

合肥市 PM_{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析

王佳佳 夏晓圣 程先富 廖润霞¹

(1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;

2. 安徽自然灾害过程与防控研究省级实验室, 安徽 芜湖 241002)

【摘要】: 利用 2017 年合肥市污染监测站点 PM_{2.5} 浓度数据、气象数据以及土地利用类型数据, 结合随机森林算法(RF)与土地利用回归模型(LUR), 模拟合肥市 PM_{2.5} 浓度空间分布, 并利用主成分分析法对 PM_{2.5} 影响因素进行分析。结果表明: (1) 合肥市 PM_{2.5} 浓度日变化特征大致呈双峰变化, 春季、夏季及秋季的峰值多出现在 8:00~9:00, 而冬季的峰值则出现在 10:00~11:00。低谷值大致都出现在 15:00~17:00。全年 PM_{2.5} 浓度变化趋势与春季类似。夏季 PM_{2.5} 浓度变化最为平稳。(2) 2017 年合肥市 PM_{2.5} 浓度分布由城市中心向外减弱, 形成北高南低, 西高东低的空间分布格局。(3) 影响因素方面, PM_{2.5} 浓度变化与降水、风速以及相对湿度等呈负相关关系, 日照对 PM_{2.5} 浓度的影响较大, 气压及其他污染物与 PM_{2.5} 浓度呈正相关关系, 其中 NO₂ 对 PM_{2.5} 浓度的影响力度较大。

【关键词】: 随机森林 土地利用回归模型 主成分分析法 时空分布

【中图分类号】: X513 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)06-1413-09

近年来, 随着经济快速发展, 城市化进程加快, 大部分城市面临严重的 PM_{2.5} 污染问题。PM_{2.5} 在大气中停留时间较长, 降低大气能见度^[1], 严重影响居民的生活质量, 危害人体健康^[2,3]。明确 PM_{2.5} 的时空分布特征和影响因素, 有利于改善地区环境质量, 提高人居生活水平^[4]。

王嫣然等^[5]利用 2013 年 1 月~2014 年 12 月北京地区监测站点的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度数据和同期近地面观测数据, 采用非参数分析法研究了北京地区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度对不同季节地面气象因素的响应。汉瑞英等^[6]基于 2013 年 12 月~2014 年 11 月杭州市监测的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度数据和气象、土地利用类型以及道路交通数据, 利用土地利用回归模型模拟了杭州市 PM_{2.5} 浓度空间分布。杨兴川等^[7]通过对京津冀地区 PM_{2.5} 研究发现, 京津冀地区污染物存在明显的时间变化规律, 风速、相对湿度和日照时长与 PM_{2.5} 浓度变化具有较强的相关性, 气象因素在冬季对 PM_{2.5} 的影响最为显著。刘金培等^[8]利用向量自回归模型对西安市的研究表明, 一氧化碳、二氧化硫、臭氧和气温的正向变动会引起 PM_{2.5} 浓度增加, 风速和降水量的正向变动则会引起 PM_{2.5} 浓度降低。综上所述, PM_{2.5} 浓度分布存在空间差异, 气象因子以及其他大气污染物的改变是 PM_{2.5} 浓度发生变化的主要影响因素。前人对 PM_{2.5} 的研究多集中在发达地区, 对中部地区的研究较少。

合肥位于我国中部地区。近年来, 随着城市化进程的加快, 城市区划发展重大变化, PM_{2.5} 污染日渐严重, 成为中部研究 PM_{2.5} 污染的典型地区。张玉丽^[9]、汪雅倩等^[10]分别研究了合肥市 PM_{2.5} 的影响因素和时空分布。张思远等^[11]研究了合肥市 PM_{2.5} 的污染特征以及影响因素。目前针对合肥市的研究基本只选择合肥市中心区域作为研究对象, 并没有完整覆盖整个合肥市; 在分析合肥市

作者简介: 王佳佳(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事于区域环境与自然灾害、土壤质量与环境等研究. E-mail:wjj18375315813@163.com; 程先富 E-mail:xianfucheng@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271516); 安徽师范大学研究生科研创新与实践项目(2018kycx051)。

的空间分布时,只简单分析合肥市分布特征和评价各区空气质量;在探讨影响因素时,只选择了自然因素作为研究变量。

因此,本文基于合肥市现有的监测站点以及周边站点的监测数据,应用随机森林—土地利用回归模型^[12],模拟合肥市 2017 年 PM_{2.5}浓度空间分布特征,并利用 canoco5 软件中的主成分分析法,分析影响合肥市 2017 年 PM_{2.5}浓度的自然因素和其他大气污染物,为区域大气污染防治和环境保护提供科学依据。

