

黑龙江省大气污染物时空分布特征及影响因素

伍昱飞, 叶华香, 臧淑英

(哈尔滨师范大学 地理科学学院, 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 哈尔滨 150025)

摘要:运用 IDW 空间插值法和灰色关联分析, 对黑龙江省 2015—2018 年大气污染监测数据和对应年份社会经济数据进行分析。研究表明: AQI 值和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 浓度时间变化趋势在年内呈现“U”形变化规律; 黑龙江省的污染重心在哈尔滨市, 东南城市群污染程度高于西北城市群; 民用汽车及单位公里民用汽车拥有量和 CO 、 O_3 的关联度极强; 人均 GDP 增长、单位 GDP 能源消耗强度的减少以及城镇化的发展具有明显的双向性; 第一产业发展对空气质量的影响主要来自秸秆燃烧, 第二产业则主要是化石燃料燃烧和建筑业产生的扬尘等, 第三产业能耗低, 对资源的依赖小, 污染小。

关键词:空气质量; 时空分布; 污染排放; 经济要素; 黑龙江省

中图分类号: F129.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2021)08-0134-08

随着中国城市化和工业化的高速发展, 大气环境污染问题日益凸显, 对人们的生产生活和身心健康造成严重的影响, 引发民众对环境健康的担忧, 成为一个重大的民生问题。《2018 中国环境状况公报》显示, 217 个城市空气环境质量仍超标, 占比 64.2%。其中严重污染 822 d, 比 2017 年增加 20 d, 可见中国城市大气污染形势依旧很严峻。在十九大报告中, 习近平总书记指出, 加快生态文明体制改革, 建设美丽中国, 必须推进绿色发展、着力解决突出环境问题、加大生态环境保护力度等措施^[1]。因此, 大气环境问题也成为社会各界关注的焦点, 同时也受到了很多学者的关注, 掌握其污染的时空分布特征、影响因子等, 对区域的绿色可持续发展和生态文明建设具有重要意义。

关于大气污染问题, 国内外学者从不同的角度进行了相关研究。在研究区域上主要包括全球、全国等大尺度方面, 同时也包含典型的省份、城市群以及城市。Hafiz 等^[2]探讨了空气污染的健康成本对亚洲国家财政状况的影响; 黄小琥等^[3]研究了中国城市主要大气污染物时空分布特征及其相关性; 李力等^[4]对京津冀、珠三角城市群空气质量时空特征与影响机理进行了分析。在省级层面, 王化杰等^[5]研究了安徽省大气污染物演化规

律。也有研究者从环境学、经济学、地理学等多角度, 基于探索性空间数据和空间计量模型^[6-8]等方法分析了大气污染物时空分布特征及变化规律^[9]、空间溢出效应^[10-11]等。在影响因素方面主要是从自然和人文两个角度阐明内在演变机理。自然方面, 杨莹等^[12]在分析哈尔滨空气质量指数分布特征的基础上研究其与气象要素的相关因素, 结果显示 AQI 与风速、气压、气温、相对湿度有相关性; 李文杰等^[13]从不同角度研究了空气质量与沙尘暴的关系。人文方面则有梁伟等^[14]探讨了城镇化率对空气质量的影响及空间效应; 蔺学芹等^[9]分析了城市空气质量与能源消耗、经济发展等方面的响应关系。

黑龙江省地处中国中高纬度地区, 2013 年以来, 省内大多数城市经常出现空气质量指数“爆表”情况, 加强对黑龙江省空气质量研究显得尤为重要。由于受数据完整性的影响, 收集了 2015—2018 年黑龙江省 13 个市地的常规大气污染物监测数据及当地经济数据, 运用统计学定量分析、IDW (inverse distance weighted) 空间插值法和灰色关联方法对省内空气质量状况及影响因素进行分析, 以期对地区大气污染的防控治理工作提供理论支撑。

收稿日期: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41501547)。

作者简介: 伍昱飞 (1995—), 男, 甘肃镇原人, 哈尔滨师范大学地理科学学院, 硕士研究生, 研究方向为环境监测与生态风险评估; 通信作者叶华香 (1979—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨师范大学地理科学学院, 副教授, 博士, 硕士研究生导师, 研究方向为区域环境污染生态风险。

1 材料与方法

1.1 研究区域

黑龙江省位于中国东北部(图 1),东接俄罗斯,西邻吉林内蒙古,属温带大陆季风性气候与寒温带气候。地势呈东南、西北和北部较高,西南和东北部较低。全省境内有黑龙江、乌苏里江、松花江和绥芬河四大水系。黑龙江省位于东北亚区域腹地,是亚洲与太平洋地区陆路通往俄罗斯和欧洲大陆的重要通道,中国沿边开放的重要窗口,是中国重要的林业基地、能源基地、商品粮基地和重工业基地。

