

基于系统动力学的京津冀区域减污降碳政策仿真研究

曾元¹, 张文港², 孙靖文², 孙李傲², 吴军^{2*}, 高庆先³

1. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190

2. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要: 京津冀地区作为我国最早开展污染协同治理的区域, 一直在探索区域污染协同治理的政策性改善措施. 为探究不同减污降碳政策对京津冀区域污染治理效果的影响, 构建了一个由经济、能源、人口、环境、科技及政策 6 个要素组成的区域减污降碳系统动力学模型, 综合考虑废水、废气、固体废物等污染物以及 CO₂ 对环境的影响, 研究 4 种情景下不同政策组合对区域减污降碳的效果. 结果表明: ①从区域整体治理成效看, 除经济增长政策外的所有政策情景均表现出明显的治理效果. 产业结构调整政策、能源结构调整政策和环保投入政策下的环境相对污染度在 2030 年将分别下降 13.789%、0.282%、8.852%. ②从各污染物评价指标看, 经济增长政策更有利于降低废水污染物排放量和单位 GDP 能耗, 产业结构调整政策更有利于降低固体废物、废气和 CO₂ 等污染物排放量. ③相较于单一政策, 组合政策能够进一步降低环境相对污染度, 但随着组合数量的增加, 减污降碳效果并未表现出明显的政策协同效应. 研究显示, 虽然减排政策对不同污染物治理表现出不同的政策效应, 但产业结构调整仍然是实现京津冀区域减污降碳的关键途径.

关键词: 京津冀区域; 减污降碳; 系统动力学; 政策模拟; 三废

中图分类号: X506; C94 **文章编号:** 1001-6929(2023)11-2210-11

文献标志码: A **DOI:** 10.13198/j.issn.1001-6929.2023.09.11

Simulation Study on Pollution Reduction and Carbon Reduction Policies in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on System Dynamics

ZENG Yuan¹, ZHANG Wengang², SUN Jingwen², SUN Li'ao², WU Jun^{2*}, GAO Qingxian³

1. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei region is the first region in China to conduct collaborative pollution management. It has been exploring and developing policies and various measures for collaborative regional pollution management. In order to investigate the effects of different emission reduction policies on pollution management in the Beijing-Tianjin-Hebei region, a system dynamics model of the Beijing-Tianjin-Hebei region has been constructed. The system dynamics model consists of six sub-systems: economy subsystem, energy subsystem, population subsystem, environment subsystem, technology subsystem, and policy subsystem. The model takes into account the environmental impact of wastewater, waste gas, solid waste, and carbon dioxide. Four policy scenarios are considered in the model according to different pollution reduction and carbon reduction objectives. The effects of both single policy and combined policies on pollution reduction and carbon reduction in the Beijing-Tianjin-Hebei region are analyzed. The empirical results show the following findings: (1) In terms of the overall regional governance levels, all policy scenarios except the economic growth policy show significant governance effects. In 2030, under the industrial restructuring policy scenario, the energy restructuring policy scenario, and the environmental protection input policy scenario, the relative environmental pollution levels will decrease by 13.789%, 0.282% and 8.852%, respectively. (2) The evaluation indicators of each pollutant shows that the economic growth policies will promote the reduction of the wastewater discharge and energy consumption per unit of GDP, and the industrial restructuring policies will lead to the reductions in the

收稿日期: 2023-04-23 修订日期: 2023-08-23

作者简介: 曾元(1978-), 男, 河南永城人, 2522952984@qq.com.

* 责任作者, 吴军(1974-), 男, 湖北襄阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事环境建模与政策仿真研究, wujun@mail.buct.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFF0204405)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFF0204405)

pollutants such as solid waste, waste gas and carbon dioxide. (3) Compared with the single policy scenario, the combination of policies can further reduce the relative environmental pollution. However, as the number of the combination policies increases, no significant synergistic effect has been observed. The management insight drawn from the results is that different emission reduction policies have different effects on different pollutant management. Among them, industrial restructuring is still the key policy to achieve pollution reduction and carbon reduction in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; pollution reduction and carbon reduction; system dynamics; policy simulation; three wastes

京津冀作为我国北方经济的核心区域^[1],在经济高速发展的同时,其环境问题也受到政府高度重视。2013年9月,国务院印发《大气污染防治行动计划》中提出,要求到2017年京津冀区域可吸入颗粒物浓度要比2012年下降25%左右^[2]。2015年4月,国务院印发《水污染防治行动计划》中指出,要求到2020年京津冀区域丧失使用功能(劣V类,根据GB 3838—2002《地表水环境质量标准》划分)的水体断面比例下降15个百分点左右^[3]。经过多年的有效治理,京津冀环境质量有了明显改善,但仍存在污染问题。2020年京津冀秋冬大气污染物排放量超出环境容量的50%以上^[4],大量工业企业污染物的渗入致使水环境污染仍然严重^[5]。此外,2020年9月,我国在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出的力争于2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标^[6]也给京津冀区域减污降碳带来了新的挑战。因此,如何制定更为有效的政策来推进京津冀区域减污降碳,对维护区域生态环境安全意义重大。

目前减污降碳领域的研究主要集中在国家^[7]、省市级^[8-10]或重点排放行业层面^[11-15],对于区域层面的关注有限。在目前区域层面的研究中,束韞等^[16]针对京津冀大气污染问题,研究了不同政策情景改善区域空气质量的效果,为京津冀区域制定大气污染治理政策提供了建议。黄宝莹等^[17]基于粤港澳大湾区特点,提出了粤港澳大湾区实施水环境标准衔接的建议。王俊杰等^[18]分析了长三角区域工业固体废物处置效率不高的原因,为长三角地区一般工业固体废物的区域协同处置提出了新见解。然而,目前区域减污降碳研究大多集中在大气污染^[16,19-20]、水污染^[17]或固体废物污染^[18](简称“固废”)等单方面。在政策评价领域,各国学者集中研究了经济政策^[21-24]、能源政策^[25-28]、产业结构政策^[29]、环保投入政策^[30]等政策工具对减污降碳的效果。但目前研究较多关注单一政策对减污降碳的效果,无法判断不同政策之间的政策效应是否一致,政策组合的治理效果是否更有效等问题。

综上,对于区域减污降碳问题,当前研究主要存在以下不足:①减污降碳是一个多领域的复杂系统问

题,需要从更为系统、全面的角度对该问题进行分析,而目前研究较少综合考虑大气污染、水污染和固废污染治理问题;②政策协同是实现区域减污降碳的关键路径,而目前研究较少探究组合政策的协同效应。针对以上研究不足,系统动力学可以提供一个有效的解决方法。目前系统动力学方法在绿色发展^[31]、可持续发展^[32]、区域经济^[33]等众多领域有着广泛的应用,并取得了丰富的成果,其不仅可以从系统层面对各变量之间的关系进行研究,还可以通过设置不同情景对未来发展状况进行数值模拟。在减污降碳领域已有学者使用系统动力学方法分别对中国31省(自治区、直辖市)^[7]以及福建省^[34]、滇池流域等^[35]地区进行了研究,为研究京津冀区域减污降碳提供了借鉴和参考。基于此,该研究创新点如下:①使用系统动力学方法综合考虑了区域内的废气、废水和固废等污染物,从更为系统、全面的角度对减污降碳问题进行分析;②分别从单一政策与组合政策的角度对区域内政策协同问题进行了研究。该研究通过模拟不同政策方案下不同污染物以及二氧化碳的减排效果,探索了区域最优减排措施,以期相关政策制定提供参考。

