

# 天津市减污降碳协同效应评估与预测

刘茂辉<sup>1</sup>,刘胜楠<sup>2</sup>,李婧<sup>1</sup>,孙猛<sup>1</sup>,陈魁<sup>1\*</sup> (1.天津市生态环境监测中心,天津 300191; 2.天津天滨瑞成环境技术工程有限公司,天津 300190)

**摘要:** 为评估和预测天津市减污降碳协同效应,采用减排量弹性系数法评估减污降碳协同效应,基于 STIRPAT 模型预测天津市“十四五”期间的减污降碳协同效应,并分情景预测天津市 2026~2060 年的减污降碳协同效应.结果表明:大气污染当量和温室气体的主要排放源均为工业源;2015~2017 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.11~0.26,2013~2014 年和 2018~2020 年天津市的减污降碳协同效应系数均小于 0;天津市“十四五”期间减污降碳协同效应系数为 0.06;各种情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数均大于 0.天津市 2011~2020 年减污降碳协同效应波动变化,“十四五”时期或可进入减污降碳协同增效阶段.天津市要在 2026~2060 年实现较高水平的减污降碳协同增效,就需要合理控制城镇化率、人口总数和地区生产总值,增加第三产业比重和高技术比重,持续降低能源强度.

**关键词:** 减污降碳; 协同效应; 天津

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2022)08-3940-10

**Evaluation and prediction of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin.** LIU Mao-hui<sup>1</sup>, LIU Sheng-nan<sup>2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, SUN Meng<sup>1</sup>, CHEN Kui<sup>1\*</sup> (1.Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2.Tianjin Tianbinruicheng Environmental Technology and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300190, China). *China Environmental Science*, 2022,42(8): 3940~3949

**Abstract:** To evaluate and predict the synergistic effect of reducing pollution and carbon in Tianjin, the emission reduction elasticity coefficient method was used in this study. Based on the STIRPAT model, the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin during the "14th Five-Year Plan" period and 2026~2060 were predicted by scenario. The results showed that the main emission sources of air pollution equivalent and greenhouse gases were industrial sources. The synergistic effect coefficient of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin ranged from 0.11 to 0.26 in 2015~2017, and was less than 0 in 2013~2014 and 2018~2020. According to prediction, the synergistic effect coefficient of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin was 0.06 during the "14th Five-Year Plan" period and was greater than 0 in 2026~2060 under various scenarios. In 2011~2020, the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin fluctuated and changed, and it was possible to reach the synergistic stage during the "14th Five-Year Plan" period. In order to achieve a high level of synergy of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin from 2026 to 2060, several measures need to take, including reasonably control the urbanization rate, the total population and the gross regional product, increasing the proportion of tertiary industry and high technology, and continuously reducing the energy intensity.

**Key words:** reduce pollution and carbon; synergy effect; Tianjin

协同效应源自于 Ayers 等<sup>[1]</sup>提出的伴生效益,伴生效益的提出是为了阐述二氧化碳等温室气体的减排措施可以减少其他污染物的产生.此后,IPCC<sup>[2]</sup>在第三次评估报告中正式提出了协同效应的概念,协同效应是指某项污染物减排措施的实施在实现此项污染物减排的同时还产生了其他环境效益的现象<sup>[3]</sup>.我国能源结构的高碳和产业结构的高耗能特点,导致我国大气污染物与二氧化碳等温室气体具有同根、同源、同过程的特点<sup>[4]</sup>,研究表明,减污与降碳之间可以具有良好的协同效应<sup>[5]</sup>.

国外对减污降碳协同效应的研究起步较早,技

术方法和研究应用比较成熟<sup>[6-9]</sup>.国内对减污降碳协同效应的研究虽然起步较晚,但发展迅速,从近 10 年的发展来看,减污降碳协同效应的研究在部门、区域和方法上都有了长足的进步.从研究部门看,涉及到工业部门(包括电力行业<sup>[10]</sup>、水泥行业<sup>[11]</sup>、钢铁行业<sup>[12]</sup>等)、交通部门<sup>[13]</sup>、农业部门<sup>[14]</sup>以及集中式污染治理设施<sup>[15]</sup>;从研究区域看,涉及较为广泛,既有全

收稿日期: 2022-01-06

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160);中国工程院院地合作项目(2020C0-0002);天津市“131”创新型人才团队项目(2018032)

\* 责任作者, 正高级工程师, kuichen@126.com

国层面的<sup>[16]</sup>,也有京津冀等区域层面的<sup>[17]</sup>,既有北京<sup>[18]</sup>、上海<sup>[19]</sup>、重庆<sup>[20]</sup>、黑龙江<sup>[21]</sup>等省直辖市层面的,也有广州<sup>[22]</sup>、沈阳<sup>[23]</sup>、乌鲁木齐<sup>[24]</sup>等城市层面的;从研究方法看,计算大气污染物和二氧化碳等温室气体排放量常用的方法是排放因子法<sup>[25]</sup>、大气污染物当量法<sup>[26]</sup>,评估减污降碳协同效应常用的方法是相关系数法<sup>[27]</sup>、协同效应评估指数法<sup>[28]</sup>、协同减排当量法<sup>[29]</sup>、协同控制效应坐标法<sup>[30]</sup>和弹性系数法<sup>[31]</sup>,预测减污降碳协同效应常用的方法是多元线性回归分析法<sup>[32]</sup>、LEAP 模型法<sup>[33]</sup>和 STIRPAT 模型法<sup>[34]</sup>。

《2020 年天津市生态环境状况公报》<sup>[35]</sup>显示,天津市“十三五”期间,环境空气主要污染物浓度均显著下降,与“十二五”末相比,“十三五”末 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 年平均浓度分别下降 31.4%、41.4%、72.4%和 7.1%。同时,天津市 2020 年全市单位 GDP 碳排放强度预计累计下降超过 22%,超额完成国家下达的 20.5%的目标要求。在减污降碳协同治理的新形势下,天津市过去 10 年减污降碳协同效应如何;天津市“十四五”规划出台后,“十四五”期间的减污降碳协同效应如何;碳中和目标提出后,天津市在 2026~2060 年实现减污降碳协同增效的路径是什么样的。目前,还没有学者对天津市长时间序列的减污降碳协同效应开展评估和预测研究。为回答以上问题,研究基于排放因子法核算 2011~2020 年各排放源大气污染物和温室气体排放量,分析大气污染物与温室气体的相关性,采用减排量弹性系数法

