

江苏城市经济发展与工业排污关系研究

胡 鹏^{1,2}, 周 颖^{1,2}, 周锦华^{1,2}, 高雨轩^{1,2}, 王国祥^{1,2,3}, 朱国伟^{1,2*}

¹南京师范大学环境学院, 江苏 南京

²江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京

³江苏省环境演变与生态建设重点实验室, 江苏 南京

Email: *gwzhu@njnu.edu.cn

收稿日期: 2021年2月18日; 录用日期: 2021年3月19日; 发布日期: 2021年3月26日

摘 要

城市经济发展伴随着工业排污的变化, 探究二者之间的关系可以为未来的城市发展道路指明方向。以江苏省城市2008~2018年的经济发展与工业排污变化为研究对象, 在经济-工业排污耦合分区的基础上选取四个城市拟合城市工业排污EKC曲线、分析脱钩状态并探讨工业污染物排放的驱动因素。结果表明:

1) 苏州、南京环境指标EKC曲线呈倒U型, 其余城市基本满足N型和倒N型, 四个城市环境指标变化出现拐点时间均早于模型预测时间; 不同耦合度城市的EKC曲线呈现不同的形态。2) 南京工业污染物常年脱钩状态明显, 苏州、泰州和徐州自2012年开始脱钩状态上升, 其中工业固废脱钩状态波动变化, 不同时间差异较大; 3) 技术进步是苏州市工业污染物排放变化的重要驱动因子。

关键词

工业排污, EKC, 脱钩状态, 驱动因子

Study on the Relationship between Urban Economic Development and Industrial Pollution Discharge in Jiangsu Province

Peng Hu^{1,2}, Ying Zhou^{1,2}, Jinhua Zhou^{1,2}, Yuxuan Gao^{1,2}, Guoxiang Wang^{1,2,3}, Guowei Zhu^{1,2*}

¹School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

²Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Jiangsu

³Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Nanjing Jiangsu

Email: *gwzhu@njnu.edu.cn

Received: Feb. 18th, 2021; accepted: Mar. 19th, 2021; published: Mar. 26th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 胡鹏, 周颖, 周锦华, 高雨轩, 王国祥, 朱国伟. 江苏城市经济发展与工业排污关系研究[J]. 可持续发展, 2021, 11(2): 242-253. DOI: 10.12677/sd.2021.112028

Abstract

The development of urban economy is accompanied by the change of industrial emission and exploring the relationship between them can point out the direction of future urban development. Taking the economic development and the change of industrial pollutant discharge in Jiangsu province from 2008 to 2018 as the research object, on the basis of the coupling zone of economic and industrial pollutant discharge, four cities were selected to fit the EKC curve of urban industrial pollutant discharge, analyze the decoupling state and discuss the driving factors of industrial pollutant discharge. The results show that: 1) the EKC curve of Suzhou and Nanjing shows an inverted U-shape, while the other cities basically meet the N-shape and inverted N-shape. The inflection point of the changes of environmental indicators in the four cities is earlier than the model predicted time. The EKC curve of cities with different degree of coupling presents different forms. 2) The decoupling of industrial pollutants is obvious all the year round in Nanjing. The decoupling of Suzhou, Taizhou and Xuzhou has been on the rise since 2012, and the decoupling of industrial solid waste fluctuates greatly in different times. 3) Technological progress is an important driving factor for the change of industrial pollutant discharge in Suzhou.

Keywords

Industrial Pollution, EKC, Decoupling State, Driving Factors

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国家区域发展战略的不断推进,江苏省城市经济高速发展,成为长三角地区稳定的经济增长极。城市经济发展的同时,带来的是巨大的环境压力。为实现城市经济的可持续发展,“减排”成了当务之急。党的“十九大”将“生态文明”提升到更高的战略层面,目的是加大对生态环境的保护力度,实现城市经济与生态环境的可持续发展。探究城市经济和工业排污之间的短期作用和长期拟合趋势可以为“减排”工作指明方向,因此,研究两者之间的关系有重要的意义。

在国内外的研究中,环境库兹涅茨曲线(Environmental Kuznets Curve, EKC)拟合是研究经济和污染物之间关系最常用的方法。EKC理论认为,环境质量会随着人均收入水平的变化而变化,具体表现为初期随收入增加而降低,后期随收入增加而提高,整体曲线呈“U”形[1]。通过拟合城市经济发展与污染物排放之间的关系曲线,根据曲线形状判断是否符合EKC倒U理论模型,从而判断两者之间发展关系的长期趋势。国内外研究学者通过分析经济增长与环境指标之间的关系,拟合出两者之间可能存在的曲线形状,根据曲线判断长期发展趋势。Sinha, Bhattacharya [2]通过对印度139座城市2001~2013年间二氧化硫排放量的数据的收集,在不同的功能分区进行EKC检验,研究发现了各地区不同形状的EKC曲线,从而进一步支持了EKC假说,也为不同功能分区的经济发展与二氧化硫排放相关工作提供了合理建议。另外,部分学者通过OECD组织提出的“脱钩理论”[3],获得当前经济发展与环境指标的脱钩状态,明确当前所处的短期作用关系。王平,段友爱[4]等人在研究云南省污染物排放量与经济增长关系中,运用

了脱钩模型对排污量和经济增长进行了脱钩分析,结果表明云南省近年来经济与环境状态主要表征为“强正脱钩”和“增长弱脱钩”。在脱钩状态的研究中,国内学者主要将研究对象放在了碳排放的脱钩效应上[5][6][7][8][9]。从现有的研究中看,大部分学者只是研究经济发展与环境指标之间单一的长期或短期关系,只有很少的学者通过将 EKC 理论与脱钩理论结合起来,通过对经济发展与环境指标之间的短期作用和长期拟合趋势结合,分析污染物排放的驱动因子,明确经济增长与技术进步对污染物排放的正负作用,为之后环保政策和“减排”工作指明方向。

