

泉州市 PM_{2.5} 时空变化特征及影响因素

陈璋琪

(泉州市环境监测站, 福建 泉州 362000)

摘要: 为研究泉州 PM_{2.5} 的时空变化特征及影响因素, 以期为有针对性的提出大气污染防治对策提供科学依据, 选取 2016 年泉州市主城区的一城区点和一背景点大气监测站在线 PM_{2.5} 与污染气体数据, 并同期采集 PM_{2.5} 样品进行综合分析。结果表明: 1) 城区点和背景点的年均 PM_{2.5} 浓度分别为 $(31.06 \pm 20.96) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(20.59 \pm 10.29) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 低于我国空气质量标准中的年均二级浓度限值; 2) PM_{2.5} 的月均值在 2—3 月浓度最高, 其次为 11 月, 污染事件的发生可能与污染物远源传输和不利天气条件的双重影响有关; 3) 冬、春季: 城区点 PM_{2.5} 同时受到一次排放污染物(如工业、机动车)和二次颗粒物的共同影响, 而背景点 PM_{2.5} 则是和较多的二次反应产物生成相关; 4) 夏、秋季: 两个站点的 PM_{2.5} 和 SO₂、NO₂ 的相关性明显提升, 伴随着夏、秋季主导的西南风, 验证了西南部工业区排放污染物的传输影响, 此外, 城区点 PM_{2.5} 浓度还受到粉尘的显著影响; 5) 泉州的硫氧化率和氮氧化率在冬、春季高于夏、秋季, 这可能与上游区域污染物的远源输送相关。上述结果为全面掌握泉州市大气颗粒物的分布规律提供了基础数据。

关键词: 泉州; PM_{2.5}; 变化特征; 影响因素

中图分类号: X51 **文献标志码:** A

大气颗粒污染物已成为中国大中型城市的主要空气污染物, 导致区域性的灰霾天气频发^[1-5]。已有研究表明, PM_{2.5} 中的有机物、重金属等污染物能够对人的心脑血管系统、呼吸系统、免疫系统等产生损害^[6], 同时 PM_{2.5} 会降低大气能见度、影响气候变化, 是改善中国环境空气质量的主要瓶颈之一。2013 年以来, 整个中国大陆地区大范围出现的灰霾天气给工业生产、交通运输和民众健康带来了巨大影响, 引起了国家、政府部门、社会大众及科学家的广泛关注, 因此针对大气颗粒物的分布特征、来源解析、形成机制、污染成因等相关研究

收稿日期: 2018-01-12 **录用日期:** 2018-07-11

Email: 13505006698@163.com

在我国不同区域陆续开展，其中以京津冀、长三角、珠三角及关中地区最为典型^[7-15]。

福建省地处中国东南沿海地区，冬、春季盛行东北季风，夏季盛行东南季风，属于典型的亚热带海洋性季风气候，环境空气质量优良率较高；然而随着其城市化的加速、机动车保有量的增多、工业的发展等因素引发的大气污染问题，雾霾天气偶有发生。泉州作为福建省民营经济的发源地（陶瓷、建材、化工等产业较为集中），同时也是福建省人口最多的城市，其大气环境问题近些年来得到了一定的关注。目前，针对福建省大气颗粒物的研究多集种在厦门和福州地区^[16-19]，而泉州地区的大部分研究以在线数据分析为基础，获取大气污染物的变化特征，如黄晓燕于 2017 年，谢瑞加于 2016 年以国控站在线监测数据为基础，获取泉州市 $PM_{2.5}$ 和臭氧的变化趋势^[20-21]与时空分布特征^[22]。另有部分研究涉及泉州市灰霾时 $PM_{2.5}$ 浓度与气象条件、能见度相关分析^[23]、短期的 $PM_{2.5}$ 源解析^[24]等，但涉及大气颗粒物化学组分以及影响因素等开展深入分析的相对较少，因此制约了针对性地提出泉州市大气污染防治对策。

