

福州市空气质量状况时空变化及其与天气系统关系

王宏¹ 林长城¹ 蔡义勇¹ 赵卫红²

(1 福建省气象科学研究所, 福州 350001; 2 福建省环境监测中心站, 福州 350010)

摘要 利用 2002~2006 年福州市 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 逐日资料及同期 08:00 850 hPa 天气图资料, 采用统计学和天气气候分类方法, 综合分析福州市 5 年来空气质量总体状况, 污染物时空分布特征以及不同天气系统对污染物浓度变化的影响。结果表明: 福州市空气质量状况总体良好, PM₁₀ 浓度呈逐年下降趋势, NO₂ 浓度呈逐年上升趋势, SO₂ 浓度变化不明显; 市区交通要道的 NO₂ 和 SO₂ 污染浓度值最高, 高山站的各种污染物浓度值均低于市区。副热带高压和低压倒槽影响下福州市不会出现轻度污染事件, 轻度污染出现机会超过 5% 的天气系统有冷槽、均压场、暖区辐合和大陆高压; 暖区辐合的天气里, 等级良的出现率为各类天气系统之首; 低压和低压倒槽影响下, 等级优的出现率高于良。

关键词 空气质量 时空分布 天气系统

引言

近年来, 国内外学者针对气象因素对大气污染物的影响开展了大量的研究, 并取得很多有意义的成果。研究方法主要有数值模式和统计分析两种。国外代表性的大气污染数值模式有 Hysplit-4、Models-3/CMAQ、WRF-chem 等。国内有徐大海等研制的城市大气污染数值预报系统 CAPPS, 许建明等根据美国 EPA 新一代空气质量模式 CMAQ 建立的 CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正模型等。统计分析主要是利用数理统计及一些半经验的方法分析大气污染物环境浓度的变化趋势、周期及其与气象因素之间的相关关系, 对大气环境质量的演变进行预测。目前在评价天气条件对环境问题的影响研究中, 普遍采用天气气候分类方法。首先通过主成分分析和聚类方法将长期气象资料分为若干类型, 然后分别统计各种天气型出现的频率及相应的污染物的平均浓度以及在高污染过程中各种天气型出现的频率, 从而筛选出对空气质量有显著影响的天气型。经过多年发展, 在天气与空气质量相关关系领域的研究中已有一些成功例子。如 Shahgedanova^[1]用地面及高空气象资料研究了莫斯科空

气污染与天气气候的关系; G. C. Daniel^[2]运用天气气候分类方法研究了天气类型及变化与空气污染及人群死亡率之间的关系; 文慧等^[3]发展了城市短期预报统计模式; 林祥明等^[4]利用地面气象资料开展城市空气质量预报等。本文以福州市为研究对象, 利用上述方法, 开展空气质量与天气系统关系的研究, 为指导并开展空气质量的预报, 及建立一个基于“CMAQ”模式产品资料的福建省重点城市空气质量精细预报系统, 给出不同气象条件下福建省重点城市空气质量预报的订正方法。

1 资料收集与处理方法

福州市空气污染物主要有 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂, 其中 PM₁₀ 为首要污染物的出现频率达 99% 以上, 因此本文主要以 PM₁₀ 的分析结果来反映福州市空气质量的时空分布特征。3 种污染物日监测数据为福州市 4 个空气质量自动监测站 2002~2006 年资料, 其中市区取五四北、紫阳、师大 3 站的算术平均值, 每种污染物各有 1826 个样本, 清洁对照点取鼓山站, 各有 1573 个样本。空气质量浓度等级划分标准参照国家环保总局空气污染指数的定义及分级限值^[5]。气象资料为同期对应的 08:00 850 hPa 天气

图资料。天气类型分类以 850 hPa 高空图为主,根据厦门、福州、邵武、南昌、赣州、大陈、衢州、汕头、台北和花莲 10 个探空站 850 hPa 的风向进行划分,共 9 类:暖式切变、冷式切变、冷槽、暖区辐合、低压倒槽、低压(气旋)、大陆高压、副热带高压、均压场。