本研究通过对江苏省城市进行经济-排污耦合分区,在此基础上研究不同耦合等级城市 2008~2018 年 EKC 曲线拟合和经济增长与工业排污的脱钩状态,对城市经济发展与工业排污的长期拟合趋势和短期作用关系进行分析,并对城市的工业排污驱动因子进行探讨。

2. 江苏城市经济发展与工业排污现状及耦合分区

2.1. 江苏城市经济与工业排污现状

江苏省 GDP 总值由 2008 年的 31,357 亿元增加到 2018 年的 92,595.40 亿元,2018 年 GDP 居全国第二位,占全国 GDP 的 10.3%,是国家经济发展的重要增长极与动力中心。当前江苏省内十三市经济整体发展迅速,正处于“经济发展快、资源需求大、环境负担重”的发展时期。随着省内“水十条”、“气十条”、“263 行动”等环境污染防治政策的大力推行,江苏省各市的工业排污也在发生着变化。从 2008 年到 2018 年江苏省工业主要污染物排放数据来看,工业废水和工业 SO₂ 逐年呈下降趋势,工业固废产生量呈逐年增加的趋势。

2.2. 江苏城市经济 - 工业排污耦合分区

耦合度表征的是两个及两个以上系统间的相互作用的强弱,分析耦合关系,可以了解系统间的失调发展问题,有利于系统间的资源配置和资源整合,以促进系统间的共同发展。通过经济 - 工业排污的耦合程度将江苏省划分为四个不同等级的耦合区域。为此,本研究首先在结合江苏省实际经济发展情况和排污现状,确定了经济发展系统和排污系统两大子系统,选取经济发展系统内 GDP 指标,代表产业结构的第三产业占比指标,代表经济内部优化的第二产业增加值指标,在工业排污系统的指标选取中,主要选取工业废水总量、工业 SO₂ 总量、工业固废产生总量以及烟气粉尘总量这四个环境指标,然后参考国内部分学者常用的耦合模型[10][11],将江苏省进行经济 - 工业排污耦合分区,再进行进一步的分析。通过

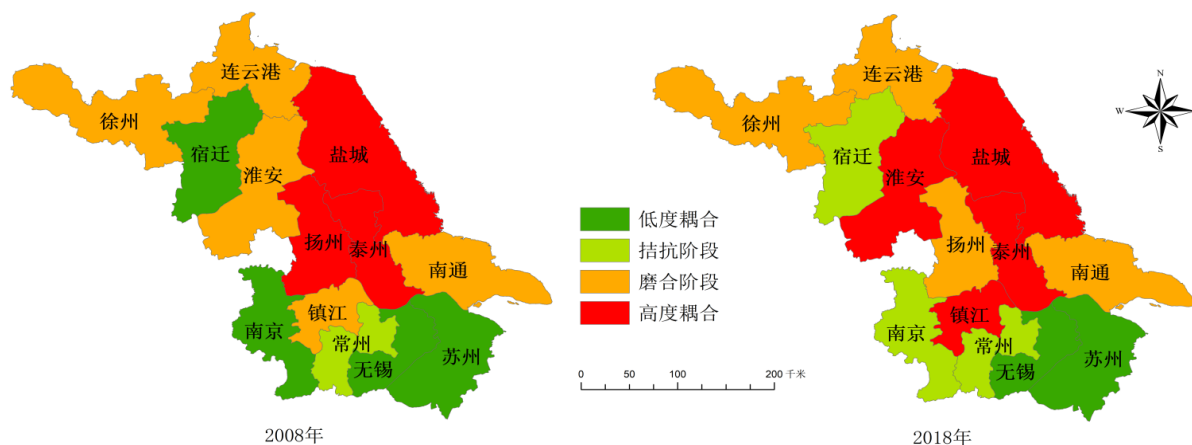


Figure 1. Economy-Industrial pollution discharge Coupling Zoning map of Jiangsu Province in 2008 and 2018

图 1. 江苏省 2008、2018 年经济 - 工业排污耦合分区图

对江苏省十三市 2008 年和 2018 年的经济 - 工业排污耦合度 C 值的计算, 依据耦合度理论模型, 按照江苏省 13 市 2008、2018 年耦合度值大小排序, 在 Arcgis 里可划分为低度耦合($C < 0.3015$), 拮抗阶段($0.301 \leq C < 0.4236$), 磨合阶段($0.4236 \leq C < 0.4824$), 高度耦合($C \geq 0.4824$)四个阶段, 江苏省十三市 2008 年与 2018 年经济 - 工业排污耦合变化如图 1。

经济 - 工业排污耦合度总体上呈现江苏省中部耦合度高, 南部耦合度低, 北部耦合度中等。高耦合度之主要分布在盐城市、扬州市、泰州市等设市区; 低耦合度主要集中于苏州市、无锡市、南京市等设市区。选取四个分区的城市分别是南京、苏州、泰州和徐州, 大致可以代表苏南、苏中和苏北地区。

3. 研究方法与数据来源

3.1. EKC 曲线拟合

根据环境库兹涅茨曲线理论以及国内外研究学者对于该理论的深入研究, 城市的经济发展和排污量的关系如下: 在发展初期, 经济规模与排污量呈现成比例的正相关关系, 这种情况还会随着经济的持续发展而加剧; 当经济发展到一定阶段, 到达某个临界值之后, 排污量随着经济规模的增加而降低, 总体的曲线(EKC 曲线)呈现倒 U 形[10] [11]。EKC 曲线用来研究排污量与经济增长之间的长期关系, 侧重于拟合演变趋势。根据国内外学者对于经济增长与环境质量关系的研究中更多地通过构建二次、三次方程的环境库兹涅茨曲线模型, 从而拟合出经济增长与环境质量间存在的关系图, 判断城市的经济发展与工业排污的变化是否符合传统 EKC 理论, 最终通过拟合的曲线判断该城市的发展阶段, 为之后的经济发展和环境污染提出解决方法[12] [13] [14] [15]。其常用的 EKC 模型的二次、三次方程的表达式是:

$$E = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \varepsilon$$

$$E = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3 + \varepsilon$$

其中 E 表示环境质量指标, X 表示经济增长指标, ε 表示误差。拟合的曲线方程中, 在 $\beta_1 > 0$, $\beta_2 < 0$ 的情况下, 当 $\beta_3 = 0$ 时, 曲线呈倒 U 型, 即 EKC 曲线; 当 $\beta_3 > 0$ 时, 曲线呈 N 型; 在 $\beta_1 < 0$, $\beta_2 > 0$ 且 $\beta_3 < 0$ 时, 曲线呈倒 N 型。在拟合曲线过程中, 选择拟合度 R^2 更接近 1 的方程来代表该环境指标的变化趋势。在数据处理上, 将 3 大环境指标数据进行归一化处理, 然后进行其图像的拟合。