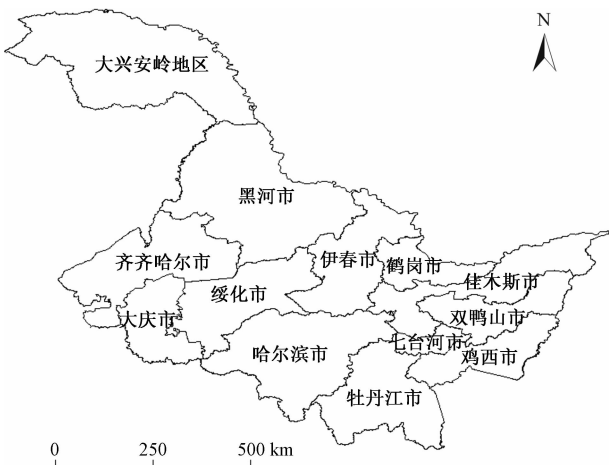


图 1 研究区域

1.2 数据来源与分析方法

1.2.1 数据来源与处理

本文收集了黑龙江生态环境保护厅记录的 2015—2018 年黑龙江省 13 个市地的大气污染监测数据,包括空气质量指数(AQI)日均值以及 6 种主要大气污染物浓度 SO₂、NO₂、CO、PM_{2.5}、PM₁₀、O₃ (以质量浓度计)。经济城镇化指标、产业结构指标、城市机动车保有量等指标数据来源于相应年份的黑龙江省统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报。

《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)对 SO₂、NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 4 种污染物的浓度年均值限值进行了规定,但未对 CO 和 O₃ 进行浓度年均值限定。根据环境空气质量评价技术规范,对 4 种规定浓度年度限制的大气污染物以浓度年均值进行评价,而对于 CO 以日均值的第 95 百分位数代表年均浓度,O₃ 以日最大 8 h 滑动平均值的第 90 百分位数代表年均浓度。同时生态环境部发布的国家环境保护标准 HJ 633—2012 中环境空气质量指数

(AQI) 技术规定(试行)中,将空气污染指数 AQI 分为 6 级: AQI ≤ 50 (优)、51 < AQI ≤ 100 (良)、101 < AQI ≤ 150 (轻度污染)、151 < AQI ≤ 200 (中度污染)、201 < AQI ≤ 300 (重度污染)、AQI > 300 (严重污染)。

对于部分缺失的数据采用月平均值进行平滑处理。在分析数据时,结合实际情况,将每年 4 月 16 日至 10 月 14 日规定为非供暖期,共计 182 d (2016 年供暖期为 184 d)。

1.2.2 分析方法

运用统计学定量分析法、IDW 空间插值法和灰色关联方法进行相关研究。下面简单介绍灰色关联法。

灰色系统理论是由中国学者邓聚龙提出的。灰色关联分析可适用于样本小、数据少的研究对象,近几年被广泛使用^[15]。

灰色关联分析的基本操作步骤如下。

1)原始数据的初始化:

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i} \tag{1}$$

为便于各个指标进行比较分析,利用均值化处理对数据进行归一化。

2)计算比较数列和参考数列的绝对差值:

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)| \tag{2}$$

3)指标体系的灰色系数:

$$\gamma[x_0(k), x_i(k)] = \frac{\min_j \min_k \Delta_i(k) + \xi \max_j \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \xi \max_j \max_k \Delta_i(k)}, 0 < \xi < 1 \tag{3}$$

式中, ξ 为常数,通常情况下 ξ 取 0.5,本文中 ξ 取 0.5。

4)计算灰色关联度并排列关联序:

综合灰色关联度的计算公式为

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma[x_0(k), x_i(k)] \tag{4}$$

由式(4)得,关联系数 γ 越大,表明对参考序列与对比序列的关联水平越高。其关联度划分为:弱 (0 < γ < 0.35)、中 (0.35 < γ < 0.65)、较强 (0.65 < γ < 0.85)、极强 (0.85 < γ < 1)。

2 结果与分析

2.1 黑龙江省污染物时间分布特征

2.1.1 AQI 的时间分布特征

由研究区域研究数据可得,从 2015—2018 年, AQI 从 66.34 降到了 53.94,降幅 18.69%,区域整体空气质量向更加清洁的方向发展,其主要原因是

黑龙江省加大了地区大气污染的治理力度。近年来,政府连续颁布的《黑龙江省大气污染防治专项行动方案》及《黑龙江省大气污染防治行动计划》等方案规划有关,具体有推进锅炉改造及淘汰,严控燃煤污染;升级改造治理设施,严治工业企业污染;推行绿色交通,严管机动车污染;强化大气污染综合治理,严防城乡面源污染;加强重污染天气应对,严格特殊时段环境空气质量管控等一系列重大举措。