评估 2011~2020 年的减污降碳协同效应,基于 STIRPAT 模型预测分析天津市“十四五”期间的减污降碳协同效应,并分情景预测天津市 2026~2060 年的减污降碳协同效应。

## 1 材料与方法

### 1.1 排放源分类

依据《城市大气污染源排放清单编制技术手册》<sup>[36]</sup>,大气污染源一般分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和其他排放源等十大类,这十大类源又可以依据污染物产生机理和排放特征进一步地细分。依据《省级温室气体清单编制指南(试行)》<sup>[37]</sup>,温室气体排放源一般分为能源活动、工业生产过程、农业、土地利用变化和林业、废弃物处理等五大类,其中能源活动又可分为化石燃料燃烧、生物质燃烧、煤炭开采和矿后活动逃逸、石油和天然气系统逃逸。《城市大气污染源排放清单编制技术手册》只纳入大气污染物的直接排放源,未考虑电力调入调出等间接排放源,为方便与大气污染物排放协同分析,研究只核算温室气体的直接排放,未考虑电力的调入调出和森林碳汇。为方便协同分析,需要对大气污染源和温室气体排放源进行统一分类,其中一级源类分为工业源、交通源、建筑源、农业源、生活源和集中式污染治理设施,具体排放源分类见表 1。

表 1 减污降碳协同效应评估排放源分类

Table 1 Emission source classification for assessment of synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction

一级源类	二级源分类	对应大气污染源	对应温室气体排放源
工业源	工业能源活动	电力供热,工业锅炉,烟气脱硝,生物质工业锅炉	工业能源活动,煤炭开采逃逸,油气系统逃逸,生物质工业锅炉
	工业生产过程	工艺过程源,工业溶剂使用,堆场	工业生产过程
交通源	交通运输	道路移动源,道路扬尘,储存运输源,船舶,飞机,铁路内燃机	交通运输业能源活动
建筑源	建筑施工	工程机械,建筑涂料,工地扬尘	建筑业能源活动
农业源	农田活动	农业机械,氮肥施用,裸地扬尘,生物质开放燃烧,固氮植物,土壤本地,农药使用	农业能源活动,稻田,农用地
	畜禽养殖	畜禽养殖	动物肠道发酵,动物粪便管理系统
生活源	民用锅炉	民用锅炉	服务业能源活动
	民用燃烧	民用燃烧	居民生活能源活动
	生物质炉灶	生物质炉灶	生物质燃烧
	生活溶剂	其他溶剂	/
	餐饮	餐饮	/
	人体粪便	人体粪便	/
集中式污染治理设施	废水处理	废水处理	废水处理
	固体处理	固体处理	固体处理

注:/表示不涉及。

## 1.2 大气污染物排放量和温室气体排放量核算

大气污染物的排放量主要核算公式如下式(1):

$$E=A \times EF \times (100-\eta) \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中: $E$  为大气污染物排放量,kg; $A$  为燃料消耗量或产品产量或行政区活动水平,t; $EF$  为污染物产生系数,kg/t; $\eta$  为污染控制设施对污染物的去除效率, %.

本研究所称“碳”是指温室气体,天津市温室气体主要包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$ ,且  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  分别按照 25、298 的系数折算为  $\text{CO}_2$  当量.温室气体的排放量依据《省级温室气体清单编制指南(试行)》进行核算,该指南总体上遵循《2016年 IPCC 国家温室气体清单指南》<sup>[38]</sup>的基本方法,并借鉴了 1994 年和 2005 年我国能源活动温室气体清单编制好的做法.其中,能源活动化石燃料燃烧温室气体清单编制采用以详细技术为基础的部门方法,该方法基于分部门、分燃料品种、分设备的燃料消费量等活动水平数据以及相应的排放因子等参数,通过逐层累加综合计算得到总排放量,计算公式如下:

$$C=EF_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \quad (2)$$

式中: $C$  为温室气体排放量,t; $EF_{i,j,k}$  为  $i$  燃料类型  $j$  部门活动  $k$  技术类型的排放因子,t/TJ; $A_{i,j,k}$  为  $i$  燃料类型  $j$  部门活动  $k$  技术类型的燃料消费量,TJ.

## 1.3 大气污染当量核算

表 2 大气污染物折算大气污染当量系数

Table 2 Air pollution equivalent conversion coefficient of air pollutants

大气污染物	当量系数	当量系数值
二氧化硫	$\alpha$	1/0.95
氮氧化物	$\beta$	1/0.95
一氧化碳	$\gamma$	1/16.7
挥发性有机物	$\delta$	1/0.95
氨	$\varepsilon$	1/9.09
可吸入颗粒物	$\zeta$	1/2.18

注:挥发性有机物的当量系数值来自《挥发性有机物排污收费试点办法》(财税〔2015〕71号),其他污染物的当量系数值来自《中华人民共和国环境保护税法》.

大气污染当量的定义源自《中华人民共和国环境保护税法》,采用以下公式(3)核算大气污染当量:

$$E_{\text{LAP}}=\alpha E_{\text{SO}_2}+\beta E_{\text{NOX}}+\gamma E_{\text{CO}}+\delta E_{\text{VOCs}}+\varepsilon E_{\text{NH}_3}+\zeta E_{\text{PM}_{10}} \quad (3)$$

式中: $E_{\text{LAP}}$  为大气污染当量,t; $E_{\text{SO}_2}$  为二氧化硫排放量,t; $E_{\text{NOX}}$  为氮氧化物排放量,t; $E_{\text{CO}}$  为一氧化碳排放量,t; $E_{\text{VOCs}}$  为挥发性有机物排放量,t; $E_{\text{NH}_3}$  为氨排放

量,t; $E_{\text{PM}_{10}}$  为可吸入颗粒物排放量,t; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\varepsilon$ 、 $\zeta$  分别为二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、挥发性有机物、氨和可吸入颗粒物的当量系数,无量纲.当量系数的具体数值见表 2.

## 1.4 协同效应系数

减污降碳协同效应系数可以定量描述温室气体与大气污染的协同减排效应,常用的系数是减排量弹性系数,具体计算公式(4)如下:

$$S=\frac{\Delta E_{\text{CO}_2} / E_{\text{CO}_2}}{\Delta E_{\text{LAP}} / E_{\text{LAP}}} \quad (4)$$

式中: $S$  为协同效应系数,无量纲; $\Delta E_{\text{CO}_2}$  为二氧化碳等温室气体减排量,t; $E_{\text{CO}_2}$  为二氧化碳等温室气体排放量,t; $\Delta E_{\text{LAP}}$  为大气污染当量减排量,t; $E_{\text{LAP}}$  为大气污染当量排放量,t.

