

邢台和天津大气污染物影响因素的灰色关联分析

王彦林, 赵洪英, 吴利丰

(河北工程大学 管理工程与商学院, 河北 邯郸 056038)

[摘要]空气污染已成为我国最受关注的环境问题。文章利用灰色关联分析模型研究了天津市和邢台市大气污染源与污染物浓度的关系。基于2013年到2016年空气质量数据和社会经济数据,分析邢台和天津的大气污染物来源,邢台和天津大气主要污染源分别为工业、常住人口、农业、汽车保有量。研究发现,工业体系对邢台空气质量影响最大,常住人口对天津市空气质量影响最大。结果表明,影响不同城市空气质量的主要污染源并不一致。因此,不同地区在大气污染治理过程中应根据自身特点采取相应的措施。

[关键词] 空气污染源; 灰色关联度; 产业; 农业; 常住人口

doi: 10.3969/j.issn.1673-9477.2020.01.001

[中图分类号] F062.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1673-9477(2020)01-001-07

自2012年雾霾大规模爆发以来,空气污染已成为中国最受关注的环境问题。环境污染问题不仅影响人们的身体健康和生活^[1],同时也对许多行业产生了影响^[2],考虑到可持续发展的重要性,控制空气污染也成为所有地区的一项主要任务^[3-5]。2013年初,生态与环境部在全国范围内对主要污染物进行了源头分析。相关科学研究也取得了很多成果,但结论并不相同。地理探测模型与斯皮尔曼相关分析相结合的结果表明,除了城市化程度外,社会经济因素与2015年中国的空气质量指数有着显著的正相关关系。影响强度按降序排列为人员占用率、车辆数量、国内生产总值、人口、第二产业在经济中的比重^[6]。工业系统是2013年京津冀地区SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀和CO的最大贡献者^[7],Xie等利用2003-2015年中国283个地级城市的面板数据计算了交通密度对大气雾霾的影响^[8],Lu等分析了PM_{2.5}浓度与影响因素的关系^[9],Zhang等研究表明,当地空气污染物排放、空气流速和附近PM_{2.5}浓度对京津冀地区PM_{2.5}浓度影响较大^[10],Li等利用颗粒物源分析技术建立了空气质量研究模型,得出北京PM_{2.5}的主要来源为居民(27%)和工业(44%)^[11],Han等发现,城市人口规模的上升与不同区域的大都市PM_{2.5}浓度有着不同的联系,中国和印度的大都市人口对PM_{2.5}浓度的潜移默化贡献甚至高于其他国家^[12],Mao等发现,中国的化石燃料工厂是其大气污染物排放的最大来源之一^[13],Zhu等研究表明,外商直接投资对京津冀地区SO₂排放具有显著的正向影响^[14],同时,Xie等也揭示了SO₂税和可再生能源对京津冀地区空气污染物和CO₂

减排的影响^[15],Wang等通过分解分析方法解释了具体的空气污染物排放的转移模式^[16],统计分析表明,资源枯竭和国内生产总值是大气污染的首要因素,但在京津冀地区,气象因素的影响也可能很明显^[17],Yu等发现人口老龄化趋势,产业结构和人均财富对二氧化碳排放量的增长产生了强烈影响,而能源强度对二氧化碳排放量的负面影响较小^[18],宝山地区PM₁₀的可能起源是地面尘埃,运输及其环境和工业活动,而PM_{2.5}主要来源于工业活动,煤炭燃烧和运输及其环境^[19]。