黑龙江省的 AQI 在年内整体呈现出“U”形变化规律(图 2),其中年最高值一般出现在每年的 1—4 和 10—12 月,全年 AQI 的最低值一般在 8 月或 9 月出现。从整体上看,年内 AQI 的波动在减小,年际 AQI 呈下降趋势。

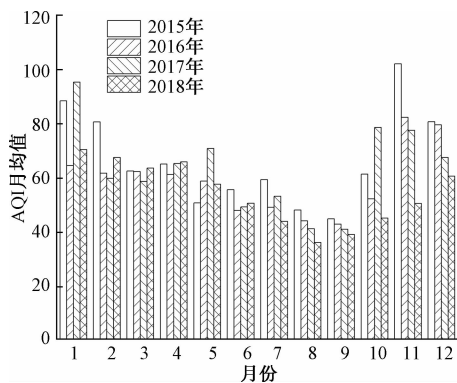


图 2 2015—2018 年研究区 AQI 月均值

2.1.2 污染物的时间变化特征

2015—2018 年,黑龙江省 6 种主要污染物浓度基本随着年度的推移呈现波动式的变化趋势。其中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 NO_2 年均质量浓度变化趋势一致,先减后增再减,三者的年均浓度最大值出现在 2015 年,分别为 39.54 、 65.83 、 $23.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$;最小值出现在 2018 年,分别为 27.76 、 50.49 、 $19.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$; SO_2 的年均质量浓度则逐年递减,由 2015 年的 $20.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到 2018 年的 $10.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$,降幅为 47.05% ; CO 的第 95 百分位数,2015—2017 年基本保持不变,维持在 $0.77 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右,2018 年降低到 $0.57 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。此外, O_3 8 h 的第 90 百分位数先有 2015 年的 $71.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降低至 2016 年的 $66.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$,后逐年升高至 2018 年的 $71.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$,略高于研究初期水平。

黑龙江省 6 种污染物的月均值浓度如图 3 所示,不同月份主要污染物见表 1。由图 3 可知, $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 的浓度变化趋势整体上

较为一致,在年内呈现出“U”形的变化规律;而 O_3 变化趋势则相反,呈现倒“U”形的变化规律。

由图 3 和表 1 得出,1—5 月和 10—12 月 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为研究区的主要污染物,这可能是因为寒冷季节常见的稳定天气条件和大规模供暖导致其排放量增大^[16],同时与季节性扬尘天气^[17]和区域性秸秆焚烧对浓度抬升也有较大关系^[18]。6—8 月主要污染物除颗粒物外, O_3 也是主要污染物之一,与 O_3 污染主要是集中在 4—9 月,是夏季影响许多城市空气质量的首要污染物^[19]的研究较为一致。

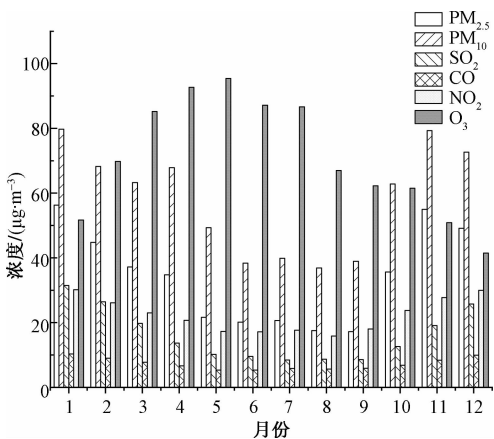


图 3 研究区各污染物浓度月均值

表 1 2015—2018 年黑龙江省不同月份首要污染物种类

月份	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}
2	PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}
3	$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	—
4	PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	O_3 、 PM_{10}
5	PM_{10}	PM_{10} 、 O_3	PM_{10}	O_3 、 PM_{10}
6	$\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3	O_3 、 $\text{PM}_{2.5}$	O_3	O_3 、 PM_{10}
7	O_3	O_3	O_3	O_3 、 PM_{10}
8	O_3	O_3	—	PM_{10} 、 O_3
9	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	—	PM_{10} 、 O_3
10	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$
11	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$
12	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$	$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10}	PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$

2.1.3 污染等级变化特征

黑龙江省各级环境空气质量级别占比见表 2。从表 2 可以看出,黑龙江省优良天气的天数占有统计天数的比例最高,为 90.57% ,其次是轻度和中度污染,分别占比 6.24% 和 1.72% ,而重度和严重污染所占比最小,仅为 1.47% 。结合黑龙江省特点,分别对供暖期和非供暖期的污染等级天数进行