当  $S < 0$ ,表示减污降碳不具有协同性;当  $S > 0$  时,表示减污降碳具有协同性.在温室气体和大气污染物同时减排的情况下,当  $0 < S < 1$  时,表示对大气污染物的减排作用大于对二氧化碳等温室气体的减排作用;当  $S = 1$  时,表示对温室气体和大气污染物的减排程度相当;当  $S > 1$  时,表示对温室气体的减排作用要大于对大气污染物的减排作用.

## 1.5 STIRPAT 模型

可拓展的随机性的环境影响评估(STIRPAT)模型源于 IPAT 等式,IPAT 等式表达式为:

$$I=P \times A \times T \quad (5)$$

式中: $I$  为环境负荷; $P$  为人口规模; $A$  为富裕度; $T$  为技术水平.

为克服 IPAT 等式各因素等比例影响的不足,York 等<sup>[39]</sup>基于 IPAT 等式,构建了 STIRPAT 模型,其表达式为:

$$I=a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (6)$$

式中: $a$  为常数; $P$ 、 $A$ 、 $T$  含义同式(5); $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为  $P$ 、 $A$ 、 $T$  的指数项; $e$  为误差项.

STIRPAT 模型作为定量分析各影响因素对环境负荷的一种有效方法,已被广泛地应用于环境保护研究中.苏凯等<sup>[40]</sup>利用 STIRPAT 模型分析了福建省域 2010~2016 年碳排放影响因子,探讨了各因子的影响程度,指明了碳排放控制的主要领域.王琳杰等<sup>[41]</sup>基于 STIRPAT 模型揭示了鄱阳湖沉积物重金属的主要影响因素.在利用 STIRPAT 模型对环境负荷的研究过程中,可以依据研究区域实际情况,引

入其他可以对环境负荷造成影响的因素,进而构建扩展的 STIRPAT 模型<sup>[42]</sup>。由文献[43]和[44]可知,人口总数、城镇化率、地区生产总值、第三产业比重、能源强度、高技术比重等 6 项因素是天津市碳排放的主要影响因素,因此,研究选取以上 6 项因素作为自变量对 STIRPAT 模型进行扩展,构建扩展后的模型见式(7):

$$E = \alpha P^a U^b A^c B^d T^e H^f g \quad (7)$$

式中: $E$  为大气污染当量或温室气体排放量, $t$ ;  $P$  为人口总数,万人;  $U$  为城镇化率,%;  $A$  为地区生产总值,亿元;  $B$  为第三产业比重,%;  $T$  为能源强度, $t$  标煤/万元;  $H$  为高技术比重,%;  $a$  为常数项, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $f$  为指数项, $g$  为误差项。为了消除模型中可能存在的异方差影响,研究将所有变量进行对数化处理,对数化之后的扩展 STIRPAT 模型如式(8):

$$\ln E = \ln \alpha + a \ln P + b \ln U + c \ln A + d \ln B + e \ln T + f \ln H + \ln g \quad (8)$$

在使用 STIRPAT 模型研究大气污染或温室气体排放时,构建的多元线性回归模型易产生多重共线性的问题,因此,使用偏最小二乘法(PLS)进行多元线性回归模型的构建。

## 1.6 情景设置

《天津市人口发展“十四五”规划》显示,到 2025 年,天津市常住人口达到 1500 万人左右,天津市“十四五”时期人口总数年均增长约为 1.5%;《天津市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》显示,天津市“十四五”时期,城镇化率达到 85%(年均增长 0.28 个百分点),地区生产总值年均增长 6%左右(其中,2021 年增长 6.6%),第三产业比重年均增长 1.5%左右,能源强度 5 年累计降低 15%,高技术比重达到 30%以上(年均上升 2.92 个百分点),参照文献[38,45-46],对天津市 2026~2060 年基准情景、低碳情景和超低碳情景下的 6 项参数进行设定(表 3)。

表 3 2026~2060 年减污降碳协同效应预测中各参数设置

Table 3 The setting of various parameters in the prediction of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction from 2026 to 2060

情景	参数	2026~2030 年	2031~2040 年	2041~2050 年	2051~2060 年
基准情景	人口总数	年均增长 1.2%	年均增长 0.45%	年均增长 -0.55%	年均增长 -1.55%
	城镇化率	年均增长 0.26	年均增长 0.2	年均增长 0.13	年均增长 0.06
	地区生产总值	年均增长 5.3%	年均增长 4.55%	年均增长 3.55%	年均增长 2.55%
	第三产业比重	年均增长 1.32%	年均增长 1.02%	年均增长 0.62%	年均增长 0.22%
	能源强度	5 年累计降低 16.6%	5 年累计降低 18.85%	5 年累计降低 21.85%	5 年累计降低 24.85%
	高技术比重	年均上升 2.64	年均上升 2.04	年均上升 1.24	年均上升 0.44
低碳情景	人口总数	年均增长 1.1%	年均增长 0.73%	年均增长 -0.23%	年均增长 -0.28%
	城镇化率	年均增长 0.24	年均增长 0.18	年均增长 0.11	年均增长 0.04
	地区生产总值	年均增长 4.8%	年均增长 4.05%	年均增长 3.05%	年均增长 2.05%
	第三产业比重	年均增长 1.52%	年均增长 1.22%	年均增长 0.82%	年均增长 0.42%
	能源强度	5 年累计降低 18.6%	5 年累计降低 20.85%	5 年累计降低 23.85%	5 年累计降低 26.85%
	高技术比重	年均上升 2.84	年均上升 2.24	年均上升 1.44	年均上升 0.64
超低碳情景	人口总数	年均增长 0.94%	年均增长 0.72%	年均增长 -0.42%	年均增长 -0.12%
	城镇化率	年均增长 0.22	年均增长 0.16	年均增长 0.09	年均增长 0.02
	地区生产总值	年均增长 3.8%	年均增长 3.05%	年均增长 2.05%	年均增长 1.05%
	第三产业比重	年均增长 1.72%	年均增长 1.42%	年均增长 1.02%	年均增长 0.62%
	能源强度	5 年累计降低 20.6%	5 年累计降低 22.85%	5 年累计降低 25.85%	5 年累计降低 28.85%
	高技术比重	年均上升 3.04	年均上升 2.44	年均上升 1.64	年均上升 0.84

注:城镇化率和高技术比重的数值为增长或上升的百分点数。

## 1.7 数据来源

工业、交通、建筑、农业、生活等能源数据,如煤炭、焦炭、煤气、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、石脑油、润滑油、石蜡、溶剂油、石油沥青、石油焦、液化石油气、炼厂干气、天然气、液化天然气等来自历年的《中国能源统计年鉴》<sup>[47]</sup>

中的“6-2 天津能源平衡表”。工业生产过程核算所需工业主要产品产量数据,交通运输核算所需机动车保有量,建筑施工核算所需建筑面积,农业源核算所需农作物播种面积、农产品产量,生活源核算所需餐饮业数据、人口数据,模拟预测所需要的人口总数、城镇化率、能源强度和高技术比重等数据来自历年

的天津统计年鉴.模拟预测所需要的地区生产总值、第三产业比重来源于历年的天津市国民经济和社会发展统计公报.

