DOI：10.19789/j.1004-9398.2022.04.008
文献引用：万芸菲，崔阳阳，吴雪芳，等．京津冀区域二氧化碳排放特征及其与大气污染物协同减排潜力分析[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2022，43（4）：46-52+74. WAN Y F，CUI Y Y，WU X F，et al. Characteristics of carbon dioxide emission in Beijing-Tianjin-Hebei region and its synergistic reduction potential with air pollutants[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2022，43（4）：46-52+74.

京津冀区域二氧化碳排放特征及其与大气污染物协同减排潜力分析*

万芸菲[1,2]，崔阳阳[2]，吴雪芳[2]，沈　岩[2]，薛亦峰[2**]

（1. 首都师范大学资源环境与旅游学院，北京　100048；2. 北京市生态环境保护科学研究院，国家城市环境污染控制工程技术研究中心，北京　100037）

摘要：京津冀区域化石能源消费和工业产品产量大，二氧化碳（CO_2）和大气污染物协同减排面临较大挑战．本研究采用排放因子法，核算了2011—2017年京津冀区域CO_2排放总量，识别其排放特征和影响因素．基于情景分析法，结合减排协同率、线性回归分析方法对京津冀区域内CO_2和主要大气污染物（SO_2、NO_x）协同减排情况进行量化评估，提出未来协同控制对策和建议．研究结果表明：（1）2011—2017年京津冀区域CO_2排放总量呈现先上升后下降的趋势，2013年达到最大值（17.7亿t），此后受产业结构和能源结构调整带动，CO_2排放量下降，2017年降至16.0亿t，较2013年下降了9.60%．（2）2011—2017年间京津冀区域SO_2与CO_2排放协同性较好，说明降低煤炭、燃油消耗对区域内SO_2和CO_2协同减排效果较为显著；NO_x与CO_2排放协同性相对较差，还需要进一步降低交通、工业等领域油品消耗．（3）河北省能源消费以煤、油为主，工业生产量大，减排潜力较北京市、天津市更大，需持续优化产业结构并降低化石燃料消费总量．（4）对于未来京津冀区域大气污染物和CO_2协同控制，建议因地适宜、分阶段制定减排目标，合理设置减排力度，动态调整协同减排政策．

关键词：京津冀区域；CO_2；排放因子；大气污染物；协同控制
中图分类号：X51

Characteristics of carbon dioxide emission in Beijing-Tianjin-Hebei region and its synergistic reduction potential with air pollutants*

WAN Yunfei[1,2]，CUI Yangyang[2]，WU Xuefang[2]，SHEN Yan[2]，XUE Yifeng[2**]

（1. College of Resource Environment and Tourism，Capital Normal University，Beijing　100048；2. Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection，National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control，Beijing　100037）

Abstract：Beijing-Tianjin-Hebei（BTH）region，with its large fossil energy consumption and industrial output，faces great challenges in coordinated emission reduction of air pollutants and carbon dioxide

收稿日期：2021-08-17
* 北京市生态环境局研究项目；能源基金会研究项目
** 通信作者：xueyifeng@cee.cn

(CO_2). In this study, the emission factor method was used to calculate the CO_2 emissions in BTH region from 2011 to 2017, and identify the emission characteristics and influencing factors. Based on the scenario analysis method, the collaborative emission reduction of CO_2, SO_2 and NO_x in this region was quantitatively evaluated with the coordination rate of emission reduction and linear regression analysis method, and the future coordinated control countermeasures and suggestions were put forward. The results showed that: (1) the CO_2 emissions in BTH region firstly increased and then decreased from 2011 to 2017, reaching the maximum value in 2013 (1.77 billion t), and then, driven by the adjustment of industrial structure and energy structure, CO_2 emissions decreased to 1.60 billion t in 2017, a decrease of 9.60% compared with 2013. (2) The synergistic effect of SO_2 and CO_2 emissions in BTH region from 2011 to 2017 was good, indicating that reducing coal and fuel consumption had a significant synergistic effect on SO_2 and CO_2 emission reduction in the region. The synergy between NO_x and CO_2 emissions was relatively poor, and it was necessary to further reduce oil consumption in transportation, industry and other fields. (3) Energy consumption in Hebei province is dominated by coal and oil, with large industrial production and greater emission reduction potential than Beijing and Tianjin. It is necessary to continuously optimize the industrial structure and reduce the total consumption of fossil fuels. (4) For the coordinated control of air pollutants and CO_2 in BTH region in the future, it is suggested to set emission reduction targets in stages according to local conditions, reasonably set emission reduction intensity, and dynamically adjust coordinated emission reduction policies.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; carbon dioxide (CO_2); emission factor; air pollutants; coordinated control