1 研究区域和研究数据

1.1 研究区域

合肥地处中纬度地带,属亚热带季风性湿润气候,季风明显,四季分明,气候温和,雨量适中。地形地貌类型复杂多样,主要有平原、丘陵以及山地 3 大类地貌。交通便捷、人口众多、产业较发达,全市共有 15 个 PM_{2.5}监测站点(图 1)。

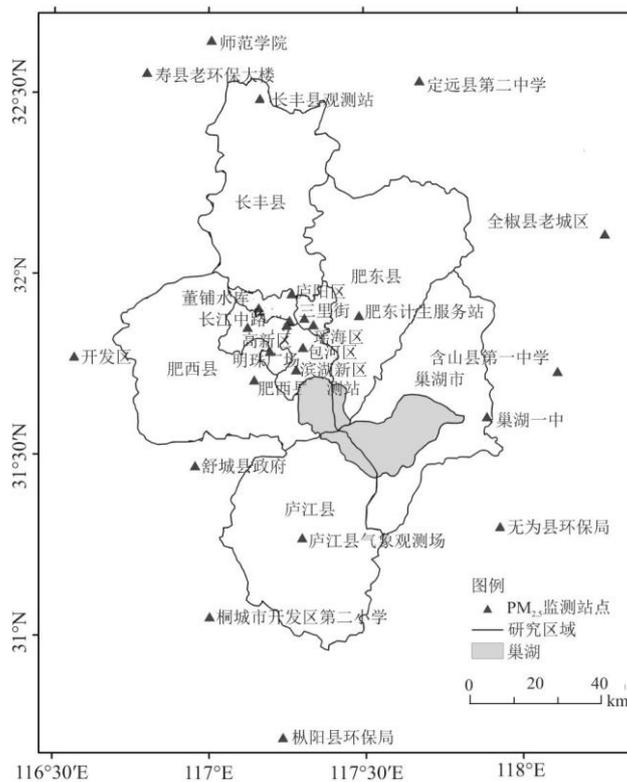


图 1 研究区域

1.2 数据来源

合肥市及其周边共 25 个空气监测站(图 1)的实时观测数据来源于安徽省环境保护厅(<http://www.aepb.gov.cn>),包括 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃、CO 等 6 项监测指标;土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 100m;道路交通数据来源于 Wiki 世界地图数据库(<http://www.openstreetmap.org/>);气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括风速、相对湿度、日照、地表温度、气温、降水、气压等;人口密度数据来自于哥伦比亚大学社会经济数据应用中心网站(<http://beta.sedac.ciesin.columbia.edu>)发布的 Gridded Population of the World(GPW)数据集,空间分辨率为 30s(约 1km)。

1.3 研究变量

土地利用回归模型常用的地理变量有土地利用方式、交通因素、人口分布、高程以及其他的自然变量等^[13],本文参考前人的研究以及考虑合肥市的实际情况^[14,15],选取气象、道路交通、土地利用以及人口密度作为研究变量,以缓冲区内的耕地、林地、草地、建筑用地、水域以及未利用土地的比例表示土地利用的状况;以缓冲区内的道路类型的长度表示道路交通状况。

表 1 研究变量

变量类型	变量名称	单位	缓冲区 (km)	时间分辨率
土地利用类型	耕地	m ²	0.5-4.0	
	建筑用地	m ²	0.5-4.0	
	林地	m ²	0.5-4.0	
	水域	m ²	0.5-4.0	
	草地	m ²	0.5-4.0	
	未利用土地	m ²	0.5-4.0	
道路交通	高速公路	m	0.2-1.0	
	国道	m	0.2-1.0	
	省级道路	m	0.2-1.0	
	市区一级 市区二级	m	0.2-1.0	
气象因子	地温	1℃	不限定缓冲区	月均值
	风速	1m/s	不限定缓冲区	月均值
	降水	1mm	不限定缓冲区	月均值
	气温	1℃	不限定缓冲区	月均值
	气压	1h/Pa	不限定缓冲区	月均值
	日照	1h	不限定缓冲区	月均值
其他因子	湿度	1%	不限定缓冲区	月均值
	监测站点 处人口数	人	不限定缓冲区	