了统计。从表 2 中可以看出,非供暖期空气质量整体优于供暖期,其中优良天数的比例非供暖期以 97.38% 高于供暖期的 84.42%。污染天数比例则供暖期的 15.58% 则是非供暖期 2.62% 的 6 倍。这一情况的出现和供暖期内大量燃煤及燃烧秸秆有关。在供暖初期的十月,既有燃煤量的增加,还有大量周边地区的秸秆燃烧,使得空气质量严重下滑。除此之外,黑龙江省冬季寒冷,混合层高度低,易出现逆温等稳定天气状态,导致省内供暖期内污染情况严重。供暖期及供采暖期气象间明显差异导致污染状况不同。从年度变化角度看,合格率从 2015 年的 87.42% 提升到 2018 年的 94.09%。污染情况相对比较严重的供暖期重度污染和严重污染的比例也从 4.55% 降低至 1.01%,降幅 77.80%。由此可见,随着大气污染物防治的各项政策及规章制度的颁布和落实,空气质量提升明显。

表 2 2015—2018 年黑龙江省各级环境空气质量级别占比 %

年份	时间段	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
2015	全年	43.2	44.2	8.1	2.2	1.8	0.5
	供暖期	32.9	44.9	13.3	4.4	3.6	1.0
	非供暖期	53.6	43.5	2.8	0.0	0.0	0.0
2016	全年	48.2	43.5	6.3	1.5	0.5	0.1
	供暖期	35.7	49.9	10.5	2.7	1.0	0.2
	非供暖期	60.8	37.0	2.0	0.2	0.0	0.0
2017	全年	53.3	35.8	6.2	2.2	1.7	0.8
	供暖期	43.3	40.6	9.2	3.5	2.5	0.9
	非供暖期	65.1	31.6	2.5	0.3	0.2	0.3
2018	全年	54.9	39.2	4.4	1.0	0.4	0.2
	供暖期	43.8	46.6	6.7	1.9	0.7	0.3
	非供暖期	65.8	32.1	2.1	0.0	0.0	0.0
总计	总计	49.9	40.7	6.2	1.7	1.1	0.4
	总供暖期	38.9	45.5	9.9	3.1	1.9	0.6
	总非供暖期	61.3	36.1	2.4	0.1	0.0	0.1

2.2 黑龙江省污染物空间分布特征

运用反距离权重法对黑龙江省 6 种空气污染物浓度进行空间插值(图 4)。从图 4 可以看出,不同的空气污染物在空间上有着不同的分布特征。空间分布格局变化不大但变化率在空间上存在明显差异。CO 在空间分布上有较强空间异质性,其中高浓度地区主要分布在哈尔滨、鸡西、鹤岗、佳木斯、大兴安岭地区等城市。大兴安岭地区的 CO 来源可能是林区森林火灾后期大量排放出来的^[20]。其他高浓度地区 CO 可能主要来源于燃料的不完全