除了工业运输对环境的影响外,城市化的迅速发展也成为空气污染的源头,Wei等计算了京津冀地区城市电网的碳排放量并分析了其排放特征及影响因素^[20],Zhang等通过探索家庭消费的间接能源和CO₂排放,发现间接能源消耗和CO₂排放是家庭消费引起的总能源消费和CO₂排放的主要部分^[21],从1987年到2017年,对中国所有239种颗粒物来源分析研究进行了修订。在中国,用于颗粒物来源分析的最常用方法是受体模型。但是,即使数据来自相同的时间和地点,通过不同的受体模型计算出的主要来源分类和来源贡献也可能会有些差异。许多方法没有单一的解决方案,用于标识源的许多源跟踪程序也不是特定源所独有的^[22]。从以往的文献中可以看出,目前对大气污染影响因素与污染物浓度关系的研究,仍然缺乏对城市之间的宏观分析和对比分析。因此,本文对这一问题进行了分析和研究。由于中国在2013年实施了新的空气质量评估方法,因此影响空气质量因素的指标通常是年度统计数据。

[投稿日期] 2020-01-06

[基金项目] 河北省高层次人才资助项目(编号:A2017003100)成果

[作者简介] 王彦林(1973-),男,河北肥乡人,教授,博士,研究方向:经济学、环境治理。

在空气污染源的研究中,可用的统计数据有限。同时,现有的数据灰度值较大,也存在人为因素。因此,在空气质量影响因素的研究中,很难找到典型的分布,也很难用数理统计的方法进行研究。灰色关联分析法弥补了用数理统计方法进行系统分析的不足,而且,计算量小并且非常方便。

为了研究污染源与污染物浓度之间的关系,选取了天津和邢台两个具有代表性的城市作为研究对象。天津可以反映中国许多港口城市的地位,而邢台可以被视为内陆污染严重城市的代表。针对这两个城市数据的局限性和不确定性,采用灰色关联分析法将大气污染源(工业、农业、常住人口和机动车保有量)与大气污染物进行关联。根据分析结果,确定了污染源的影响程度。排序结果表明,两个城市不同污染源对大气污染物浓度的影响存在显著差异。因此,我们可以得出结论,不同城市的空气污染源对空气污染物浓度的影响程度不同。在大气污染治理过程中,不应针对每个城市采取类似的治理措施,而是根据各城市污染源对大气污染物的影响程度排序,有针对性地进行治理。

一、邢台、天津地区大气污染物概况

(一) 邢台和天津的地理特征

邢台位于河北省的南部。它的西部毗邻太行山和山西省。东界是京杭大运河和山东省。它的地形复杂多样。高度差非常大。从西到东,山脉、丘陵和平原排成一排。三者之比是2:1:7。最高海拔1822米,最低海拔20米。其中,邢台市位于太行山沟槽区,平均海拔仅60米,比南北相邻的石家庄和邯郸低20米。

天津位于华北平原,是中国四大直辖市之一^[23],天津东临渤海,北临燕山。它位于海河下游,横跨海河两岸。它南北长189公里,东西宽117公里。陆地边界1137公里,海岸线153公里。它是中国北方最大的沿海开放城市。邢台和天津都位于京津冀区域。

(二) 邢台市和天津市大气污染的主要来源

京津冀地区是中国发展的重要地区。工业是京津冀地区的支柱产业。随着工业的快速发展,工业废气对大气环境的影响越来越大。工业污染对大气的影响体现在许多方面。SO₂主要由电力和热能发电机、供应行业、非金属矿产品行业、黑金属冶炼和

压延行业生产。废气主要由造纸工业、化工原料、化工产品制造业和纺织工业产生。颗粒物的来源更加多样化。因此,产业体系是影响京津冀地区大气污染的重要因素之一。

农业是社会经济生活最基本的组成部分,在国民经济中具有多种功能。农业污染的主要原因是化学药剂的广泛使用和农业及动物粪便的排放。化学药品主要包括化肥、杀虫剂、促生长药物和水果增强剂。农业废弃物又称农业生产废弃物,农业是东北地区经济发展的重要组成部分。随着农业的快速发展,农业对大气环境的影响已成为不可避免的。

随着人口密度的不断增加和生活方式的改变,城市生活在空气污染中扮演着越来越重要的角色,主要包括垃圾焚烧、燃气、油烟等。京津冀地区的人口密度一直处于全国前列。因此,常住人口对空气污染的影响不容忽视。