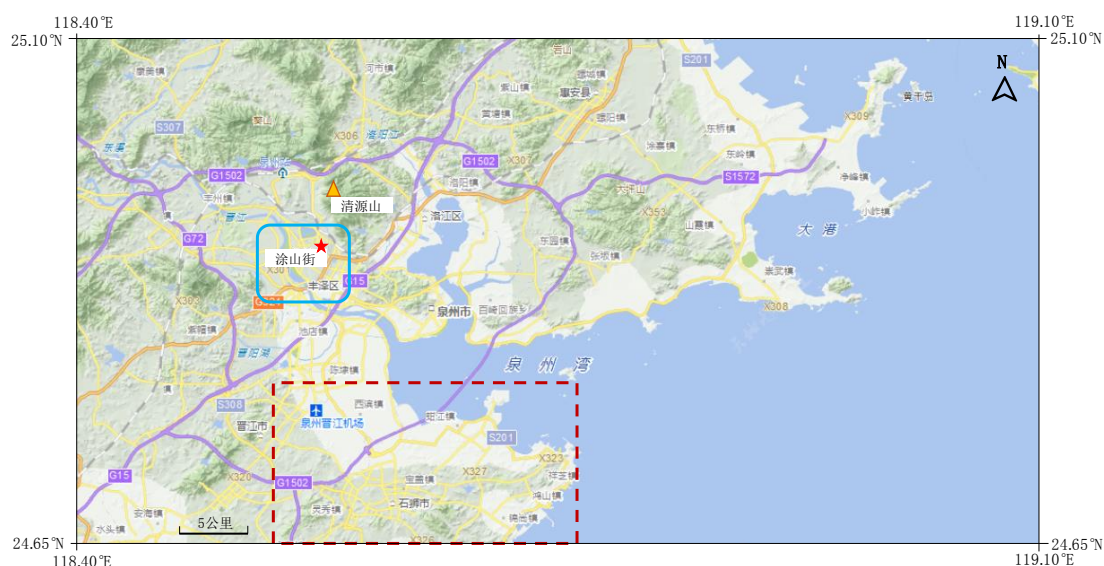
本研究利用 2016 年全年在线监测大气颗粒物数据获取泉州地区大气颗粒物的时空分布特征，同时通过在线与离线化学数据的对比，综合定性分析不同季节、不同点位泉州市大气颗粒物的主要影响因素，以期为全面掌握大气颗粒物的分布规律及提出有针对性的大气污染防治对策提供科学依据。

1 实验方法

1.1 采样点位与环境

颗粒物监测点位由国控空气子站中的涂山街站点（图 1 中红色五角星标记）和清源山站点（图 1 中橙色三角标记）：其中涂山街站点（ $24^{\circ}54'42''$ N, $118^{\circ}34'55''$ E）位于泉州市中心老城区，为城区观测点；清源山站点（ $24^{\circ}57'42''$ N, $118^{\circ}36'39''$ E）位于清源山顶（海拔 450 m），周围没有明显污染源，为背景观测点。泉州市西北方向为山脉，东南方向面海，市区划分为老城区与新城，老城区主要分布在山脉的环抱中（图 1 中蓝色实线区域）；在泉州市区的西南向（晋江与南安交界处）与南向（晋江、石狮，图 1 中红色虚线区域）为工业企业聚集地，以化工、陶瓷、建材、石材工业、热电、纺织为主；市区的北及东北方向，企业数量相对较少，泉州热电、联合石油化工、湄洲湾氯碱工业等为最主要的排放企业。

从气象角度来看,泉州市地处东亚季风区,冬季风从高纬度地区吹向海洋,主导风向为西北风;夏季风从副热带海洋吹向陆地,主导风向为东南风。冬、春季节,大气逆温出现频率和强度较高,致使大气污染物易累积,易出现灰霾天气^[22]。



五角星为涂山街站点,三角形为清源山站点,实线区域为老城区,虚线区域为市区工业区。地图来源于福建省地理信息局 (<http://www.fjmap.net/fjmap/index.html>), 地图测绘编号: 福建(闽 S[2016]21 号)。

图 1 采样点位图

Fig. 1 Sampling sites in Quanzhou

1.2 在线数据监测

本研究用在线资料来自泉州市环境监测子站中的涂山街和清源山站点,采样时间为 2016 年 1 月 1 日—12 月 31 日,监测仪器均为美国赛默飞世尔科技公司生产的 $PM_{2.5}$ 监测仪。仪器通过 β 射线法,加载动态加热和光散射模块实时测定大气中的细颗粒物浓度,采样频率为每小时记录一个 $PM_{2.5}$ 数据,要求每天至少 18 个有效数据;采样仪器均经国际公认的方法检测对比,并在有效期内使用。不同季节的 SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 浓度也均来自于同站点的在线监测数据。

1.3 离线样品采集

为更好理解不同季节大气颗粒物的变化成因,本研究分别在 2016 年 2, 4, 7 和 10 月采

集大气颗粒物样本，分别代表冬、春、夏、秋四季，在涂山街使用美国 Thermo 四通道连续采样器，在清源山使用 TISCH 单通道与 Thermo RP2025 连续采样器同步采集 PM_{2.5} 样品；两个站点均选用石英（Whatman, USA）和特氟龙（Whatman, USA）两种滤膜平行采集，每个季节有效采集 25 d 以上，每天对每个点位实施 24 h 连续采样，监测时段为每天 16:30 至次日 15:30，同时每个点位每 10 d 进行一次空白样品采集，在计算化学组分浓度时均减去了相应的空白均值。

1.4 采集样品分析

采集的样品中，石英滤膜用于分析碳与常规离子组分，特氟龙滤膜用于分析元素组分。

碳组分包括有机碳（OC）和元素碳（EC），采用美国沙漠研究所研制的热光碳分析仪进行测试分析（DRI_2001A, Atmoslytic, USA），应用 IMPROVE_A 热光反射分析法，获得 OC 和 EC 的 8 个组分（OC1、OC2、OC3、OC4、OP、EC1、EC2、EC3）的热谱图，其中 OP 为聚合碳，用于对 OC 和 EC 浓度值的校正。IMPROVE 协议将 OC 定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP，EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - OP^[25]。每 10 个样品中须任意挑选一个样品进行重复检测，当样品浓度低于 10 μg/cm² 时，要求 OC、EC 的偏差小于 1 μg/cm²；当样品浓度达 10 μg/cm² 及以上时，要求重复检测 OC、EC 偏差在 10% 以内，则认为该样品的分析结果有效^[7]。