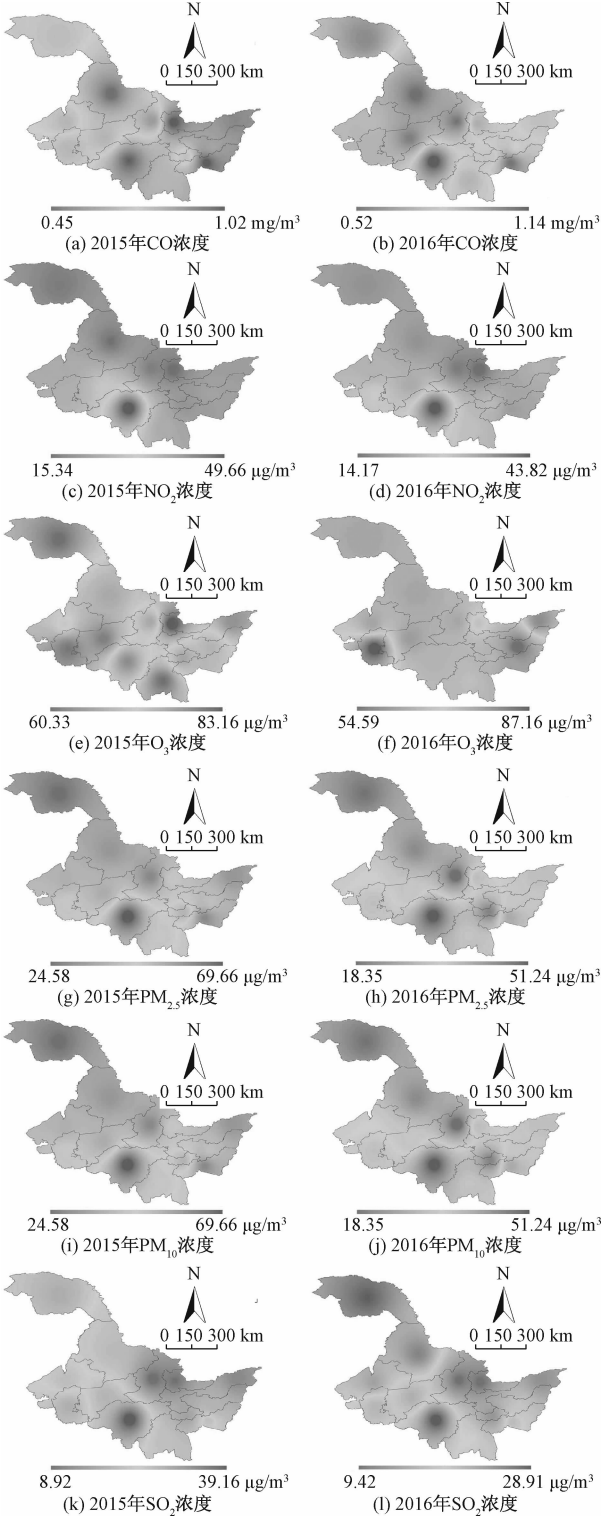


图 4 2015、2016 年黑龙江大气污染物空间分布

燃烧^[21-22]。NO₂ 浓度的空间分布基本不变,并且污染重心稳定在哈尔滨市附近。哈尔滨作为黑龙江省的省会城市,受汽车尾气、工业污染的影响相对较突出。O₃ 高浓度的空间分布逐渐由省西南城市大庆开始遍布全省大多数城市,可见 O₃ 的污染在日益增加。这主要是全省各城市的发展和机动车的

增加带来的后果,因此 O₃ 的治理形式相当严峻^[23]。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的空间分布以及在时间序列上的分布都比较相似,空间分布上呈现出东南高、西北低的态势。时间变化则相对稳定。这可能与东南地区人口与第二产业分布较西北地区密集有关^[24]。全省 SO₂ 浓度分布的重点区域逐渐由大兴安岭黑河和哈尔滨两个变化为仅哈尔滨一个重点区域。大兴安岭黑河重心处于黑龙江省最北部,年平均温度常低于零度。生活于该地区的民众取暖时远多于其他地区,因此伴随着煤炭等燃烧,释放出的 SO₂ 也相对较多。但是随着集中供热和燃气化的建设、对锅炉等的限期治理,SO₂ 也随之减少。哈尔滨市则在经济增长的同时带来了污染源源头排放量的增加,虽然在各种环境保护规章制度的限制下,SO₂ 年均浓度有所控制,但相对于其他地区仍然相对处在较高的状态。

3 讨论——以哈尔滨市为例

城市空气污染是自然条件和人类活动等因素共同作用的结果。在掌握大气污染时空分布特征的基础上,明晰空气污染的机理可为大气污染防治提供合理的参考依据,具有十分重要的现实意义。虽然哈尔滨市作为黑龙江省的经济文化中心,但是随着城市建设的发展,也带来了更加严重的环境污染问题。从前文分析中可以看出,哈尔滨市的大气污染程度略高于其他城市,同时各污染物在空间分布上以哈尔滨为重心。由于省内多数地区社会经济指标获取困难,因此以哈尔滨市为例,在前人研究成果的基础上,利用灰色关联分析法,探讨 2015—2018 年影响城市空气质量的自然和社会因素,为哈尔滨市大气污染的防控治理工作提供理论支撑。

3.1 自然因素

不同学者从不同的角度对哈尔滨市的空气污染的自然影响因素进行了分析。朱红蕊等^[25]认为 AQI 与气压之间以正相关为主,秋冬季最为显著;

与风速主要表现为负相关,冬季尤为显著;与气温的关系受到采暖的干扰差异较大,年尺度及秋冬季呈负相关,月尺度呈正相关;与降水日数呈负相关;与相对湿度冬季表现为显著正相关,而 5—9 月为负相关。李树岭等^[26]对哈尔滨市 2017 年 10 月一次持续性污染过程分析后认为,在此次重污染发展的过程中,地面相对湿度(RH)增大有利于颗粒物吸湿增长和污染加剧,且污染物主要来源于秸秆焚烧,其次来源于取暖燃煤。欧娜音等^[27]认为哈尔滨市空气污染物浓度与持续性逆温频率、厚度呈正相关。杨艳等^[17]通过对近 50 年哈尔滨市沙尘暴规律的研究发现,哈市沙尘暴主要发生在春季,少数发生在秋季和冬季,极少数发生在夏季。因此,由前人研究可得,风速、相对湿度、气温、逆温和沙尘暴等在自然因素方面对哈尔滨市空气质量都有影响。

3.2 经济社会因素

城市的空气质量受气象条件、地形等自然因素的影响,同时与经济、科技等社会经济因素密切相关。如表 3 所示,在结合前人研究经验并参考相关文献的情况下,最终选取交通指数、城市发展和产业结构为比较序列和不同年份的不同污染指标进行关联度分析,分析结果见表 4。

