

山东省工业污染排放趋势预测及影响因素分析

朱文晶¹, 刘冠权^{1,2}, 唐勇¹

(1. 青岛理工大学管理工程学院, 山东青岛 266525; 2. 山东省高校智慧城市建设管理研究中心, 山东青岛 266525)

摘要: 研究山东省工业污染排放的变化趋势和影响因素对促进工业绿色发展和环境保护具有重要意义。文章基于山东省2012—2021年的工业废水、工业SO₂排放量以及工业固体废物产生量的数据, 采用灰色马尔可夫模型及灰色关联法对山东省工业污染排放的变化趋势以及影响因素进行分析。结果表明: (1) 山东省工业废水和工业SO₂的排放量在未来五年内仍呈下降趋势, 但工业固体废物的产生量呈缓慢增长态势; (2) 各影响因素对山东省工业污染排放均有显著影响, 其中产业结构和能源强度是影响工业废水及工业SO₂排放的主要因素, 经济发展水平对工业固体废物产生量影响最大。基于研究结果, 文章提出大力发展新能源、加大技术投入、重点关注工业固体废物的处理等建议。

关键词: 工业污染; 灰色关联分析; 灰色马尔可夫模型; 趋势预测; 影响因素

中图分类号: X322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-9659(2025)01-0018-08

工业作为经济发展的重要支柱, 在推动经济迅猛增长的同时, 不可避免地带来大量污染。《“十四五”工业绿色发展规划》提出, 在“十四五”期间需大力推动工业节能减排, 切实降低污染排放强度, 进而促进工业的绿色转型升级。山东省是我国重要的工业大省, 其工业结构和产品构成侧重于高投入、高消耗的重化工业领域, 面临着严重的工业污染问题。因此, 探究山东省工业污染排放的变化趋势及影响因素有助于工业污染防治策略的精准实施, 促进工业绿色发展。

工业污染排放的影响因素研究以及对工业污染物排放量的预测已经引起国内外学者的广泛关注。学者们在研究工业污染排放状况时, 通常在废水、废气和固体废物方面选择一种或多种污染物来衡量工业污染排放水平^[1-2]。在研究影响因素方面, 李芸邑等人研究发现, 经济增长是促使长江经济带工业污染排放的主要因素^[3]。李学迪等人以中国77个城市为研究对象, 探究影响工业污染的因素^[4], 结果表明, 人口规模、城市化率对工业污染均有显著的正向影响, 改善能源消费结构可以降低工业污染。Wang等人研究发现, 人均GDP、人口密度、产业结构等因素与长江经济带工业污染排放之间存在正相关关系^[5]。Zhang等人通过对中国工业污染强度的驱动因素进行综合研究发现, 经济发展、煤炭能源消耗及环境管制等对工业污染强度均有影响^[6]。在预测工业污染排放方面, 学者们通常对单一工业污染物的排放量进行预测。刘炳春等人建立PCA-SVR模型对我国工业固体废物产生量进行预测发现, 工业固体废物产生量呈增长趋势且与工业化进程密切相关^[7]。在预测方法上, 灰色GM(1, 1)预测模型对各类预测问题适应性较强, 能够处理非线性、不确定性等复杂情况。因此, 许多学者在对工业污染物排放量进行预测时, 通常采用改进的灰色预测模型或组合预测模型。马啸等人通过改进的灰色GM(1, 1)模型对三峡库区的工业废水排放量进行预测^[8]。李小芳等人利用灰色马尔可夫模型预测天津市的工业废水排放量^[9]。张汛等人基于灰色GM(1, 1)模型对工业废水排放总量进行预测, 并利用马尔可夫模型进行修正, 体现了该组合预测模型的精确性^[10]。鉴于此, 文章选择工业废水、工业SO₂排放量以及工业固体废物产生量来表征山东省工业污染排放水平, 通过灰色马尔可夫模型预测山东省未来三种工业污染物的排放状况, 并运用灰色关联法对影响工业污染排放的因素进行分析, 以期对山东省工业污染的改善提出相应对策建议, 促进山东省工业绿色发展和环境保护。