1 京津冀区域减污降碳系统动力学模型构建

1.1 系统边界、基本假设及数据来源

1.1.1 系统边界

该研究构建了京津冀区域减污降碳系统动力学模型,以分析不同政策情景对区域减污降碳效果的影响。将系统的空间边界限定为京津冀区域,系统的时间边界设定为2005—2030年,仿真步长设定为1年。其中2005—2018年为仿真数据与实际数据对比的检验年限,用来验证模型有效性;2019—2030年为系统仿真的预测年限,预测了京津冀人口、经济、科技、能源、环境的发展趋势。

1.1.2 基本假设

a) 该研究主要考虑化学需氧量(COD)、氨氮化物、固废、二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)等五类污染物与二氧化碳(CO₂)。在京津冀地区,这些排放物主要来源于工业生产领域,因此模型构建不直接涉及第一和第三产业等领域的污染物排放^[7]。

b) 通过对京津冀区域 2005 年以来的历史数据进行分析, 该研究假设京津冀区域经济持续稳定增长, 不考虑存在较大增长波动与恶性通货膨胀等对经济影响较大的情况。

c) 鉴于考察减污降碳效果的全面性、合理性, 该研究以“环境相对污染度”作为衡量环境污染程度的综合评价指标^[8,34], 取值范围为 0~1, 数值越大表示环境污染程度越高, 由“废气相对污染度”“废水相对污染度”与“固废相对污染度”组成。根据不同污染物对人体的有害程度进行加权平均得到相对污染度^[36], 其权重分别设置为 0.55、0.35、0.1^[8]。同时, 设置“污染损失”作为衡量环境污染对 GDP 影响的量化指标^[34], 以虚拟治理成本法为核心进行测算, 用于量化环境污染对于经济造成的损失。

1.1.3 数据来源

模型运行所需的统计数据中, COD 减排效果因子、SO₂ 减排效果因子、人口增长率、人均生活污水排放量、单位工业产值固废产生量、工业产值占 GDP 比重、单位工业产值 COD 产生量、单位工业产值氨氮化物产生量、单位工业产值 SO₂ 产生量、化石能源消费弹性系数、非化石能源消费弹性系数取自

2006—2019 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》; NO_x 减排效果因子与单位工业产值 NO_x 产生量取自 2012—2019 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》; 工业产值占 GDP 比重取自 2006—2019 年《中国统计年鉴》; 环保投入比重取自 2006—2019 年《中国环境统计年鉴》。

1.2 系统结构分析

京津冀区域减污降碳系统是一个复杂多反馈的系统, 该系统主要包含污染物的来源、处理和排放机制。根据已有研究^[37]和 DPSIR(驱动力、压力、状态、影响和响应) 概念框架分析: 经济、人口总量、产业结构调整 and 能源是影响区域资源环境系统的主要“驱动”因素; 由人类活动(驱动力) 导致的污染物排放(压力) 进一步引起环境(状态) 的变化; DPSIR 概念框架中的“响应”主要是指系统在环境(状态) 受到影响之后, 政府通过制定相关政策来优化社会与经济之间的相互作用关系, 最终降低环境污染对人类社会的影 响。此外, 该文还考虑了科技进步对减污降碳效果的影响。综上, 该研究将京津冀区域减污降碳系统划分为人口、科技、经济、能源、环境和政策 6 个相互关联、作用的子系统, 各子系统之间的关系如图 1 所示。

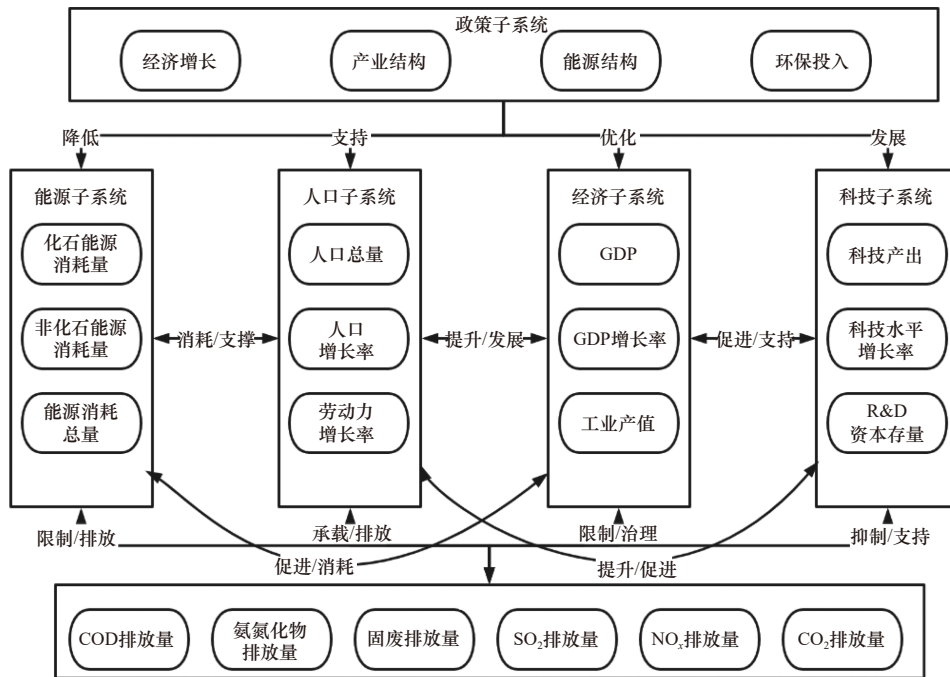


图 1 京津冀区域减污降碳系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of pollution reduction and carbon reduction system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

a) 人口子系统, 主要研究人口变化对其他子系统的影响, 其作用方式主要有 4 种: ①人口总量增长会提高能源消耗量^[34]; ②人口增长率升高会引起 GDP

增长率上升^[34]; ③全社会劳动力会受人口总量的影响, 研发人员的数量会受到“研发人员增长率”“新增研发人员占比”和“全社会劳动力”等多重因素的影响,

研发人员数量的升高会在一定程度促进科技产出^[8];
 ④人口总量增加,生活污水量会随之增加,进而引起
 废水污染物排放量升高^[8].

b) 经济子系统,主要研究经济总量和工业产值
 对环境和科技的影响.经济变化对环境和科技带来的
 影响可归结为两条路径:①GDP 影响 R & D 投资,进
 而影响科技水平;②GDP 影响环保投资,进而影响环
 境污染物的治理量,最终影响污染物的排放量.

c) 能源子系统,主要研究能源结构对环境的影响.
 能源消耗量会随着 GDP 增长而增加,同时化石能源
 消耗会对环境造成影响.

d) 科技子系统,主要研究科技水平对减污降碳
 的影响.科技水平的进步会影响污染物的治理效果.

e) 环境子系统,主要研究在其他子系统的作用下,
 污染物排放量的变化.环境子系统对整个系统的影响
 表现为,一是各类污染物排放量升高,导致环境相对
 污染度升高,进而引起污染损失升高,制约经济子系

统;二是环境相对污染度越高,生态环境对人类健康
 的影响就越大.

f) 政策子系统,主要研究不同政策实施对减污降
 碳的影响.不同政策的主要影响机制如下:①经济增
 长政策通过调控 GDP 增长率、人口增长率^[37],使得
 人口总量、GDP 上升,进而提高环保投资以及科技水
 平,加大污染物的治理量,最终减少污染物的排放量;
 ②产业结构调整政策通过调控产业结构^[34],直接影
 响工业产值,进而降低污染物的产生量;③能源结构
 调整政策通过调控能源结构^[34],调整化石能源消耗增
 长率和非化石能源消耗增长率,降低废气相对污染度;
 ④环保投入政策通过提高环保投入比例^[34],加大污
 染物治理量,进而降低污染物的排放量.