表 3 影响因素指标

变量分类	具体指标
交通指数	民用汽车拥有量 X ₁ (辆)
	摩托车拥有量 X ₂ (辆)
	单位公里民用汽车拥有量 X ₃ (辆/km)
城市发展	人均 GDPX ₄ (元)
	单位 GDP 的能源消耗强度 X ₅ (吨标准煤/万元)
	城镇人口占总人口的比重 X ₆ (%)
	城市绿化覆盖率 X ₇ (%)
产业结构	第一产业增加值 X ₈ (亿元)
	第二产业增加值 X ₉ (亿元)
	第三产业增加值 X ₁₀ (亿元)

表 4 污染指标与经济指标关联系数

污染物	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
PM _{2.5}	0.65	0.88	0.66	0.71	0.75	0.79	0.83	0.76	0.78	0.69
PM ₁₀	0.63	0.87	0.64	0.69	0.74	0.77	0.81	0.74	0.77	0.70
SO ₂	0.50	0.63	0.51	0.55	0.61	0.59	0.64	0.59	0.60	0.53
CO	0.87	0.77	0.89	0.93	0.98	0.88	0.89	0.90	0.88	0.93
NO ₂	0.71	0.80	0.73	0.78	0.84	0.87	0.92	0.84	0.86	0.76
O ₃	0.88	0.73	0.89	0.86	0.88	0.86	0.84	0.86	0.86	0.88

1)在交通指数方面,整体来说民用汽车以及单位公里民用汽车拥有量和 CO(0.87、0.89)、O₃

(0.88、0.89)有着极强的关联度,其次是和 $\text{PM}_{2.5}$ (0.65、0.66)、 NO_2 (0.71、0.73) 有较强的关联度。而摩托车拥有量和 $\text{PM}_{2.5}$ (0.88)、 PM_{10} (0.87) 的关联度极强。虽然近些年黑龙江省采取一系列的环保措施成果显著,但是私人汽车拥有量增长迅速,同时汽车尾气大量排放,依旧很大程度上影响城市空气质量。有学者通过电动车的普及对空气质量的影响模拟后,得到电动车对小型载客车辆 50% 的代替可对 CO 和 NO_x 的减排产生积极效果^[28-29]。

2) 在城市发展方面,首先从人均 GDP 来说,经济发展水平和空气质量密切相关,人均 GDP 和各项污染指标的关联度从中等到极强 (0.55~0.93)。其次,降低能源消耗强度有利于提升能源效率,改善空气质量;但能耗强度的降低会引起能源(尤其是化石能源)的消费总量反弹效应,导致空气质量恶化^[30]。黑龙江省在 2016—2018 年制定的大气污染防治专项行动方案,将重点放在控制燃煤消费总量、提高燃煤质量、推进建筑供热计量和节能改造等 5 个方面。因此单位 GDP 的能源消耗强度与大多数污染指标有着较强到极强的关联度 (0.64~0.99)。从城镇人口占总人口比例来说,除了和 SO_2 (0.59) 的关联度在中等以外,其中和颗粒物的关联度为 (0.77) 和 (0.79) 属较强关联度,和其余指标的关联度极强,在 (0.86~0.88)。城镇化的提升与发展,在消耗大量能源与产生不用程度大气环境问题的同时,也会使得公众的环保意识提高,产业结构得到优化,环境的治理水平也将得到提升。随着城镇化发展的提升,人口和不同产业大量聚集,劳动效率必将得到提升,但同时单位污染物的产出量增加^[28],使得环境恶化加速;随着环境的恶化,民众的环保意识增强。从而在社会的发展中,更为严格的环境规章开始实施,产业结构开始加速升级,清洁能源得以更多地运用,环境质量逐步提升。哈尔滨市户籍城镇化率由 2015 年的 48.3% 提升到 2018 年的 49.1%,常住人口城镇化率升至 65.3%,同时哈尔滨市全年天气合格率也从 2015 年的 66.3% 提升到 2018 年的 85.2%。由此表明,新型城镇化提升了城市质量的内涵,有效改善空气质量。城市绿化率与各指标相关性除 SO_2 (0.61) 中等关联度以外,与其余指标的关联度在 0.81~0.92,有较强到极强的关联度。随着城市的建设与发展,绿色植被面积逐渐减少,取而代之的是愈加严重的城市热岛效应及其他环境问题,因此城市绿地建设的重要性逐渐凸显。同时哈尔滨市也积极落实国务院《城市