CLC: X51

0 引 言

协同推进减污降碳是我国“十四五”时期的重要规划纲要之一,是新发展阶段我国深入打好污染防治攻坚战、建设美丽中国的必然要求[1].京津冀区域空气质量逐步改善,但大气污染物浓度绝对值仍然较高[2],2019年京津冀及周边地区平均超标天数比例为46.90%,是全国平均水平(18.00%)的2.6倍[3].同时区域内化石燃料消耗和工业产量大,碳减排还有较大的潜力.加强京津冀区域二氧化碳(CO_2)和大气污染物协同控制非常重要.

温室气体和大气污染物协同控制是当前的研究热点,国内外针对二者协同控制的研究主要分为2个切入点.一是以行业部门为研究切入点,对不同措施下的协同减排效应进行分析[4-9],如:刘胜强等[5]通过构造协同减排当量指标评价单一技术措施对SO_2、NO_x和CO_2的综合减排效果,并得出我国钢铁行业仅靠前端和过程控制措施就可实现NO_x减排目标的结论;顾阿伦等[6]选取电力、钢铁和水泥3个行业,测算了在“十一五”以来SO_2的减排效果,并分析由其带来CO_2减排的协同效果.二是以区域内时空特征为研究切入点[10-16],识别并预测某区域温室气体与大气污染的时空排放特征,进而研究二者之间的协同排放效应,如:Zheng等[10]采用GAINS-China模型,评估2005—2030年长三角区域现行政策下工业部门大气污染减排情况,预测2030年该区域SO_2排放量将得到控制;杨文涛等[11]利用空间模式分析方法与地理探测器,探究中国地区2011—2017年间$PM_{2.5}$年均质量浓度时空分布格局及其成因.

京津冀区域多基于空气质量改善目标下研究制定污染控制措施[17-20],未来在碳达峰碳中和压力下需要进一步考虑CO_2和大气污染物的协同控制.因此,为量化京津冀区域CO_2排放特征和评估其与大气污染物的协同减排效应,本研究采用排放因子法[21],对京津冀区域2011—2017年的CO_2年排放总量进行核算,识别其排放特征与影响因素.在此基础上,应用线性回归分析与协同率等方法,评估该区域内主要大气污染物(SO_2、NO_x)与CO_2协同排放情况,并采用情景分析法预测该区域的减污降碳潜力,提出未来大气污染物和CO_2协同减排的对策与建议.

1 数据与方法

1.1 CO_2排放量核算方法

温室气体与常规大气污染物大多由矿物化石燃料燃烧产生,主要来源于工业生产、交通运输与电力供应等行业[22-23].此外,人们生活产生的排泄垃圾也会产生CH_4和CO_2等温室气体及污染物,林业结构的大面积调整也会对区域内CO_2与大气污染物的排放产生细微影响[24].为全面认识京津冀区域内CO_2与大气污染物的协同减排特征,对CO_2的核算主要包括能源活动、工业生产过程、土地利用变化与林业调整以及废弃物的焚烧处理4个方面.

本研究采用排放因子法,对京津冀区域内的CO_2进行核算,各领域排放因子取自《省级温室气体清单编制指南》[25].

(1)能源活动领域的CO_2排放量(E_1)计算公式为

$$E_1 = \sum (V \times F_a), \tag{1}$$

式中:V为各能源消费量,F_a为各能源排放因子.

(2)工业生产过程领域的CO_2排放计算.本研究对工业生产过程中产生的CO_2排放核算主要包括水泥和钢铁2个工业类型.

水泥的工业生产过程CO_2排放量(E_2)计算公式为

$$E_2 = D \times F_b, \tag{2}$$

式中:D为水泥生产产量,F_b为水泥生产过程平均排放因子.

钢铁的工业生产过程CO_2排放量(E_3)计算公式为

$$E_3 = D_1 \times F_1 + D_2 \times F_2 + (D_3 \times C_3 - D_4 \times C_4) \times 44/12, \tag{3}$$

式中:D_1和D_2是石灰石和白云石的消耗量,F_1和F_2是石灰石和白云石消耗的排放因子;D_3是炼钢消耗生铁量,C_3是炼钢用生铁的平均含碳率;D_4是炼钢的钢材产量,C_4是炼钢的钢材产品的平均含碳率.