常规离子组分采用离子色谱仪（Dionex-600, Dionex, USA）进行测试分析。取约 4.33 cm² 石英滤纸置于样品瓶中，加入 10 mL 去离子水（R>18.2 MΩ）溶解；超声萃取 15 min 间隔 30 min，以免温度升高引起铵根离子的挥发，共进行 4 次；之后脱色摇床振荡 1 h，再用 0.45 μm 的水系过滤器过滤约 4 mL 溶液，置于洗净的进样瓶中待测。在离子测试中，使用国家标准物质中心的标准溶液配制实验标准物质，样品测试结果进行空白校正和方法校正。每 10 个样品中任意挑选一个样品进行重复检测，结果符合以下要求时认为有效：样品溶液浓度在 0.03~0.09 μg/mL 之间时，相对标准偏差<30%；当样品浓度在 0.10~0.15 μg/mL 之间时，相对标准偏差<20%；而当样品溶液浓度在 0.15 μg/mL 以上时，相对标准偏差<10%。

元素组分分析仪器为能量色散 X 射线荧光分析仪（Epsilon 5, PANalytical B. V., Netherlands），所测样品不需前处理，仪器由激发样品所得到的能谱图中能量峰的峰面积来

进行样品中不同元素的定量，推算出每种元素的浓度。仪器通过美国 MicroMatter 公司的薄膜滤纸和 NIST 的 2783 号标准物质进行校正，每 8 个样品中任意挑选一个样品进行重复检测，要求重复检测的样品之间标准偏差<10%。

1.5 数据的统计分析

本研究中的平均值和标准差，分别为算数平均值 ($\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{N}$) 与标准偏差 (方差的算数平方根)；标准偏差反映出一组数据的离散程度，该值越大，说明该组数据越离散，反之亦然。

本研究中的相关性分析则是使用 SPSS 18.0 软件进行双变量 Pearson 相关性分析，相关系数数值越高，表明两者关系越密切；显著性检验为双尾检验， $p < 0.05$ 为有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 泉州大气颗粒物的时空变化特征

涂山街与清源山站点 2016 年 1 月 1 日—12 月 31 日的年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 $(31.06 \pm 20.96) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $(20.59 \pm 10.29) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，均低于国家空气质量标准 (GB 3095—2012) [26] 中的年均二级浓度限值 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。清源山站点作为背景点，采样点周边没有明显的污染排放源，但 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仅比城区站点低 15%~30%。根据环保部发布的《2016 年中国环境状况公报》[27]，和同期其他城市 $\text{PM}_{2.5}$ 在线监测浓度相比，泉州市要显著低于长三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 ($46 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，略低于珠三角地区的平均浓度 ($32 \mu\text{g}/\text{m}^3$)，在全国范围内处于较低浓度水平。

涂山街和清源山站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 均呈现出明显的季节变化特征：冬、春高，夏秋低，和较早前在福州市和厦门市的研究结论一致[16, 19]。整个采样期间，涂山街和清源山站点月均值在 2—3 月浓度最高，例如涂山街站点 2 月和 3 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度分别为 39.17 和 $38.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，清源山站点 2 月和 3 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度分别为 24.29 和 $24.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；其次为 11 月，涂山街和清源山站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 月均浓度分别为 36.44 和 $23.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，这个时期的高峰值则与大陆冬季风与夏季风交替时段易出现静稳天气有关，扩散条件变差使得污染物在此阶段相对易累积有关[22]，本研究也选取了污染较为严重的污染日期进行了相关气象分析。

从日均浓度上看(图2),涂山街站点高于GB 3095—2012^[26]中规定的PM_{2.5}日均浓度二级限值(75 μg/m³)共8 d,其中2月中国农历正月初一(2月8日)最高,其PM_{2.5}浓度高达234.29 μg/m³,这与农历春节泉州市当地烟花爆竹和寺庙香炉燃烧等活动有关,而对远离人为活动的清源山背景点则相对影响较小,清源山站点当天PM_{2.5}浓度略有升高,为58.38 μg/m³;其次,PM_{2.5}日均浓度高值集中在10月底(10月27—28日)和11月中旬(11月14—15日、11月19日);清源山站点高于二级浓度限值的则只有2 d,分别为10月28日和11月14日。