机动车尾气是城市空气污染的重要组成部分,主要含有铅、氮氧化物、一氧化碳和碳氢化合物。由于汽车尾气的复杂性和所涉及的复杂的化学反应,最终会产生多达100种有害成分。目前,京津冀地区的车辆数量每年都在快速增长。这对该地区的空气污染产生了很大的压力,机动车尾气也是大气污染源。

综上所述,根据上述分析,空气污染的来源分为四个部分:工业,农业,常住人口和机动车保有量。各行业的主要污染源见表1。

表1 各行业主要污染源

	污染源
工业	动力和热能发电机; 供电行业; 非金属矿产品工业; 黑金属冶炼和压延行业; 造纸行业; 化工原料; 化工产品; 制造(工)业; 纺织业……
农业	化学肥料; 杀虫剂; 促生长药物; 农业废物……
常住人口	垃圾焚烧; 天然气; 油烟……
机动车保有量	汽车尾气排放

二、数据与方法

(一) 数据来源与处理

在讨论了空气污染的影响因素后，这里的工业增加值代表了产业发展水平，农业产值代表了农业，常住人口代表了人类活动的影响，机动车尾气通过使用机动车数量来测量。目前，污染物浓度监测数据每小时更新一次，社会经济指标是年度数据，因此，将污染物浓度数据转化为年平均。从 2013 年 1 月 1 日起，中国新的空气质量标准开始实施。根据新的标准，测量了六种常见污染物 (PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃ 和 CO) 的浓度来计算空气质量指数。邢台市的空气污染数据来源于 <http://www.xtshbj.gov.cn/>，邢台市的社会经济数据来源于 <http://www.xtstj.gov.cn/>。天津市的大气污染数据来源于 <http://hjbh.tj.gov.cn/>，天津市社会经济数据来源于 <http://stats.tj.gov.cn/>。2013-2016 年邢台市的空气污染数据如表 2 所示，邢台市的社会经济数据如表 3 所示；2013-2016 年天津市的空气污染数据如表 4 所示，天津市的社会经济数据如表 5 所示。

表 2 邢台市的空气污染情况

指标	2013	2014	2015	2016
PM _{2.5} (ug/m ³)	160	131	101	87
PM ₁₀ (ug/m ³)	294	235	172	144
SO ₂ (ug/m ³)	113	75	60	52
NO ₂ (ug/m ³)	69	62	60	61
CO (mg/m ³)	2.2	1.7	1.8	1.8
8 小时 O ₃ (ug/m ³)	96	82	77	83

表 3 邢台市的社会经济数据

指标	2013	2014	2015	2016
工业增加值(亿元)	775	765	712	818
农业产值(亿元)	461	496	491	478
常住人口(万人)	722	726	729	732
车辆数量(万辆)	54	64	73	85

表 4 天津市的空气污染情况

指标	2013	2014	2015	2016
PM _{2.5} (ug/m ³)	96	83	70	69
PM ₁₀ (ug/m ³)	150	133	116	103
SO ₂ (ug/m ³)	59	49	29	21
NO ₂ (ug/m ³)	54	54	42	48
CO (mg/m ³)	3.7	2.9	3.1	2.7
8 小时 O ₃ (ug/m ³)	151	157	142	157

表 5 天津市的社会经济数据

指标	2013	2014	2015	2016
工业增加值(亿元)	6679	7083	6981	7239
农业产值(亿元)	412	442	467	494
常住人口(万人)	1472	1517	1547	1562
车辆数量(万辆)	224	235	235	234

(二) 方法

由于我国统计部门在 2013 年之前没有公布完整的污染物浓度信息，样本量受到限制，传统的统计模型需要大量的数据，因此不适合在本文中进行研究。灰色模型一直是解决小样本不确定性问题的合适方法^[24]，它可以更好地应用于寻找系统的演化规律，从而建立关系分析模型。由于影响污染物负荷的因素很多，如经济结构、气象变化、政策变化等，它可以被认为是一个灰色系统，因此，它可以用灰色关联分析来描述。灰色关联分析模型研究系统中一个主要激励因素与其他因素之间的不确定关系^[25]，灰色关联分析的步骤如下：

