36(5): 15-19
- Hurley P J, Blockley A, Rayner K. 2001. Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia [J]. *Atmospheric Environment*, 35(10): 1871-1880
- Jaffe D, Anderson T, Covert D, et al. 1999. Transport of Asian air pollution to North America [J]. *Geophysical Research Letters*, 26(6): 711-714
- 阚海东,陈秉衡,汪宏. 2004. 上海市城区大气颗粒物污染对居民健康危害的经济学评价[J]. 中国卫生经济, 23(2): 8-11
- 康涛. 2014. 2014年厦门经济特区年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社
- 李思川,史凯,刘春琼,等. 2015. 夏季NO<sub>2</sub>与O<sub>3</sub>相互作用的时间尺度特征——以香港地区为例[J]. 环境化学, 34(2): 299-307
- 林长城,王宏,陈彬彬,等. 2009. 厦门市空气质量时空分布特征及气象条件关系研究[A]//第26届中国气象学会年会大气成分与天气气候及环境变化分会论文集[C]. 杭州: 中国气象学会. 211-216
- 刘明光. 1998. 中国自然地理图集(第2版)[M]. 北京: 中国地图出版社
- 刘宁微,马雁军,王扬锋,等. 2010. 丹东市大气颗粒物质量浓度变化特征及其与能见度的关系[J]. 环境科学研究, 23(5): 642-646
- 刘永红,冯婷,蔡铭. 2011. 广州灰霾现象特征分析[J]. 环境科学研究, 24(10): 1081-1087



- 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 2010. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学: 化学, 40(4): 407-420
- Ma J Z, Chen Y, Wang W, *et al.* 2010. Strong air pollution causes widespread haze-clouds over China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115( D18): D18204
- Peters A, Dockery D W, Muller J E, *et al.* 2001. Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction [J]. Circulation, 103( 23): 2810-2815
- 钱冉冉, 闫景明, 吴水平, 等. 2012. 厦门市冬春季灰霾期间大气 PM<sub>10</sub> 中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 33( 9): 2939-2945
- Ruzer L S, Harley N H. 2005. Aerosols handbook: measurement, dosimetry, and health effects[M]. London: CRC Press
- 沈艳, 潘旻, 徐宾, 等. 2012. 最优插值法在对中国自动站降水量空间分析中的参数优化[J]. 成都信息工程学院报, 27( 2): 219-224
- 孙丹, 杜吴鹏, 高庆先, 等. 2012. 2001 年至 2010 年中国三大城市群中几个典型城市的 API 变化特征[J]. 资源科学, 34( 8): 1401-1407
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. 2010. Correlations between fine particulate matter ( PM<sub>2.5</sub> ) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM<sub>2.5</sub> to climate change[J]. Atmospheric Environment, 44( 32): 3976-3984
- 汪旻, 陈晓东, 王彩声. 2009. 运用反距离加权插值法研究江苏省地方性氟中毒空间分布态势[J]. 中国地方病学杂志, 28( 1): 97-100
- 王斌, 高会旺. 2008. 中国沿海城市空气污染指数的分布特征[J]. 生态环境, 17( 2): 542-548
- 王丛梅, 杨永胜, 李永占, 等. 2013. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. 环境科学研究, 26( 7): 695-702
- 王芳芳, 何丽, 魏勇. 2014. 基于 GIS 的乌鲁木齐 PM<sub>10</sub> 时空分布与气象因素分析[J]. 环境保护科学, 40( 3): 32-35
- 王宏, 陈晓秋, 余永江, 等. 2012. 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, 21( 4): 175-181
- 王坚, 赵丽娟, 郁建柱. 2014. 厦门空气中 NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 来源及污染物传输研究[J]. 中国西部科技, 13( 3): 7-9
- 汪伟峰, 王迎红, 王莉莉, 等. 2010. 北京奥运会期间奥运村站空气质量观测与研究[J]. 环境科学研究, 23( 1): 48-54
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 32( 2): 257-269
- 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 2012. 宁波市环境空气中 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 来源解析[J]. 环境科学研究, 25( 5): 549-555
- 严晓瑜, 缙晓辉, 刘玉兰, 等. 2015. 银川市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境学报, 31( 2): 21-30
- 阳文锐, 王如松. 2007. 反距离加权插值法在污染场地评价中的应用[J]. 应用生态学报, 18( 9): 2013-2018
- 叶翠杏, 王新红, 印红玲, 等. 2006. 厦门市不同功能区冬季 PM<sub>10</sub> 中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学学报, 26( 9): 1532-1538
- 詹长根, 吴艺, 韦淑贞, 等. 2014. 基于 GIS 的武汉市 AQI 时空分布规律研究[J]. 地理空间信息, 12( 5): 62-64
- 张彩艳, 吴建会, 张普, 等. 2014. 成都市冬季大气颗粒物组成特征及来源变化趋势[J]. 环境科学研究, 27( 7): 782-789
- 张建忠, 孙瑾, 王冠岚, 等. 2014. 北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境科学, 37( 1): 33-39
- 张伟, 王金南, 蒋洪强, 等. 2015. 《大气污染防治行动计划》实施对经济与环境的潜在影响[J]. 环境科学研究, 28( 1): 1-7
- 张学敏. 2007. 厦门市大气可吸入颗粒物源解析的研究[J]. 环境科学与技术, 30( 11): 51-54; 69
- 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 2014. 北京地区冬春 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 35( 2): 418-427
- 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 2013. 北京地区秋季雾霾天 PM<sub>2.5</sub> 污染与气溶胶光学特征分析[J]. 环境科技, 34( 2): 416-423
- 郑美秀, 周学鸣. 2010. 厦门空气污染指数与地面气象要素的关系分析[J]. 气象与环境学报, 26( 3): 53-57
- 郑秋萍, 王宏, 林长城, 等. 2013. 海峡西岸沿海城市群大气污染物浓度特征及其与天气形势的关系[J]. 环境科学学报, 33( 2): 356-363
- 周生贤. 2012. PM<sub>2.5</sub> 纳入环境质量标准[J]. 中国标准导报, ( 2): 51-51
- 周挺进, 黄娟, 张江山, 等. 2012. 厦门市环境空气质量的模糊综合评价[J]. 环境科学与管理, 37( 2): 167-170
- 庄马展, 杨红斌, 王坚, 等. 2006. 厦门大气可吸入颗粒物离子成分特征研究[J]. 现代科学器, ( 6): 92-95