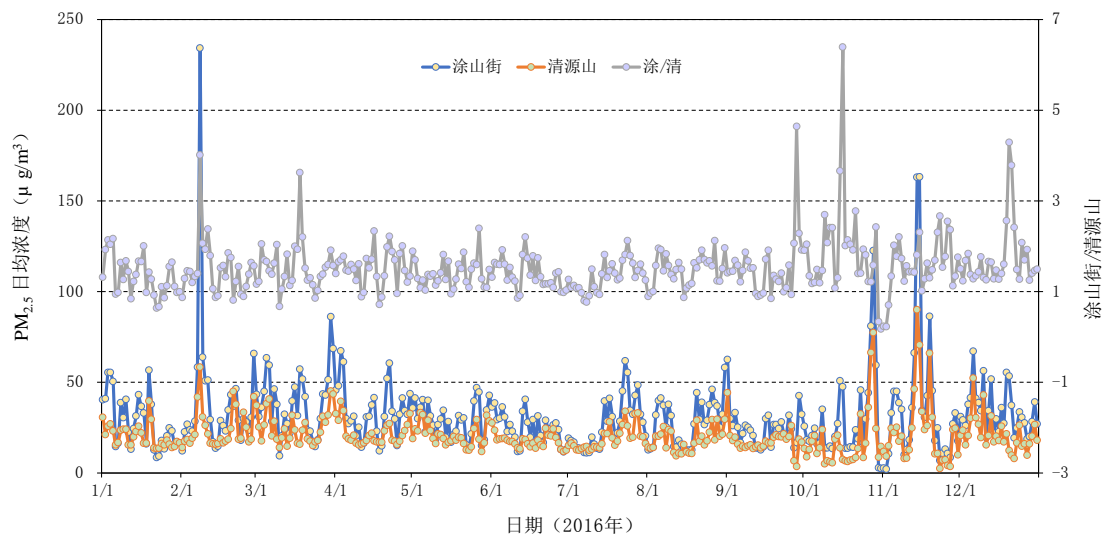


图2 2016年全年泉州涂山街和清源山站点的PM_{2.5}日均浓度变化序列

Fig. 2 Temporal variations of daily PM_{2.5} concentrations for the whole year of 2016 in Quanzhou

本研究选取污染程度相对较为严重的11月14日,对此次污染事件进行了后推48 h后向轨迹和气象场分析(图3),可以看出:此次污染事件中泉州市主要受到了“南向传输”气团的影响,近地面区域(500和1 000 m)气团在垂直方向上基本稳定不动;而从气象上看,11月14日泉州地区一方面受到大陆高压所造成的偏北风影响,另一方面受到海陆风的影响(图3中的绿色虚线为夏季风的前沿,泉州地区刚好处于两者交汇地带),导致气团在泉州地区停滞,等压线非常稀疏,泉州地区基本处于均压场内,平均气压1 015 hpa左右,气团稳定少动,风速偏小,扩散条件差,导致污染物难以扩散。在这种污染物远源传输和不利天气条件的双重影响下,导致泉州市城区点和背景点同时受到影响,从而出现除春节外PM_{2.5}日均浓度的最高值。