步骤 1: $Y_0 = (y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(n))$ 是主序列，

$Y_1 = (y_1(1), y_1(2), \dots, y_1(n))$, ...,

$Y_m = (y_m(1), y_m(2), \dots, y_m(n))$ 为参考序列，这些数据可以通过式 (1) 进行标准化

$$x_i(j) = \frac{y_i(j)}{y_i(1)}, j = 1, 2, \dots, n, i = 0, 1, \dots, m \quad (1)$$

步骤 2: 灰色关联系数可由式 (2) 计算得出

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

其中 $\xi \in [0, 1]$ 是区分系数，大多数的参考文献假设其数值取 0.5^[19]。

步骤 3: 灰色关联度的计算方法如下

$$\gamma(Y_0, Y_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (3)$$

$\gamma(Y_0, Y_i)$ 是 Y_0 和 Y_i 的灰色关联度。灰色关联度越大，表示参考序列 Y_i 对主序列 Y_0 的影响越大。

三、邢台、天津空气污染源研究

(一) 邢台市灰色关联度分析结果

以邢台市 PM_{2.5} 浓度与污染源的灰色关联度为例，灰色关联度分析的步骤如下：

主序列是 $Y_0 = (160, 131, 101, 87)$ 以及参考序列是

$Y_1 = (774.9, 764.5, 711.6, 818.3)$,

$$Y_2 = (460.8, 496.4, 491.4, 477.7),$$

$$Y_3 = (721.69, 725.63, 729.44, 731.99),$$

$$Y_4 = (54.2, 63.65, 72.88, 85.25).$$

由步骤 1-3 得,

$$\gamma(Y_0, Y_1) = 0.7243, \gamma(Y_0, Y_2) = 0.6795,$$

$$\gamma(Y_0, Y_3) = 0.7079, \gamma(Y_0, Y_4) = 0.5859.$$

$\gamma(Y_0, Y_1)$ 表示 $PM_{2.5}$ 浓度与工业增加值的灰色关联度为 0.7243, $\gamma(Y_0, Y_2)$ 表示 $PM_{2.5}$ 浓度与农业产值的灰色关联度为 0.6795, $\gamma(Y_0, Y_3)$ 表示 $PM_{2.5}$ 浓度与常住人口的灰色关联度为 0.7079, $\gamma(Y_0, Y_4)$ 表示 $PM_{2.5}$ 浓度与机动车数量的灰色关联度为 0.5859。

$\gamma(Y_0, Y_1) > \gamma(Y_0, Y_3) > \gamma(Y_0, Y_2) > \gamma(Y_0, Y_4)$ 意味着工业对 $PM_{2.5}$ 年浓度的影响最大, 常住人口对 $PM_{2.5}$ 年浓度的影响大于农业, 汽车人口对 $PM_{2.5}$ 年浓度的影响最小。这与最近的研究结果一致(邢台地区工业、家庭、交通和农业对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献分别为 56.8%、25.3%、3.6%和 12.9%)^[26], 因此, 灰色关联分析适合对空气污染源进行排序。同样, 邢台市空气污染数据与其他社会经济数据的灰色关联度如表 6 所示。

表 6 邢台市空气污染数据与社会经济数据的灰色关联度

	工业增加值	农业产值	常住人口	机动车保有量
$PM_{2.5}$	0.72	1	0.68	3
PM_{10}	0.71	1	0.67	3
SO_2	0.68	1	0.64	3
NO_2	0.83	1	0.75	3
CO	0.76	1	0.70	3
O_3	0.78	1	0.71	3