3.2. 脱钩理论

脱钩理论是在研究经济因素与环境因素脱钩关系的最主要方法。脱钩的概念最初是由经济合作与发展组织(OECD)提出的, 经过学者们的深入研究, J. Vehmas [16]等在其研究报告中划分为强脱钩、弱脱钩、强复钩、弱复钩和扩张性复钩, 对脱钩状态进行了等级划分。脱钩系数是指在一定时间段内消耗某种资源的速度或者是某种污染物排放量变化速率与经济规模变化速度的比值, 具体公式是:

$$R_i = \frac{\Delta P}{\Delta G} = \frac{(P_i - P_j)/P_i}{(G_i - G_j)/G_i}$$

其中, R_i 表示第 i 年经济增长与污染物排放的脱钩指数; ΔP 表示污染物排放量变化率, P_i 和 P_j 表示第 i 年与第 j 年污染物排放量(一般 $i > j$); ΔG 表示经济规模变化率, G_i 和 G_j 表示第 i 年与第 j 年经济增长量。参照郭承龙、张智光[17]等人对于脱钩指数等级的划分, 本文也采用此种划分标准, 在数据处理上, 因经济的不断增长, ΔG 始终大于 0, 在标准划分里只保留了强脱钩、弱脱钩、增长连接和扩张负脱钩四个状态并对其分级进行赋值(见表 1)。

Table 1. Decoupling of pollutant emission growth and economic growth
表 1. 污染物排放量增长与经济成长的脱钩量表

脱钩状态	判别条件			含义	分级标准(R)	赋值
	ΔG	ΔP	R			
强脱钩	>0	<0	<0	经济增长, 环境压力下降	$(-\infty, -0.6)$	14
					$[-0.6, -0.4)$	13
					$[-0.4, -0.2)$	12
					$[-0.2, 0)$	11
弱脱钩	>0	>0	0~0.8	经济增长, 环境压力缓慢增长	$[0, 0.2)$	10
					$[0.2, 0.4)$	9
					$[0.4, 0.6)$	8
					$[0.6, 0.8)$	7
增长连接	>0	>0	0.8~1.2	经济增长, 环境压力同步增长	$[0.8, 1.0)$	6
					$[1.0, 1.2]$	5
扩张负脱钩	>0	>0	>1.2	经济缓慢增长, 环境压力大幅增加	$(1.2, 1.4]$	4
					$(1.4, 1.6]$	3
					$(1.6, 1.8]$	2
					$(1.8, +\infty)$	1

3.3. 工业排污因素分析法

因素分析法可以通过对某一现象中的各种因素进行分类、解析, 将引起事物变化的因素固定然后对其分析, 从而判断出事物变化的主次要因素。污染物的年际变动量可以分解为技术因素贡献量、经济发展贡献量以及两者的交叉协同贡献量, 本文采用公式对环境质量的驱动因子[18] [19]进行分析:

$$P = P_t - P_0 = G_t \times A_t - G_0 \times A_0 = (G_t - G_0) \times A_0 + (A_t - A_0) G_0 + (G_t - G_0)(A_t - A_0)$$

公式中 P 代表废物排放总变动量; P_t 代表 t 时期的废物排放量; P_0 代表基期的废物排放量; G_t 代表 t 时期的经济产值; G_0 代表基期的经济产值; A_0 代表基期的单位产值废气排放量; A_t 表示 t 时期的单位产值污染物排放量。其中, $(G_t - G_0)A_0$ 为经济贡献量, $(A_t - A_0)G_0$ 为技术政策贡献量, 包括技术进步、产业结构优化、环保政策推行以及环保意识提高对工业污染物排放的共同作用, $(G_t - G_0)(A_t - A_0)$ 为经济变动和技术政策变动交叉协同贡献量。

3.4. 数据来源

在指标的选取上, 经济增长指标选取人均 GDP 数据, 环境指标选取主要工业污染物排放, 包括工业废水排放总量、工业 SO_2 排放量和工业固废产生总量, 由于各城市公布的工业污染数据不同, 在有关大气工业污染数据中, 选择各市共有的工业 SO_2 数据作为环境指标之一。在江苏省经济 - 工业排污耦合分区的分析基础上, 分别选取不同耦合分区中的城市, 通过经济增长与工业排污变化之间的关系拟合 EKC 曲线, 并且分析其脱钩状态, 明确经济增长与排污关系的短期作用和长期发展趋势, 最后对城市工业排污驱动因子进行分析。本文主要收集耦合分区四个耦合等级代表城市的经济数据和环境指标数据, 包括南京、苏州、泰州和徐州。所有数据均来自于 2008~2019 年《江苏统计年鉴》、江苏 13 市各市统计年鉴、

经济发展公报、环境状况公报等。

4. 结果与分析

4.1. EKC 曲线拟合与分析

通过对四个城市 2008~2018 年经济发展与工业污染排放的 EKC 曲线拟合, 结果如下表 2。

Table 2. Fitting data of EKC model between economic development and industrial emission in four cities
表 2. 四市经济发展与工业排污之间 EKC 模型的拟合数据