## 2 结果与讨论

### 2.1 相关性分析

如图1所示,从近10年的排放占比来看,大气污染当量和温室气体的主要排放源均为工业源.大气污染当量的工业源占比范围为58.6%~76.7%,且呈现逐年降低的趋势;温室气体的工业源占比范围为82.0%~85.6%,未呈现逐渐下降趋势,基本保持平稳.对2011~2020年间各大气污染物和各温室气体的相关性进行分析(表4).从源类相关性看,二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、挥发性有机物、可吸入颗粒物、大气污染当量、二氧化碳、氧化亚氮和温室气体相互之间均有较高的相关性;氨与甲烷有较高的相关

性;大气污染当量与温室气体的 Pearson 相关系数为0.984( $P < 0.01$ ),具有较高的相关性.

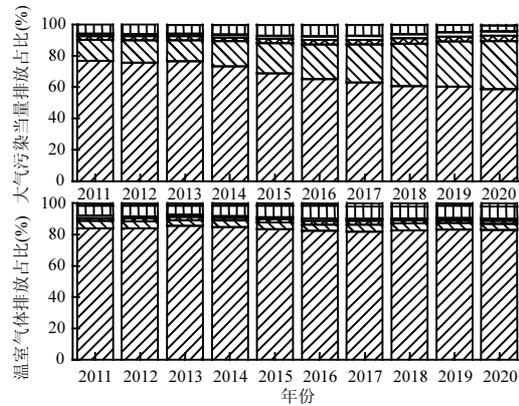


图1 天津2011~2020年大气污染当量和温室气体排放占比  
Fig.1 Tianjin's air pollution equivalent and greenhouse gas emissions from 2011 to 2020

工业源 交通源 建筑源 农业源 生活源 集中式

表4 2011~2020年间大气污染物和温室气体的源类相关性分析

Table 4 Correlation analysis between emission sources of air pollutants and greenhouse gases from 2011 to 2020

项目	二氧化硫	氮氧化物	一氧化碳	挥发性有机物	氨	可吸入颗粒物	大气污染当量	二氧化碳	甲烷	氧化亚氮	温室气体
二氧化硫	1.000	0.888**	0.990**	0.988**	0.664	0.923**	0.972**	0.995**	0.742	0.984**	0.995**
氮氧化物	0.888**	1.000	0.901**	0.928**	0.686	0.960**	0.969**	0.909**	0.751	0.873*	0.909**
一氧化碳	0.990**	0.901**	1.000	0.997**	0.657	0.902**	0.979**	0.998**	0.733	0.998**	0.998**
挥发性有机物	0.988**	0.928**	0.997**	1.000	0.661	0.929**	0.991**	0.998**	0.740	0.990**	0.997**
氨	0.664	0.686	0.657	0.661	1.000	0.701	0.691	0.672	0.767*	0.643	0.678
可吸入颗粒物	0.923**	0.960**	0.902**	0.929**	0.701	1.000	0.961**	0.923**	0.793*	0.872*	0.923**
大气污染当量	0.972**	0.969**	0.979**	0.991**	0.691	0.961**	1.000	0.984**	0.767*	0.963**	0.984**
二氧化碳	0.995**	0.909**	0.998**	0.998**	0.672	0.923**	0.984**	1.000	0.752	0.993**	1.000**
甲烷	0.742	0.751	0.733	0.740	0.767*	0.793*	0.767*	0.752	1.000	0.715	0.759*
氧化亚氮	0.984**	0.873*	0.998**	0.990**	0.643	0.872*	0.963**	0.993**	0.715	1.000	0.993**
温室气体	0.995**	0.909**	0.998**	0.997**	0.678	0.923**	0.984**	1.000**	0.759*	0.993**	1.000

注:\*\*表示相关性在0.01水平上显著,\*表示相关性在0.05水平上显著.

表5 2011~2020年大气污染物和温室气体的时间相关性分析

Table 5 Correlation analysis between emission time of air pollutants and greenhouse gases from 2011 to 2020

	二氧化硫	氮氧化物	一氧化碳	挥发性有机物	氨	可吸入颗粒物	大气污染当量	二氧化碳	甲烷	氧化亚氮	温室气体
二氧化硫	1.000	0.999**	0.977**	0.994**	0.861**	0.993**	0.998**	0.286	-0.843**	0.940**	0.415
氮氧化物	0.999**	1.000	0.976**	0.994**	0.855**	0.994**	0.998**	0.281	-0.849**	0.938**	0.411
一氧化碳	0.977**	0.976**	1.000	0.984**	0.894**	0.992**	0.988**	0.132	-0.874**	0.927**	0.263
挥发性有机物	0.994**	0.994**	0.984**	1.000	0.874**	0.993**	0.998**	0.274	-0.832**	0.931**	0.403
氨	0.861**	0.855**	0.894**	0.874**	1.000	0.871**	0.873**	0.124	-0.758*	0.720*	0.222
可吸入颗粒物	0.993**	0.994**	0.992**	0.993**	0.871**	1.000	0.998**	0.203	-0.862**	0.939**	0.335
大气污染当量	0.998**	0.998**	0.988**	0.998**	0.873**	0.998**	1.000	0.247	-0.852**	0.938**	0.378
二氧化碳	0.286	0.281	0.132	0.274	0.124	0.203	0.247	1.000	0.091	0.102	0.988**
甲烷	-0.843**	-0.849**	-0.874**	-0.832**	-0.758*	-0.862**	-0.852**	0.091	1.000	-0.825**	-0.024
氧化亚氮	0.940**	0.938**	0.927**	0.931**	0.720*	0.939**	0.938**	0.102	-0.825**	1.000	0.250
温室气体	0.415	0.411	0.263	0.403	0.222	0.335	0.378	0.988**	-0.024	0.250	1.000

注:\*\*表示相关性在0.01水平上显著,\*表示相关性在0.05水平上显著.