[收稿日期] 2024-03-06

[修回日期] 2024-04-02

[基金项目] 山东省重点研发计划(软科学项目)一般项目(2019RKB01459); 青岛理工大学校级教改面上项目(W2022-057)。

[作者简介] 朱文晶(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事生产系统工程、绿色经济与可持续发展方面研究, E-mail: zwj3664@163.com。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

本研究相关工业污染物排放量数据以及影响因素各项指标数据均来源于2013—2022年《山东省统计年鉴》。

1.2 研究方法

1.2.1 灰色关联分析

灰色关联分析由著名学者邓聚龙教授等人提出,用于衡量因素间关联程度^[11]。其具体步骤如下:

(1)确定分析序列:将各工业污染物排放量构成的原始数据序列 Y 作为参考序列,各项影响因素的原始数据序列作为比较序列 X 。

(2)无量纲化:鉴于各影响因素量纲的多样性以及数值间存在显著差异,采用均值化对原始数据进行无量纲化处理。具体的计算公式如下

$$x_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i}, k = 1, 2, \dots, n; i = 0, 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

(3)计算关联系数

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_k \min_i |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_k \max_i |y(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中, ρ 作为分辨系数,其取值范围一般在(0,1)之间,通常取0.5。

(4)计算关联度

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \zeta_i(k) \quad (3)$$

1.2.2 灰色马尔可夫预测模型

(1)GM(1,1)预测:GM(1,1)预测模型是一种基于灰色系统理论的预测方法,具有操作简单且精度高、适用范围广等优点^[12]。它在工业、经济等领域广泛应用,主要计算过程如下:

记原始序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$,其中 n 为10。对原始数据进行累加,得到一次累加生成序列 $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$,其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$, $k = 1, 2, \dots, n$ 。 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列为 $Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)\}$ 。因此,GM(1,1)的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dx} + ax^{(1)}(t) = b \quad (4)$$

解得 $x^{(1)}(t) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-a(t-1)} + \frac{b}{a}$,其中, a 为发展系数, b 为灰作用量。

$$\text{引入矩阵表达式: } u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}$$

则GM(1,1)模型可表示为 $Y = Bu$,利用最小二乘法求解 a 、 b 值

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (5)$$

可得累加预测值

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a}, k = 1, 2, \dots, n-1 \quad (6)$$

将累加预测值还原得到三种工业污染物的预测值 $\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$ 。

(2)马尔可夫修正:当原始数据变化波动较大时,学者们通常结合马尔可夫模型进行组合预测,能够显

著提升预测的精度^[13-14]。马尔可夫修正模型是一种通过状态转移概率进行修正的方法,主要依据当前状态与未来状态之间的关联性,对预测数值进行适当调整,以提高预测结果的准确性。具体包括以下几个步骤:

①划分状态:状态的划分是指将系统的状态空间划分为互不相交的子集,目的是简化问题,降低模型计算难度并提高预测准确性。通过GM(1,1)预测模型得到工业污染物排放量预测值,并计算预测值与实际值之间的相对误差,计算公式如下所示

$$\varepsilon(k) = \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)}, k = 1, 2, \dots, 10 \quad (7)$$

根据相对误差的大小进行状态分类。为了确保状态区间的划分更加科学合理,采用系统聚类法进行状态划分。系统聚类法是一种具有广泛适用性的聚类算法,其优点在于无需事先指定聚类数量,且不受数据结构限制^[15]。将相对误差视为独立样本进行分类,利用离差平方法计算类间距离,从而得出马尔可夫预测所需的状态。

②构建转移概率矩阵:根据状态划分结果,将各状态区间记为 $E_i = [L_i, U_i]$,统计各误差数据所处的状态 E_i 出现的次数,记为 M_i 。 $P_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_j}$ 为状态 i 转移到状态 j 的一步转移概率,其中 $P_{ij} \geq 0, \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$,即转移概率矩阵的每一行和为1。由此建立一阶转移概率矩阵如下所示