从表 6 中能够明显看出, 工业增加值对六种常见污染物年浓度的影响最大。常住人口对六种常见污染物年浓度的影响大于农业总产值, 车辆数量的影响最小, 这些结果与实际情况是一致的。邢台自 20 世纪 50 年代以来一直是老工业基地。高耗能、高排放、低资源利用率的钢铁、煤化工、电力、建材等行业已成为邢台的支柱产业。当前, 邢台产业正处于经济转型升级阶段, 但受传统老工业的影响, 效果不是很明显。常住人口在影响因素中排名第二, 因为 2015 年邢台的平均人口密度是河北省 11 个城市中最高的。邢台的平均人口密度与英国的伦敦和俄罗斯的莫斯科相近, 高于德国的柏林和美国的华盛顿(图 1)^[27]。

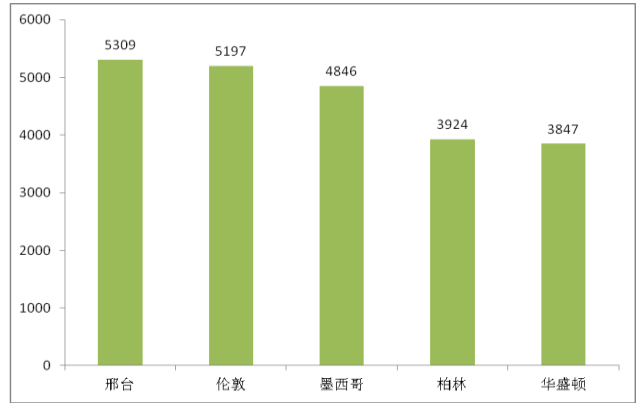


图 1 邢台与世界几个主要城市的人口密度比较(人/平方公里)

从计算结果可以看出, 邢台农业对大气污染物浓度的影响低于工业。邢台虽然是一个农业大城市, 但随着农业产业化发展, 一些落后的生产方式造成的污染已经减少。这并不意味着它应该忽视对空气污染的影响, 相反, 它必须不断地、动态地观察农业与污染物浓度之间的关系。

结果表明, 机动车数量在影响因素中居第四位。造成这一现象的原因是, 虽然邢台的汽车保有量持续增长, 但与许多城市相比还是有很大差距。但在影响机理方面, 车辆数量的增加和车流量的增加会导致车辆尾气排放量的增加。与欧美发达国家相比, 我国汽车尾气排放标准较低, 燃料质量存在档次低、质量不稳定、硫含量高等问题。因此, 缓解大气污染防治的控制策略不能忽视车辆数量。

(二) 天津市灰色关联度分析结果

根据 4.1 中的计算过程, 类似地, 天津市空气污染物的数据与社会经济数据的灰色关联度, 如表 7 所示。

表 7 天津市空气污染数据与社会经济数据的灰色关联度

	工业增加值	农业产值	常住人口	机动车保有量
$PM_{2.5}$	0.59	3	0.56	4
PM_{10}	0.62	3	0.58	4
SO_2	0.61	3	0.59	4
NO_2	0.66	3	0.60	4
CO	0.59	3	0.56	4
O_3	0.75	3	0.62	4

表 7 的结果与近期的一些科学研究结果基本一致(天津地区扬尘、交通和工业对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献分别为 30%、20%和 17%, 天津地区扬尘、交通和工业对 PM_{10} 浓度的贡献分别为 42%、14%和 14%)^[28], 综上所述, 可以得出结论, 常住人口与 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 的关系最为密切。这一现象主要是由于近年来天津经济的快速扩张, 提高了城市的竞争力和吸引力。流动人口规模不断扩大。从生产和生活两个方面来

看，人们的污染物排放量增加，从而加剧了空气污染的情况。此外，Gao 等发现，与天津其他污染源相比，土壤和建筑扬尘排放能力对 $PM_{2.5}$ 污染有显著影响^[29]。同时，一个地方的人口越多，其对环境的污染就会越大。因此，灰色关联分析的结果与文献一致。