(3)土地利用变化与林业领域的CO_2计算.主要包括木质生物质生物量碳贮量变化以及森林转化碳排放.鉴于城市森林转换数据收集的局限性,在这里只针对森林和其他木质生物质生物量碳贮量变化所引起的碳排放变化进行统计,包括乔木林、散生木、四旁树、疏林生长生物量的碳吸收及活立木消耗碳排放所引起的CO_2排放变化.

(4)废弃物焚烧处理领域的CO_2排放量(E_4)计算.其公式为

$$E_4 = \sum (I_m \times P_{Bm} \times P_{Cm} \times F_m \times 44/12),$$

式中:m表示某种废弃物(固体废弃物、危险废弃物和污泥);I_m指废弃物的焚烧量;P_{Bm}指废弃物中的碳含量比例;P_{Cm}指废弃物中矿物碳在碳总量中比例;F_m指废弃物焚烧炉的燃烧效率.

1.2 协同效应分析

1.2.1 情景分析法

基于京津冀各类消费能源结构优化,在2017年消费能源结构的基础上,采用情景分析法,对京津冀地区消费能源结构进行合理的假设调整和情景模拟,来考察不同情景下京津冀地区CO_2与主要大气污染物(SO_2、NO_x)排放量变化情况.以京津冀地区2017年能源消费比例为基准情景,衡量能源结构调整对CO_2与主要大气污染物(SO_2、NO_x)排放削减效果,设置低、中、高3种减排情景,基于排放因子法,通过估算CO_2、SO_2与NO_x的减排量进行对比分析.2017年煤炭、燃油、天然气和其他能源的消费比例分别为46.70%、39.80%、12.30%和1.20%,假定2018—2023年期间煤炭、燃油能源消耗量比例降低幅度和天然气消耗量比例提高幅度分低、中、高3种减排情景:前者分别降低2.00%、3.00%和5.00%,后者分别提高4.00%、6.00%和10.00%.

1.2.2 协同率

为量化温室气体和大气污染物协同减排效应,本文参考协同率作为量化参数[26],将某能源结构情景下的大气污染物排放量同基准情景相比的削减量的当量值作为分子,CO_2排放量同基准情景相比的削减量的当量值作为分母,二者比值即为协同率.为便于分析,本文将2种空气污染物NO_x、SO_2加总,与CO_2相比形成综合协同率.大气污染物当量值计算方法为:

$$Q_p = E_{NO_x}/W_{NO_x} + E_{SO_2}/W_{SO_2},$$

$$Q_{CO_2} = GWP_{CO_2} \times E_{CO_2},$$

$$P = \frac{\Delta Q_p}{\Delta Q_{CO_2}},$$

$$\Delta Q_p = Q_{p基准} - Q_p, \Delta Q_{CO_2} = Q_{CO_2基准} - Q_{CO_2}.$$

式中:Q为当量值,P表示协同率,E为某种物质排放量,W为排污税推荐的污染物当量,GWP指某种物质产生温室效应的指数,本式中为1,NO_x与SO_2排污税污染物当量值均为0.95 kg.

1.3　数据来源

区域内煤、石油、天然气等各类能源消耗数据来自2011—2017年《中国能源统计年鉴》能源平衡表中能源消费总量的数据;京津冀地区的国民生产总值(GDP)、人口总数、工业产品的生产数据、林木蓄积量以及垃圾焚烧处理量等来自《天津统计年鉴》《河北省经济年鉴》《北京统计年鉴》;京津冀各地区SO_2、NO_x排放量来自国家数据网站(https://data.stats.gov.cn/);CO_2排放因子来自《省级温室气体编制指南》.

2　结果与分析

2.1　2011—2017年京津冀CO_2排放量变化特征及驱动力分析

根据排放因子法,得到京津冀区域2011—2017年的CO_2排放变化(图1).可以看出,京津冀区域CO_2排放总量呈现出先上升后下降的变化趋势.2008年后北京奥运经济的带动下,工业生产总量骤增[27],引起CO_2排放量在2011—2013年持续上升,2013年达到排放量的最大值,为17.7亿t. 2013年之后国家加强大气环境监管力度,出台大气污染减排的各项文件政策[28-29],减排效果显著,该区域的CO_2排放总量逐渐回落. 2017年降至16.0亿t,较2013年下降了9.60%. 3个地区CO_2排放量从高到低依次为河北省、天津市、北京市,该结果与京津冀区域的地理位置、产业特征以及相关的技术水平具有直接的联系.