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

③计算预测值:利用灰色马尔可夫状态转移概率矩阵可以预测未来的状态分布。计算公式如下所示

$$\hat{y}^{(0)}(k) = \frac{\hat{x}^{(0)}(k)}{1 \pm \frac{1}{2}(L_i + U_i)} \quad (9)$$

其中, L_i 和 U_i 分别为状态区间的下限值和上限值。若预测值大于实际值,则符号为正,相反则取负。

(3)精度检验:当使用灰色马尔可夫模型进行预测时,后验差检验可用于评估模型的精度和可靠性。通过分析实际值与预测值之间的差异,判断模型的拟合效果。方差比 C 和小概率误差 p 是后验差检验的两个重要指标。

首先,通过得到的预测值与实际值进行计算得到残差序列

$$e(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad (10)$$

设原始序列 $X^{(0)}$ 和残差序列 E 的均方差分别为 S_1, S_2 ,则

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x^{(0)}(k) - \bar{x})^2} \quad (11)$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (e(k) - \bar{e})^2} \quad (12)$$

其中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k), \bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e(k)$. 后验差比值为: $C = \frac{S_2}{S_1}$.

小误差概率为

$$p = P\{|e(k) - \bar{e}| < 0.6745 S_1\} \quad (13)$$

通过对比方差比值 C 和小误差概率 p 的数值大小,可以评估模型的精度,具体的精度等级如表1所示。

表1 精度预测等级

模型精度	优秀	合格	勉强	不合格
p	> 0.95	> 0.80	> 0.70	≤ 0.70

C	≤ 0.35	≤ 0.50	≤ 0.65	≥ 0.65
-----	-------------	-------------	-------------	-------------

2 结果分析

2.1 山东省工业污染排放预测

2.1.1 灰色马尔可夫预测

通过对山东省工业污染物排放量建立的原始序列进行累加,得到累加生成序列,基于式(4)~(6)得到三种工业污染物的预测值。由式(7)计算得到相对误差值,采用系统聚类法进行聚类分析,结果如表2所示。

表2 相对误差状态划分

年份	工业废水		工业SO ₂		工业固废	
	相对误差(%)	状态	相对误差(%)	状态	相对误差(%)	状态
2013年	2.54	2	12.94	2	14.06	3
2014年	1.42	1	10.56	2	12.91	2
2015年	8.61	4	25.88	3	14.52	3
2016年	3.40	3	1.50	1	10.01	1
2017年	8.54	4	38.27	4	12.94	2
2018年	1.85	2	26.33	3	13.53	2
2019年	2.03	2	15.38	2	15.57	4
2020年	1.08	1	35.49	4	13.53	2
2021年	3.80	3	23.27	3	17.59	4

以工业废水为例,根据聚类结果可得状态划分区间: $E_1 = [1, 1.5]$; $E_2 = (1.5, 3]$; $E_3 = (3, 5]$; $E_4 = (5, 9]$ 。由各年份相对误差所处的状态可知: $M_1 = 2, M_2 = 3, M_3 = 2, M_4 = 2$ 。根据 P_{ij} 的计算公式可得一阶状态转移矩阵

$$P^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \\ 2/3 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0 \end{bmatrix}$$

由于 $P^{(1)}$ 中部分行元素的最大值无法确定,因此需要通过计算3步转移概率矩阵来确定每行元素的最大值,同理可得工业SO₂和工业固废的预测值。由灰色马尔可夫预测模型得到预测值与实际值对比如图1所示。