	模型参数	拟合结果	R ²	曲线特性
南京	工业废水	$Y = -1.51 \times 10^{-4}X + 1.219E - 9X^2 + 3.599E - 15X^3 + 8.853$	0.972	三次曲线, 观察期内单调递减
	工业 SO ₂	$Y = 0.000112X - 1.2171E - 9X^2 + 12.311$	0.92	二次曲线, 呈倒 U 型
	工业固废	$Y = 0.052X - 4.6101E - 7X^2 + 1.4345E - 12X^3 - 290.852$	0.939	三次曲线, 呈 N 型
苏州	工业废水	$Y = 0.000176X - 7.9969E - 10X^2 - 3.032210$	0.846	二次曲线, 呈倒 U 型
	工业 SO ₂	$Y = 0.000586X - 2.7761E - 9X^2 - 12.97$	0.926	二次曲线, 呈倒 U 型
	工业固废	$Y = 0.06X - 2.0491E - 7X^2 - 1890.129$	0.601	二次曲线, 呈倒 U 型
泰州	工业废水	$Y = -0.000017X - 1.8678E - 10X^2 + 1.7024E - 15X^3 + 2.335$	0.927	三次曲线, 观察期内单调递减
	工业 SO ₂	$Y = 0.000197X - 3.0001E - 9X^2 + 1.0139E - 14X^3 + 2.082$	0.852	三次曲线, 呈 N 型
	工业固废	$Y = 0.026X - 3.08E - 7X^2 + 1.0821E - 12X^3 - 293.12$	0.955	三次曲线, 呈 N 型
徐州	工业废水	$Y = 0.000003X + 1.1629E - 9X^2 - 1.547E - 14X^3 + 0.083807$	0.87	观察期内呈倒 U 型
	工业 SO ₂	$Y = -0.000563X + 1.7831E - 8X^2 - 1.6285E - 13X^3 + 15.656867$	0.755	三次曲线, 呈倒 N 型
	工业固废	$Y = 0.247739X - 0.000005X^2 + 2.998E - 11X^3 - 2619.851886$	0.763	三次曲线, 呈 N 型

通过 EKC 模型的数据拟合, 拟合出四个城市的 3 大环境指标与经济增长的关系曲线, 如下图 2, 其中 a、b、c、d 分别代表南京、苏州、泰州和徐州。

南京市工业废水与人均 GDP 的拟合曲线是三次方程, 其 R² = 0.972, 拟合度较高。该拟合方程并不符合 EKC 的倒 U 曲线模型, 由图 2(a)可以看出在观察期内, 自 2008 年开始, 到 2018 年间, 南京市工业废水排放量一直处于递减状态, 其变化趋势大致符合倒 U 曲线的第二阶段, 随着经济的增长, 工业废水排污量不断减少。南京市工业 SO₂ 与人均 GDP 的拟合曲线是倒 U 曲线, 完全符合 EKC 理论, 并且在 2005 年出现了拐点, 拐点出现比模型理论预测提前了一年, 拐点出现之前污染物不断增加, 拐点之后工业 SO₂ 排放量随经济发展呈递减趋势。南京市工业固废产生量与人均 GDP 拟合曲线为三次方程, 不符合环境库兹涅茨曲线的倒 U 模型, 该曲线呈并不明显的 N 型, 且工业固废的产生量一直在波动上升。

苏州市的工业污染物与人均 GDP 的拟合曲线都是二次方程, 都符合 EKC 倒 U 模型, 苏州市工业废水和工业 SO₂ 在 2011 年就出现了拐点, 在 2011 年后, 工业废水和工业 SO₂ 排放量持续降低, 其工业固废的变化在 2014 出现拐点。根据拟合曲线的系数预测, 苏州市工业废水的拐点在人均 GDP 达到 110,042 元时出现, 但苏州市在 2011 年人均 GDP 达到 103,739 元时就出现了拐点, 早于模型理论预测; 工业 SO₂ 拐点出现预测人均 GDP 为 105,543 元, 大致符合 2011 年的人均 GDP 值, 工业固废的拐点预测出现是人均 GDP 为 146,405 元, 但苏州市在 2014 年人均 GDP 达到 132,131 元时就出现拐点, 但近年来工业固废还在不断波动增长。