京津冀地区人均GDP与CO_2排放强度的变化趋势见图1,2011—2017年,京津区人均GDP逐年上升,2017年为8.1万元,比2011年增长48.32%;而CO_2排放强度不断下降,2017年仅为19.8 t/万元,比2011(35.2 t/万元)下降38.60%.该区域CO_2排放强度的不断下降与人均GDP的不断上升,启示未来京津冀区域可实现经济增长与污染减排的进一步协同[30].

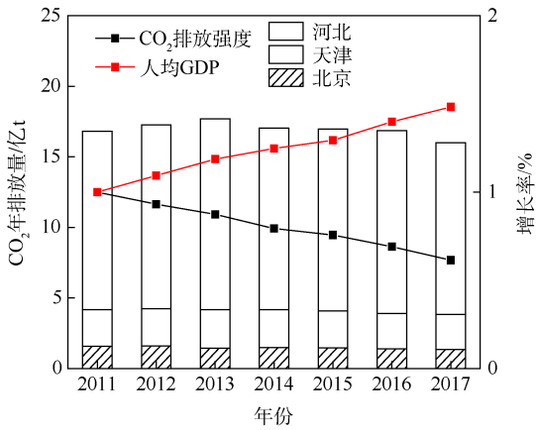


图1　2011—2017年京津冀区域CO_2排放总量及人均GDP、CO_2排放强度的变化趋势

2.2　京津冀区域CO_2排放变化影响因素分析

为分析京津冀区域内能源消费结构调整对CO_2减排的影响,本文对区域内煤炭、燃油、天然气及其他能源4类能源消费量进行统计,得到2011—2017年各类能源消费量在能源消费总量中的比例(图2).京津冀区域能源消费仍以煤、油为主,整体比例>80.00%.但其消耗比例逐年下降,说明该区域能源结构的调整取得了阶段性进展.然而分开来看,3个地区之间的能源调整存在显著差异.从煤炭消费来看,北京市在此期间其比例下降趋势明显,2017年降至9.73%,而天津市的比例仍在50.00%左右浮动,河北省更是居高不下,始终高于80.00%,燃油的变动并不明显.

造成京津冀地区之间能源消耗比例参差不齐的原因,可以从产业结构的变化情况进行分析[31].该区域在2011—2017年,第二产业比例下降2.34%,结合该区域能源消费的变化,第二产业的下降伴随区域内煤、油能源消费比例的下降.第二产业包括采矿业、制造业、电力等行业,是煤炭、燃油能源消费的主力军产业.因此对该区域未来减排研究,可通过调整产业结构进而优化能源消费比例,进一步实现减污降碳.

此外,其他因素也对区域内的CO_2排放变化产生了一定的影响.2011—2017年京津冀工业生产的CO_2排放亦呈现逐年下降的趋势,2011年排放总量为1.12亿t,随着产业结构的不断优化,工业生产量不断下降,生产过程产生的CO_2也随之不断下降,2017年减少至0.80亿t,较2011年下降28.57%.区域内林业面积增加,对CO_2的不断吸收使得排放总量下降.而废弃物处理量的增加,产生的CO_2排放量增加,但这对整体排放趋势影响较小.

2.3　京津冀区域CO_2和主要大气污染物协同减排评估

京津冀地区不同能源结构调整的情景下CO_2、SO_2与NO_x的减排情况见表1,可以看出,在低度减排情景下,京津冀地区CO_2、SO_2、NO_x排放量可分别下降2.24%、1.35%、1.78%;随着产业结构的不断优化,逐渐向中度减排情景发展,此时各排放量可分别下降3.44%、2.02%、2.43%;当前京津冀地区的降