结果表明，汽车尾气排放对天津市 CO 和 O_3 的影响最大。交通系统对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 的影响仅次于常住人口。一种说法是，天津是中国北方不可或缺或的港口城市，因此它的运输量巨大^[30]，另一个原因是，近年来，天津的机动车数量一直位居全国前几名。它大大增加了汽车污染的排放。此外，Guo 等发现，从 2011 年到 2020 年，天津、河北和北京的汽车保有量增长率分别为 13%、11%和 7%^[31]，因此，采取常住人口控制策略来缓解空气污染是必要的。

然而，产业体系对中国大部分地区的空气污染有显著影响，但对天津空气质量的影响不是很明显。这主要是近年来天津产业结构转型升级的结果。产业结构的核心正在由经济的第二产业向第三产业转变。同时，第二产业内部结构的升级方向是智能化、绿色化。从而降低了产业体系对天津市空气质量的影响。在天津产业结构调整的过程中，不仅第二产业的比重在下降，第一产业的比重也在逐年下降。更重要的是，吴等发现在天津的三个产业结构从 2005 年到 2014 年，农业国内生产总值（GDP）的比例逐渐减少，有一个下降的趋势；第二产业的比重开始下降，在 2009 年之后第三产业的比例逐渐增加^[32]，因此，农业系统对天津空气质量的影响微乎其微。

四、结论与建议

（一）结论

本文通过灰色关联度分析，对邢台和天津地区大气污染物的影响因素进行了排序。如表 6 和表 7 所示，结果与实际情况一致。灰色关联分析模型非常适合解决本文的问题。建议将灰色关联分析方法应用于其他地区大气污染的源头识别。近年来，空气污染越来越受到人们的关注。虽然在政府和人们的共同努力下，空气质量得到了改善，但现在似乎成了瓶颈。根据计算结果可以发现，各城市空气污染物的主要来源不一定相同。如工业系统和常住人口是影响邢台空气污染物浓度的两个最主要因素，而交通系统和常住人口是影响天津空气污染物浓度的两个最主要因素。这并不是说其他因素可以忽略，只是在治理过程中，影响的关键因素应该得到重点处理，而影响较小的因素应该得到适当的处理。结

论表明，大气污染防治应根据不同情况采取针对性措施。目前，大多数政府采取类似的措施来控制空气污染。尽管在治理的早期阶段存在一些影响，但随着治理过程的推进，治理的效果越来越低。这是由于政府没有控制最重要的空气污染源。本文以邢台市和天津市为例，采用灰色关联分析模型对这两个城市的主要空气污染源进行了分析。给出了不同污染物浓度的影响因子排序。为地方政府治理大气污染提供理论指导。

（二）建议

根据表 6 的计算结果和上述分析，对邢台空气污染的具体控制策略提出了具体建议。

1. 由于工业体系对邢台空气污染物浓度影响最大，所以在大气污染控制方面，政府必须以工业为主。以国家政策为导向，加快供给侧结构性改革步伐。政府要淘汰落后产能，继续化解钢铁、煤炭、石化、建材等传统行业的过剩产能。

2. 邢台虽然不是像北京、上海那样的一线城市，但人口密度却异常之高。因此，政府不仅可以关注工业系统对空气污染的处理，还可以考虑人口密度的问题。为了解决这个问题，政府需要了解该地区人口密度过高的根源。地方政府可以借鉴其他地区的治理经验，但不能完全照搬。根据他们的实际情况，有针对性地解决这个问题。

3. 虽然农业和交通系统对空气污染的影响小于工业和人口，但政府不能忽视前者的影响。在治理过程中，政府可以侧重于后者。

根据表 7 的计算结果和上述分析，给出了天津市大气污染控制的具体建议。

第一，人口因素居首位。这表明，以工业和交通系统为重点的政府应该把注意力转向人口因素。目前，天津的人口增长率非常快。政府必须意识到如何解决人口增长的负面影响。

第二，由于天津城市化的快速发展，机动车数量也在高速增长。为了解决交通系统造成的空气污染，政府不应该仅仅采取低效的交通限制方式，因为简单的交通限制并不能给空气污染带来多大的改善。相反，它会给人民带来极大的不便，引起人民极大的不满。面对这个问题，政府必须从源头开始。汽车尾气排放标准低，燃油质量也存在档次低的问题。只有解决了这些问题，交通系统带来的空气污染才能得到有效的解决。