从表 5 可知,二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、挥发性有机物、氨、可吸入颗粒物、大气污染当量甲烷和氧化亚氮相互之间在时间上有较高的相关性;二氧化碳除与温室气体之间有较高相关性之外,与其他排放物在时间上相关程度都不高;大气污染当量与温室气体的 Pearson 相关系数为 0.378,在时间上相关程度不高。

从排放源和时间相关性分析来看,大气污染与温室气体的排放源均是工业源,具有同根同源的特点,这与王金南等<sup>[5]</sup>研究结果是一致的;天津市实施“大气污染防治行动计划”“蓝天保卫战三年行动计划”以来,主要大气污染物实现了逐年下降,但温室气体的排放在 2013~2017 之间逐年下降之后又略有上升,导致大气污染当量和温室气体在年度时间上相关程度不高。

## 2.2 2011~2020 年协同效应分析

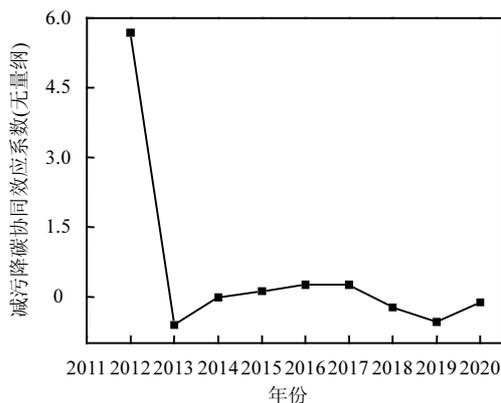


图 2 天津 2011~2020 年减污降碳协同效应分析

Fig.2 Analysis of the synergistic effect of pollution and carbon reduction in Tianjin from 2011 to 2020

基于 2011~2020 年大气污染当量和温室气体的排放量和逐年减排量以及公式(4)核算 2011~2020 年减污降碳协同效应系数。由图 2 可知,2015~2017 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.11~0.26,协同效应系数介于 0 和 1 之间,说明这几年天津市实施的减污降碳措施对大气污染物的减排作用要大于对温室气体的减排作用;2013~2014 年和 2018~2020 年的减污降碳协同效应系数小于 0,说明这几年天津市的减污降碳不具有协同效应,进一步分析大气污染当量和温室气体的减排情况可知,这几年大气污染当量是不断减少的,温室气体的排放略有增长,导致这几年减污降碳不具有协同效应;2012 年与 2011 年

相比,协同效应系数为 5.69,但是大气污染当量和温室气体均是增加的,并未出现减污降碳的效应。这说明,受天津市“大气污染防治行动计划”的影响,大气污染当量和温室气体在 2015~2017 年处于减污降碳协同增效的阶段,但 2018~2020 年受国际形势变化和新冠疫情影响,尤其是中美贸易战的影响,天津市为减缓经济增长的乏力,能源、资源的消耗略有增加,导致温室气体排放增加、减污降碳不具有协同效应。

## 2.3 “十四五”期间协同效应预测

使用偏最小二乘法,基于公式(8)和 2011~2020 年时期数据,构建大气污染当量( $E_{LAP}$ )和温室气体( $E_{CO_2}$ )的预测模型如下:

$$E_{LAP} = \text{EXP}(1.8968 \ln P + 3.324 \ln U - 0.2449 \ln A - 0.782 \ln B + 1.3162 \ln T - 0.6786 \ln H - 16.0722) \quad (9)$$

$$E_{CO_2} = \text{EXP}(-0.4596 \ln P + 7.3443 \ln U + 0.0683 \ln A - 0.0398 \ln B + 0.6533 \ln T - 0.041 \ln H - 19.0781) \quad (10)$$

由预测模型可知,对于天津地区,在保持其他变量不变的情况下,人口总数每增加 1%,大气污染当量的排放平均增加 1.91%,温室气体的排放平均减少 0.46%;城镇化率每增加 1%,大气污染当量的排放平均增加 3.36%,温室气体的排放平均增加 7.58%;地区生产总值每增加 1%,大气污染当量的排放平均减少 0.24%,温室气体的排放平均增加 0.07%;第三产业比重每增加 1%,大气污染当量的排放减少 0.78%,温室气体的排放减少 0.04%;能源强度每降低 1%,大气污染当量的排放平均减少 1.31%,温室气体的排放平均减少 0.65%;高技术比重每增加 1%,大气污染当量的排放平均减少 0.67%,温室气体的排放平均减少 0.04%。由公式(9)可以看出,人口总数、城镇化率、能源强度与大气污染当量排放成正相关,地区生产总值、第三产业比重和高技术比重与大气污染当量排放成反比;对大气污染当量排放影响程度从大到小排序依次为:城镇化率>人口总数>能源强度>第三产业比重>高技术比重>地区生产总值。由公式(10)可以看出,城镇化率、地区生产总值、能源强度与温室气体排放成正相关,与上海市<sup>[42]</sup>、昆明市<sup>[48]</sup>和天津市<sup>[49]</sup>是一致的,但人口总数与温室气体排放成负相关,这与以上研究是不一致的,主要是因为 2013 年以来天津市的温室气体排放是呈下降趋势的,而人口则是呈上升趋势的,以上城市的数据结果并未呈现类似规律,所以导致了本研究的人口总

数的相关性与其他城市研究不一致的结果.因此,低碳发展要求下,需要合理控制人口总数,城镇化速度和地区生产总值增速都需要放缓,增大第三产业比重和高技术比重,持续增强能源强度的下降幅度.对温室气体排放影响程度从大到小排序依次为:城镇化率>能源强度>人口总数>地区生产总值>高技术比重>第三产业比重.因此,城镇化率、人口总数和能源强度是对大气污染当量和温室气体的排放影响最大的三个因素.

基于公式(9)和(10)以及“十四五”期间的各参数核算大气污染当量和温室气体排放量,核算协同效应系数(图 3).天津市“十四五”减污降碳的协同效应系数范围为 0.05~0.10,平均值为 0.06,说明天津市“十四五”期间减污降碳具有协同效应.因此,现有天津市“十四五”规划可以实现减污降碳协同增效的效果.