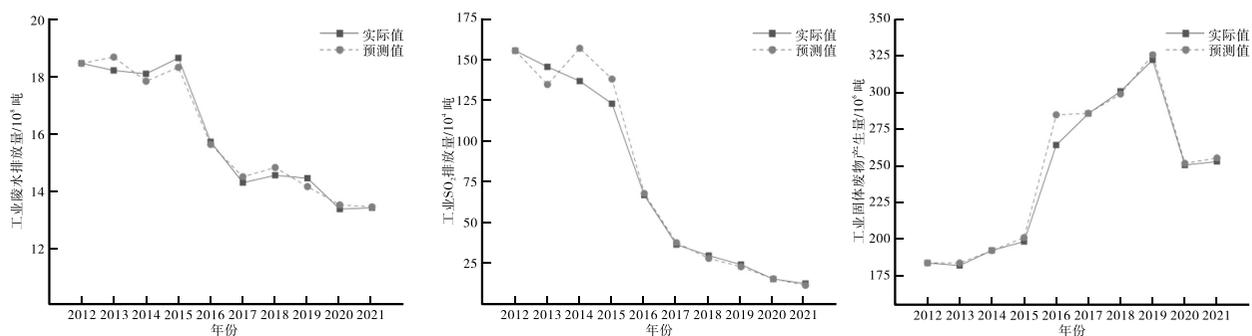


图1 灰色马尔可夫模型预测结果

2.1.2 模型精度检验

利用式(10)~(13)对灰色马尔可夫模型预测结果进行精度检验,得到方差比 C 和小概率误差 p 的值(表3)。

由表3可以得出,采用灰色马尔可夫模型对山东省三种工业污染物排放进行预测时,该模型表现出较高的精度等级,经过模型验证后证实其预测效果较好。

表3 模型精度检验结果

预测模型	p	C	精度等级	
灰色马尔可夫模型	工业废水排放量预测	1	0.12	优秀
	工业SO ₂ 排放量预测	1	0.15	优秀
	工业固体废物产生量预测	1	0.12	优秀

2.1.3 未来五年工业污染排放量预测

根据灰色马尔可夫模型预测山东省未来五年的工业废水、工业SO₂的排放量以及工业固体废物的产生量(表4)。

表4 山东省未来五年三种工业污染物预测值

年份	工业废水排放量(万吨)	工业SO ₂ 排放量(吨)	工业固体废物产生量(万吨)
2022年	128118	85688	26637
2023年	122379	63801	27858
2024年	116897	47505	29136
2025年	111660	35372	30472
2026年	106658	26337	31870

由表4可知,山东省未来五年工业废水和工业SO₂排放量呈下降趋势,但工业废水降幅相对较小,而工业固体废物产生量则呈缓慢上升趋势。这一结果反映了山东省在环保治理方面所取得的成效,同时也显示出当前存在的问题。具体来看,工业废水和工业SO₂排放量自2015年呈下降趋势,并且在未来五年仍将保持。这得益于山东省近年来提出的《水污染防治计划》《大气污染防治计划》等治理政策。在工业SO₂排放方面,通过深入推进火电、钢铁、石化等重点行业SO₂的治理,降低工业SO₂的排放水平。在工业废水方面,通过淘汰落后产能,加强对造纸、农副食品加工等重点行业的废水污染防治,提升工业企业的污染治理水平。然而,相较于对SO₂排放的治理,工业废水的处理在技术难度和成本方面要求可能更高,也是导致其降幅相对较小的原因。工业固体废物产生量在未来五年仍将呈增长趋势。一方面这与山东省工业生产规模的持续扩大有关,随着经济的增长,工业生产活动不断增加,固体废物的产生量相应上升。另一方面,资源利用效率的提升速度尚未跟上生产规模的扩大,这也导致了固体废物产生量的增加。总体来说,虽然山东省在环保治理方面取得了一定成效,但仍需继续努力来应对工业固体废物产生量上升等挑战。

2.2 工业污染影响因素分析

2.2.1 影响因素的选取

工业污染是人类社会经济发展的产物,工业污染物排放量受社会经济多种因素的影响。借鉴相关文献^[16-19],并考虑科学性与实用性等原则,文章选取了人口规模、城镇化率、产业结构、能源强度等六项影响因素(表5)。