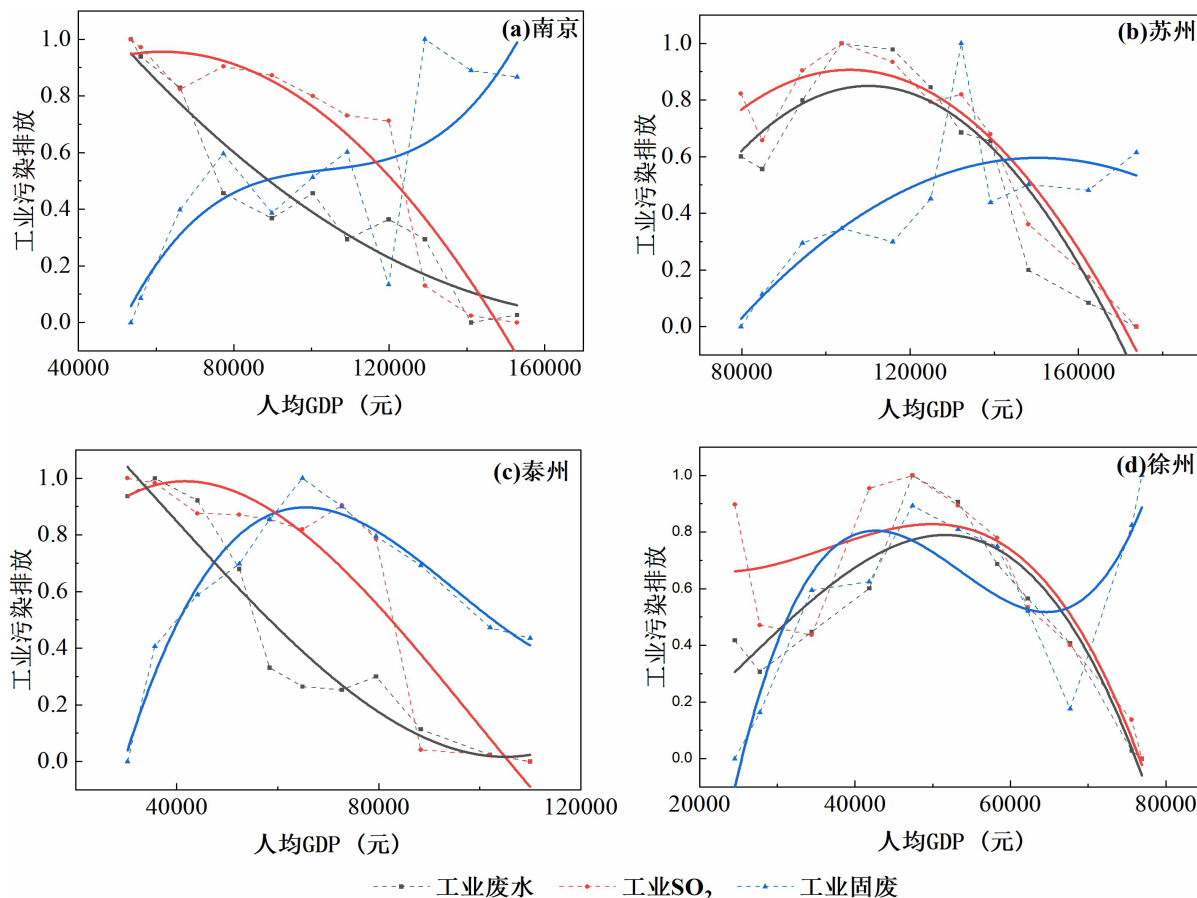


Figure 2. Relationship between economic growth and sewage discharge in the four cities and EKC fitting diagram
图 2. 四市经济增长与排污量的关系及 EKC 拟合图

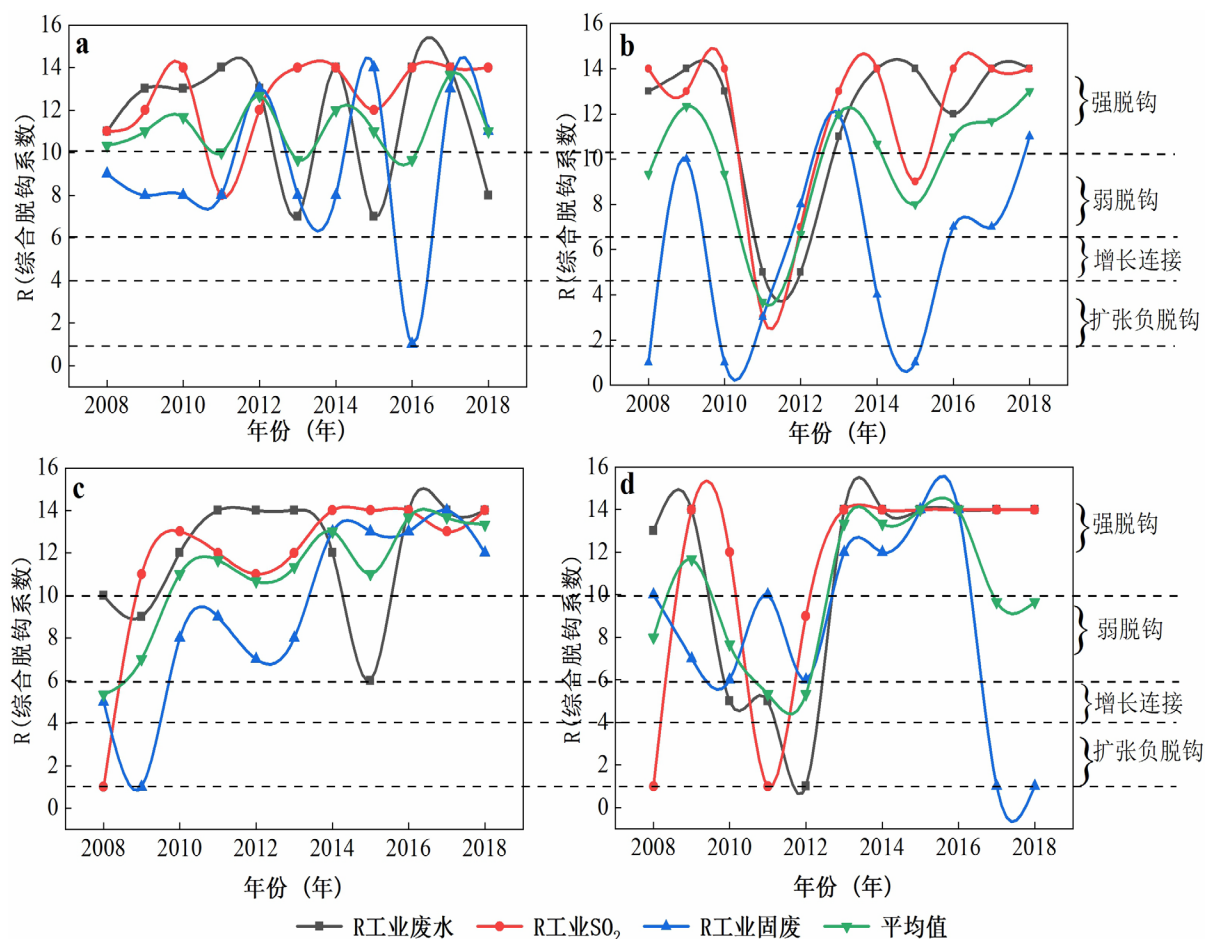
泰州市工业废水拟合曲线是三次方程，并不符合 EKC 的倒 U 理论模型，其拟合曲线呈 N 型，模型预测当人均 GDP 达到 104,881 元时，工业废水会出现第二个拐点，截止 2018 年结束，泰州市人均 GDP 超过 109,988 元，泰州市工业废水排放持续减少，并未出现第二个拐点。随着绿色技术的改进、环保政策的推进以及环保意识的进一步提升，泰州市工业废水会持续下降。工业 SO₂ 在 2009 年也已出现了拐点，近年工业 SO₂ 排放持续下降，出现拐点时间早于模型预测时间。泰州市工业固废拟合曲线是三次方程，观察期内的曲线大致符合倒 U 曲线的，自 2012 年出现了第一个拐点后，工业固废产生量一直在减少，模型预测人均 GDP 达到 126,382 元时会出现第二个拐点，其工业固废产生量会持续增加，因此，泰州市需要在工业生产过程中把控固废的产生与资源化利用。