1.3 流量存量图与主要方程

在京津冀区域减污降碳系统结构分析的基础上,
 构建了京津冀区域减污降碳系统动力学模型,其系统
 存量流量图如图 2 所示.

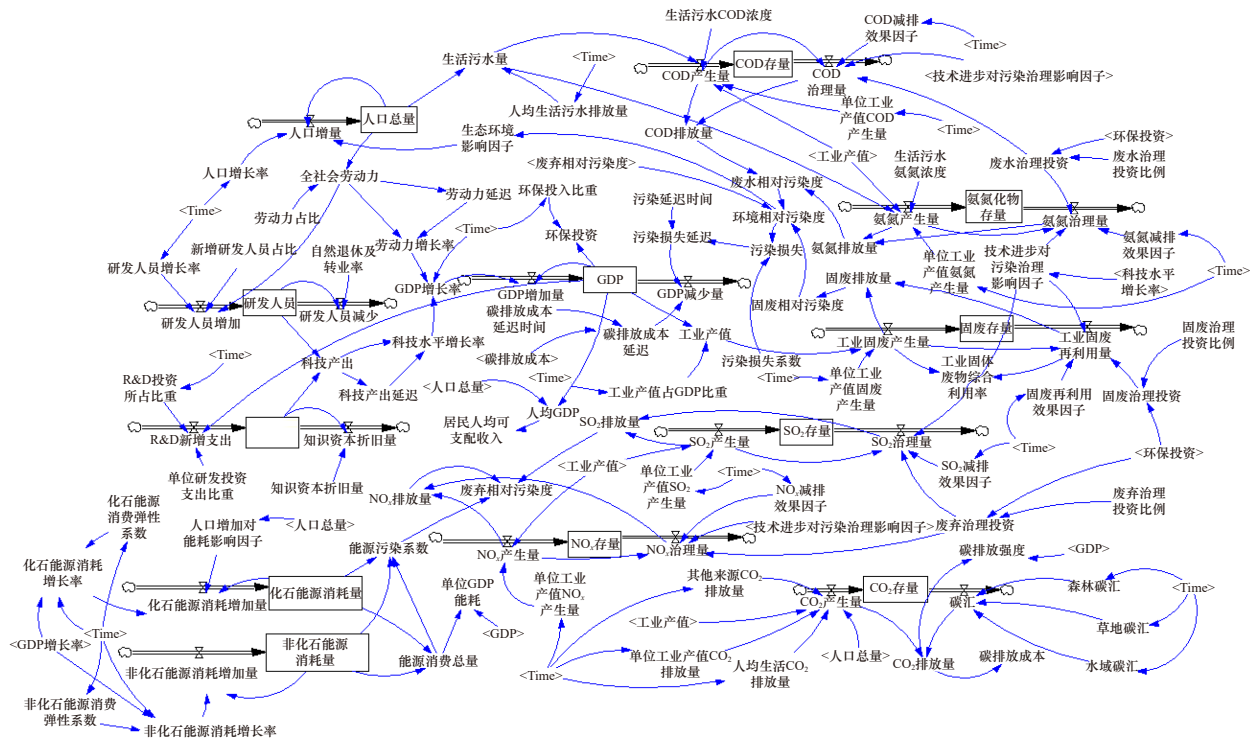


图 2 京津冀区域减污降碳模型存量流量示意

Fig.2 Pollution reduction and carbon reduction model of the Beijing-Tianjin-Hebei region

2 模型检验与仿真情景设计

2.1 模型有效性检验

为保证模型能够准确地反映各政策对减污降碳
 效果的影响,需要对模型的合理性和适用性进行检验,
 即模型先后进行了直观检验、稳定性检验、历史检验
 和灵敏性检验.由于篇幅所限,该研究重点介绍历史

检验^[8]和灵敏度检验^[34]的过程.历史检验通过比较
 各变量仿真值与实际值之间的差距从而判断模型是
 否有效,该研究对模型的主要变量进行了历史检验.
 考虑到历史数据的可获取性,历史检验时间设置为
 2005—2018 年.该研究共对 GDP、人口总量、氨氮化
 物排放量、单位 GDP 能耗、居民人均可支配收入、

COD 排放量、固废排放量、SO₂ 排放量、NO_x 排放量、CO₂ 排放量、化石能源消耗量、非化石能源消耗量等 12 个指标, 149 个历史值进行了分析. 结果显示, 除单位 GDP 能耗在 2006 年、2011 年、2012 年、2013 年的仿真值与历史值之间的相对误差分别为 16.28%、10.45%、13.02%、13.39% 以外, 其余变量的相对误差均在 10% 以内, 系统仿真结果与实际情况基本一致, 因此认为模型能够真实有效地反映京津冀减污降碳的实际状况.

灵敏度检验是通过研究系统的输出变化对周围

条件变化的反映程度, 探讨模型中某些输入变量改变后对一些关键指标的影响程度^[34]. 该研究为了检验区域减污降碳系统的灵敏度, 选取人口出生率和 GDP 增长率作为敏感参数, 考察在其基础情景下对参数进行合理范围内的增加或减少 5% 时, 人口总量和 GDP 总量的变化情况, 检验结果如图 3 所示. 由图 3 可见, 人口出生率或 GDP 增长率的变动, 没有对人口总量和 GDP 产生较大的不合理波动. 因此模型灵敏度检验表明, 模型对参数要求不会很严苛, 并未表现出过高的灵敏度.

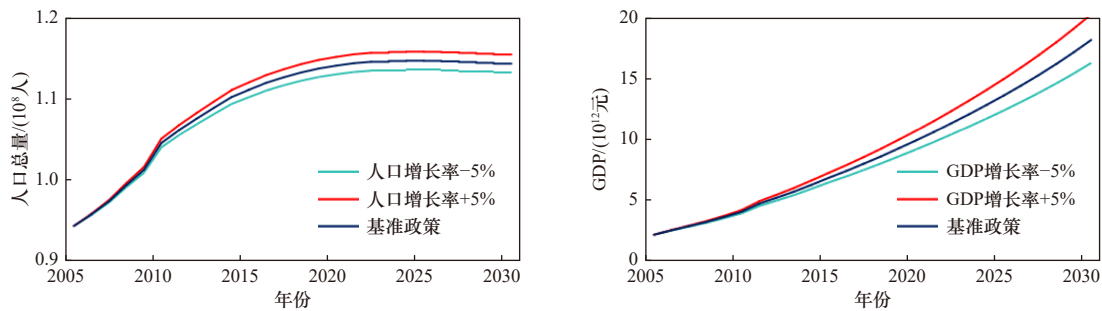


图 3 2005—2030 年京津冀区域减污降碳模型灵敏度检验

Fig.3 Sensitivity test of Beijing-Tianjin-Hebei region pollution reduction and carbon reduction model, 2005-2030

2.2 仿真情景设计

为考察减排政策对区域污染物排放的影响作用, 该文从经济、产业、能源、环保四项政策维度出发, 对减排政策进行模拟仿真^[7,34]. 各政策对应的调控因子和调控方式如表 1 所示.