2 结果与分析

2.1 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 的年际变化

2002~2006 年 5 年中福州市 PM₁₀ 平均浓度为 0.075 mg/m³,空气质量等级为优占 28.6%,良占 66.6%,轻度污染只有 4.8%,没有出现中度污染和重污染的事件,空气质量的优良率达到 95.2%,说明福州市空气质量状况总体良好。利用 Daniel 的趋势检验结果表明,福州市 PM₁₀ 浓度年际变化有明显下降趋势,即福州市空气质量逐年转好。对不同等级 PM₁₀ 的出现率进行趋势检验,轻度污染、良、优 3 个等级的出现率变化趋势不明显。NO₂ 浓度等级为优的天数 1809 天,良 17 天;SO₂ 浓度等级为优的天数 1824 天,良仅 2 天,二者均没有出现轻度污染以上事件。就全国平均水平来讲,福州市 NO₂ 和 SO₂ 的浓度比较低。利用 Daniel 的趋势检验结果为 NO₂ 年平均变化呈上升趋势,SO₂ 年平均变化趋势不明显。说明近年来福州市 NO₂ 污染程度有所加重,这与城市现代化进程加快,大量燃烧石化燃料,向大气中排放工业废气和汽车尾气有直接关系。

2.2 福州市空气质量月际变化

2.2.1 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 的月际变化

由图 1 可见,福州市 PM₁₀ 浓度月际变化呈凹字形,4 月空气污染最严重,8 月最轻,1~4 月空气质量整体情况最差,7~9 月最好,其中 11 月至次年 4 月 PM₁₀ 均值(0.084 mg/m³)比 5~10 月 PM₁₀ 均值(0.065 mg/m³)高出 29.2 个百分点。NO₂ 浓度月际变化也呈凹字形,2 月平均浓度最高,7 月最低,5~10 月 NO₂ 浓度均低于 0.040 mg/m³,其余月份都高于 0.040 mg/m³;SO₂ 浓度月际变化规律不明显。综上所述,福州市 11 月至次年 4 月 PM₁₀、NO₂ 污染程度比 5~10 月严重。主要原因是 11 月至次年 4 月特别是早晚时段,气温低,静风频率高,大气低层容易出现逆温层,污染物垂直输送能力差,导致污染物堆积,造成空气污染严重;而 5~10 月城市下垫面受太阳辐射加热明显,大气层结