第三，天津市工农业对大气污染的影响小于人

口和交通系统。由此可见,近年来,天津市在产业转型升级方面取得了很大的成效。建议天津市继续加强产业结构升级,大力发展新兴产业,减少高排放、低收益、高污染产业。

本文通过与空气污染物浓度的相关关系,分析了邢台和天津大气污染的影响因素。结果由大到小排序表明,邢台市和天津市空气污染源对大气污染物浓度的影响不符合预期,与政府的治理方案也存在差异。因此,两市政府有必要根据自身的产业结构特点,从复杂的环境问题中审视全局,把握主要矛盾。

参考文献:

- [1]Yuan Li, Dabo Guan, Shu Tao, et al. A review of air pollution impact on subjective well-being: Survey versus visual psychophysics[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184:959-968.
- [2]Amir Mohammad Fathollahi-Fard, Mostafa Hajiaghaei-Keshteli. A stochastic multi-objective model for a closed-loop supply chain with environmental considerations[J]. *Applied Soft Computing*, 2018, 69: 232-249.
- [3]Mostafa Hajiaghaei-Keshteli, Amir Mohammad Fathollahi-Fard. Sustainable closed-loop supply chain network design with discount supposition[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3369-5>.
- [4]Bruna Mota, Maria Isabel Gomes, Ana Carvalho, et al. Sustainable supply chains: an integrated modeling approach under uncertainty[J]. *Omega*, 2018, 77:32-57.
- [5]A. Samadi, N. Mehranfar, A. M. Fathollahi Fard, et al. Heuristic-based metaheuristic to address a sustainable supply chain network design problem[J]. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 2018, 35(2):102-117.
- [6]Dongsheng Zhan, Mei-Po Kwan, Wenzhong Zhang, et al. The driving factors of air quality index in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197(1):1342-1351.
- [7]Ji Qi, Bo Zheng, Meng Li, et al. A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the BTH region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2107, 170: 156-168.
- [8]Rui Xie, Dihan Wei, Feng Han et al. The effect of traffic density on smog pollution: Evidence from Chinese cities[J]. *Technological Forecasting & Social Change*, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.04.023>.
- [9]Debin Lu, Jianhua Xu, Dongyang Yang, et al. Spatio-temporal variation and influence factors of PM_{2.5} concentrations in China from 1998 to 2014[J]. *Atmospheric Pollution Research*. 2017, 8(6):1151-1159.
- [10]Xiaoling Zhang, Minjun Shi, Yuanjie Li, et al. Correlating PM_{2.5} concentrations with air pollutant emissions: a longitudinal study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 179:103-113.
- [11]Xin Li, Qiang Zhang, Yang Zhang et al. Source contributions of urban PM_{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei region: Changes between 2006 and 2013 and relative impacts of emissions and meteorology[J]. *Atmospheric Environment*. 2015, 123:229-239.
- [12]Lijian Han, Weiqi Zhou, Steward T.A. Pickett et al. An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate (PM_{2.5}) concentration[J]. *Environmental Pollution*. 2016, 208:96-101.
- [13]X. Q. Mao, A. Zeng, T. Hu, et al. Co-control of local air pollutants and CO₂ from the Chinese coal-fired power industry[J]. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 67:220-227.
- [14]Lin Zhu, Qingmei Gan, Yan Liu, et al. The impact of foreign direct investment on SO₂ emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei region: a spatial econometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166:189-196.
- [15]Yang Xie, Hancheng Dai, Huijuan Dong. Impacts of SO₂ taxations and renewable energy development on CO₂, NO_x and SO₂ emissions in Jing-Jin-Ji region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 171:1386-1395.
- [16]Yuan Wang, Huiwen Liu, Guozhu Mao, et al. Inter-regional and sectoral linkage analysis of air pollution in Beijing - Tianjin - Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration of China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 1436-1444.
- [17]Yupeng Liu, Jianguo Wu, Deyong Yu, et al. Understanding the patterns and drivers of air pollution on multiple time Scales: the case of