表5 影响因素指标及说明

影响因素	因素说明	单位
人口规模(X1)	人口密度	人/km ²
经济发展水平(X2)	人均GDP	元/人
城镇化率(X3)	年末城镇人口/总人口	%
产业结构(X4)	工业生产总产值/地区生产总值	%
能源强度(X5)	单位GDP能耗	吨标准煤/万元

技术创新(X6)

R&D经费投入强度

%

(1)人口规模:以人口密度作为衡量人口规模的指标。人口密度高的地区通常伴随着更多的工业企业和基础设施建设,人口密度增加导致工业活动增加,从而造成更多工业污染的排放。

(2)城镇化率:城镇化率即城镇人口在总人口的占比。一方面,城市化进程的持续推进推动了工业生产的发展和扩张,城镇化率的提高可能会带来更多的工业活动和污染物的排放;另一方面,城镇化的推进使城市环境管理和监管体系得到了改进和加强,有助于减少工业污染的排放。

(3)经济发展水平:采用人均GDP来衡量经济发展水平。经济发展水平较高的地区通常有更多的工业企业,工业活动的增加和生产水平的提升,加剧了污染物的排放。然而,随着经济发展水平的提高,人们的环保意识增强,可以减少工业污染并实现可持续发展。

(4)产业结构:利用工业生产总产值占地区生产总值的比重来表示产业结构。传统重工业的高污染产业结构会导致排放大量的废水、废气和固体废物,对环境产生负面影响。

(5)能源强度:人类通过对能源的开发利用来促进经济增长,能源的过度消耗造成严重的污染。高能源强度意味着单位产出所需能量量较高,导致更多的燃煤和化石燃料消耗,从而增加工业污染的排放。

(6)技术创新:采用R&D经费投入强度表征技术创新水平。较高的R&D投入意味着更多资源用于技术研发和创新,有助于发展清洁技术和环保解决方案,从而减少工业污染。R&D投入也有助于提高企业的环境管理和监控能力,促进绿色生产方式的采用,在一定程度上降低工业污染水平。

2.2.2 基于灰色关联度的影响因素分析

基于灰色关联分析法探究各影响因素对不同工业污染物排放的影响。经计算得到山东省工业废水、工业SO₂、工业固废与六项影响因素的关联度(图2)。各工业污染物与影响因素间的关联度均大于0.5,说明各项影响因素对工业污染均有比较重要的影响。