基准情景. 此方案延续现行发展模式, 用于对比其他情景下的污染物与 CO₂ 的变化趋势.

经济增长政策情景仿真. 《京津冀协同发展规划纲要》提出“于 2030 年成为具有较强国际竞争力和影响力的重要区域, 甚至能够引领、支撑全国经济社会发展”, 结合美国、德国等发达国家经济增速缓慢下降的规律, 设置经济增长政策^[37]. 在基准情景的基础上, 将 2019—2030 的人口增长率和 GDP 增长率调高 30%. 以此来模拟经济发展对区域减污降碳的影响.

产业结构调整政策情景仿真. 我国“十三五”规划以来“三产化”趋势凸显, 结合世界制造业大国德国和日本两大经济体的产业结构发展趋势 (“三产化”阶段之后, 第二产业占比均稳定在 23%~25% 之间)^[38], 为探究产业结构调整下的减污降碳效果, 设置产业结构调整政策^[34]. 在基准情景的基础上, 将“工业产值占 GDP 比重”降低 3%, 在 2030 年达到 25% 左右, 以此来模拟产业结构调整对区域减污降碳的影响.

能源结构调整政策情景仿真. 目前京津冀区域能源消费结构以化石能源特别是煤炭为主, 清洁能源消费比重较低^[39]. 为探究能源结构调整下的减污降碳效果, 参考相关研究^[34] 设置能源结构调整政策. 在基准情景的基础上, 将“化石能源增长率”降低 10%, “非化石能源增长率”提高 4%, 以此来模拟能源结构调整对区域减污降碳的影响.

表 1 京津冀区域减污降碳政策

Table 1 Pollution reduction and carbon reduction policies in the Beijing-Tianjin-Hebei region

政策类型	调控因子	调控方式	数据来源
经济增长政策	人口增长率	+30%	文献[37]
	GDP增长率	+30%	
产业结构调整政策	工业产值占GDP比重	-3%	文献[34]
能源结构调整政策	化石能源消耗增长率	-10%	文献[34]
	非化石能源消耗增长率	+4%	
环保投入政策	环保投入比重	+2%	文献[34]

环保投入政策情景仿真. 我国目前环保投入与 GDP 的比值为 1%, 远低于发达国家的 2%. 为探究环保投入变化下的减污降碳效果, 参考相关研究^[34] 设置环保投入政策. 在基准情景的基础上, 将“环保投入比重”提高 2%, 使京津冀地区环保投入占比在 2030 年达到 2% 左右, 模拟加大环保投入对区域减污降碳的影响.

在以上 4 种政策的基础上, 为探究各政策及政策组合对京津冀区域减污降碳效果的影响, 设置了 4 类情景: 第 1 类为单一政策情景, 在此情境下分别研究每一种政策的实施效果; 第 2 类为 2 种政策组合的情景; 第 3 类为 3 种政策组合的情景; 第 4 类为 4 种政策组合的情景. 具体情景设置情况如表 2 所示.

表 2 情景设置

Table 2 Scenario setting

情景类型	调控政策	情景编号
基准情景	无	S0
单一政策情景	经济增长政策	S1
	产业结构调整政策	S2
	能源结构调整政策	S3
	环保投入政策	S4
2种政策组合情景	经济增长政策+产业结构调整政策	S12
	经济增长政策+能源结构调整政策	S13
	经济增长政策+环保投入政策	S14
	产业结构调整政策+能源结构调整政策	S23
	产业结构调整政策+环保投入政策	S24
	能源结构调整政策+环保投入政策	S34
3种政策组合情景	经济增长政策+产业结构调整政策+能源结构调整政策	S123
	经济增长政策+产业结构调整政策+环保投入政策	S124
	经济增长政策+能源结构调整政策+环保投入政策	S134
	产业结构调整政策+能源结构调整政策+环保投入政策	S234
4种政策组合情景	经济增长政策+产业结构调整政策+能源结构调整政策+环保投入政策	S1234

3 仿真结果分析

3.1 单一政策情景分析

通过对单一政策情景仿真, 模拟了各政策作用下京津冀减污降碳的发展趋势, 仿真结果如图 4 所示.

从区域整体治理成效看, 到 2030 年, 各情景下的环境相对污染度范围为 0.370~0.440. 相对基准情景, S2、S3 和 S4 情景下的环境相对污染度在 2030 年将分别下降 13.789%、0.282%、8.852%, 其中 S2 情景的治理效果最为显著, 原因在于: ①S1 情景的人口和 GDP 增加, 能源需求扩大, 导致各污染物排放量升高; ②各类污染物主要来源于工业生产过程, 优化产业结构, 降低高消耗、高污染产业比例, 加快工业绿色转型, 可以有效减少污染物排放, 进而改善环境污染问题.

从各污染物评价指标看, 到 2030 年, 各情景下的单位 GDP 能耗范围为 0.300~0.354 t/(10⁴ 元), 其中 S1 情景对控制能源消耗速度、降低单位 GDP 能耗效果显著. 原因在于: 单位 GDP 能耗是能源消耗量与 GDP 的比值, 其大小与能源消耗量成正比, 与 GDP

成反比, S1 情景下 GDP 快速增长, 使得在该情景下单位 GDP 能耗更低、能源利用效率更高. 固废排放量范围为 9 521.290×10⁴~14 140.700×10⁴ t, S2、S3 和 S4 情景均能够有效降低固废排放量, 其中 S2 情景的减排效果最为显著. 原因在于: 工业生产过程是固废产生的直接来源, S1 情景下的工业产值增加会导致固废排放量增加, 与此同时, S2 情景通过优化产业结构, 鼓励绿色产业的发展可以从源头处减少固废排放. CO₂ 排放量范围为 107 792.000×10⁴~137 538.000×10⁴ t, 其中 S2 情景能显著降低 CO₂ 排放量, S3 和 S4 情景对降低 CO₂ 排放量影响不明显, S1 情景则表现出了负面效果. 原因在于: CO₂ 排放与居民能耗和工业生产相关, S1 情景下工业产值和人口增加导致 CO₂ 排放量增加; S2 情景下产业结构得到优化, 绿色化、低碳化的产业结构可以有效减少工业生产过程的碳排放.