#### 2.4 2026~2060 年协同效应预测

由图 3 可知,在基准情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.07~0.23,平均值为 0.17,说明此情景下,天津市减污降碳具有协同效应,但协同效应强度较低;在低碳情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.11~0.39,平均值为 0.27,说明此情景下,天津市减污降碳具有较强的协同效应,协同效应强度是基准情景下的 1.59 倍;在超低碳情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.14~0.47,平均值为 0.33,说明此情景下,天津市减污降碳具有更强的协同效应,协同强度是基准情景下的 1.94 倍、低碳情景下的 1.22 倍.

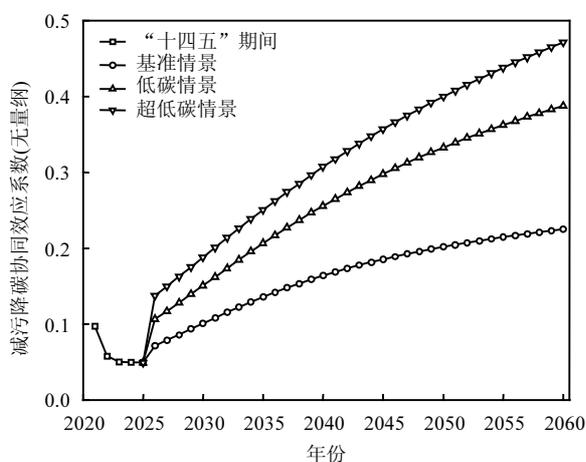


图 3 天津 2021~2060 减污降碳协同效应分析

Fig.3 Analysis of the synergistic effect of reducing pollution and carbon in Tianjin from 2021 to 2060

因此,低碳发展要求下,减污降碳协同效应也随之增强.天津市在 2026~2060 年若想实现减污降碳协同增效,可以按照基准情景设置各参数;但若想实现较高水平的减污降碳协同增效,在基准情景的基础之上,需要合理控制城镇化率、人口总数和地区生产总值,增加第三产业比重和高技术比重,并持续降低能源强度.

#### 2.5 不确定性分析

核算大气污染当量和温室气体采用的排放因子是分别来源《城市大气污染源排放清单编制技术手册》和《省级温室气体清单编制指南(试行)》,这两份技术手册是面向全国范围的,未考虑天津市本地化的排放因子,核算结果会带来一定的不确定性;研究中未考虑电力调入调出等间接排放源,导致大气污染和温室气体排放量的分析存在一定的不确定性;预测模型的构建是依据 2011~2020 年的数据进行构建的,反映的是这 10 年整体的规律,依据该模型进行预测分析时存在一定的不确定性.

### 3 结论

3.1 2015~2017 年天津市减污降碳协同效应系数范围为 0.11~0.26,且减污降碳措施对大气污染物的减排作用要大于对温室气体的减排作用;2013~2014 年和 2018~2020 年天津市减污降碳协同效应系数均小于 0.

3.2 天津市“十四五”减污降碳的协同效应系数范围为 0.05~0.10,平均值为 0.06,说明依据本研究构建的模型进行预测,天津市“十四五”期间减污降碳或可实现协同增效.

3.3 在基准情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数均大于 0;在低碳情景下,2026~2060 年天津市减污降碳协同效应系数也均大于 0,协同效应强度是基准情景下的 1.59 倍;在超低碳情景下,2026~2060 年天津市减污降碳具有更强的协同效应,协同效应强度是基准情景下的 1.94 倍.

3.4 天津市若在 2026~2060 年实现高水平减污降碳协同增效,就需要合理控制城镇化率、人口总数和地区生产总值,增加第三产业比重和高技术比重,并持续降低能源强度.