绿化条例》,并结合哈尔滨实际,颁布《哈尔滨市城市绿化条例》等法律法规,提高当前城市绿化覆盖率,可以在一定程度上缓解城市空气污染问题。

3) 产业结构方面,从关联度系数均值来看,第二产业增加值 (0.80) 相对第一产业增加值 (0.78) 和第三产业增加值 (0.74) 与各项污染指标有较强关联度。第二产业对于空气质量的主要影响因素是化石燃料的燃烧和建筑业产生的扬尘等。哈尔滨市是中国最早一批的工业基地之一,即使其重工业相对较为发达,但大量工厂每天都在向大气中排放大量的废气和有毒有害气体。而且哈尔滨市地处中国的东北部,远离政治和经济中心,虽然有重化工业作为哈尔滨市的经济增长点,但是随着传统经济增长模式逐渐丧失原有的活力,使哈尔滨的经济面临转型与产业结构调整等多重挑战^[31],也使得政府在依靠传统第一第二产业的同时又很难高要求的对重化工业进行整治以保证清洁生产。再加之随着城市建设,建筑业所带动的钢铁水泥业等行业也直接或间接地加剧了空气污染,同时在施工过程中所产生的扬尘也污染着周边空气。在第一产业发展过程中,对于空气质量的影响主要集中在农田的秸秆燃烧,加上同一时期相对稳定的大气状态,经常造成空气质量指数爆表。有研究表明^[32],第三产业能耗低,对资源的依赖小、污染小,发展第三产业,提高第三产业的比重,能够有效改善空气质量。

4 结论

1) 从时间变化角度看,随着年份增加,区域整体空气质量状况向更加清洁的方向发展。AQI 和 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 的浓度变化趋势相对一致,在年内呈现出“U”形的变化规律。这是人类活动和自然因素作用的结果。寒冷季节常见的稳定天气条件和大规模供暖导致污染物排放量增大,加剧了空气污染。春季气温回暖,土壤表层松动,加之强对流带来的不稳定大气,易形成扬尘天气,导致空气污染加重。夏季则降水增多,湿度升高,空气对流旺盛,都有利于污染物的扩散和稀释,从而降低了污染物浓度。 O_3 的质量浓度分布则呈现出“倒 U”形的变化规律。这主要是由于人为排放的“ NO_x ”和“VOCs”在同期高温和高强度太阳辐射等因素影响光化学反应二次转化形成的。

2) 从空间变化角度看,不同的空气污染物在空间上有着不同的分布特征。空间分布格局变化不大但变化率在空间上存在明显差异。整体来说,黑

龙江省内的污染重心在哈尔滨市,东南城市群污染程度高于西北城市群。

3)采用灰色关联分析法探究空气质量的社会经济影响,结果表明:①民用汽车以及单位公里民用汽车拥有量和 CO 、 O_3 的关联度极强。而摩托车拥有量和 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_2 的关联度极强。私人汽车拥有量增长迅速,同时汽车尾气大量排放,很大程度上影响城市空气质量。②人均GDP、单位GDP的能源消耗强度、城镇化率对空气质量的影响都具有两面性。随着人均GDP增长,人们对清洁空气质量要求越来越高的同时,也使得政府有更多的资金去保护环境、治理大气。单位GDP的能源消耗强度的减少有利于提升能源效率,改善空气质量,同时也引起能源(尤其是化石能源)的消费总量反弹效应,导致空气质量恶化。城镇化的提升与发展在消耗大量能源与产生不用程度大气环境问题的同时,也会使得公众的环保意识提高,产业结构得到优化,环境的治理水平也将得到提升。③第二产业增加值和第一产业增加值对空气质量有着不同程度的污染。第二产业对于空气质量的影响主要是化石燃料的燃烧和建筑业产生的扬尘等。在第一产业发展过程中,对于空气质量的影响主要集中在农田的秸秆燃烧,加上同一时期相对稳定的大气状态,经常造成空气质量指数爆表。第三产业能耗低,对资源的依赖小,污染小,发展第三产业,提高第三产业的比重,能够有效改善空气质量。

参考文献

- [1] 肖悦,田永中,许文轩.中国城市大气污染特征及社会经济影响分析[J].生态环境学报,2018,27(3):518—526.
- [2] HAFIZ J, AMIRAH R N, AMIRAH A, et al. A systematic review of financial implications of air pollution on health in Asia [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25: 30009—30020.
- [3] 黄晓虎,韩秀秀,李帅东.城市主要大气污染物时空分布特征及其相关性[J].环境科学研究,2017,30(7):1001—1011.
- [4] 李力,唐登莉,孔英.FDI对城市雾霾污染影响的时空计量研究——以珠三角地区为例[J].管理评论,2016,28(6):11—24.
- [5] 王化杰,张波,胡昊.安徽省大气污染物时空分布特征及演化规律[J].环境科学研究,2018,31(4):628—641.
- [6] 刘海猛,方创琳,黄解军.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(1):177—197.
- [7] 徐盈之,刘琦.产业集聚对雾霾污染的影响机制——基于空间计量模型的实证研究[J].大连理工大学学报(社会科学版),2018,39(3):24—31.