徐州市工业废水拟合曲线是三次方程，但在观察期内呈现倒 U 型，且在观察期内工业废水排放量持续减少。工业 SO₂ 拟合曲线呈倒 N 型，模型预测在人均 GDP 达到 49,903 元时出现第二个拐点，但徐州在 2012 年就提前出现拐点，自 2012 年后工业 SO₂ 排放量持续下降。工业固废拟合曲线不符合 EKC 倒 U 理论模型，其曲线呈 N 型，在 2012 年出现了第一个拐点，2012 年到 2015 年，工业固废产生量持续下降，2016 年开始，出现第二个拐点，其数量开始持续上升，两个拐点的出现时间均早于模型预测时间。

4.2. 脱钩状态分析

通过对南京市、苏州市、徐州市、泰州市四个城市的经济指标数据和排污量指标数据的收集与整理，运用脱钩模型，得出各市 2008~2018 年经济增长与排污量脱钩状态，图 3 是南京(a)，苏州(b)，泰州(c)，

徐州(d)四个城市 2008~2018 年综合脱钩状态的统计图。

**Figure 3.** Statistical chart of the comprehensive decoupling state of the four cities from 2008 to 2018**图 3.** 2008~2018 年四市综合脱钩状态统计图

工业废水脱钩状态分析。南京市近十年来工业废水基本处于脱钩状态，除了 2013 年、2015 年和 2018 年处于弱脱钩状态，总体来说脱钩状态比较高。苏州市 2011、2012 年工业废水处于增长连接状态，这一时期，工业废水排放量随着经济的增长而增加，除这两年内，其余年份工业废水都处于强脱钩状态，总体来说脱钩状态较好，由此说明苏州市在工业废水“减排”的治理上工作到位，在非脱钩状态出现后积极应对，保证常年的污染物脱钩状态，实现经济发展与工业排污的可持续状态。徐州市 2010、2011 两年工业废水处于增长连接阶段，并且在 2012 年处于扩张负脱钩状态，此时徐州市经济缓慢增长，工业废水排放量却大幅增加，环境压力也在不断提高，到近几年，徐州市工业废水处于强脱钩状态，由此说明徐州市近几年的工业废水治理工作做的到位，总体脱钩状态比较好；泰州市在 2008、2009 年工业废水处于弱脱钩状态，并且在 2015 年处于增长连接状态，到后期较为稳定，一直处于强脱钩状态。

工业 SO₂ 脱钩状态分析。南京市工业 SO₂ 除了 2011 年处于弱脱钩状态，其余年份都稳定保持在强脱钩状态。苏州市 2011~2012 年，工业 SO₂ 由扩张负脱钩状态转变为弱脱钩状态，其余时间都保持在强脱钩状态。徐州市 2008、2011 年都处于扩张负脱钩状态，整体脱钩指状态具有一定动荡性，但到后期相对保持在稳定的强脱钩状态。泰州市从 2008 年的扩张负脱钩状态变化为 2009 年强脱钩状态后一直保持强脱钩状态至今，其总体的脱钩状态较好。

工业固废脱钩状态分析。南京市工业固废在 2008~2014 年基本保持在弱脱钩状态，2016 年处于扩张负脱钩状态，近两年，其状态稳定保持在强脱钩状态。苏州市工业固废总体的脱钩状态动荡性较大，近两年工业固废脱钩状态在弱脱钩和强脱钩之间动荡。徐州市在前期的时间段内工业固废脱钩状态保持在强、弱脱钩状态内，近两年来，其状态处于扩张负脱钩状态，表明近几年徐州经济增长放缓，但工业固废的产生还在继续增加着。泰州市从前半段时间由非脱钩状态转变为后半段时间的强脱钩状态且比较稳定。

4.3. 工业排污驱动因子分析

根据 EKC 曲线拟合检验和脱钩状态分析，对整体脱钩状态较好的苏州市进行工业排污的驱动因子分析，通过 2007~2018 年苏州市年 GDP 和工业废水排放量、工业 SO₂ 排放量以及工业固废产生量的数据，运用因素分析公式，做出苏州市工业排污的因子分析图，如图 4 所示，图 4(a)~(c)分别是苏州市工业废水、工业 SO₂、工业固废的驱动因子图。