2 研究方法

土地利用回归模型 (Land Use Regression, LUR) 建模的理论依据是大气污染物空间分布与土地利用等地理空间要素相关,利用地面监测数据和监测点一定范围内地理空间要素数据构建回归方程,将回归关系推演至未监测地区,进而模拟出污染物空间分布,模型的表达形式为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

式中:Y为因变量,在本文中为PM_{2.5}月均浓度;X₁, X₂, ..., X_n为自变量,即为与PM_{2.5}浓度相关的地理变量;β₁, β₂, ..., β_n为待定系数,β₀为常数项;ε为随机变量。

LUR 模型是一种全局空间回归模型,是典型的线性回归模型,用以研究因变量和自变量之间的线性关系。但在研究尺度上,由于现实中污染物分布广泛,不同地理位置的污染物浓度变化受到不同地理环境要素的影响程度不同,各影响因素之间不是简单的线性关系^[16]。随机森林^[17,18]比较适合非线性以及较小区域的预测和模拟。赵佳楠等^[12]利用 RF-LUR 模型模拟长江三角洲 PM_{2.5} 浓度空间分布,模型拟合效果较好,且模拟结果与相关参考文献较相符。因此,本文应用随机森林优化土地利用回归模型,希望能够准确表达各影响因素之间的非线性关系,预测合肥市 2017 年 PM_{2.5} 的空间分布。

3 PM_{2.5} 时空分布特征

3.1 PM_{2.5} 时间分布特征

3.1.1 PM_{2.5} 日变化特征

为研究不同季节大气颗粒物 PM_{2.5} 浓度的小时变化规律,将 2017 年 4 个季节分开研究,不同季节的 PM_{2.5} 浓度随时间变化如图 2 所示,总体上,四季的 PM_{2.5} 浓度小时变化规律相似,大致呈双峰变化特征,且都具有上午和晚上浓度高,下午浓度较低的特点。春、夏、秋季 PM_{2.5} 浓度的高峰值均出现在上午(8:00~9:00)和晚上(21:00~24:00),而冬季的高峰值则出现在上午(10:00~11:00)和晚上(22:00~24:00);春、夏、秋的低谷值出现在下午(15:00~17:00),而冬季的低谷值同样出现在下午(15:00~17:00)。冬季 PM_{2.5} 小时平均浓度随时间变化幅度最大,夏季变化趋势最为平稳。

PM_{2.5} 浓度随人类活动和大气物理化学特征的昼夜变化而呈现明显的周期变化特征^[19],合肥市 PM_{2.5} 浓度日变化的双峰趋势与出行高峰时间相呼应,出行早高峰时(一般为 7:00~8:00),此时车辆排放大量的二氧化硫、氮氧化物和细颗粒物等,随着温度的升高,排放气体之间产生化学反应,使得 PM_{2.5} 浓度不断上升,稍滞后出行早高峰且出现峰值,但由于昼夜长短的差异,春季、夏季和秋季的高峰出现在 8:00~9:00,冬季的高峰值出现在 10:00~11:00;达到高峰值后,随着空气对流,扩散能力增强,PM_{2.5} 浓度开始缓慢下降,直至 16:00~17:00 出现最低值;之后气温降低、混合层厚度减小,晚高峰车流量增加,厨房油烟排放量剧增,使得 PM_{2.5} 浓度再次增加,同时由于合肥市夜间人类活动较多,因此第二峰值出现在 21:00~24:00^[20]。冬季 PM_{2.5} 夜间下降幅度最大的主要原因是,PM_{2.5} 本身具有不易沉降的特性,冬季逆温层厚,消失较慢,使得高峰过后的 PM_{2.5} 浓度降低速度缓慢,再加上冬季 PM_{2.5} 本身浓度较高,而夜间人类活动明显减少,因此 PM_{2.5} 浓度下降幅度较大。

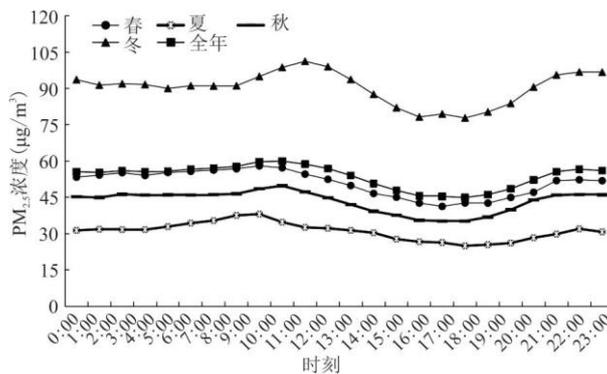


图 2 PM_{2.5} 小时变化曲线

3.1.2 PM_{2.5} 月间变化特征

由图 3 可知,PM_{2.5} 浓度在 2、12 月为全年最高月,7、8 月的 PM_{2.5} 浓度较小,为全年最低。在 PM_{2.5} 浓度的月间变化中,从 2 月开始,PM_{2.5} 浓度开始缓慢下降,直到 8 月出现最低值。之后 PM_{2.5} 浓度开始上升,8~10 月的上升幅度较为缓慢,10 月开始,PM_{2.5} 浓度开