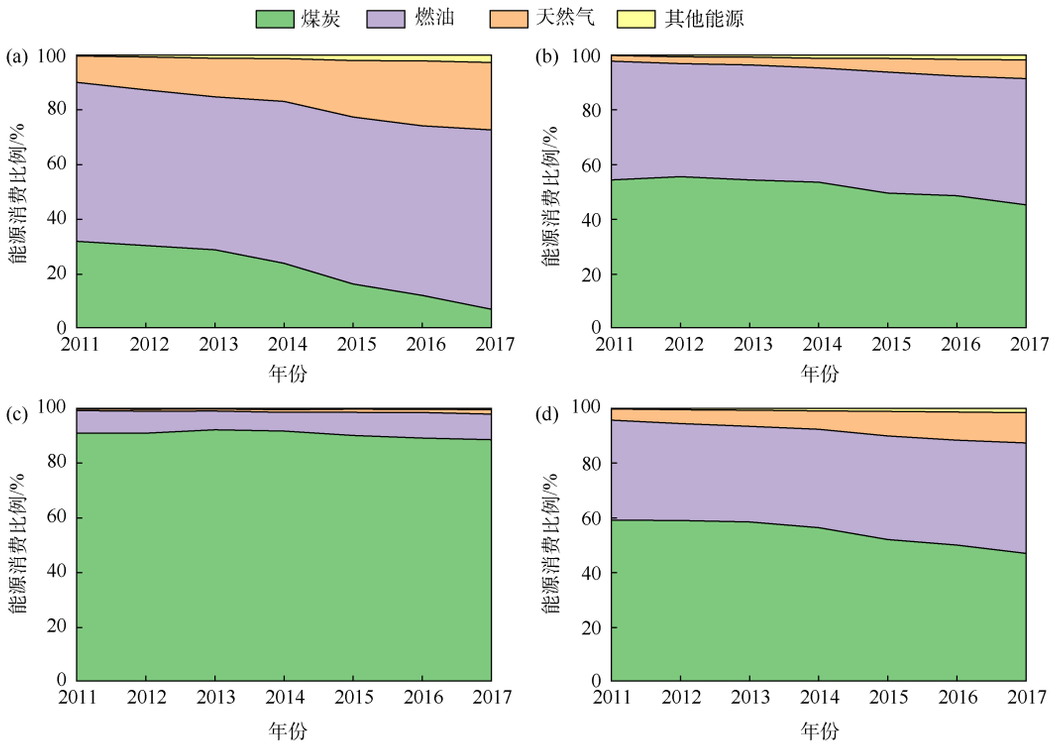


图2 2011—2017年各种能源在能源消费总量中的所占比例变化

(a)北京市;(b)天津市;(c)河北省;(d)京津冀地区

碳减排任务依旧艰巨,若能采取更大的减排力度,能源结构得到进一步的优化,则可以达到设定的高度减排情景.此外,在同等程度的减排情景下,CO_2的减排比例最高,NO_x次之,SO_2的减排程度相对较低.但总体上,随减排力度的加强,三者减排比例均不断提高.

表1 京津冀地区不同能源结构调整的情景下不同排放物的减排比例情况 单位:%

排放物	低度减排情景	中度减排情景	高度减排情景
CO_2	2.24	3.44	5.56
SO_2	1.35	2.02	3.89
NO_x	1.78	2.43	4.24

以2017年能源结构为基础,3种能源结构调整情景下CO_2与大气污染物的减排协同率差异显著.低度减排情景下的CO_2与大气污染物的减排协同率为9.92/kg CO_2当量,随着减排力度的不断增强,当达到中度减排情景时协同率上升为11.01/kg CO_2当量;而当减排力度再次升高时,达到高度减排情景时协同率反而降为10.90/kg CO_2当量.基于3种模拟情景,中度减排情景下CO_2与大气污染物的减排协同率相对较高,协同减排效果相对较好.减排力度过高,反而会抑制二者之间的协同减排.因此,在未来协同减排的技术实施与政策制定上,选择适宜的减排力度,才能更好地实现减污降碳.

2.4 京津冀区域协同减排潜力分析

(1)CO_2与主要大气污染物排放协同性分析.结合京津冀区域SO_2与NO_x的年排放总量,与该区域CO_2的年排放总量进行相关性分析,如图3所示,可以看出:SO_2与CO_2年排放总量呈明显正相关,相关系数$|r| = 0.77 > 0.75$(判定系数R^2=0.606 8),说明减少煤油能源消耗所占比例对区域内SO_2和CO_2协同减排效果较为显著;而NO_x与CO_2相关性并不显著,相关系数为$|r| = 0.36 < 0.50$(判定系数R^2=0.134 4),则需进一步降低交通、工业等领域的油品消耗.

造成这种排放相关性差异的原因分析如下:从排放机制来看,SO_2排放主要来自化石燃料燃烧,CO_2的排放除小部分来自石灰石煅烧外,绝大部分也来自化石燃料燃烧,因而SO_2排放与CO_2排放具有同源排放特征[32].而NO_x的来源绝大部分为天然源,极小部分为人为源,主要由汽车等移动源以及工业窑等固定源组成,与CO_2的排放途径协同性不高.从反应机制来看,CO_2遇H_2O(水蒸气)生成H_2CO_3,进而与SO_2反应产生CO_2,SO_2与CO_2在此情况下不断进行可逆反应,相互促进彼此生成,这也是二者排放协同性相对较高的重要原因.