很不稳定,易产生较强烈的局地对流,低层污染物易被垂直扩散到高空,另外 5~10 月降水较多,受相对干净的海洋气团影响大,也是造成污染物浓度较低的原因。

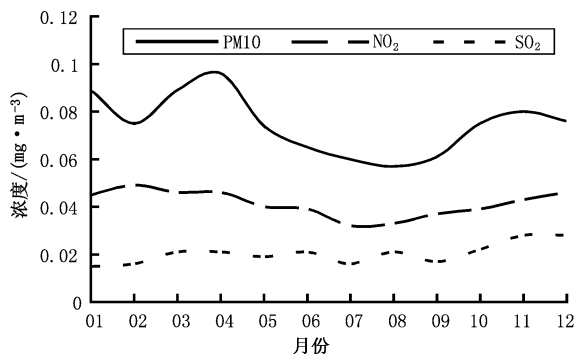


图 1 福州市 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 浓度的逐月统计

2.2.2 不同污染等级 PM₁₀ 月际变化

5 年间福州市空气质量等级为良的天数最多,占 66.6%,由于等级良 PM₁₀ 的浓度值跨度比较大(0.051~0.150 mg/m³),不利于反映空气污染特征,所以本文将等级良细分为 2 个等级:良 I (PM₁₀ 为 0.101~0.150 mg/m³),良 II (PM₁₀ 为 0.051~0.100 mg/m³)。PM₁₀ 浓度按轻度污染、良 I、良 II、优 4 个等级划分,统计出不同污染等级的 PM₁₀ 月平均出现率(图 2),由图 2 可见,PM₁₀ 等级为轻度污染和良 I 的月际变化结果非常相似,呈现凹字形,即 11 月至次年 4 月的出现频率高于 5~10 月,7、8 月没有出现轻度污染事件,1、3、4 月出现轻度污染的频率较高。出现良 I 的事件主要在 11 月和 1~4 月。PM₁₀ 等级为良 II 和优的月际变化结果也非常相似,呈现凸字形,即 5~10 月出现频率高于 11 月至次年 4 月。一年当中等级良 II 的出现率比

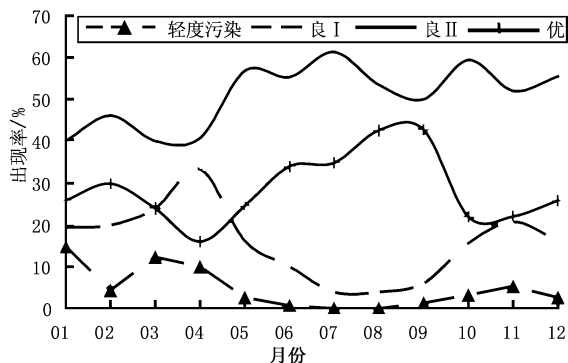


图 2 不同污染等级的 PM₁₀ 月平均出现率

其他等级的出现率都高。除4月(优<良Ⅰ),其余月份不同等级出现率排列顺序为:良Ⅱ>优>良Ⅰ>轻度污染,5~10月表现尤为突出。

2.3 PM₁₀、NO₂ 和 SO₂ 的空间分布

福州市环保部门根据福州市环境特征和区域性不同,将其划分为4种区域,其中紫阳站位于城区偏东面,代表工业区;五四北站位于城区偏北面,代表生活区和商业区;师大站位于城市东南部,代表近郊区和文化区;鼓山站位于城东的高山上,代表近郊区和风景区,作为清洁对照点。福州市区3个环境监测站PM₁₀年平均值差别不大,为0.072~0.076 mg/m³,五四北站最高0.076 mg/m³,说明代表生活区和商业区的五四北站可吸入颗粒物、飘尘污染相对大些;而紫阳站NO₂和SO₂的年平均值均为最高,尤其是NO₂浓度明显偏高,达0.056 mg/m³,是其他两个站点的1.6~1.8倍,说明代表工业区、靠近交通要道的紫阳站点NO₂和SO₂污染最严重;海拔较高的鼓山站各污染物浓度值均低于市区,PM₁₀、NO₂和SO₂浓度平均值分别为市区的62.2%,43.9%和57.1%,主要原因是鼓山站远离市区,地势高,受城市工业、生活、交通影响小,加之高山上风速大有利于污染物的稀释和扩散,所以空气污染程度轻。

2.4 不同天气系统影响下PM₁₀平均浓度和不同等级空气污染的出现率特征

表1是2002~2006年福州市在不同天气系统影响下PM₁₀平均浓度和不同等级空气污染出现率的统计结果。

表1 不同天气系统影响下PM₁₀平均浓度和不同等级空气污染的出现率

天气系统	样本数	出现率/%	PM ₁₀ 平均浓度/mg/m ³	轻度污染出现率/%	良出现率/%	优出现率/%
暖式切变	127	7.0	0.064	3.2	57.4	39.4
冷式切变	124	6.8	0.071	4.0	66.9	29.1
冷槽	130	7.1	0.084	7.7	71.5	20.8
暖区辐合	437	23.9	0.084	6.4	74.4	19.2
低压倒槽	22	1.2	0.047	0.0	36.4	63.6
低压(气旋)	185	10.1	0.055	1.6	46.5	51.9
大陆高压	615	33.7	0.078	5.4	70.2	24.4
副热带高压	126	6.9	0.059	0.0	57.1	42.9
均压场	60	3.3	0.087	6.7	73.3	20.0