始剧烈上升,直到12月出现最高值。

3.1. 3PM_{2.5} 季节变化特征

合肥市的总体污染情况较好,污染天数分布状况大致为春冬多,夏秋少,优良天数夏季占比最多,重度污染天气多出现在春冬季节,严重污染天气则暂时未出现(图 4a)。从可以看出,春季、冬季的 PM_{2.5} 浓度较高,夏季、秋季的 PM_{2.5} 浓度较低(图 4b)。造成此种现象的原因是,春季和冬季节气温较低,近地面温度较低,但地面上部的气温由于下降幅度较小,温度高于近地面,易出现逆温现象;以及供暖设备的使用,能源的消耗,影响细颗粒物排放源,导致 PM_{2.5} 浓度增高;同时会排放大量 SO₂ 和 NO_x 等气态前体物,此类气态前体会在大气中通过均相或非均相(在颗粒物表面)反应生成硫酸盐、硝酸盐和有机气溶胶等二次污染物^[21],提高 PM_{2.5} 浓度;而夏秋季节,气温较高,风速较大,对流旺盛,辐射逆温现象不易出现,PM_{2.5} 较易扩散,不易出现堆积现象。

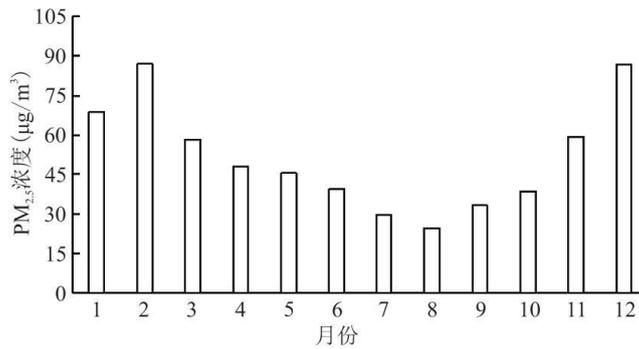


图 3 PM_{2.5} 月份变化特征

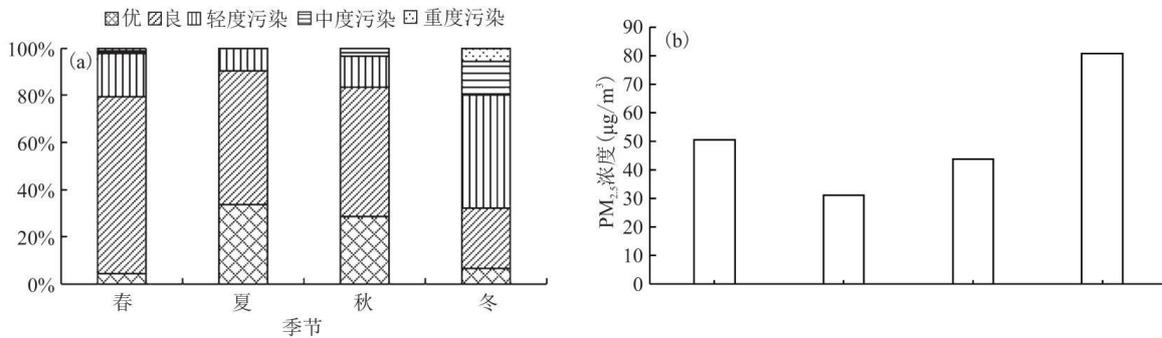


图 4 PM_{2.5} 季节变化特征

3.2 PM_{2.5} 空间分布特征

3.2.1 双变量相关分析

将监测站点的 PM_{2.5} 浓度与各相关因子分别做双变量相关分析,计算相关系数,据此识别出与 PM_{2.5} 浓度相关性显著的目标因子。在同类因子中,选择不同缓冲半径中相关性最大的因子作为目标因子(表 2),通过引入方差膨胀因子,对上述变量进行分析,结果如表 3 所示。

表 2 双变量分析结果

目标因子	相关系数
气温	-0.775**
风速	-0.032
相对湿度	0.519**
日照时长	0.484**
林地-4km	-0.068
草地-2km	-0.193**
建筑用地-0.5km	0.178**
水域-3km	-0.037
耕地-1km	-0.197**
市区二级-1km	0.134

注:**表示在 0.1 的水平(双侧)上显著.