SO₂ 排放量范围为 76.767×10⁴~114.412×10⁴ t, NO_x 排放量范围为 90.557×10⁴~145.007×10⁴ t. S2、S3 和 S4 情景能有效降低废气污染物排放量, 其中 S2 情景的

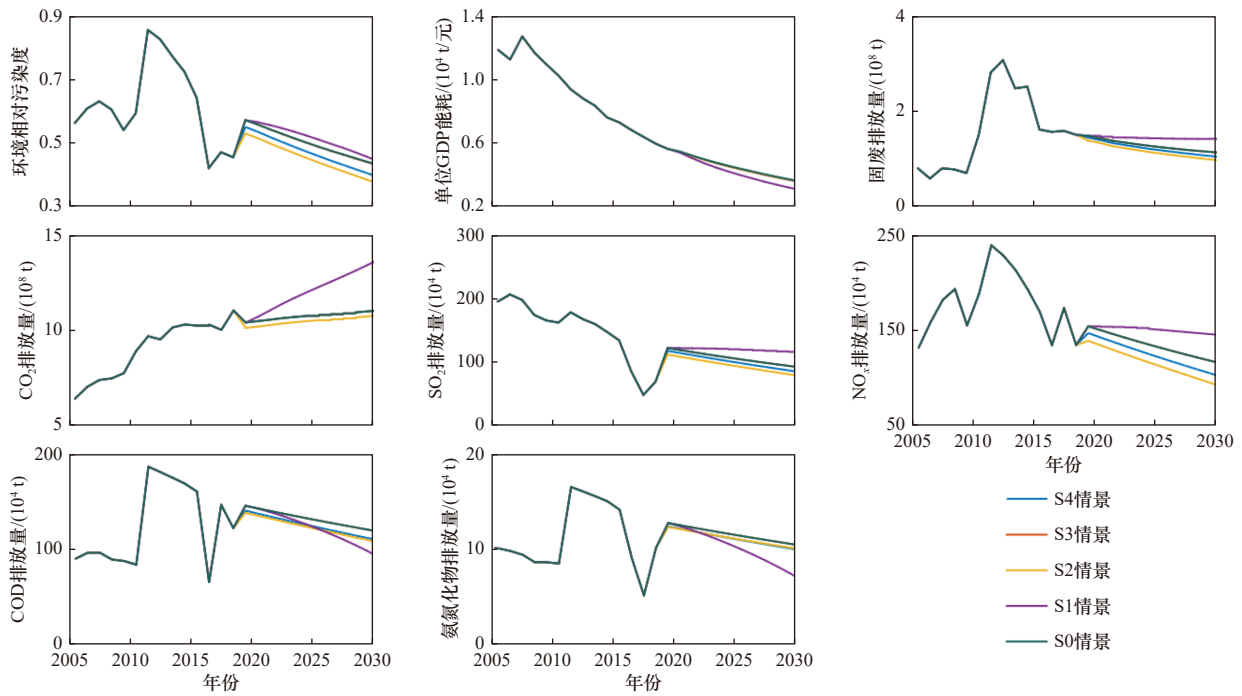


图4 单一政策情景下的仿真结果

Fig.4 Results of simulation under a single policy scenario

减排效果最为显著. 原因在于: ①S1 情景下人口和 GDP 增加, 能源需求扩大, 导致废气污染物排放量升高; ②废气产生与工业生产直接相关, 因此通过优化产业结构, 降低高消耗、高污染产业比例, 推进整个工业结构向着更加清洁、节能、高效的方向转变, 可以有效降低废气污染物排放量. COD 排放量范围为 $91.710 \times 10^4 \sim 118.535 \times 10^4$ t, 氨氮化物排放量范围为 $6.690 \times 10^4 \sim 10.332 \times 10^4$ t. 各情景均能有效降低废水污染物排放量, 其中 S1 情景的减排效果最为显著. 原因在于: S1 情景下人口和 GDP 增加, 能源需求扩大, 会导致各类污染物排放量上升. 然而废水的治理量会随之大幅增加, 从而降低废水污染.

3.2 两种政策组合情景分析

两种政策组合情景的仿真结果如图 5 所示, 到 2030 年, 各情景下的环境相对污染度范围为 0.332~0.438, 其中 S24 情景最低; COD 排放量范围为 $77.225 \times 10^4 \sim 118.535 \times 10^4$ t, 其中 S12 情景最低; 氨氮化物排放量范围为 $6.044 \times 10^4 \sim 10.331 \times 10^4$ t, 其中 S14 情景最低; 固废排放量为 $8\ 612.820 \times 10^4 \sim 14\ 140.700 \times 10^4$ t, 其中 S24 情景最低; SO_2 排放量为 $69.229 \times 10^4 \sim 114.412 \times 10^4$ t, 其中 S24 情景最低; NO_x 排放量为 $76.308 \times 10^4 \sim 145.007 \times 10^4$ t, 其中 S24 情景下最低; 单位 GDP 能耗范围为 0.296~0.354 t/(10^4 元), 其中 S13 情景最低; CO_2 排放量为 $107\ 795.000 \times 10^4 \sim 137\ 542.000 \times 10^4$ t, 其中 S24 情景最

低. 仿真结果显示, 2 种政策组合情景下的污染物排放量的最小值均低于单一政策情景的最小值, 这表明 2 种政策组合可以表现出更好的治理效果, 但需要付出更多的成本.

3.3 3 种政策组合情景分析

3 种政策组合情景的仿真结果如图 6 所示, 到 2030 年, 各情景下的环境相对污染度范围为 0.318~0.429, 其中 S124 情景最低; COD 排放量范围为 $65.349 \times 10^4 \sim 118.535 \times 10^4$ t, 其中 S124 情景最低; 氨氮化物排放量范围为 $5.526 \times 10^4 \sim 10.332 \times 10^4$ t, 其中 S124 情景最低; 固废排放量为 $8\ 612.820 \times 10^4 \sim 12\ 988.200 \times 10^4$ t, 其中 S234 情景最低; SO_2 排放量为 $69.229 \times 10^4 \sim 104.849 \times 10^4$ t, 其中 S234 情景最低; NO_x 排放量为 $76.308 \times 10^4 \sim 126.929 \times 10^4$ t, 其中 S234 情景最低; 单位 GDP 能耗范围为 0.295~0.354 t/(10^4 元), 其中 S123 情景最低; CO_2 排放量为 $107\ 795.000 \times 10^4 \sim 137\ 542.000 \times 10^4$ t, 其中 S234 情景最低. 仿真结果显示: 3 种政策组合情景下的环境相对污染度、废水污染物排放量和单位 GDP 能耗的最小值均低于 2 种政策情景和单一政策情景的最小值; 3 种政策组合情景下废气污染物排放量和 CO_2 排放量的最小值均与 2 种政策情景下的最小值相同, 但低于单一政策情景下的最小值. 这表明随着政策叠加数量的增加, 治理效果表现更好, 但边际效应有所降低.