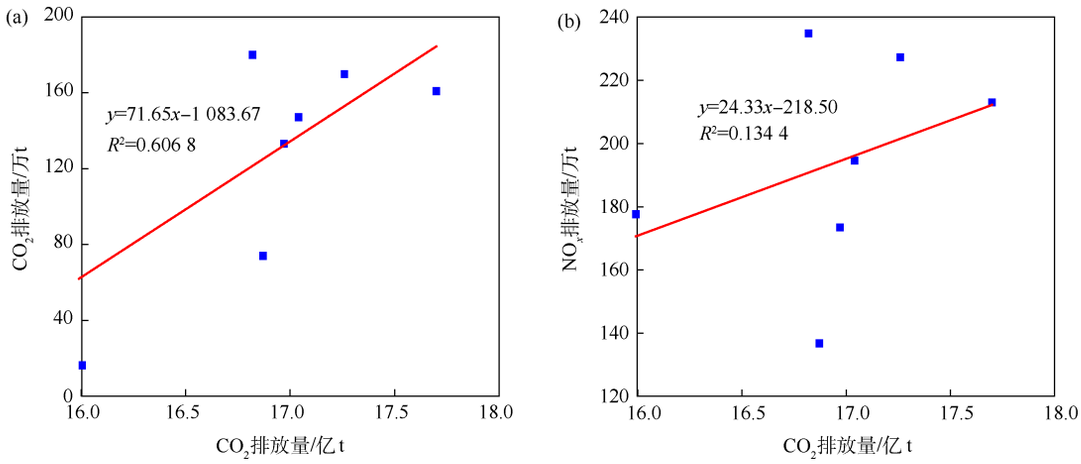


图3　京津冀区域CO_2与大气主要污染物年排放总量的相关性分析

(a)CO_2与SO_2相关性;(b)CO_2与NO_x相关性

(2)京津冀区域减排潜力分析.为判断该区域的减排潜力,将2018年世界能源的消费比例[33]作为参考,2017年北京市、天津市和河北省煤炭和燃油消费比例分别为72.60%、91.42%、97.84%(表2),均高于世界能源消费煤及燃油消费平均水平(60.80%).从能源结构看,减排潜力由小到大依次为:北京市、天津市、河北省.其中,河北省对高碳排放产业的依赖性相对较高[34],2017年煤炭能源消费比例高达88.53%,需持续革新工业技术来降低煤炭消耗;天津市的煤炭、燃油消耗总比例与河北省相差不大,但均高于2018年世界平均水平;北京市能源减排潜力相对较小,但2017年北京市燃油消耗比例为65.40%,较2018年世界能源数据仍有差距,未来减排应大力发展清洁化运输设备来实现燃油消耗下降.

表2　不同地区能源消费比例　　单位:%

地区(年份)	煤炭	燃油	天然气	其他能源
世界能源(2018)	27.20	33.60	23.90	15.30
北京市(2017)	7.20	65.40	24.60	2.71
天津市(2017)	45.36	46.06	6.85	1.73
河北省(2017)	88.53	9.31	1.69	0.47

3　结　论

本研究基于排放因子法,计算得到京津冀区域2011—2017年CO_2的排放变化特征并分析其影响因素,对该区域大气污染物与CO_2的协同减排作出评估并分析其减排潜力,得出以下结论:

(1)京津冀区域2011—2017年CO_2排放总量呈现先上升后下降的排放趋势,2011—2013年CO_2排放量逐年上升,2013年达到7年间最大值17.7亿t,随后各项大气减排政策出台,CO_2减排效果显著,总量逐年下降,2017年降低至16.0亿t,较2013年下降了9.60%.

(2)基于3种减排情景,可以发现随着煤炭、燃油能源消耗比例的不断下降,CO_2、NO_x与SO_2减排比例均不断增加,其中CO_2的减排相对明显;从协同减排的角度来看,在煤炭、燃油消耗比例各减少3.00%、天然气增加6.00%时,CO_2与大气污染物之间的协同减排相对较好.

(3)从年排放总量出发,SO_2与CO_2相关系数$|r| = 0.77 > 0.75$,协同排放相关性好,说明减少煤油能源的消耗比例对于区域内SO_2和CO_2协同减排效果较为显著;NO_x与CO_2相关系数$|r| = 0.36 < 0.50$,则需要进一步降低交通、工业等领域油品消耗.