表 2 中,有些解释变量的相关系数较低,为了确保模型的解释力度,通过 R 语言对模型变量进行筛选比较,通过比较所有变量构建模型的解释力度(a)、删除相关系数较小的变量之后模型的解释力度(b)、删除相关性显著的相关系数较小的变量(c),结果表明,模型 a 的解释力度为 97.6%,模型 b 的解释力度为 88.76%,模型 c 的解释力度为 48.31%。虽然风速之类的解释变量的相关系数较低,但将其加入模型之中,能较好的提高模型的解释力度。

由表 2、表 3 可知,本研究最终选择的目标因子为气温、风速、相对湿度、日照时长、4km 缓冲区内的林地比例、2km 缓冲区内的草地比例、500m 缓冲区内的建设用地比例、3km 缓冲区内的水体比例、1km 缓冲区内的耕地比例以及市区二级道路。

3.2. 2RF-LUR 模型模拟结果

通过 ArcGIS 在研究区均匀布点,计算各点的目标因子的数据,利用 RF-LUR 模型计算 $PM_{2.5}$ 的浓度预测值,模拟出合肥市 2017 年 4 个季度的浓度空间分布。

表 3 解释变量多重共线性诊断

气温	日照时长	湿度	耕地-1km	建筑用地-0.5km	水域-3km	林地-4km	草地-2km	市区二级-1km	风速
4.330226	2.570051	2.792966	3.420099	4.655858	3.822742	3.986167	1.504168	1.291887	1.643738