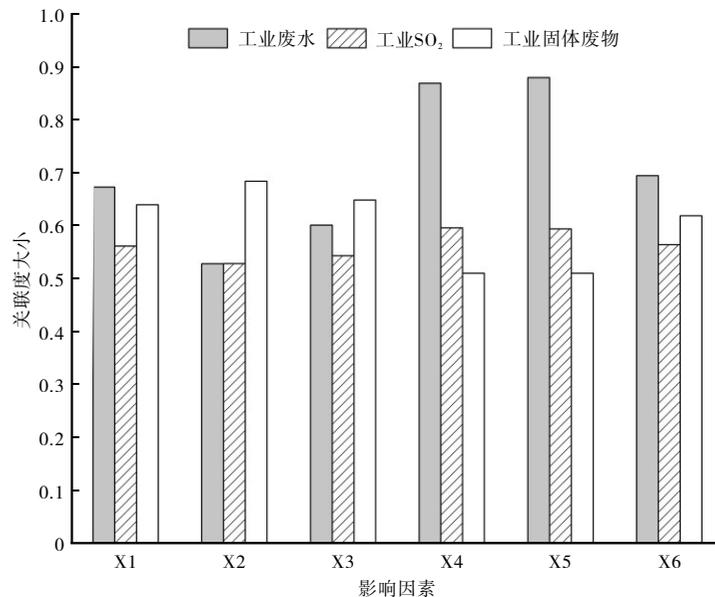


图2 三种工业污染物与影响因素的关联度

各因素与工业废水和工业SO₂关联度大小排序基本一致,在众多影响因素中,产业结构、能源强度、技术创新的关联度大小排在前三位,排在后三位的影响因素依次为人口规模、城镇化率、经济发展水平。略有不同的是,能源强度和产业结构均是与工业废水和工业SO₂关联度最大的两项因素。山东省作为工业大省,产业结构中重工业所占比重较大,在生产过程中往往伴随着较高的能源消耗与污染物排放,因此,产业结构和能源强度对工业废水和工业SO₂排放的影响较大。技术创新水平虽然与工业废水和工业SO₂排放的关联度较高,但排在产业结构和能源强度之后,这说明山东省在技术创新方面还有提升的空间。通过加大研发投入、推动创新技术发展,可以有效提高资源利用效率,减少污染物排放。相反的是,各因素对工业固体废物

的影响,按关联度由大到小排序依次为经济发展水平、城镇化率、人口规模、技术创新、能源强度、产业结构,经济发展水平成为首要因素。这说明随着经济的发展,工业生产活动增加,直接导致工业固体废物产生量的增加。城市化率和人口规模的影响紧随其后,反映出城市化进程中人口聚集和生活方式的改变对工业固体废物的推动作用。

综上所述,各因素对工业污染排放的影响存在差异性,这主要是因为不同类型的污染物产生和处理机制不同,需要针对不同污染物和排放类型制定具体的减排措施。在工业废水和SO₂方面,应重点关注产业结构优化、能源效率提升和技术创新的投入;在工业固体废物方面,则需要更加注重经济发展模式的转型与城市化进程的合理规划。

3 结论

文章以山东省为研究对象,采用工业废水、工业SO₂排放量和工业固体废物产生量表征工业污染状况,探究山东省工业污染排放的变化趋势和影响因素,并预测了未来五年三种工业污染物的排放量,得到以下结论:

(1)通过建立灰色马尔可夫模型进行预测,对状态的划分采用系统聚类的方法。该方法能够使区间划分更加合理,避免了传统灰色马尔可夫模型因区间划分不合理带来的误差。

(2)通过对山东省未来五年工业污染排放量进行预测发现,工业废水和工业SO₂的排放量均呈下降趋势,特别是工业SO₂排放量下降更为显著,而工业固体废物产生量呈缓慢上升趋势。因此,在今后的环保工作中应重点关注和控制工业固体废物的排放。

(3)通过灰色关联分析可知,选取的各因素指标对山东省工业污染具有显著影响。产业结构和能源强度对工业废水和工业SO₂排放影响尤为突出。相比之下,工业固体废物与产业结构和能源强度的关联度较低,与经济发展水平和城镇化率关联度较大。因此,减少工业废水和工业SO₂排放应从产业结构和能源结构入手,加强对企业环保监管和技术支持,提高资源利用率和环保水平,加强工业固体废物的处理,减少其对环境的负面影响。这些措施有助于推动经济可持续发展和实现生态文明建设的目标。

鉴于此,针对山东省工业污染排放状况,提出以下三点建议:首先,推动产业结构调整 and 能源结构转型,减少高污染产业的比重,增加清洁能源的使用比例,减少工业污染排放。其次,加强对工业企业的监督管理,鼓励科研机构和企业加大对环境保护的投入力度,推动技术创新,实现可持续发展。最后,加强对工业固体废物的处理,加大对处理设施的投资力度,推动技术升级和普及,提升处理效率。

参考文献:

- [1] 田时中,赵鹏大.西北六省工业污染动态综合评价及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(07):1-7.
- [2] 熊国经,董玉竹,宗瑾.基于岭回归法对“三废”排放影响因素的研究——以江西省为例[J].生态经济,2017,33(02):103-107.
- [3] 李芸邑,刘利萍,刘元元.长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素[J].环境科学,2021,42(08):3820-3828.
- [4] 李学迪,郑海涛.中国城市工业污染的影响因素研究[J].北京航空航天大学学报(社会科学版),2020,33(01):93-98.
- [5] WANG Y Z, DUAN X J, WANG L Q, et al. Spatial Temporal Patterns and Driving Factors of Industrial Pollution and Structures in the Yangtze River Economic Belt[J]. Chemosphere, 2022, 303: 134996.
- [6] ZHANG L, ADOM P K, AN Y. Regulation-induced Structural Break and the Long-run Drivers of Industrial Pollution Intensity in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 121-132.
- [7] 刘炳春,齐鑫.基于PCA-SVR模型中国工业固废产生量预测研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2020,48(01):69-74.
- [8] 马啸,李露.基于改进灰色GM(1,1)模型的三峡库区工业废水量预测[J].环境工程,2018,36(01):162-167.
- [9] 李小芳,孙宝盛,司志娟.基于灰色马尔可夫模型的城市污水量预测[J].环境工程学报,2013,7(01):237-241.
- [10] 张汛,李鹏.工业废水排放总量预测模型研究与仿真[J].计算机仿真,2022,39(07):482-486.
- [11] 谭学瑞,邓聚龙.灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J].统计研究,1995,(03):46-48.
- [12] 刘思峰,曾波,刘解放,等.GM(1,1)模型的几种基本形式及其适用范围研究[J].系统工程与电子技术,2014,36(03):501-508.

- [13] 丁天明,潘宁,杜柏松,等.基于改进灰色马尔可夫的港口货物吞吐量预测研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(09):1-6.
- [14] 蒋玮,许庆正,单金焕,等.基于熵值赋权灰色马尔可夫法的沥青路面使用性能预测[J].中国科技论文,2022,17(06):595-601.
- [15] ZUBAROĞLU A, ATALAY V. Data Stream Clustering: A Review [J]. Artificial Intelligence Review, 2021, 54(02): 1201-1236.
- [16] 李花,赵雪雁,王伟军,等.基于多尺度的中国城市工业污染时空分异及影响因素[J].地理研究,2019,38(08):1993-2007.
- [17] 杨冕,晏兴红,李强谊.环境规制对中国工业污染治理效率的影响研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(09):54-61.
- [18] LI Q, SONG J, WANG E, et al. Economic Growth and Pollutant Emissions in China: A Spatial Econometric Analysis [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(02): 429-442.
- [19] 洪竞科,张天翼.时空分异视角下工业污染影响机制研究[J].工业技术经济,2021,40(05):89-98.

Forecast of Industrial Pollution Emission Trend and Analysis of Influencing Factors in Shandong Province

ZHU Wen-jing¹, LIU Guan-quan^{1,2}, TANG Yong¹

(1.School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong, 266525, China;

2.Shandong University Research Center for Smart City Construction and Management, Qingdao, Shandong, 266525, China)

Abstract: It is of great significance to study the changing trend and influencing factors of industrial pollution emission in Shandong Province for promoting industrial green development and environmental protection. Based on the data of industrial wastewater, industrial SO₂ discharge and industrial solid waste generation in Shandong Province from 2012 to 2021, the changing trend and influencing factors of industrial pollution discharge in Shandong Province were analyzed by using grey Markov model and grey correlation method. The results show that: (1) The discharge of industrial wastewater and industrial SO₂ in Shandong Province will decrease in the next five years, but the production of industrial solid waste will increase slowly; (2) All influencing factors have a significant impact on industrial pollution discharge in Shandong Province, in which industrial structure and energy intensity are the main factors affecting industrial wastewater and industrial SO₂ discharge, while economic development level has the greatest impact on industrial solid waste generation. Based on the results of the study, the suggestions are put forward to develop new energy, increase technical input and pay more attention to the treatment of industrial solid waste.

Keywords: Industrial pollution; Gray correlation analysis; Gray Markov model; Trend prediction; Influencing factors