由表1可见,福州市一年四季受高压系统(含大陆高压和副热带高压)控制的天数最多,占40.6%,

其中大陆高压出现的次数最多,其次是暖区辐合天气,占23.9%。低压(气旋)主要包括台风和西南低涡,影响的天气占10.1%,其中包含台风外围影响的天气。暖式切变、冷式切变、冷槽影响的天数相当,低压倒槽系统影响天数最少,仅占1.2%。不同天气系统下PM₁₀平均浓度值存在差异,这与天气系统宏观的热力结构和动力结构有很大关系,具体分析如下。

(1)福州市一年四季受高压系统影响的天数最多,其中包含大陆高压和副热带高压,虽然都是高压系统,但性质不同,对福州市的空气质量浓度分布也产生明显影响。在大陆高压控制下PM₁₀平均浓度(0.078 mg/m³)比在副热带高压控制下PM₁₀平均浓度(0.059 mg/m³)高出许多。因大陆高压属冷性高压,庞大而稳定,由北向南移动,常将上游的污染物传递到下游。当受其前部偏北气流影响时,一般下沉气流风力较大,导致污染物垂直输送能力差,容易堆积,空气质量一般;当受其后部西南风或偏南风影响时,暖湿气流充沛,天气回暖,空气湿度大,系统稳定,高低层形成不了很好的对流交换,易造成污染浓度偏高。在其影响下,等级良的出现率超过70%,轻度污染的出现率5.4%,优的出现率24.4%。副热带高压属暖性高压,从西太平洋海上西伸至中国大陆,是影响福建省夏季最主要的天气系统,在其控制下,城市天气晴热,湿度小,大气热力和动力条件好,非常有利于污染物垂直输送和水平扩散,夏季城市的热岛效应明显。有研究表明^[6]:城市下垫面的热力作用和动力作用改变了一般边界层低层的温度结构和湍流结构,所以城市的热岛效应使近地面源产生的地面污染物浓度减小;另一方面副热带高压从西太平洋海上西伸至福建省上空,福州市常吹偏东风,海上的外来污染物相对较少。副热带高压控制下福州市不会出现轻度污染事件,出现等级优的概率有42.9%,良的为57.1%。当副热带高压主体控制时,空气质量多为优,当500 hPa上588线东退,福建省处于副热带高压边缘时,高空西南气流加强,湿度增大,云层增厚,大气层结不稳定易出现午后热雷雨天气,这样的天气条件下,空气质量等级多为良。

(2)当福建省上空为一致西南气流控制的暖区辐合天气时,PM₁₀平均浓度比较高(0.084 mg/m³),因为暖区辐合天气下城市低层易出现逆温层,

大气层结稳定,风速小,云层厚,象锅盖一样笼罩在近地面,使污染物垂直输送不出去,容易造成局地污染物堆集。暖区辐合的天气系统等级良的出现概率达到 74.37%,是所有天气系统中最高的一种,优的出现率只有 19.2%,是所有天气系统中最低的一种。

(3)冷槽系统影响下 PM10 平均浓度为 0.084 mg/m³,与暖区辐合相当,主要原因是福州一般都位于冷槽前西南气流或偏南气流的控制下,会出现类似暖区辐合天气,当冷槽继续东移南下的时候,受武夷山脉、戴云山山脉的阻挡,冷槽由竖转横,影响福州时已成为冷式切变。由于多数冷槽系统相对于福州位置都偏西北,所以在其影响下福州市空气质量一般偏差。