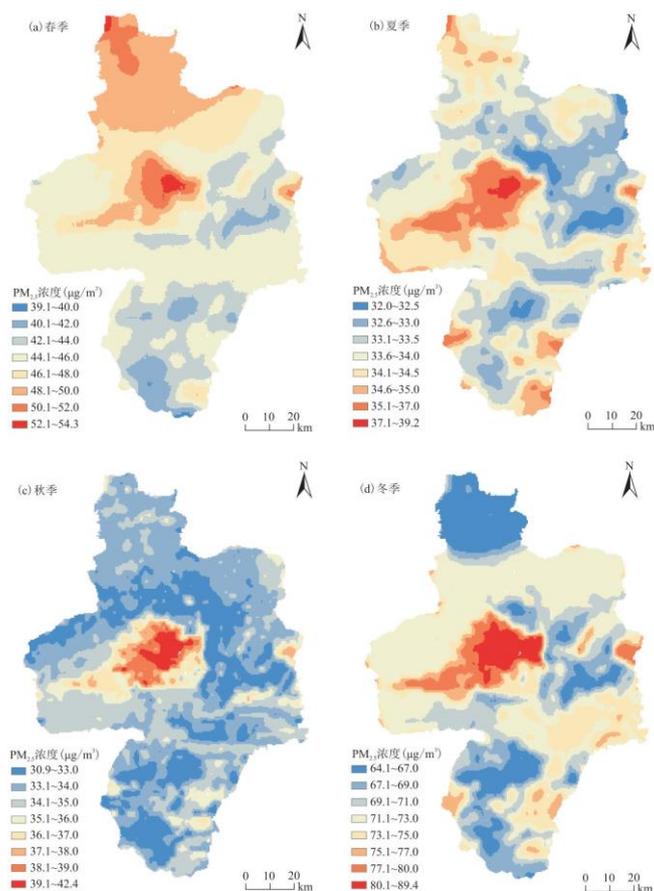


图 5 基于 RF-LUR 模型的各季度 $PM_{2.5}$ 浓度空间模拟分布

不同季节合肥市的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布不同(图 5)。总体上, $PM_{2.5}$ 浓度空间分布由市中心向外减弱, 呈北高南低, 西高东低的分布格局。冬季的污染最为严重, 是由于冬季近地面气温较低, 出现辐射逆温, 阻碍了空气的垂直对流运动, 妨碍烟尘、污染物、水汽凝结物的扩散, 使 $PM_{2.5}$ 浓度升高, 大气污染严重。再加上冬季降雨天气较少, 不利于颗粒物的沉降和扩散。市中心的污染浓度明显高于周边地区, 这是由于市中心人类活动较多, 交通流量大, 汽车尾气排放较多, $PM_{2.5}$ 排放源较多, 易导致 $PM_{2.5}$ 浓度增加, 再加上植被覆盖度小, 建筑密度较大, 导致 $PM_{2.5}$ 不易扩散; 南部地区、东部地区 $PM_{2.5}$ 浓度较低, 是因为这些地区的林地、草地的覆盖度较高, 以及巢湖流域的影响。春季、夏季的污染最高值大部分位于瑶海区北部, 而秋冬季节的污染重点则位于包河区的北部、蜀山区的南部, 城市汽车尾气排放、工业排放污染是造成这种现象的主要原因。冬季全市的 $PM_{2.5}$ 浓度较高, 污染较低的地区除了东部和南部大部分地区, 还有长丰县北部地区, 可能是由于冬季合肥市的盛行风向为偏北风, 虽然风速较低, 不利于合肥市区污染物扩散, 但对北部地区的 $PM_{2.5}$ 污染有一定的减弱作用。除冬季以外, 其余季节合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度差异不是很大。由于合肥市的建成区多集中在市中心, 其他地区土地利用类型差别不大, 因此导致各地季节差异较小。巢湖水域受到水汽影响, 增加了空气湿度, 有利于 $PM_{2.5}$ 的沉降, 所以其 $PM_{2.5}$ 浓度全年较低。而巢湖市的东北角和东南角以及庐江县的东南角部分地区, 由于林地分布范围较广, 而森林植被对大气有一定的吸附作用, 因此, 这些地区的 $PM_{2.5}$ 浓度全年较低^[22]。

4 $PM_{2.5}$ 影响因素分析

本文主要分析影响 $PM_{2.5}$ 浓度的自然因子(气象因子以及其他污染物因子), 主要利用 canoco5 软件中的主成分分析法分析其主要影响因素。结果如图所示:

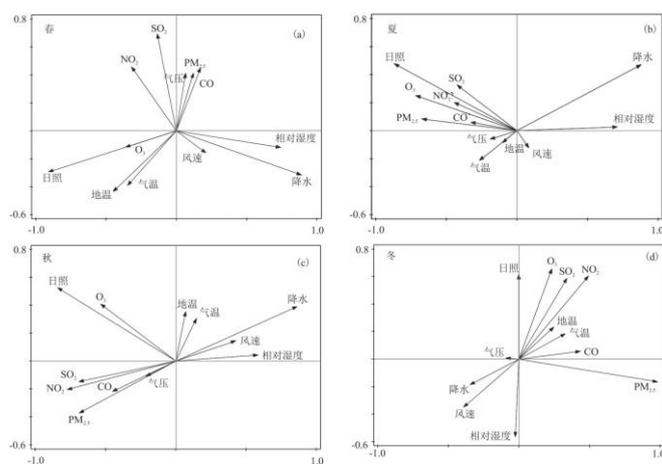


图6 各季节 PM_{2.5} 影响因素图

由图6可知,不同的季节影响 PM_{2.5} 浓度的主要因素不同。春季(a),合肥的 PM_{2.5} 浓度与降水、日照时数呈显著负相关,与平均湿度呈显著正相关。这是由于合肥市春季降水天数少,超过 60%的天数为非降水日,此时降水对大气的清除作用较弱;合肥市春季近地面受高压控制,高压中心气流辐散下沉,阻止污染物向上扩散,直接加剧了地面空气污染程度^[23]。但同时日照时长加强,会导致热力湍流变化,破坏地面的逆温层,导致大气垂直扩散能力加强,有利于污染物的扩散。研究表明相对湿度为 61%~80%时,污染粒子更容易吸湿增长,粒径增大,相应的 PM_{2.5} 浓度增加,引发空气污染^[23]。春季时 PM_{2.5} 对相对湿度的响应力度最高,导致春季 PM_{2.5} 浓度增长。

夏季(b),日照、气温、气压、地温与 PM_{2.5} 呈正相关,相对湿度、降水与 PM_{2.5} 呈现明显的负相关。降水的影响力度最大。夏季高温,太阳辐射增强,促进了各气体污染物的均相反应的增加,以及提高了颗粒物表面氧化反应的概率,加速二次污染的形成,导致夏季温度升高 PM_{2.5} 质量浓度增大^[24]。但另一方面,夏季气温升高,垂直扩散作用得到加强,再加上降水对 PM_{2.5} 有明显的沉降作用^[24],夏季合肥市总体空气湿度较大,高湿度状态更有利于降雨致 PM_{2.5} 湿清除。