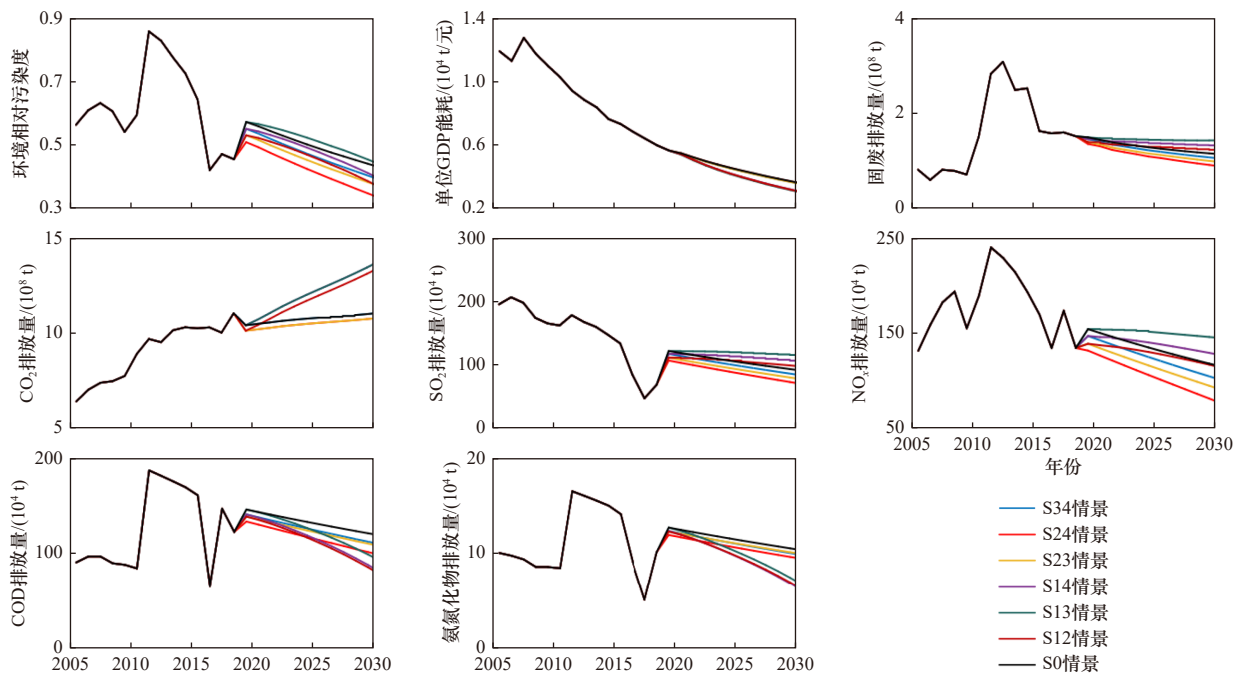


图 5 两种政策组合情景下的仿真结果

Fig.5 Results of simulation under two policy combination scenarios

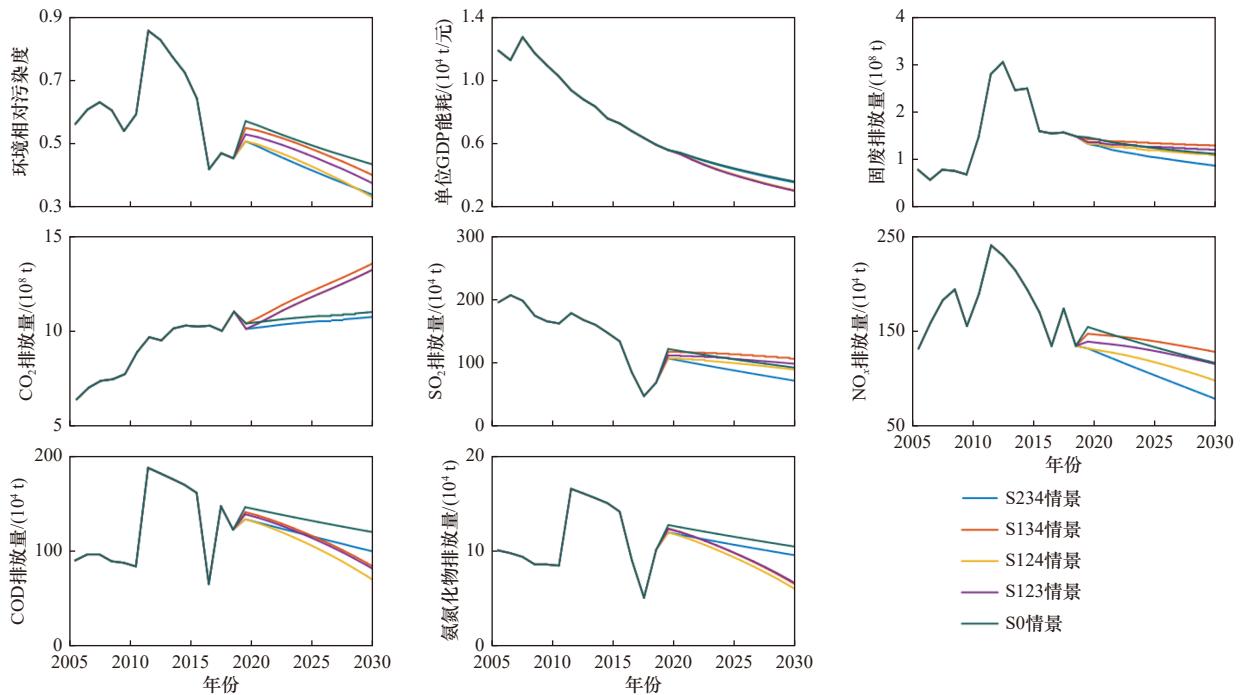


图 6 3 种政策组合情景下的仿真结果

Fig.6 Results of simulation under three policy combination scenarios

3.4 4 种政策组合情景分析

4 种政策组合情景的仿真结果如图 7 所示, 到 2030 年, 各情景下的环境相对污染度范围为 0.316 876~0.428 917, 其中 S1234 情景最低; COD 排放量范围为 $65.349 \times 10^4 \sim 118.535 \times 10^4$ t, 其中 S1234 情景最低; 氨

氮化物排放量范围为 $5.526 \times 10^4 \sim 10.332 \times 10^4$ t, 其中 S1234 情景最低; 固废排放量范围为 $10\ 872.100 \times 10^4 \sim 12\ 988.200 \times 10^4$ t, 其中 S1234 情景最低; SO₂ 排放量范围为 $87.368 \times 10^4 \sim 104.849 \times 10^4$ t, 其中 S1234 情景最低; NO_x 排放量范围为 $95.774 \times 10^4 \sim 126.929 \times 10^4$ t, 其中

S1234 情景最低;单位 GDP 能耗范围为 0.295~0.354 t/(10⁴元),其中 S1234 情景最低;CO₂ 排放量范围为 110 414.000×10⁴~134 190.000×10⁴ t,其中基准情景最低. 仿真结果显示:4 种政策组合情景下的环境相对污染度和废水污染物排放量在单一政策情景以及 2 种、3 种政策组合情景最低值的基础上进一步降低;

4 种政策组合情景下的废气污染物排放量、固废排放量仅低于基准情景;4 种政策组合情景下的 CO₂ 排放量高于基准情景. 这表明不同政策情景对不同污染物表现出不同的治理效果,4 种政策叠加对区域整体减污降碳表现出了更好的效果,但对于废气、固废、CO₂ 等污染物表现的治理、减排效果并不理想.