- Northern China[J], *Environmental Management*, 2018, 61:1048-1061.
- [18] Yang Yu, Yu-ru Deng, Fei-fan Chen. Impact of population aging and industrial structure on CO₂ emissions and emissions trend prediction in China[J], *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9:446-454.
- [19] Jun Wang, Zimei Hu, Yuanyuan Chen, et al. Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J], *Atmospheric Environment*, 2013, 68:221-229.
- [20] Wendong Wei, Xibo Wang, He Zhu, et al. Carbon emissions of urban power grid in Jing-Jin-Ji region: characteristics and influential factors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 168:428-440.
- [21] Yue Jun Zhang, Xiao Juan Bian, Weiping Tan, et al. The indirect energy consumption and CO₂ emission caused by household consumption in China: an analysis based on the input-output method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163:69-83.
- [22] Yanhong Zhu, Lin Huang, Jingyi Li, et al. Sources of particulate matter in China: insights from source apportionment studies published in 1987-2017[J]. *Environment International*, 2018, 115:343-357.
- [23] Yanan Guan, Guanyi Chen, Zhanjun Cheng, et al. Air pollutant emissions from straw open burning: a case study in Tianjin[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 171:155-164.
- [24] Fan, W.Y., Wang, L., Wang X., He, F.N. Grey relational analysis of environment interference factors and control measures on endemic status of schistosomiasis in Poyang Lake Eco-economic Region[J]. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2016, 28(6): 635- 643.
- [25] R. Rajesh, V. Ravi. Supplier selection in resilient supply chains: a grey relational analysis approach[J], *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86:343-359
- [26] Wang L., Wei Z., Wei W., Fu J.S., Meng C., Ma S. Source apportionment of PM_{2.5} in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model[J], *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 723-736.
- [27] http://www.sohu.com/a/148258277_793346
- [28] http://dqhj.mep.gov.cn/dqhzjz1/dqklwyjx/201709/t20170915_421693.shtml.
- [29] Jiajia Gao, Kun Wang, Yong Wang, et al. Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM_{2.5} as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J], *Environmental Pollution*, 2018, 233:714- 724.
- [30] Xue Liu, Geng Li, Shoufeng Ma, et al. Urban road traffic scale analysis from the perspective of atmospheric environmental indicators in Tianjin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 82:392-398.
- [31] Xiurui Guo, Liwei Fu, Muse Ji, et al. Scenario analysis to vehicular emission reduction in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J], *Environmental Pollution*, 2016, 216:470-479.
- [32] 吴爱东, 李奕男. 京津冀协同发展背景下天津产业结构升级空间与路径分析 [J]. *现代城市研究*, 2017 (02):41-46+53.

[责任编辑 王云江]

Grey relational analysis of affecting factors for air pollutant in Xingtai and Tianjin

WANG Yan-lin, ZHAO Hong-ying, WU Li-feng

(College of Management Engineering and Business, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Air pollution has become the most concerned environmental problem in China. In this paper, the relationship between air pollution sources and pollutant concentration in Tianjin and Xingtai is studied by grey relational analysis model. It is found that the industrial system has the greatest impact on the air quality of Xingtai, while the resident population has the greatest impact on the air quality of Tianjin. The results show that the main pollution sources affecting air quality in different cities are not consistent. Therefore, different regions should take measures according to their own characteristics in the process of air pollution control.

Key Word: grey relational degree; air pollution source; industry; agriculture; resident population