秋季(c),大部分气象因素与 PM_{2.5} 呈负相关,降水、相对湿度、风速、地温、气温的影响力度依次下降。秋季多静稳天气,逆温出现频率高、强度大且持续多日,污染物不易扩散。因此当近地面气温升高,大气对流运动加剧,垂直扩散作用变强,甚至会破坏形成的逆温层,导致大气扩散作用增强,可以大大降低 PM_{2.5} 浓度。当风速大于 2m/s 时,对 PM_{2.5} 的清除作用较大^[24];合肥市秋季风速大于 2m/s 的天数占总天数一半以上,因此合肥市秋季大气清除和扩散作用较高。当相对湿度较低时(≤60%),空气干燥,粒子不容易吸湿增长,因此 PM_{2.5} 浓度较低。而高湿天气(≥81%)空气质量优的天数较多,可能是因为颗粒物在较高相对湿度时容易湿沉降^[23]。合肥市秋季相对湿度在此范围内的天数超过 62%。因此整个秋季,合肥市污染浓度较低。

冬季(d),与 PM_{2.5} 呈正相关的影响因素为相对湿度、气温、地温;与 PM_{2.5} 呈负相关的影响因素为日照、风速、降水、气压。其中相对湿度的影响力度最高,气压影响力度最低。冬季人们大量使用空调、地暖等家具设备,导致 PM_{2.5} 的排放量增加,低风速、高湿和逆温天气都会造成颗粒物污染加重。冬季合肥市 80%以上的天气降水量小于 0.1mm,降水清除作用较弱,再加上合肥市冬季整体风速较低,低于 2m/s 的天数占总天数的 64%以上,大气扩散能力较弱。合肥市冬季相对湿度在 61%~80%的天数,超过总天数的一半,PM_{2.5} 吸湿增长,造成合肥市冬季 PM_{2.5} 最高。

总体上,大气污染物促进 PM_{2.5} 浓度增加。在水的存在下,NO₂ 在吸湿性很弱的矿物颗粒物表面反应明显加快,反应产物(硝酸盐)导致颗粒物吸湿性增强;SO₂ 在颗粒物表面吸附生成的亚硫酸盐可被臭氧(O₃)快速氧化为硫酸盐。硫酸盐和硝酸盐等增加了颗粒物的吸湿性,使气溶胶粒径增大、消光效率增强。导致 PM_{2.5} 浓度变高。上述中 NO₂ 和 SO₂ 与 PM_{2.5} 良好的正相关,表明其相互间存在明显的二次转化过程,大气中的 SO₂ 和 NO₂ 通过均相或非均相反应生成硫酸盐和硝酸盐,对 PM_{2.5} 质量浓度变化具有重要影响,日照的长

短则通过影响热力湍流作用,间接对大气的垂直扩散作用产生影响,从而影响 $PM_{2.5}$ 的浓度。气象因素中,降水、湿度、风速与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在明显的负相关关系,气温、气压则与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在正相关。

5 结论

本文通过利用 RF-LUR 模型模拟合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度分布特征,应用 canoco5 软件中的主成分分析法分析合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因素和大气污染物之间的关系,得出以下结论:

(1)从季节上看,总体上,合肥市 $PM_{2.5}$ 季节浓度呈现出冬春季节污染较重,夏秋季节的污染较轻的变化规律。

(2)从日变化上看,合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度日变化呈现双峰变化趋势,春季、夏季及秋季的峰值多出现在 8:00~9:00,而冬季的峰值则出现在 10:00~11:00,全年 $PM_{2.5}$ 浓度日变化趋势与春季类似。

(3)合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布,总体上呈现北高南低,西高东低,城市中心 $PM_{2.5}$ 浓度较高。分地区来看,2017 年年均浓度变化幅度由高到低依次为北部、西北部、东北部,浓度高的季节空间分布差异较大。

(4)不同季节, $PM_{2.5}$ 受到的影响因素不同。总体上,日照对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响力度较大,降水、风速以及相对湿度与 $PM_{2.5}$ 浓度呈负相关,气温、气压及其他污染物与 $PM_{2.5}$ 呈正相关,大气污染物中 NO_2 对 $PM_{2.5}$ 的影响力度较大。