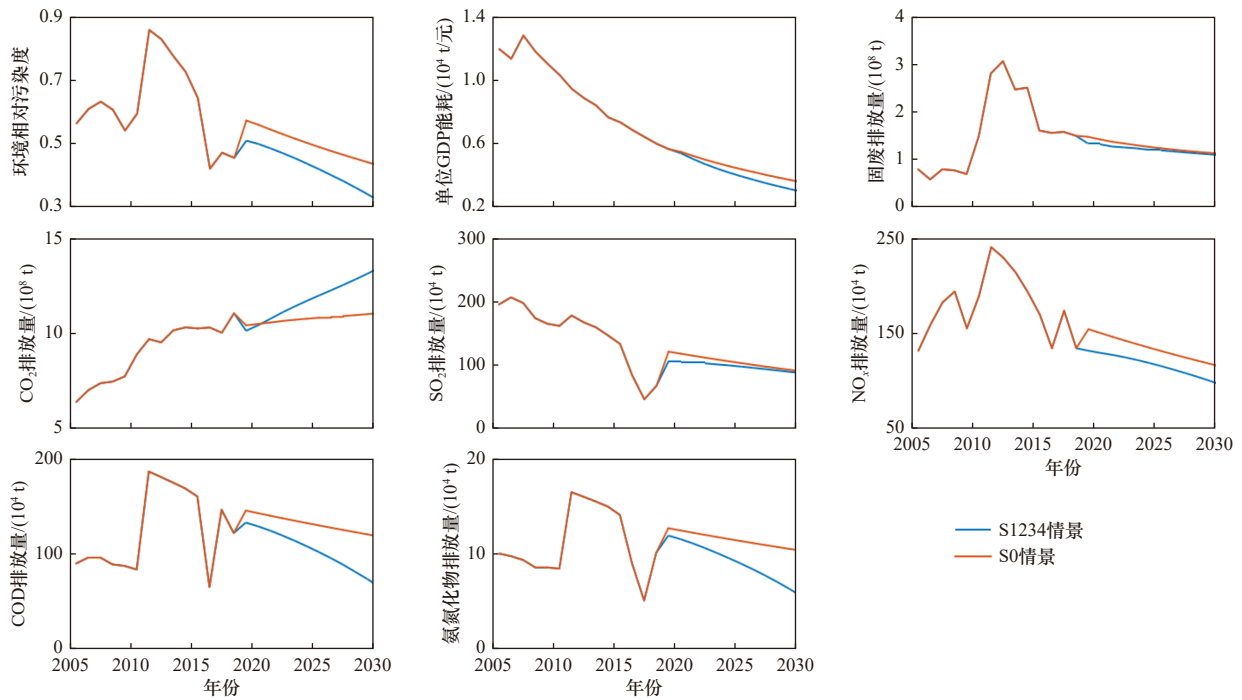


图7 4种政策组合情景下的仿真结果

Fig.7 Results of simulation under four policy combination scenarios

3.5 策略分析

通过对仿真结果分析,本文针对不同污染物评价指标,总结了最优减排政策,如表3所示.结果显示:①不同政策情景对不同污染物表现出不同的治理效果,政策制定者可参考表3,根据本地实际污染状况,针对性地制定减排政策.②随着政策组合数量的叠加,治理成本也随之升高.通过对比单一政策和组合政策的最优结果发现,随着政策组合数量的增加,京津冀

环境相对污染度能够得到进一步降低,基准情景、单一政策情景、2种政策组合情景、3种政策组合情景、4种政策组合情景下的环境相对污染度的最优结果分别为 0.440、0.370、0.332、0.318、0.317. 同时发现,随着政策组合数量的增加,京津冀污染治理效果并未表现出明显的政策协同效应.因此,政策制定者应该从治理成本和治理效益两方面出发制定政策,不应为追求治理效果最大化,盲目叠加政策.

表3 减污降碳最优政策总结

Table 3 Summary of optimal policies for pollution and carbon reduction

情景类型	环境相对污染度	废水污染物		固废	废气污染物		单位GDP能耗	CO ₂
		COD	氨氮化物		SO ₂	NO _x		
单一政策情景	S2	S1	S1	S2	S2	S2	S1	S2
2种政策组合情景	S24	S12	S14	S24	S24	S24	S13	S24
3种政策组合情景	S124	S124	S124	S234	S234	S234	S123	S234

4 结论

a) 减排政策对不同污染物治理表现出不同的政策效应,从单一政策角度出发,优化产业结构,降低

高消耗、高污染产业比例,加快工业绿色化、低碳化转型,是实现京津冀区域减污降碳的关键途径.

b) 随着政策组合数量的增加,京津冀区域环境

相对污染度能够得到进一步降低,但并未表现出明显的政策协同效应。因此,政策制定者在追求治理效果最大化的同时需要考虑治理成本的变化,不应为追求治理效果最大化,盲目叠加政策。

参考文献 (References):

- [1] 戴铁军,安佰超,王婉君.京津冀地区资源-环境-经济协调发展模式探究 [J].生态与农村环境学报,2020,36(6):731-740.
DAI T J,AN B C,WANG W J.Path analysis of coordinated development of resource,environment and economy in Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Journal of Ecology and Rural Environment,2020,36(6):731-740.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知 [EB/OL].北京:中华人民共和国中央人民政府,(2013-09-13)[2023-06-27].https://www.gov.cn/zhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发水污染防治行动计划的通知 [EB/OL].北京:中华人民共和国中央人民政府,(2015-04-16)[2023-06-27].https://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm.
- [4] 谷妍,邓楠.京津冀及周边秋冬季大气污染成因为何?生态环境部回应 [EB/OL].北京:人民网,(2020-09-11)[2023-06-27].<http://sn.people.com.cn/n2/2020/0911/c378287-34286993.html>.
- [5] 宋易南,侯德义,赵勇胜,等.京津冀化工场地地下水污染修复治理对策研究 [J].环境科学研究,2020,33(6):1345-1356.
SONG Y N,HOU D Y,ZHAO Y S,et al.Remediation strategies for contaminated groundwater at chemical industrial sites in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Research of Environmental Sciences,2020,33(6):1345-1356.
- [6] 吴婧.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 [EB/OL].北京:中国网,(2020-09-23)[2023-06-27].http://v.China.com.cn/news/2020-09/23/content_76731422.htm.
- [7] 刘开迪,杨多贵,王光辉,等.基于系统动力学的生态文明建设政策模拟与仿真研究 [J].中国管理科学,2020,28(8):209-220.
LIU K D,YANG D G,WANG G H,et al.Policy modeling and simulation on ecological civilization construction in China based on system dynamics[J].Chinese Journal of Management Science,2020,28(8):209-220.
- [8] 周雄勇,许志端,郝永勤.中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真 [J].系统工程理论与实践,2018,38(6):1422-1444.
ZHOU X Y,XU Z D,XI Y Q.The system dynamic model and policy optimized simulation of energy conservation and emission reduction in China[J].Systems Engineering-Theory & Practice,2018,38(6):1422-1444.
- [9] 曹俐,王梦瑶,雷岁江,等.基于准自然实验的生态转移支付政策环境效应评价 [J].环境科学研究,2022,35(11):2627-2638.
CAO L,WANG M Y,LEI S J,et al.Evaluation of environmental effect of ecological transfer payment policy based on quasi-natural experiment[J].Research of Environmental Sciences,2022,35(11):2627-2638.
- [10] 曹嘉琪,张英奎,徐晓萌,等.基于 DEA 和 SBM-Undesirable 模型的山东省污水处理效率研究 [J].环境科学研究,2021,34(7):1764-1770.
CAO J Q,ZHANG Y K,XU X M,et al.Efficiency of sewage treatment in Shandong Province based on DEA and SBM-undesirable model[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1764-1770.
- [11] WU T,WANG S Y,WANG L N,et al.Contribution of China's online car-hailing services to its 2050 carbon target:energy consumption assessment based on the GCAM-SE model[J].Energy Policy,2022,160:112714.
- [12] TANG L,XUE X D,QU J B,et al.Air pollution emissions from Chinese power plants based on the continuous emission monitoring systems network [J].Scientific Data,2020,7:325.
- [13] TANG L,RUAN J H,BO X,et al.Plant-level real-time monitoring data reveal substantial abatement potential of air pollution and CO₂ in China's cement sector [J].One Earth,2022,5(8):892-906.
- [14] 汤铃,薛晓达,伯鑫,等.中国水泥排放清单及分布特征 [J].环境科学,2020,41(11):4776-4785.
TANG L,XUE X D,BO X,et al.Contribution of emissions from cement to air quality in China[J].Environmental Science,2020,41(11):4776-4785.
- [15] LI H L,ZHU X H,CHEN J Y,et al.Environmental regulations, environmental governance efficiency and the green transformation of China's iron and steel enterprises [J].Ecological Economics,2019,165:106397.
- [16] 束韞,李海生,张文杰,等.2030 年京津冀及周边城市群 PM_{2.5} 污染控制路径 [J].环境科学研究,2023,36(3):439-448.
SHU Y,LI H S,ZHANG W J,et al.Pollution control path of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding urban agglomerations in 2030 [J].Research of Environmental Sciences,2023,36(3):439-448.
- [17] 黄莹莹,潘磊,尹倩婷.粤港澳大湾区水环境标准分析与衔接建议 [J].环境科学研究,2023,36(8):1543-1553.
HUANG B Y,PAN L,YIN Q T.Analysis and convergence of water environment standards in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J].Research of Environmental Sciences,2023,36(8):1543-1553.
- [18] 王俊杰,方正,赵震乾,等.长三角区域一体化生态共治机制下的一般工业固体废物废弃矿山协同处置模式探讨 [J].环境污染与防治,2021,43(6):796-800.
WANG J J,FANG Z,ZHAO Z Q,et al.Discussion on the collaborative disposal mode of general industrial solid waste/abandoned mine under the mechanism of regional integration and ecological co-governance in the Yangtze River Delta [J].Environmental Pollution & Control,2021,43(6):796-800.
- [19] 李晓瑜,王念,刘慧文,等.京津冀地区 NO_x 和 VOCs 协同减排成本及减排策略研究 [J].环境科学研究,2022,35(11):2618-2626.
LI X Y,WANG N,LIU H W,et al.Collaborative emission reduction cost and strategies of NO_x and VOCs in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J].Research of Environmental Sciences,2022,35(11):2618-2626.