(4)将世界能源结构作为参考,京津冀地区污染物减排潜力由小到大依次为:北京市、天津市、河北省.河北省煤炭消耗比例过高,未来减排应侧重于革新工业技术实现煤炭消耗下降.天津市能源结构相对较合理,但均高于世界平均水平.北京地区燃油消耗比例高,应大力发展清洁化运输设备来实现燃油消耗下降.

4　建　议

结合上述对京津冀地区CO_2排放量变化特征及其与主要大气污染物的排放协同性的探究分析,总结其对未来政策制定或调整的建议,具体内容包括:(1)因地制宜实施CO_2减排方案.京津冀区域的能源消费结构参差不齐,CO_2减排潜力不等,减排重

点不一,必须以不同地区能源消费结构为出发点,综合考虑当地的产业结构特点,制定减排目标.(2)持续调整产业结构.京津冀地区产业结构尚不成熟,加快推动能源产业结构转型升级,促进京津冀地区绿色发展生产,是实现源头减排的重要措施.(3)设计CO_2和大气污染物减排方案的最优化.识别CO_2与大气污染物的排放协同效应,选择适宜的减排力度,设计合理的减排目标与减排比例,是实现协同减排的关键.(4)动态调整协同减排方案与政策.现有政策的主体内容应根据实际情况进行调整,及时评估效果,根据需要调整方案,保障政策的顺利实施.加强对空气质量的监控,可以细致地监督和管理各地区实时减排情况和空气质量状况.

参 考 文 献

[1] 许田."十四五"时期生态环境污染防治的重点方向[J].化工管理,2021(10):39-40.

[2] 沈晓梅,于欣鑫,刘熙宇,等.京津冀地区$PM_{2.5}$浓度变化的驱动因素及其时空效应[J].环境保护科学,2020,46(5):53-59.

[3] 生态环境部.2019年中国生态环境状况公报[EB/OL].(2020-06-02)[2022-01-20]. https://www. mee. gov. cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202006/P020200602509464172096.pdf.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 顾阿伦,滕飞,冯相昭.主要部门污染物控制政策的温室气体协同效果分析与评价[J].中国人口·资源与环境,2016,26(2):10-17.

[7] XIAO C C, CHANG M, GUO P K, et al. Analysis of air quality characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding air pollution transport channel cities in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 87(1):213-227.

[8] 李健,景美婷,苑清敏,等.绿色发展下区域交通碳排放测算及驱动因子研究:以京津冀为例[J].干旱区资源与环境,2018,32(7):36-42.

[9] 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.

[10] ZHENG J J, JIANG P, QIAO W, et al. Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016(114):314-322.

[11] 杨文涛,谯鹏,刘贤赵,等.2011—2017年中国$PM_{2.5}$多尺度时空分异特征分析[J].环境科学,2020,41(12):5236-5244.

[12] 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.

[13] 曹钰,楼晟荣,王茜,等.长三角区域性$PM_{2.5}$污染的空间分型及其大气环流特征研究[J].环境科学学报,2021,41(5):1665-1679.

[14] 汪宇,彭钰雯,陈多宏,等.珠三角城市近地面臭氧污染分布特征及变化趋势[J].环境污染与防治,2019,41(9):1103-1107.

[15] WU H, WANG T J, WANG Q G, et al. Relieved air pollution enhanced Urban Heat Island intensity in the Yangtze River Delta, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019, 19(12):2683-2696.

[16] 吴丹,列毓颖,刘利,等.京津冀和珠三角地区二氧化硫减排成本评估及政策启示[J].环境与可持续发展,2019,44(3):56-63.

[17] WANG Y, LIU H W, MAO G Z, 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.

[18] CHANG X, WANG S X, ZHAO B, et al. Contributions of inter-city and regional transport to $PM_{2.5}$ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its implications on regional joint air pollution control[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660:1191-1200.

[19] 臧宏宽,杨威杉,张静,等.京津冀城市群二氧化碳排放达峰研究[J].环境工程,2020,38(11):19-24+77.

[20] YAN Q Y, WANG Y X, LI Z Y, et al. Coordinated development of thermal power generation in Beijing-Tianjin-Hebei region: evidence from decomposition and scenario analysis for carbon dioxide emission[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232:1402-1417.

[21] 杜赟. IPCC排放因子法探究CO_2排放量[J].环保科技,2015,21(5):14-18.

[22] 谭琦璐,温宗国,杨宏伟.控制温室气体和大气污染物的协同效应研究评述及建议[J].环境保护,2018,46(24):51-57.