本文虽然借助随机森林对土地利用回归模型进行了优化,模拟合肥市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布,但由于近地表 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化性强、很难掌控,而其他时间分辨率高的预测因子如风向、边界层高度等未纳入模型,后续可能会将其加入模型进行模拟;在分析合肥市 $PM_{2.5}$ 的影响因素,目前只考虑到了气象因素和其他污染物的影响,后续的研究还应考虑其他影响因素如产业结构、景观格局等。

参考文献:

- [1]李德林,全攀瑞,黄翔.关于空气细颗粒物 $PM_{2.5}$ 防治对策的初步探讨[J].洁净与空调技术,2005,(4):34-36,43.
- [2]VIANA M, QUEROL X, ALASTUEY A, et al. Characterising exposure to PM aerosols for an epidemiological study[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(7):1552-1568.
- [3]HANSEN J E, SATO M, RUEDY R, et al. Efficacy of climate forcings[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(18):2571-2592.
- [4]齐梦溪,赵文慧,孙爽,等.2014-2016年北京市 $PM_{2.5}$ 污染时空分布特征[J].生态环境学报,2019,28(1):97-105.
- [5]王嫣然,张学霞,赵静瑶,等.北京地区不同季节 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度对地面气象因素的响应[J].中国环境监测,2017,33(2):34-41.
- [6]汉瑞英,陈健,王彬.利用 LUR 模型模拟杭州市 $PM_{2.5}$ 质量浓度空间分布[J].环境科学学报,2016,36(9):3379-3385.
- [7]杨兴川,赵文吉,熊秋林,等.2016年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其与气象因素的关系[J].生态环境学报,2017,26(10):1747-1754.

-
- [8]刘金培,汪官镇,陈华友,等.基于VAR模型的PM_{2.5}与其影响因素动态关系研究—以西安市为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):78-84.
- [9]张玉丽,朱家明,何玉,等.合肥环境空气中PM_{2.5}的影响因素和时空分布[J].成都工业学院学报,2015,18(4):43-46.
- [10]汪雅倩,朱家明,钱舒婷,等.合肥市PM_{2.5}影响因素及分布演变规律的定量分析[J].商丘师范学院学报,2016,32(3):1-6,16.
- [11]张思远,吴开亚.合肥市PM_{2.5}污染特征及影响因素分析研究[J].环境科学与管理,2015,40(1):51-56.
- [12]赵佳楠,徐建华,卢德彬,等.基于RF-LUR模型的PM_{2.5}空间分布模拟——以长江三角洲地区为例[J].地理与地理信息科学,2018,34(1):18-23.
- [13]刘凡,翟亮,桑会勇.PM_{2.5}土地利用回归模型地理要素的选取[J].测绘与空间地理信息,2017,40(9):84-87.
- [14]OLIVEIRA SANDRA, OEHLER, et al. Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using multiple regression and random forest[J]. Forest Ecology & Management, 2012, 275(4):117-129.
- [15]CUTLER D R, EDWARDS T C, BEARD K H, et al. Random forests for classification in ecology[J]. Ecology, 2007, 88(11):2783-2792.
- [16]陈莉,白志鹏,苏笛,等.利用LUR模型模拟天津市大气污染物浓度的空间分布[J].中国环境科学,2009,29(7):685-691.
- [17]马玥,姜琦刚,孟治国,等.基于随机森林算法的农耕区土地利用分类研究[J].农业机械学报,2016,47(1):297-303.
- [18]张雷,王琳琳,张旭东,等.随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例[J].生态学报,2014,34(3):650-659.
- [19]张海霞,程先富,陈冉慧.安徽省PM_{2.5}时空分布特征及关键影响因素识别研究[J].环境科学学报,2018,38(3):1080-1089.
- [20]SUN Y, ZHUANG G, TANG A A, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10):3148-3155.
- [21]朱彤,尚静,赵德峰.大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J].中国科学:化学,2010,40(12):1731-1740.
- [22]赵晨曦,王玉杰,王云琦,等.细颗粒物(PM_{2.5})与植被关系的研究综述[J].生态学杂志,2013,32(8):2203-2210.
- [23]高嵩,田蓉,郭彬,等.长三角典型城市PM_{2.5}浓度变化特征及与气象要素的关系[J].科学技术与工程,2018,18(9):142-155.
- [24]于彩霞,邓学良,石春娥,等.降水和风对大气PM_{2.5}、PM₁₀的清除作用分析[J].环境科学学报,2018,38(12):59-68.