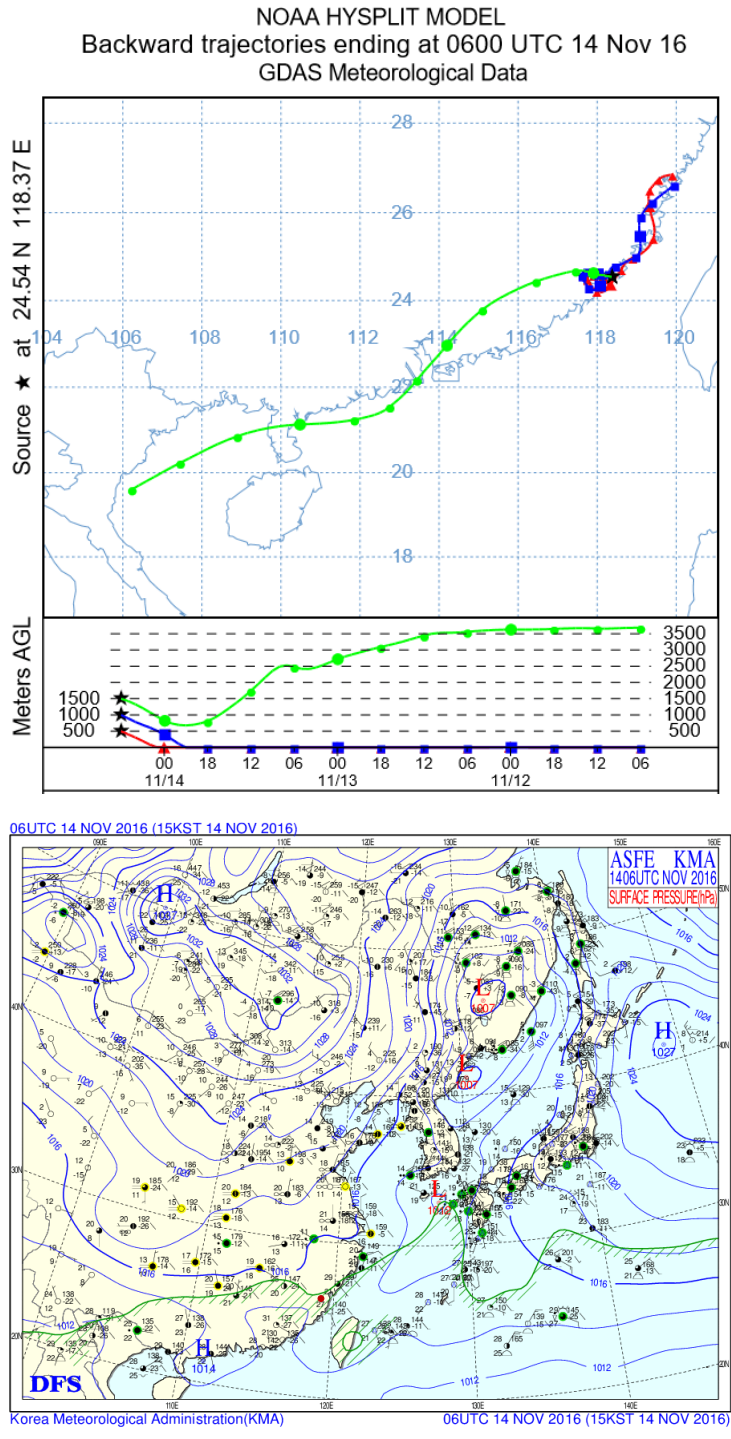


图3 污染事件（11月14日）的后向轨迹图和气象场分析图

Fig. 3 Back trajectory and meteorological field analysis of episode event (November 14)

一般而言，福建省夏季由于降雨较多，大气扩散条件好，城区的大气颗粒物浓度往往呈现出一一年当中的最低浓度水平^[16]；然而，本研究在泉州市的观测表明，其PM_{2.5}浓度在7月末至8月末，除少数天数（8月中旬）较低外，其余天数均在40 μg/m³左右波动（涂山街站

点)。从气象角度分析,这可能是由于泉州市在东亚夏季风影响下(风由副热带海洋吹向陆地),使得南向及西南方向的工业区(如石狮、晋江)的生产排放污染传输到泉州市区,并由于地形原因(西北地区为山脉)使得污染物在老城区累积明显,而清源山则由于海拔较高,受到的影响较小。

基于城市点和背景点的特征,即城市点环境质量的好坏受多种因素的影响,例如局地排放、远距离传输、气象因素等,背景点的环境质量因为远离排放源,所以受污染物传输(包括近距离传输和远距离传输)以及气象因素的影响较大^[28]。本研究假设理想状况下,城市点污染物的浓度主要反映局地污染物排放和区域整体气象环境的影响,背景点污染物浓度主要反映区域整体大气环境,因此两者比值应大于1,且两者比值越大则说明城市点和背景点PM_{2.5}差异越大,表明受局地污染排放影响大,该比值越小则表明两站点差异越小,越可能出现区域性污染。图2中对涂山街和清源山站点的PM_{2.5}比值随时间变化序列进行分析,该比值变化范围0.17~6.39,全年平均值约为1.5,该比值>3的有7d(如春节当天),该比值>2的有46d,说明在这些天数下,涂山街站点较大可能反映出局地人为活动污染,清源山站点则受影响较小;而该比值<1的有47d,约占所有天数的12%,且大部分集中出现在1月底与9月中旬,平均值为0.82,这些天数则可能更多反映出区域特征,清源山站点由于其海拔较高,受到远源污染的传输影响更明显,从而出现背景点PM_{2.5}日均浓度值较高的现象。

2.2 不同季节大气颗粒物时空变化原因分析

2.2.1 与不同化学组分的相关性

考虑到不同站点具有不同的局地排放特征,为了解不同站点影响大气颗粒物的主要因素,将在线数据进行每日平均值计算,与不同季节滤膜采样日期相对应,获得不同站点的PM_{2.5}与污染气体(SO₂、NO₂、NO、CO)、化学组分(OC、EC、二次无机离子(SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺)及相关地壳元素(Al、Si、Ca)的相关性,结果见表1。值得注意的是,在线监测和离线样品PM_{2.5}存在一定的差异性,Ayers等^[29]的研究表明在线(Thermo Scientific™连续环境颗粒物监测仪)和离线称重测定的PM_{2.5}线性相关曲线斜率为0.63,但相关系数较大,R²为0.87,可能由于滤膜在采集过程中存在周边破损掉渣等情况导致称重不准确。因此,本研究使用在线PM_{2.5}取代离线数据进行相关性分析。

冬、春季：PM_{2.5}和污染气体 SO₂、NO₂、CO、NO 在涂山街站点具有一定的相关性，反映出一次排放污染物（如工业、机动车）对涂山街站点的 PM_{2.5} 存在一定的影响；而在清源山站点则均无显著相关性，这和它作为背景点的特征一致。大气污染物在传输的过程中发生二次反应，因此背景点 PM_{2.5} 和 OC、EC、SO₄²⁻整体呈现较好的相关性，而和一次排放污染气体不存在相关性。

夏、秋季：1) PM_{2.5} 和 SO₂ 的相关性在涂山街和清源山站点整体有所提升，其中夏季与冬季相比提升明显，涂山街站点夏季两者的相关系数从冬季的 0.50 增大到 0.75，清源山站点则从冬季的 0.03 增大至 0.73，这说明夏季在西南风的主导下，两个站点均受到西南方向工业生产活动的影响，污染物的传输使得大气颗粒物、污染气体显著增加；这种影响也同时使得两个站点夏季 PM_{2.5} 和 SO₄²⁻、OC、EC 的相关性较冬季整体有所提升。2) PM_{2.5} 和 Al、Si 和 Ca 的相关性可以看出，涂山街站点夏季的 PM_{2.5} 浓度受到了粉尘的显著影响，相关性较冬季有明显提升，粉尘可能来源于西南方向工业区的排放传输（西南工业区存在大量陶瓷、建材、石材加工企业）以及道路粉尘的影响；而清源山站点夏、秋季均无显著相关性，说明粉尘对清源山站点的 PM_{2.5} 影响较小。3) 清源山站点的 PM_{2.5} 和 CO 的相关性有很大程度的提高，相关系数分别高达 0.77（夏季）和 0.69（秋季），这可能是由于清源山作为风景区，夏、秋季旅游参观人数增多导致机动车排放增多有一定的关系。