#### 参考文献:

- [1] Ayres R U, Walter J. The greenhouse effect: damages, costs and

- abatement [J]. *Environmental and Resource Economics*, 1991,1(3): 237-270.
- [2] IPCC. *Climate change 2001-mitigation* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [3] 毛显强,曾 桢,邢有凯,等.从理念到行动:温室气体与局地污染物减排的协同效益与协同控制研究综述 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(3):255-267.
- Mao X Q, Zeng A, Xing Y K, et al. From concept to action: a review of research on co-benefits and co-control of greenhouse gases and local air pollutants reductions [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(3):255-267.
- [4] Swart R, Amann M, Raes F, et al. A good climate for clean air: Linkages between climate change and air pollution. An Editorial Essay [J]. *Climatic Change*, 2004,66(3):263-269.
- [5] 王金南,宁 淼,严 刚,等.实施气候友好的大气污染防治战略 [J]. *中国软科学*, 2010,(10):28-36,111.
- Wang J N, Ning M, Yan G, et al. Implementing climate-friendly strategy for air pollution prevention and control [J]. *China Soft Science Magazine*, 2010,(10):28-36,111.
- [6] 郑佳佳,孙 星,张牧吟,等.温室气体减排与大气污染控制的协同效应——国内外研究综述 [J]. *生态经济*, 2015,31(11):133-137.
- Zheng J J, Sun X, Zhang M Y, et al. Review of researches on the synergistic effect of GHGs mitigation and air pollution control at home and abroad [J]. *Ecological Economy*, 2015,31(11):133-137.
- [7] Smith K R, Haigler E. Co-benefits of climate mitigation and health protection in energy systems: Scoping methods [J]. *Annual Review of Public Health*, 2008,29(1):11-25.
- [8] Markandya A, Armstrong B J, Hales S, et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: Overview and implications for policy makers [J]. *The Lancet*, 2009,374(9706): 2006-2015.
- [9] Groosman B, Muller N Z, O'Neill-Toy E. The ancillary benefits from climate policy in the United States [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2011,50(4):585-603.
- [10] 周 颖,刘兰翠,曹 东.二氧化碳和常规污染物协同减排研究 [J]. *热力发电*, 2013,42(9):63-65.
- Zhang Y, Liu L C, Cao D. Synergistical emission control of carbon dioxide and conventional pollutants in thermal power plants [J]. *Thermal Power Generation*, 2013,42(9):63-65.
- [11] 周 颖,张宏伟,蔡博峰,等.水泥行业常规污染物和二氧化碳协同减排研究 [J]. *环境科学与技术*, 2013,36(12):164-168.
- Zhou Y, Zhang H W, Cai B F, et al. Synergetic reduction of local pollutants and CO<sub>2</sub> from cement industry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,36(12):164-168.
- [12] 刘胜强,毛显强,胡 涛,等.中国钢铁行业大气污染与温室气体协同控制路径研究 [J]. *环境科学与技术*, 2012,35(7):168-174.
- Liu S Q, Mao X Q, Hu T, et al. Roadmap of co-control of air pollutants and GHGs in iron and steel industry in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,35(7):168-174.
- [13] 邢有凯,刘峥延,毛显强,等.中国交通行业实施环境经济政策的协同控制效应研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(4):379-387.
- Xing Y K, Liu Z Y, Mao X Q, et al. Research on co-control effect of environmental economic policies in China's transportation sector [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(4):379-387.
- [14] 何艳秋,陈 柔,朱思宇,等.中国农业碳排放空间网络结构及区域协同减排 [J]. *江苏农业学报*, 2020,36(5):1218-1228.
- He Y Q, Chen R, Zhu S Y, et al. Spatial network structure of agricultural carbon emission in China and regional collaborative emission reduction [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 36(5):1218-1228.
- [15] 王 媛,何 或,颜蓓蓓.城市生活垃圾主要处理方式的温室气体协同减排效应比较——以天津市为例 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014,47(4):349-354.
- Wang Y, He Y, Yan B B. Comparison of collaborative effects of greenhouse gas emission reduction among main municipal solid waste (MSW) disposal ways—A case study of Tianjin [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014,47(4):349-354.
- [16] 马 丁,陈文颖.中国钢铁行业技术减排的协同效益分析 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(1):298-303.
- Ma D, Chen W Y. Analysis of the co-benefit of emission reduction measures in China's iron and steel industry [J]. *China Environmental Science*, 2015,35(1):298-303.
- [17] 李 新,路 路,穆献中,等.京津冀地区钢铁行业协同减排成本-效益分析 [J]. *环境科学研究*, 2020,33(9):2226-2234.
- Li X, Lu L, Mu X Z, et al. Cost-benefit analysis of synergistic emission reduction in steel industry in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020,33(9):2226-2234.
- [18] 谢元博,李 巍.基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 [J]. *环境科学*, 2013,34(5):2057-2064.
- Xie Y B, Li W. Synergistic emission reduction of chief air pollutants and greenhouse gases based on scenario simulations of energy consumptions in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2013,34(5): 2057-2064.
- [19] 阿迪拉·阿力木江,蒋 平,董虹佳,等.推广新能源汽车碳减排和大气污染控制的协同效益研究——以上海市为例 [J]. *环境科学学报*, 2020,40(5):1873-1883.
- Alimujiang A, Jiang P, Dong H J, et al. Synergy and co-benefits of reducing CO<sub>2</sub> and air pollutant emissions by promoting new energy vehicles: A case of Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(5):1873-1883.
- [20] 王 敏,冯相昭,杜晓林,等.工业部门污染治理协同控制温室气体效应评价——基于重庆市的实证分析 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(3):296-304.
- Wang M, Feng X Z, Du X L, et al. Evaluation of co-controlling GHGs from pollutant reduction facilities in the industrial sectors, empirical analysis based on data in Chongqing city [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(3):296-304.
- [21] 张 扬,付凌波,李 薇,等.基于黑龙江省大气污染防治行动计划的温室气体减排核算 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015,25(S2):333-336.
- Zhang Y, Fu L B, Li W, et al. Accounting for the reduction of greenhouse gas emissions based on the air pollution control action plan in Heilongjiang province [J]. 2015,25(S2):333-336.
- [22] 黄 莹,焦建东,郭洪旭,等.交通领域二氧化碳和污染物协同控制效应研究 [J]. *环境科学与技术*, 2021,44(7):20-29.