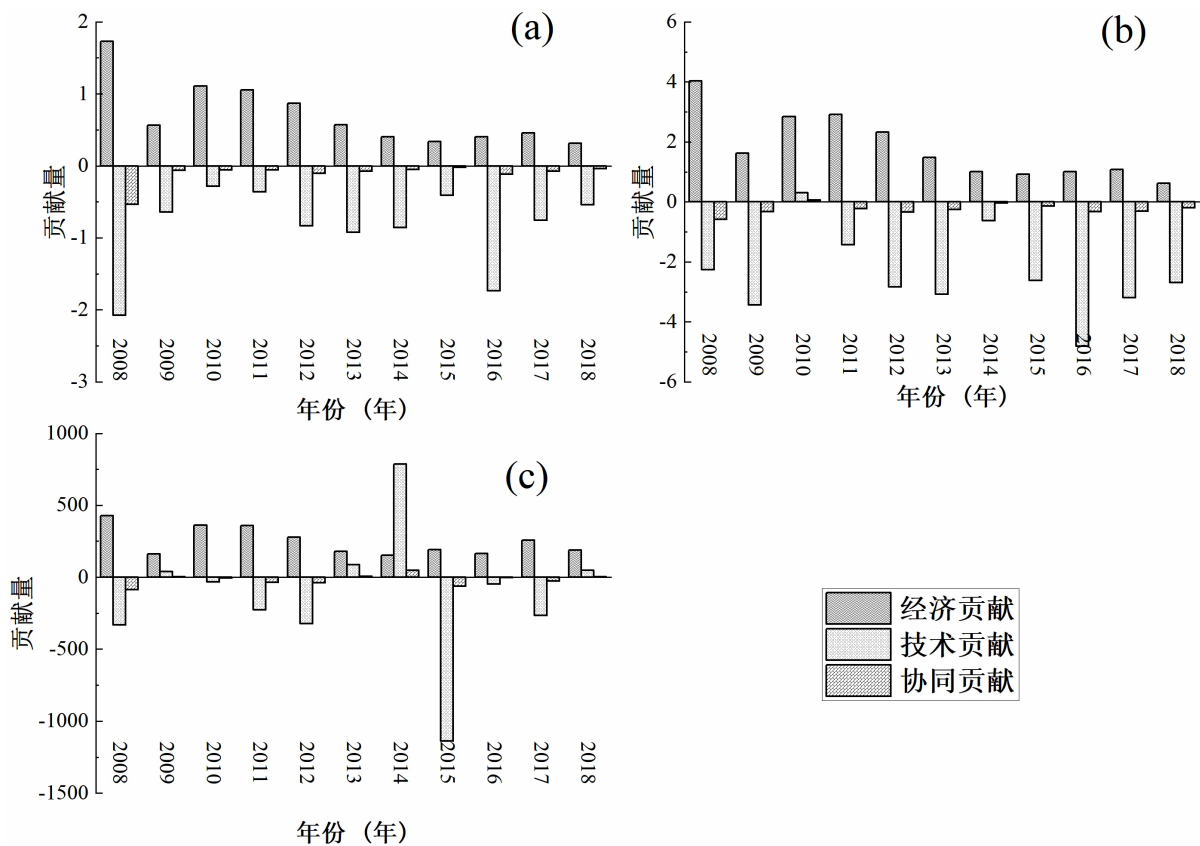


Figure 4. Driving factors of Suzhou industrial wastewater, industrial SO₂ and industrial solid waste discharge
图 4. 苏州市工业废水、工业 SO₂、工业固废排放因素分析

工业废水排放驱动因子分析。由图可知，从 2008 年起，苏州市的经济增长对工业废水的排放的贡献值在波动下降，表明苏州市的工业废水的增加受经济增长作用变小。在城市的发展初期，工业排污随着经济增长而增加[20] [21]，同时也表明苏州市经济发展的同时，有效控制了污染物的排放，环保工作到位；技术贡献都是负值，表明随着技术的进步，降低了单位产值排放量，从而导致工业废水总排放量下降；协同贡献均为负值，表明虽然经济迅速增长，但技术进步更加显著，两者协同的贡献量为负，使得苏州市工业废水排放量下降。

工业 SO₂ 排放驱动因子分析。有图 4(b)可知, 苏州市经济增长对工业 SO₂ 的排放是正值, 表明经济的增长使得污染物产生; 技术贡献除 2010 年均为负值, 表明随着技术的进步、环保政策的落实, 遏制了工业 SO₂ 的排放。2010~2011 年间, 苏州市工业 SO₂ 排放出现拐点, 该年污染物排放量达到顶峰, 这一年之后, 技术进步的作用超过经济增长对污染物排放量的作用, 苏州市工业 SO₂ 开始呈下降趋势; 协同贡献为负值, 表明在经济增长和技术进步的双重作用下, 工业排污持续减少。

工业固废排放驱动因子分析。经济贡献均为正值, 经济增长对工业固废产生量起到促进作用, 且这种促进作用变化幅度不大, 技术贡献变化幅度大, 出现一段时间的正值。从总贡献来看, 苏州市工业固废产生量在经济增长和技术进步的作用下, 呈现波动增长的趋势, 自 2014 年出现拐点后, 工业固废量并没有呈持续下降趋势, 反正出现小幅度的上升, 在驱动因子的贡献来看, 经济增长的正贡献超过了技术进步带来的负贡献, 占据主导地位, 因此, 工业固废产生量随着经济增长而不断增加。

总体来说, 苏州市工业废水、工业 SO₂ 排放量变化的驱动因子为技术进步, 工业固废的产生量变化受经济增长和技术进步的协同贡献。苏州市 2008 年产业结构比例为 1.6:62.0:36.4, 发展到 2018 年, 产业结构比例为 1.8:48.0:50.2, 第三产业急速增加, 产业结构优化明显; 另外, 2008 年境污染治理投资额为 23.4943 亿元, 到 2018 年境污染治理投资额达到 258.0179 亿元, 由此可见, 苏州市工业废水和工业 SO₂ 排放的减少深受技术进步、产业结构优化的作用, 虽然工业固废还在波动变化, 但在绿色技术的投入、环保政策的推行以及人们环保意识的增强的情况下, 工业固废产生量的预测将是乐观的。

5. 结论与建议

5.1. 主要结论

1) 苏州市三大环境指标和南京工业 SO₂ 排放量与经济增长之间的关系呈倒 U 型, 完全符合 EKC 理论, 泰州、徐州以及南京的剩余环境指标与经济增长之间的关系不满足环境库兹涅茨倒 U 曲线, 基本满足倒 N 型和 N 型曲线, 四个城市 3 大环境指标变化出现拐点时间均早于模型预测时间。不同耦合度城市的 EKC 曲线呈现不同的形态。