表 1 不同季节 PM_{2.5} 与大气污染气体及化学组分相关系数

Tab. 1 Correlation coefficients between PM_{2.5} and gaseous pollutants, chemical compositions

污染气体及 化学组分	冬季		春季		夏季		秋季	
	涂山街	清源山	涂山街	清源山	涂山街	清源山	涂山街	清源山
SO ₂	0.50**	0.03	0.62**	0	0.75**	0.73*	0.51**	0.67**
NO ₂	0.61**	0.10	0.56**	-0.38	0.76**	0.33	0.64**	0.72**
CO	0.65**	0.40	0.59**	-0.24	0.83**	0.77*	0.57**	0.69**
NO	0.39*	-0.18	0.67**	-0.02	-0.24	-0.25	0.47*	-0.19
SO ₄ ²⁻	0.55**	0.58**	0.57**	0.67**	0.69**	0.71*	0.45*	0.63**
NO ₃ ⁻	0.57**	0.51**	0.53**	0.29	-0.04	-0.26	0.44*	0.71**
OC	0.41*	0.44*	0.44*	0.56**	0.83**	0.75*	0.39	0.55**
EC	0.42*	0.44*	0.51**	0.56**	0.83**	0.73*	0.25	0.59**
Al	0.23	0.14	0.12	0.32	0.42*	0.15	0.08	0.41
Si	0.32	0.33	0.20	0.45	0.44*	0.18	0.09	0.32
Ca	0.11	0.24	0.14	0.54**	0.50*	0.23	0.07	0.29

注：**在 0.01 水平（双侧）上显著相关；*在 0.05 水平（双侧）上显著相关（下同）。

2.2.2 颗粒物二次转化的影响

为了更好地说明二次颗粒物转化的影响，进而分析了涂山街和清源山站点的硫氧化率（SOR）与氮氧化率（NOR）。SOR 和 NOR 这两个指标可指示 SO₂ 和 NO₂ 被氧化成 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的程度，值越高就表示 SO₂ 和 NO₂ 更多地转化为二次气溶胶颗粒^[8]，计算公式如下：

$$\text{SOR} = \frac{n - \text{SO}_4^{2-}}{(n - \text{SO}_4^{2-} + \text{SO}_2)}, \quad \text{NOR} = \frac{n - \text{NO}_3^-}{(n - \text{NO}_3^- + \text{NO}_2)}$$

式中，“n-SO₄²⁻”指非海盐 SO₄²⁻ 的摩尔值，“SO₂”指 SO₂ 的摩尔值，“n-NO₃⁻”是指非海盐 NO₃⁻ 的摩尔值，“NO₂”是指 NO₂ 的摩尔值。

经计算，涂山街和清源山不同季节的 SOR 和 NOR 值见表 2。整体来看，冬、春季的 SOR、NOR 高于夏、秋季，说明冬、春两季大气气溶胶中硫酸盐和硝酸盐的转化率更高，二次气溶胶的影响更大，这和其他城市的研究有所不同，如 Zhang 等^[9]在西安市的研究表明，SOR 和 NOR 在夏季最高，这是由于在夏秋季高温、湿润等气象状况有利于二次气溶胶的形成。在泉州地区，夏、秋季其更容易受到西南方向工业区一次排放污染物传输的直接影响，而冬、春季 SO₄²⁻、NO₃⁻除了本地 SO₂、NO₂ 的二次转化外，也可能来源于污染物的远源传输（整个大陆区域在冬季风的控制下，导致内陆地区的污染物被远距离输送到下游区域），因此较高浓度的二次颗粒物使得 SOR 和 NOR 计算值相对偏高。从本研究中两个站点之间对比来看，清源山站点的两项指标均高于涂山街站点，说明清源山站点的气溶胶更多为二次转化生成，这也符合一般背景点的老化气溶胶特征。

表 2 涂山街和清源山不同季节 SOR、NOR 值

Tab. 2 SOR, NOR in different sites in four seasons

季节	站点	SOR	NOR
冬季	涂山街	0.29 ± 0.09	0.15 ± 0.06
	清源山	0.43 ± 0.15	0.22 ± 0.11
春季	涂山街	0.24 ± 0.10	0.11 ± 0.04
	清源山	0.34 ± 0.18	0.15 ± 0.12
夏季	涂山街	0.14 ± 0.07	0.03 ± 0.03
	清源山	0.23 ± 0.07	0.08 ± 0.07
秋季	涂山街	0.21 ± 0.09	0.05 ± 0.03
	清源山	0.22 ± 0.10	0.08 ± 0.09