(4)在暖式切变、冷式切变天气系统控制下,PM10 平均浓度分别为 0.064 mg/m³ 和 0.071 mg/m³,空气质量比较好。一方面受切变影响出现降水的概率很大,雨水的冲刷作用对清洁空气有一定作用,但不一定非常有效,这与降水量大小有关(另文分析);另一方面风速切变除了有利于把局地污染物抬升至云外,同时也有利于局地污染物的水平方向扩散。但福州在冷切前部、暖切前部的西南风或偏南风影响下,空气质量以良为主,甚至会出现轻度污染事件。二者轻度污染出现率为 3%~4%,良的出现率为 60%左右。

(5)在低压(气旋)和低压倒槽影响下,PM10 平均浓度最低,分别为 0.055 mg/m³ 和 0.047 mg/m³。这两种天气系统多为台风和西南冷涡,因低压涡旋中大气的热力条件、动力条件和水汽条件作用显著,受其影响会出现较强的降水,强降水对污染物的稀释和清除作用明显,加之低压涡旋的低层辐合、高层辐散的配置对污染物的垂直扩散非常有利,所以低压倒槽系统控制下不出现轻度污染事件,低压(气旋)下也只有 1.6%(主要是因台风外围很强的偏北下沉气流引起的),且在它们影响下空气质量出现优的概率超过了良,分别达到 51.9%和 63.6%。

(6)均压场天气型中多为一致偏北风,出现鞍形场或者风向很乱的情况很少,PM10 平均浓度最高 0.087 mg/m³,轻度污染出现率也很高(6.7%),良 73.3%,主要原因是在这种系统控制下,易出现类似焚风效应的天气,暖风侵入,下沉气流风力很大,并伴有气温剧烈升高,相对湿度急减,不利于污染物的

水平和垂直扩散,造成空气污染物浓度升高。优的出现率有 20%,原因是受强冷空气南下一致偏北气流的影响,辐射降温明显,风速大,污染物水平扩散快,上游输送过来的空气清洁。

综上所述,福州市在不同天气系统影响下 PM10 的浓度和不同等级空气污染的出现率分布特征相当明显,因此通过对影响福州市的天气系统类型逐一分析,归纳其特点,对福州市空气质量预报的准确度提高有着积极的作用。

个例分析:2002年1月11~14日福州市连续4天出现轻度污染天气,其中11日PM10的浓度达 0.246 mg/m³,是福州市5年中的空气污染最为严重的一天,而11日前两天PM10浓度为 0.090 mg/m³,11~14日平均浓度突升为 0.215 mg/m³,15日后PM10下降明显,18日下降为 0.031 mg/m³。由于空气污染源和污染条件短时间内很难发生重大改变,因此造成空气污染浓度发生巨大改变的主要原因是气象条件的改变^[7]。1月10日北方强冷空气到达黄淮一带,福建省处在西太平洋高压控制下,天气回暖明显,从10日20:00 850 hPa图上可以看出,福州恰好处在高压中心西北下沉气流控制下,加之连日回暖天气空气质量已不好,再遇上强下沉气流,污染物垂直输送不出去,严重堆积,导致空气质量突降。11日后期高压继续加强西伸控制在江南华南一带,庞大而稳定,导致福州市连续4天出现轻度污染事件。15日强冷空气大举南下,高压东退入海,PM10浓度减轻至 0.110 mg/m³,17日受强冷空气和冷式切变的共同影响PM10下降至 0.064 mg/m³,18日在低空冷涡影响下空气质量达到优。近10天的天气过程变化对应着福州市空气质量的演变情况,很好地反映出两者之间关系密切。

3 结论

(1)2002~2006年期间福州市空气质量状况总体良好,首要污染物为PM10,PM10浓度年际变化呈明显下降趋势;NO₂浓度年际变化呈上升趋势,城市NO₂污染有所加重;SO₂浓度年际变化不明显。PM10、NO₂浓度月际变化都呈凹字形,5~10月空气质量整体情况比11月至次年4月好,1~4月最差,7~9月最好;除了4月,其余月份不同等级PM10出现率排列顺序为:良Ⅱ>优>良Ⅰ>轻度污染。