2) 南京市三大环境指标整体脱钩状态明显, 苏州、徐州和泰州自 2012 年脱钩状态明显, 其中苏州和徐州工业固废都呈波动变化状态, 不同时间脱钩状态差异大。四个城市的工业排污脱钩状态在其排污变化出现拐点后基本都是转为弱脱钩状态。在出现脱钩状态的情况下, 要急需深化城市工业污染治理, 着重加强工业固废治理, 提高固废的资源化利用。

3) 苏州市工业三大环境指标的影响因素主要为经济增长、技术进步和经济技术协同作用, 其中技术进步是苏州市工业废水、工业 SO₂ 排放减少的重要驱动因子, 工业固废产生量的增加是由于经济增长发挥重要驱动作用。

5.2. 建议

1) 继续推进污染物减排政策。在未来一段时间内, 江苏城市的工业排污还会发生变化, 因此要继续推进污染物减排政策。从江苏省“十一五”时期到“十二五”时期的 EKC 曲线来看, 江苏省整体情况变好, 这与“十一五”时期国家提出的污染物排放的刚性要求有关, 在国家政策的要求下, 江苏省大力实施污染物的工程、结构和管理减排。江苏省 2016 年底启动的“263”行动, 有效控制了工业污染物的排放, 政策效果发挥明显。因此, 继续推进污染物减排非常有必要。推动转变经济增长方式, 降低资源消耗, 实现经济增长与工业污染的强脱钩。

2) 着重加强工业固废治理, 提高固废的资源化利用。在出现脱钩状态的情况下, 要急需深化城市工业污染治理, 加强工业固废治理, 提高固废的资源化利用率, 做到源头控制、过程资源化、最终无污染

[22]。

3) 加大环境治理投入, 包括技术、资金、政策等。环保政策的更新与贯彻实施、生产技术的改革与提高以及污染治理资金的大量投入, 都极大地影响着工业污染物的治理情况[23] [24], 因此, 未来需要进一步的环境污染治理资金投入与技术进步, 并且要不断提高资金投入的回报率与技术的低成本率, 提高生态环境质量。

基金项目

国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2017ZX07203-003)。

参考文献

- [1] Sterm, D.I. (1998) Progress on the Environmental Kuznets Curve? *Environment and Development Economics*, **3**, 175-198. <https://doi.org/10.1017/S1355770X98000102>
- [2] Sinha, A. and Bhattacharya, J. (2017) Estimation of Environmental Kuznets Curve for SO₂ Emission: A Case of Indian Cities. *Ecological Indicators*, **72**, 881-894. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.018>
- [3] OECD (2002) Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth. OECD, Paris.
- [4] 王平, 段友爱. 云南省污染物排放量与经济增长脱钩状态研究[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(6): 35-39.
- [5] 赵哲, 陈建成, 白羽萍, 王国峰, 刘雨. 二氧化碳排放与经济增长关系的实证分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7): 2785-2793.
- [6] 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波. 中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1987-1996.
- [7] 马晓君, 陈瑞敏, 董碧滢, 牛雪琪. 中国工业碳排放的因素分解与脱钩效应[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3549-3557.
- [8] 苑清敏, 张文龙, 宁宁宁. 京津冀物流业碳排放驱动因素及脱钩效应研究[J]. 科技管理研究, 2016, 36(5): 222-226.
- [9] 屠红洲. 长三角地区能源消费碳排放与经济增长关系的实证研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [10] 李红艳, 李晶, 张东海, 陈山山. 西安市环境库兹涅茨曲线分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 556-562.
- [11] Wang, Q. and Wang, X. (2020) Moving to Economic Growth without Water Demand Growth—A Decomposition Analysis of Decoupling from Economic Growth and Water Use in 31 Provinces of China. *Science of the Total Environment*, **726**, 138362. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138362>
- [12] 吴文洁, 王小妮. 陕西碳排放与经济增长关系研究——基于“EKC”与“脱钩”理论[J]. 西南石油大学学报(社会科学版), 2011, 13(6): 69-75, 6.
- [13] 丁俊菘, 邓宇洋, 汪青. 中国环境库兹涅茨曲线再检验——基于 1998~2016 年 255 个地级市 PM_{2.5} 数据的实证分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 1-8.
- [14] 闫宁, 施泽尧, 王天营. 江苏工业废气排放环境库兹涅茨曲线研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(S2): 119-123.
- [15] 何欢, 皇甫卓曦, 王以尧, 谢若兰, 余江. 四川省环境库兹涅茨曲线特征及影响因素研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(8): 29-33.
- [16] Vehmas, J., Kaivo-oja, J. and Luukkanen, J. (2003) Global Trends of Linking Environmental Stress and Economic Growth. Tutu Publications, Turku, 1-25.
- [17] 郭承龙, 张智光. 污染物排放量增长与经济增长脱钩状态评价研究[J]. 地域研究与开发, 2013, 32(3): 94-98, 114.
- [18] 汪菲, 王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析——基于扩展的 STIRPAT 模型[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 441-452.
- [19] 周侃, 伍健雄, 钱者东, 樊杰, 王强. 长江经济带水污染物减排的空间效应及驱动因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 885-895.
- [20] 罗芳, 郭艺, 魏文栋. 长江经济带碳排放与经济增长的脱钩关系——基于生产侧和消费侧视角[J]. 中国环境科

-
- 学, 2020, 40(3): 1364-1373.
- [21] 崔秀萍. 经济发展中城市化与大气污染曲线拟合相关性研究——以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 44-49.
- [22] 饶清华, 林秀珠, 李家兵, 陈琪, 陈文花. 流域社会经济与水环境质量耦合协调度分析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(4): 1784-1792.
- [23] 李雪松, 龙湘雪, 齐晓旭. 长江经济带城市经济 - 社会 - 环境耦合协调发展的动态演化与分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 505-516.
- [24] 张荣天, 焦华富. 泛长江三角洲地区经济发展与生态环境耦合协调关系分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 719-727.