- [8] 马丽梅,刘生龙,张晓.能源结构、交通模式与雾霾污染——基于空间计量模型的研究[J].财贸经济,2016,37(1):147—160.
- [9] 蔺雪芹,王岱.中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J].地理学报,2016,71(8):1357—1371.
- [10] 王一辰,沈映春.京津冀雾霾空间关联特征及其影响因素溢出效应分析[J].中国人口·资源与环境,2017,27(S1):41—44.
- [11] 潘慧峰,王鑫,张书宇.雾霾污染的持续性及其空间溢出效应分析——来自京津冀地区的证据[J].中国软科学,2015(12):134—143.
- [12] 杨莹,王琨,崔晨.哈尔滨市大气污染与气象因素的相关性分析[J].环境工程学报,2015,9(12):5945—5950.
- [13] 李文杰,张时煌,高庆先.京津石三市空气污染指数(API)的时空分布特征及其与气象要素的关系[J].资源科学,2012,34(8):1392—1400.
- [14] 梁伟,杨明,张延伟.城镇化率的提升必然加剧雾霾污染吗——兼论城镇化与雾霾污染的空间溢出效应[J].地理研究,2017,36(10):1947—1958.
- [15] 宋彦李青,刘悦,王竹影.老年人休闲性体力活动城市社区建成环境影响因素灰色关联分析[J].中国老年学杂志,2018,38(15):3777—3779.
- [16] 王浩,高健,李慧.2007—2014年北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化特征[J].环境科学研究,2016,29(6):783—790.
- [17] 杨艳,程捷,田明中.近50年来哈尔滨市沙尘暴发生规律及气象特征研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(11):54—60.
- [18] 朱佳雷,王体健,邓君俊.长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J].环境科学学报,2012,32(12):3045—3055.
- [19] 王冠岚,薛建军,张建忠.2014年京津冀空气污染时空分布特征及主要成因分析[J].气象与环境科学,2016,39(1):34—42.
- [20] 石麟.大兴安岭林区一氧化碳浓度分布特征研究[D].内蒙古农业大学,2008.
- [21] KIM H S, TANS P P, NOVELLI P C. On the regional background levels of carbon monoxide observed in East Asia during 1991—2004[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2008(1):37—44.
- [22] THORSTEINSSON T, GÍSLADÓTTIR G C, BULLARD J E, et al. Dust storm contributions to airborne particulate matter in Reykjavik, Iceland[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(32):5924—5933.
- [23] 侯乐,王帅,刘闯.沈阳市臭氧浓度时空分布与变化特征分析[J].环境保护与循环经济,2017,37(10):48—51.
- [24] 邓绪伟,黄宇,李中强.湖北省大气颗粒物浓度时空变化特征[J].环境工程学报,2017,11(9):5152—5158.
- [25] 朱红蕊,刘赫男,张洪洪.哈尔滨市空气质量特征及其与气象要素的关系[J].气象与环境学报,2019,35(1):53—58.
- [26] 李树岭,花丛,赵玲.哈尔滨秋季一次持续性重污染过程分析[J].气象与环境学报,2019,35(4):25—32.
- [27] 欧娜音,马骏,袁典.持续性逆温天气对哈尔滨市空气质量的影响[J].气象科技,2018,46(6):1266—1273.

[28] 徐荣辉. 城市交通发展对空气质量的影响实证研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2018.

[29] 管奇坤,马晓燕,胡亚男. 电动汽车普及对江苏冬季大气污染影响的数值模拟[J]. 环境科学学报,2018,38(10):3905—3916.

[30] 程钰,刘婷婷,赵云璐. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济社会驱动机理[J]. 经济地理,2019,39(10):183—192.

[31] 陈鑫. 从政府经济学的视角分析哈尔滨市大气污染治理工作[J]. 经济研究导刊,2018(20):97—98.

[32] 胡冰,刘学. 长三角主要城市空气质量状况与经济社会发展的关联性研究[J]. 数学的实践与认识,2018,48(2):20—27.

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Air Pollutants in Heilongjiang Province

WU Yu-fei, YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying

(Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environmental Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions,School of Geographical Science,Harbin Normal University,Harbin 150025,China)

Abstract: Based on monitoring the air pollution data from 2015 to 2018 and the social and economic data of corresponding years in Heilongjiang Province, the temporal and spatial distribution is studied using IDW spatial interpolation method and gray correlation method, the results show that: AQI value and PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO concentration time change trend presents a “U” type change law in the year. Harbin is the center of pollution in Heilongjiang Province, and the pollution degree of southeast urban agglomeration is higher than that of Northwest urban agglomeration. There is a strong correlation between the ownership of civil vehicles and CO, O₃. The growth of per capita GDP, the decrease of energy consumption intensity per unit GDP and the development of urbanization have obvious two-way characteristics. The impact of the development of the primary industry on air quality mainly comes from straw combustion, while the impact of the secondary industry is mainly from fossil fuel combustion and construction dust. The third industry has low energy consumption, less dependence on resources and less pollution.

Key words: air quality; spatiotemporal distribution; pollution emissions; socioeconomic factors; Heilongjiang Province