(2)福州市区3个环境监测站PM₁₀年平均值差别不大,但代表工业区、靠近交通要道的紫阳站点NO₂和SO₂污染程度最高,鼓山对比站的各种污染物浓度值均低于市区。

(3)不同天气系统影响下PM₁₀平均浓度和不同等级空气污染的出现率差异明显,在副热带高压和低压倒槽影响下福州市不会出现轻度污染,且低压倒槽影响下PM₁₀平均浓度最低,出现优的机会最多,而轻度污染出现机会超过5%的天气系统有冷槽、均压场、暖区辐合和大陆高压;在均压场系统控制时,PM₁₀平均浓度最高,冷槽和暖区辐合位其次;在暖区辐合的天气里等级良出现率达到74.4%,为各类天气系统之首,其次是均压场、冷槽和大陆高压;受低压和低压倒槽影响,空气质量出现优的几率高于良,而其余天气系统影响下空气质量出现优的几率则低于良。

福建省计划利用“CMAQ”模式产品与重点城市实际观测资料建立福州、厦门和三明等城市空气质量预报数学模型;根据各个城市特有的气象条件,

开展影响当地空气质量的主要气象因子对预报结果的订正研究;开展不同季节和不同天气系统下的福州、厦门和三明等城市空气质量精细预报研究。

参考文献

- [1] Shahgedanova M. Synoptic climatology of air pollution in Moscow [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 1998, 61(1): 85-102.
- [2] Daniel G, Rainham C. Synoptic weather patterns and modification of the association between air pollution and human mortality [C]// Vancouver: the 16th Conference on Biometeorology and Aerobiology and the fifth Symposium on the Urban Environment, 2004: 42-80.
- [3] 文慧, 陈爱忠, 林楚雄, 等. 城市空气质量短期统计预报 [J]. *气象科技*, 2002, 30(6): 328-333.
- [4] 林祥明, 林永登, 冯宏芳, 等. 利用地面气象资料进行福州市空气质量日预报 [J]. *热带气象学报*, 2001, 17(3): 320-322.
- [5] 国家环保总局环境空气质量标准[S]. GB3095-1996.
- [6] 苗曼倩. 城市热岛效应对污染物扩散规律影响的数值模拟 [J]. *大气科学*, 1990, 14(2): 207-208.
- [7] 石宇虹, 张菁, 刘从容. 沈阳空气质量时空变化 [J]. *气象科技*, 2002, 30(5): 313-317.

Temporal and Spatial Distribution of Air Quality and Its Relationship with Weather Systems in Fuzhou

Wang Hong¹ Lin Changcheng¹ Cai Yiyong¹ Zhao Weihong²

(1 Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001; 2 Fujian Environmental Monitoring Center, Fuzhou 350010)

Abstract: Based on the daily data of PM₁₀, NO₂, and SO₂ and 08:00 synchronous synoptic data at 850 hPa from 2002 to 2006 in Fuzhou, Fujian Province, the general status of air quality, temporal and spatial distribution characteristics of pollutants, and the influence of different weather systems on pollutant concentration changes during the five years in Fuzhou are synthetically analyzed with the statistic and climate classification methods. The results show that the air quality conditions are generally good in Fuzhou and the concentration of PM₁₀ is becoming better year by year while there is a rising trend in the annual variation of NO₂ concentration. The concentrations of NO₂ and SO₂ over the major traffic lines of the urban area are the highest, and the concentrations of various pollutants in mountain stations are generally lower than in the urban area. Under the control of the subtropical high and the inverted trough, there will not occur pollution events in Fuzhou. The weather systems that will cause slight pollution with the probability of over 5% include the cold trough, warm-zone convergence, and continental high. Under the weather condition of warm-zone convergence, the occurrence probability of good air quality is the highest compared to other kinds of weather systems, while affected by a low pressure or inverted trough, the occurrence probability of excellent air quality is higher than that of good air quality.

Key words: air quality, temporal and spatial distribution, weather system