- Huang Y, Jiao J D, Guo H X, et al. Assessment of co-control effects for CO<sub>2</sub> and air pollutants in transport sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021,44(7):20-29.
- [23] 温娜. 沈阳大气污染物与二氧化碳协同减排效应分析 [J]. *品牌与标准化*, 2021,(4):60-64.
- Wen N. Analysis on the co-benefits of air pollution and carbon dioxide emissions reduction in Shenyang [J]. *Brand & Standardization*, 2021, (4):60-64.
- [24] 高玉冰,毛显强,Gabriel Corsetti,等.城市交通大气污染物与温室气体协同控制效应评价——以乌鲁木齐市为例 [J]. *中国环境科学*, 2014,34(11):2985-2992.
- Gao Y B, Mao X Q, Gabriel Corsetti, et al. Assessment of co-control effects for air pollutants and green house gases in urban transport: A case study in Urumqi [J]. *China Environmental Science*, 2014,34(11): 2985-2992.
- [25] 贾璐宇,王艳华,王克,等.大气污染防治措施二氧化碳协同减排效果评估 [J]. *环境保护科学*, 2020,46(6):19-26.
- Jia L Y, Wang Y H, Wang K, et al. Evaluation of carbon dioxide coordination emission reduction based on national air pollution control plan [J]. *Environmental Protection Science*, 2020,46(6):19-26.
- [26] 邢有凯,毛显强,冯相昭,等.城市蓝天保卫战行动协同控制局地大气污染物和温室气体效果评估——以唐山市为例 [J]. *中国环境管理*, 2020,12(4):20-28.
- Xing Y K, Mao X Q, Feng X S, et al. An effectiveness evaluation of co-controlling local air pollutants and GHGs by implementing blue sky defense action at city level - A case study of Tangshan City [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2020,12(4):20-28.
- [27] 宋飞,付加锋.世界主要国家温室气体与二氧化硫的协同减排及启示 [J]. *资源科学*, 2012,34(8):1439-1444.
- Song F, Fu J F. The synergistic emission reduction of GHG and sulfur dioxide in the world's major countries and its revelation [J]. *Resources Science*, 2012,34(8):1439-1444.
- [28] 高庆先,高文欧,马占云,等.大气污染物与温室气体减排协同效应评估方法及应用 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(3):268-278.
- Gao Q X, Gao W O, Ma Z Y, et al. The synergy effect assessment method and its application for air pollutants and greenhouse gases reduction [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(3):268-278.
- [29] 毛显强,邢有凯,胡涛,等.中国电力行业硫、氮、碳协同减排的环境经济路径分析 [J]. *中国环境科学*, 2012,32(4):748-756.
- Mao X Q, Xing Y K, Hu T, et al. An environmental-economic analysis of carbon, sulfur and nitrogen co-reduction path for China's power industry [J]. *China Environmental Science*, 2012,32(4):748-756.
- [30] 高玉冰,邢有凯,何峰,等.中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(4):388-399.
- Gao Y B, Xing Y K, He F, et al. Research on co-control effectiveness evaluation of energy saving and emission reduction measures in China's iron and steel industry [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(4):388-399.
- [31] 何峰,刘峥延,邢有凯,等.中国水泥行业节能减排措施的协同控制效应评估研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(4):400-409.
- He F, Liu Z Y, Xing Y K, et al. Co-control effect evaluation of the energy saving and emission reduction measures in Chinese cement industry [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(4):400-409.
- [32] 常树诚,郑亦佳,曾武涛,等.碳协同减排视角下广东省 PM<sub>2.5</sub> 实现 WHO-II 目标策略研究 [J]. *环境科学研究*, 2021,34(9):2105-2112.
- Chang S C, Zheng Y J, Zeng W T, et al. Strategies for PM<sub>2.5</sub> in Guangdong province to achieve the WHO-II air quality target from the perspective of synergistic control with CO<sub>2</sub> [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021,34(9):2105-2112.
- [33] 冯相昭,赵梦雪,王敏,等.中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2021,17(3):279-288.
- Feng X Z, Zhao M X, Wang M, et al. Simulation research on co-controlling pollutants and greenhouse gases emission in China's transportation sector [J]. *Climate Change Research*, 2021,17(3):279-288.
- [34] 杨森,许平祥,白兰.京津冀生态化路径的差异化与协同效应研究——基于 STIRPAT 模型行业动态面板数据的 GMM 分析 [J]. *工业技术经济*, 2019,38(12):84-92.
- Yang S, Xu P X, Bai L. Differentiation ecologization evolution and synergy effects of industrial structure for Beijing-Tianjin-Hebei regions [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, 38(12):84-92.
- [35] 天津市生态环境局.2020 年天津市生态环境状况公报 [EB/OL]. [http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902\\_5577540.html](http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902_5577540.html), 2021-06-15.
- Tianjin Ecology and Environment Bureau. Tianjin ecological and environmental bulletin 2020 [EB/OL]. [http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902\\_5577540.html](http://sthj.tj.gov.cn/YWGZ7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902_5577540.html), 2021-06-15.
- [36] 贺克斌.城市大气污染源排放清单编制技术手册 [R]. 北京:清华大学, 2018.
- He K B. Calculation manual of atmospheric pollutants emission inventory of cities [R]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [37] 省级温室气体清单编制指南编写组.省级温室气体清单编制指南(试行) [R]. 北京:国家发展和改革委员会, 2011.
- Writing Group of the Provincial Greenhouse Gas Inventories. The provincial greenhouse gas inventories (trial) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2011.
- [38] IPCC. 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南 [R]. 东京:日本全球环境战略研究所, 2006.
- IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Tokyo: Japan Institute for Global Environmental Strategy, 2006.
- [39] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. *Ecological Economics*, 2003,46(3):351-365.
- [40] 苏凯,陈毅辉,范水生,等.市域能源碳排放影响因素分析及减碳机制研究——以福建省为例 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(2):859-867.
- Su K, Chen Y H, Fan S S, et al. Influencing factors and reduction mechanism of carbon emissions at the city-range: An empirical study on Fujian province [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(2): 859-867.
- [41] 王琳杰,曾贤刚,段存儒,等.鄱阳湖沉积物重金属污染影响因素分析——基于 STIRPAT 模型 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(8):3683-3692.
- Wang L J, Zeng X G, Duan C R, et al. Analysis on influencing factors of heavy metal pollution in sediments of Poyang Lake based on STIRPAT Model [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(8):3683-

- 3692.
- [42] 张 哲,任怡萌,董会娟.城市碳排放达峰和低碳发展研究:以上海市为例 [J]. 环境工程, 2020,38(11):12-18.  
Zhang Z, Ren Y M, Dong H J. Research on carbon emissions peaking and low-carbon development of cities: A case of Shanghai [J]. Environmental Engineering, 2020,38(11):12-18.
- [43] 李 健,王孟艳,高 杨.基于 STIRPAT 模型的天津市低碳发展驱动力影响分析 [J]. 科技管理研究, 2014,34(15):66-71.  
Li J, Wang M Y, Gao Y. Analysis of the driving forces' impact on the low-carbon development of Tianjin based on STIRPAT model [J]. Advanced Materials Research, 2014,34(15):66-71.
- [44] 王 媛,贾皎皎,赵 鹏,等.LMDI 方法分析结构效应对天津市碳排放的影响及对策 [J]. 天津大学学报(社会科学版), 2014,16(6):509-514.  
Wang Y, Jia J J, Zhao P, et al. Effect of structure on carbon emission and countermeasures in Tianjin based on LMDI [J]. Journal of Tianjin University (Social Sciences), 2014,16(6):509-514.
- [45] 李雪梅,张 庆.天津市能源消费碳排放影响因素及其情景预测 [J]. 干旱区研究, 2019,36(4):997-1004.  
Li X M, Zhang Q. Factors affecting carbon emission from energy consumption in Tianjin [J]. Arid Zone Research, 2019,36(4):997-1004.
- [46] 黄 蕊,王 铮,丁冠群,等.基于 STIRPAT 模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测 [J]. 地理研究, 2016,35(4):781-789.  
Huang R, Wang Z, Ding G Q, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu province based on STIRPAT model [J]. Geographical Research, 2016,35(4):781-789.
- [47] 国家统计局.中国能源统计年鉴 2012~2021 [M]. 北京:中国统计出版社, 2012~2021.  
National Bureau of Statistics. China energy statistical yearbook 2012~2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012~2021.
- [48] 徐西蒙.昆明市二氧化碳排放峰值研究 [J]. 环境科学导刊, 2015,34(4):47-52.  
Xu X M. CO<sub>2</sub> emission peak prediction of Kunming [J]. Environmental Science Survey, 2015,34(4):47-52.
- [49] 李 健,王孟艳,高 杨.基于 STIRPAT 模型的天津市低碳发展驱动力影响分析 [J]. 科技管理研究, 2014,34(15):66-71.  
Li J, Wang M Y, Gao Y. Analysis of the driving forces' impact on the low-carbon development of Tianjin based on STIRPAT model [J]. Advanced Materials Research, 2014,34(15):66-71.

**作者简介:** 刘茂辉(1987-),男,山东单县人,工程师,硕士,主要从事减污降碳协同增效研究.发表论文 10 余篇.