(下转第74页)

就是辩证唯物论的知行统一观[17].”课程思政建设亦是如此,通过实践把思政元素与课程内容有机结合起来,并通过实践不断反思,如何实践才能够达到更好的教育效果,既要言之有物,也要言之有度,培养学生真正成为社会主义事业的建设者和接班人.

参 考 文 献

[1] 杜震宇.生物学课课程思政教学指南[M].上海:华东师范大学出版社,2020:3+11-18.

[2] 习近平.习近平谈治国理政(第二卷)[M].北京:外文出版社,2017:378.

[3] 王楠楠,劳军,丁文乔,等.《遗传学》课程思政的设置与实践[J].广东化工,2019,46(18):194+196.

[4] 高秀清,牛爱军.浅议在高校遗传学课堂教学中如何进行思想政治教育[J].教育现代化,2019,6(89):199-200.

[5] 贺竹梅,袁小玉.遗传学教学开展课程思政的研究与探索[J].大学教育,2021(9):1-5.

[6] 贾利云,贺颖.医学遗传学“课程思政”在研究生教学中的实践与探索[J].教育教学论坛,2021(2):81-84.

[7] 李琳琳,杨珂珂.“课程思政”的内涵、经验与启示[J].大夏教研,2019(2):5-14.

[8] 张飞雄,李雅轩.普通遗传学[M].3版.北京:科学出版社,2015.

[9] 耿华,魏留芳,周晶,等.师范院校结构化学课程思政建设探索[J].首都师范大学学报(自然科学版),2021,42(4):75-80.

[10] 曾凡一,曾溢滔.中国遗传学的春天:纪念中国遗传学会成立40周年[J].海南医学,2019(8):5-12.

[11] 许操.从0到1:异源四倍体野生稻从头驯化创造全新作物[J].遗传,2021,43(3):199-202.

[12] 韩扬眉.异源四倍体野生稻快速从头驯化获得新突破[N/OL].中国科学报,2021-02-04[2021-08-09].http://www.cas.cn/cm/202102/t20210204_4777001.shtml.

[13] MUELLER L D, GUO P Z, AYALA F J. Density-dependent natural selection and trade-offs in life history traits[J]. Science,1991,253(5018):433-435.

[14] GUO P Z, MUELLER L D, AYALA F J. Evolution of behavior by density-dependent natural selection [J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 1991, 88(23): 10905-10906.

[15] 李雅轩,张飞雄,赵昕,等.利用网络平台辅助遗传学教学的探索与实践[J].遗传,2010,32(4):393-396.

[16] 中华人民共和国科技部和卫生部.人类遗传资源管理暂行办法[EB/OL].(1998-06-10)[2021-07-23].https://baike.baidu.com/item/人类遗传资源管理暂行办法/7975072.

[17] 杨信礼.重读《实践论》《矛盾论》[M].北京:人民出版社,2014:15.

(责任编辑:王 媛)

(上接第52页)

[23] 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.

[24] 陈广生,田汉勤.土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J].植物生态学报,2007(2):189-204.

[25] 国家发展和改革委员会应对气候变化司.省级温室气体清单编制指南(试行)[R/OL].(2011-05)[2022-01-20]. http://www. cbcsd. org. cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf.

[26] 谭琦璐,杨宏伟.京津冀交通控制温室气体和污染物的协同效应分析[J].中国能源,2017,39(4):25-31.

[27] 姜同仁,钱杰.2008年奥运会对我国“京津冀”地区经济发展影响的研究[J].北京体育大学学报,2008,31(12):1601-1604+1657.

[28] 卢亚灵,范朝阳,蒋洪强,等.北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益[J].环境科学,2021,42(6):2730-2739.

[29] 刘茂辉,徐媛,岳亚云,等.天津《大气污染防治行动计划》实施减排效益[J].环境科学与技术,2020,43(5):124-131.

[30] 赵玉焕,王乾.京津冀能源消费与经济增长对碳排放的影响研究[J].中国能源,2016,38(10):34-40.

[31] 王风云,苏烨琴.京津冀能源消费结构变化及其影响因素[J].城市问题,2018(8):59-67.

[32] 蔡博峰.中国城市二氧化碳排放空间特征及与二氧化硫协同治理分析[J].中国能源,2012,34(7):33-37+19.

[33] 梁玲.从BP能源统计数据看世界能源消费趋势[J].世界石油工业,2019,26(3):5-11.

[34] 母爱英,张良.低碳经济中的河北:机遇、挑战与对策[J].工业技术经济,2010,29(9):2-8.

(责任编辑:李拓宇)