- [20] 李慧,王淑兰,张文杰,等.京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J].环境科学研究,2021,34(1):172-184.
LI H,WANG S L,ZHANG W J,et al.Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas ('2+26' cities)[J].Research of Environmental Sciences,2021,34(1):172-184.
- [21] ABBASI K R,ADEDOYIN F F.Do energy use and economic policy uncertainty affect CO₂ emissions in China?empirical evidence from the dynamic ARDL simulation approach[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2021,28(18): 23323-23335.
- [22] ADEDOYIN F F,OZTURK I,AGBOOLA M O,et al.The implications of renewable and non-renewable energy generating in Sub-Saharan Africa:the role of economic policy uncertainties[J]. *Energy Policy*,2021,150:112115.
- [23] TIAN K L,ZHANG Y,LI Y Z,et al.Regional trade agreement burdens global carbon emissions mitigation[J].*Nature Communications*,2022,13:408.
- [24] WANG M X,HU Y,WANG S Y,et al.The optimal carbon tax mechanism for managing carbon emissions[J].*Socio-Economic Planning Sciences*,2023,87:101564.
- [25] BU C Q,ZHANG K X,SHI D Q,et al.Does environmental information disclosure improve energy efficiency?[J].*Energy Policy*,2022,164:112919.
- [26] OUYANG X L,LIN B Q.An analysis of the driving forces of energy-related carbon dioxide emissions in China's industrial sector [J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2015,45:838-849.
- [27] ZHENG J L,FENG G Z,REN Z Z,et al.China's energy consumption and economic activity at the regional level[J]. *Energy*,2022,259:124948.
- [28] JIANG T Y,YU Y,JAHANGER A,et al.Structural emissions reduction of China's power and heating industry under the goal of 'double carbon':a perspective from input-output analysis[J]. *Sustainable Production and Consumption*,2022,31:346-356.
- [29] SHAO S,YANG L L,GAN C H,et al.Using an extended LMDI model to explore techno-economic drivers of energy-related industrial CO₂ emission changes:a case study for Shanghai (China) [J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2016,55:516-536.
- [30] JIANG W M,COLE M,SUN J J,et al.Innovation,carbon emissions and the pollution haven hypothesis:climate capitalism and global re-interpretations[J].*Journal of Environmental Management*,2022, 307:114465.
- [31] LI Y,SUN Z Q.Green development system innovation and policy simulation in Tianjin based on system dynamics model[J].*Human and Ecological Risk Assessment:an International Journal*,2021, 27(3):773-789.
- [32] FANG C L,CUI X G,LI G D,et al.Modeling regional sustainable development scenarios using the Urbanization and Eco-environment Coupler:case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration,China[J].*Science of the Total Environment*,2019, 689:820-830.
- [33] GAO C K,GAO C B,SONG K H,et al.Pathways towards regional circular economy evaluated using material flow analysis and system dynamics[J].*Resources,Conservation and Recycling*,2020, 154:104527.
- [34] 高明,陈丽.省域大气污染治理的系统动力学分析:以福建省为例 [J].*科技管理研究*,2020,40(1):250-258.
GAO M,CHEN L.System dynamics analysis of atmospheric pollution control in provincial region:taking Fujian Province as an example[J].*Science and Technology Management Research*,2020, 40(1):250-258.
- [35] LIU H,BENOIT G,LIU T,et al.An integrated system dynamics model developed for managing lake water quality at the watershed scale[J].*Journal of Environmental Management*,2015,155:11-23.
- [36] 丁凡,王艳,李思一,等.中国可持续发展系统动力学仿真模型:环境部分 [J].*计算机仿真*,1998,15(1):8-10.
DING F,WANG Y,LI S Y,et al.A system dynamics simulation model for the sustainable development of China:environmental sector[J].*Computer Simulation*,1998,15(1):8-10.
- [37] 杨顺顺.基于系统动力学的区域绿色发展多情景仿真及实证研究 [J].*系统工程*,2017,35(7):76-84.
YANG S S.Multi-scenario simulation and case study for regional green development based on system dynamic[J].*Systems Engineering*,2017,35(7):76-84.
- [38] 赵伟.“十四五”期间中国经济发展不宜设定制造业占比指标 [J].*探索与争鸣*,2021(1):60-68.
ZHAO W.China's economic development had better not set proportion index of manufacturing industry during the period of the '14th Five-Year Plan'[J].*Exploration and Free Views*, 2021(1):60-68.
- [39] 严晓辉,高丹,李艳杰.京津冀地区推进能源革命的思考与对策 [J].*中国工程科学*,2021,23(1):24-31.
YAN X H,GAO D,LI Y J.Thoughts and countermeasures on promoting energy revolution in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J].*Strategic Study of CAE*,2021,23(1):24-31.

(责任编辑:张 蕊)