Zhang 等^[9]的研究表明, NH_4^+ 对 SOR 的形成具有促进作用, 由于 NH_4^+ 的存在, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4HSO_4 的形成是 SO_4^{2-} 形成的主要机制。然而, 本研究与其具有一定的差异, 泉州市两站点 SOR 和 NOR 与 NH_4^+ 浓度之间的相关性, 见表 3。可以看出: 1) 除秋季外, 涂山街站点的 NH_4^+ 浓度和 SOR 的相关性均显著低于 NH_4^+ 浓度和 NOR 的相关性, 究其原因, 涂山街站点处于泉州老城区内, 受居民生活影响明显, 前体物 NO_x 、 NH_3 有源自于局地排放(如机动车排放、垃圾/废弃物释放等)的贡献, 在相同的位置和气象条件下, 二次生成的 NH_4^+ 浓度和 NOR 两者呈现一定的相关性; 而 SO_2 多来源于工业或化石燃料燃烧排放, 而工业区位于涂山街站点西南方向约 20 km, 涂山街站点的 SO_2 、 SO_4^{2-} 浓度受控于源区排放量、传输过程中的转化程度等因素, 因此 SOR 和 NH_4^+ 浓度相关性较低; 2) 从季节之间的对比来看, 冬季的 NH_4^+ 浓度和 SOR、NOR 的相关性相对较高, 夏季的相关性最低, 这与冬季泉州市主要受到了二次颗粒物影响(本地生成、远源输送)有关, 而 NH_4^+ 浓度和 NOR 在夏季无显著相关性则与夏季温度较高, NH_4^+ 和 NO_3^- 不稳定有关; 3) 清源山站点的 NH_4^+ 浓度和 SOR、NOR 的相关性要明显高于涂山街站点, 究其原因, 清源山距离城区较远, 到达的多是老化二次气溶胶, 化学组分经过了充分反应与混合, 因此相关性要显著高于城区站点。

表 3 不同季节 NH_4^+ 浓度与 SOR、NOR 相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between NH_4^+ concentration and SOR, NOR

指标	冬季		春季		夏季		秋季	
	涂山街	清源山	涂山街	清源山	涂山街	清源山	涂山街	清源山
SOR	0.23	0.57**	0.12	0.52*	0.10	0.41*	0.44*	0.63**
NOR	0.43*	0.68**	0.38	0.58**	0.14	0.18	0.27	0.59**

3 结 论

本研究基于 2016 年全年的在线监测数据和离线样品的检测结果, 针对泉州市不同季节的颗粒物与大气污染物的相关性展开了分析。整体而言, 泉州市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于国家空气质量标准(GB 3095—2012) ^[26]中的年均二级浓度限值, 大气环境状况优良; 除春节这个特殊事件的影响, $\text{PM}_{2.5}$ 在 10 月底和 11 月中旬高值, 这与污染物远源传输和不利天气条件的双重影响有关, 导致泉州市城区点和背景点同时受到影响。

从大气颗粒物和不同污染气体、化学组分的相关性研究发现，冬、春季 $PM_{2.5}$ 在涂山街站点主要受到了一次排放污染物（如工业、机动车）的影响，而清源山站点的 $PM_{2.5}$ 则更多和二次生产相关；夏、秋季两个站点均受到西南方向工业生产活动的影响，污染物的传输使得大气颗粒物、污染气体显著增加；同时涂山街站点的 $PM_{2.5}$ 浓度明显受到了西南方向工业区的排放传输（存在大量陶瓷、建材、石材加工企业）以及道路粉尘的显著影响。

泉州地区 SOR 、 NOR 在冬、春季要高于夏、秋季，这可能由于泉州市本地较为洁净，冬、春季易受到大陆气团携带污染物远距离输送的影响，导致二次无机离子浓度相对偏高；且 NH_4^+ 浓度和 NOR 的相关性整体高于 SOR ，这可能与采样点周边环境有关。

综上，本研究为全面掌握泉州市大气颗粒物的分布规律提供了基础数据，也为以后继续保持泉州市大气环境质量、提出有针对性的大气污染防治对策提供了科学依据。

参考文献：

- [1] JUNG C H, KIM Y P. Numerical estimation of the effects of condensation and coagulation on visibility using the moment method[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, 37(2): 143-161.
- [2] 程穆宁, 崔云霞, 陆春松, 等. 能见度与颗粒物质量浓度之间的关系[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(3): 146-151.
- [3] 张祥志, 秦玮, 严国梁. 2011年南京市春季大气颗粒物污染特征分析[J]. *环境监控与预警*, 2013, 5: 36-40.
- [4] 郭婧, 华蕾, 荆红卫. 大气颗粒物的源成分谱研究现状综述[J]. *环境监控与预警*, 2011, 6: 28-32.
- [5] 陆晓波, 许建华. 一次典型灰霾天气过程及成因分析[J]. *环境监控与预警*, 2009, 1: 10-13.
- [6] NATUSCH D F S, WALLACE J R. Urban Aerosol Toxicity: The Influence of Particle Size [J]. *Science*, 1974, 186: 695-699.
- [7] CAO J J, WU F, CHOW J C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2005, 5: 3127-3137.
- [8] CAO J J, SHEN Z X, CHOW J C, et al. Winter and Summer $PM_{2.5}$ Chemical Compositions in Fourteen Chinese Cities[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2012, 62(10): 1214-1226.
- [9] ZHANG T, CAO J J, TIE X X, et al. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 102(1): 110-119.
- [10] ZHAO P S, DONG F, HE D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 13(9): 4631-4644.
- [11] ZHANG R, JING J, TAO J, et al. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing:

- seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(14): 7053-7074.
- [12] DAI S, BI X, CHAN L Y, et al. Chemical and stable carbon isotopic composition of PM_{2.5} from on-road vehicle emissions in the PRD region and implications for vehicle emission control policy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(6): 3097-3108.
- [13] GENG F H, HUA J, MU Z, et al. Differentiating the associations of black carbon and fine particle with daily mortality in a Chinese city [J]. *Environmental Research*, 2013, 120: 27-32.
- [14] CAO J J, ZHU C S, TIE X X, et al. Characteristics and sources of carbonaceous aerosols from Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(2): 803-817.
- [15] TAO J, HO K F, CHEN L G, et al. Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring [J]. *Particuology*, 2009, 7: 68-75.
- [16] 苏锦. 福厦泉大气颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染状况研究[J]. *化学工程与装备*, 2015(9): 258-261.
- [17] 王宏, 林长城, 蔡义勇, 等. 福州市 PM₁₀ 突变特征与气象条件的关系研究[J]. *热带气象学报*, 2008, 24(5): 564-568.
- [18] 林长城, 王宏, 陈彬彬, 等. 厦门市空气质量时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2010, 39(1): 79-83.
- [19] 谢祖欣, 王宏, 郑秋萍, 等. 2015年福州市大气颗粒物污染特征[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(6): 864-873.
- [20] 黄小燕. 泉州市区大气环境质量近年变化规律分析[J]. *化学工程与装备*, 2017(7): 308-310.
- [21] 黄小燕. 泉州市区臭氧浓度时间变化规律及影响因子分析[J]. *化学工程与装备*, 2017(3): 201-202.
- [22] 谢瑞加. 2014年泉州市区 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(4): 127-129.
- [23] 谢瑞加. 泉州市灰霾时 PM_{2.5} 浓度与气象条件、能见度相关分析研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, 41(3): 109-112.
- [24] 侯红霞, 王惠祥, 李梅, 等. 2017年夏季泉州市细颗粒物来源解析[J]. *绿色科技*, 2017(16): 39-45.
- [25] CHOW J C, WATSON J G, CHEN L W, et al. Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols [J]. *Environmental science & technology*. 2004, 38(16): 4414-4422.
- [26] 环境保护部. 环境空气质量标准: GB 3095—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 3.
- [27] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报[R/OL]. 2017[2018-01-01]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201706/t20170605_415442.htm.
- [28] WATSON, J.G.; CHOW, J.C.; DUBOIS, D.W. et al.. Guidance for network design and optimal site exposure for PM_{2.5} and PM₁₀: EPA-454/R-99-022[R/OL].1997[2018-01-01]. <http://www.epa.gov/ttn/amtic/pmstg.html>.
- [29] AYERS G P, KEYWOOD M D, GRAS J L. TEOM VS. manual gravimetric methods for determination of PM_{2.5} aerosol mass concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 1999(33): 3717-3721.

Temporal and Spatial Variation Characteristics in PM_{2.5} in Quanzhou and their Influential Factors

CHEN Zhangqi

(Quanzhou Environmental Monitoring Station, Quanzhou 362000, China)

Abstract To investigate temporal and spatial variations in PM_{2.5} in Quanzhou, so as to provide scientific evidences for control countermeasures on air pollution, on-line PM_{2.5} and pollutant gases, and concurrent PM_{2.5} off-line samples were collected and analyzed at two sites in Quanzhou. The results were as follows: 1) The annual average PM_{2.5} at the urban site and background site were (31.06±20.96) µg/m³ and (20.59±10.29) µg/m³, respectively, both of which meet the Class 2 limit values of the National Ambient Air Quality Standard (NAAQS). 2) The maximum monthly average of PM_{2.5} was observed in February to March and November. The occurrence of pollution episodes might be related to the transport of pollutants as well as unfavorable meteorological conditions. 3) In winter and spring, PM_{2.5} was affected by both the primary emission (i.e., motor vehicle and industrial emissions) and secondary formation at the urban site, while the secondary particles formation was the main factor influencing PM_{2.5} concentrations at the background site. 4) In summer and autumn, positive correlations were found between PM_{2.5} and SO₂, NO₂ at the two sites, along with dominant southwest wind, confirming the influence of industrial production activities at the southeast. Meanwhile, PM_{2.5} at the urban site was also influenced by crustal matters. 5) SOR and NOR in winter and spring were higher than those in autumn and summer, which may probably be linked with pollutants transport from upwind areas. Overall, our study provides the basic database in the distribution of PM_{2.5} in Quanzhou.

Key words: Quanzhou; PM_{2.5}; variation characteristics; influential factor