

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析

刘茂辉¹, 岳亚云², 刘胜楠², 李婧¹, 刘佳泓^{1*}, 孙猛^{1*}

(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: 基于 STIRPAT 模型, 从排放总量、减排量和协同效应系数这 3 个维度定量分析了天津市减污降碳协同效应。结果表明, 天津市大气污染物和温室气体的主要排放源均为工业源, 大气污染物和温室气体的 Pearson 相关系数为 0.984; 人口总数、城镇化率、地区生产总值、能源强度和二氧化碳排放强度是影响天津市减污降碳协同效应的重要因素; 天津市 2011 年和 2012 年大气污染物和温室气体协同增排, 协同效应系数分别为 0.18 和 0.17; 2013~2014 年和 2018~2023 年大气污染物减排且温室气体增排, 协同效应系数均小于 0, 减污降碳不具有协同效应; 2015~2017 年和 2024~2060 年大气污染物和温室气体同时减排, 协同效应系数范围为 2.74~8.76。天津市具备在 2024 年进入减污降碳协同增效阶段的条件, 天津市推动减污降碳协同增效最关键的是严格控制温室气体排放总量, 持续推动能源强度和二氧化碳排放强度的下降, 合理控制人口总数、城镇化率和地区生产总值。

关键词: 减污降碳; 协同效应; STIRPAT 模型; 大气污染物; 温室气体; 天津

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1277-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204086

Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model

LIU Mao-hui¹, YUE Ya-yun², LIU Sheng-nan², LI Jing¹, LIU Jia-hong^{1*}, SUN Meng^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin-Tianbinruicheng Environmental Technology and Engineering Co., Ltd., Tianjin 300190, China)

Abstract: Based on the STIRPAT model, this study quantitatively analyzed the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin from three dimensions: total emission, emission reduction, and synergy coefficient. The results showed that the main emission sources of air pollutants and greenhouse gases in Tianjin were industrial sources, and the Pearson correlation coefficient of air pollutants and greenhouse gases was 0.984. The total population, urbanization rate, gross regional product, energy intensity, and carbon dioxide emission intensity were important factors affecting the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin. In 2011 and 2012, Tianjin's air pollutants and greenhouse gas emissions increased synergistically, and the synergistic effect coefficients were 0.18 and 0.17, respectively. From 2013 to 2014 and from 2018 to 2023, the air pollutant emission reduction and greenhouse gas emission increased, the synergistic effect coefficient was less than 0, and the pollution reduction and carbon reduction had no synergistic effect. In 2015-2017 and 2024-2060, air pollutants and greenhouse gas emissions were predicted to be reduced at the same time, with a synergistic effect coefficient ranging from 2.74 to 8.76. Tianjin had the conditions to enter the synergistic stage of pollution reduction and carbon reduction in 2024. The most important things for Tianjin to do to promote the synergy of pollution reduction and carbon reduction were to strictly control the total amount of greenhouse gas emissions, continue to promote the reduction in energy intensity and carbon dioxide emission intensity, and reasonably control the total population, urbanization rate, and regional GDP.

Key words: reduce pollution and carbon; synergistic effect; STIRPAT model; air pollutants; greenhouse gases; Tianjin

2021 年和 2022 年全国生态环境保护工作会议都强调, 要以实施减污降碳协同增效为总抓手, 深入打好污染防治攻坚战, 生态环境保护工作进入了减污降碳协同治理的新阶段。天津市认真贯彻落实生态文明建设总要求, 污染防治攻坚战成效显著, 生态环境明显改善。文献[1]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_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 NO₂ 年浓度平均值分别下降 31.4%、41.4%、72.4% 和 7.1%。同时, 天津市 2020 年全市单位 GDP 碳排放强度累计下降超过 22%, 超额完成国家下达的 20.5% 的目标要求。因此, 天津市主要大气污染物浓度和碳排放强度实现了双降。然而, 在进入减污降碳协同治理的新阶段之后, 大气污染物的排放总量和碳的排放总量均要双降, 才能实现减污降碳协同增效。

协同效应源自于伴生效益^[2], 伴生效益的提出

是为了阐述温室气体的减排措施可以减少其他污染物的产生。政府间气候变化专门委员会 (IPCC)^[3] 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^[4]。国外对减污降碳协同效应的研究较早^[5], 技术方法、研究应用相对比较成熟^[6~8]。国内对减污降碳协同效应的研究起步较晚, 但发展较快。从研究部门看, 涉及到电力行业^[9]、水泥行业^[10]和钢铁行业^[11]等工业部门, 还包括交通部门^[12,13]、农业部

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2022-06-09

基金项目: 天津市科技计划基金项目 (18ZXZSF00160); 中国工程院院地合作项目 (2020CO-0002); 天津市“131”创新型人才团队项目 (2018032)

作者简介: 刘茂辉 (1987~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为减污降碳协同增效, E-mail: liumaoahui@tj.gov.cn

* 通信作者, E-mail: liujiahong@tj.gov.cn; sunm1127@163.com

门^[14]和集中式污染治理设施^[15];从研究区域看,既有区域层面的^[16-18],也有北京^[19]、天津^[20]、上海^[21]、重庆^[22]、广州^[23]、沈阳^[24]和乌鲁木齐^[25]等城市层面的;从研究方法看,计算大气污染物和二氧化碳(CO₂)等温室气体排放量常用的方法是排放因子法^[26],评估减污降碳协同效应常用的方法是相关系数法^[27]、协同效应评估指数法^[28]、协同减排当量法^[29]、协同控制效应坐标系数法^[30]和弹性系数法^[31],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^[32]、长期能源替代规划系统(long range energy alternatives planning, LEAP)模型法^[33]和可拓展随机性的环境影响评估(stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology, STIRPAT)模型法^[34];从研究对象看,既涉及到对某一技术^[35]开展减污降碳协同效应评价,也涉及到对“大气十条”^[36]和“蓝天保卫战三年行动计划”^[37]的减污降碳协同效应进行分析.然而,目前减污降碳协同效应研究还存在两点不足:一是减

污降碳协同状态特征划分等级数较少,仅划分为协同和不协同这2个等级,不能满足目前环境管理多级化需求;二是目前的分析多是从协同效应系数1个维度开展分析,分析不够全面.为进一步丰富减污降碳协同效应分析技术,解决以上两点不足,本研究以天津市为例,采用排放因子法核算大气污染物和温室气体排放量,将减污降碳协同状态特征划分为八类,基于STIRPAT模型,从排放总量、减排量和协同效应系数这3个维度对减污降碳协同效应开展定量分析,以期为天津市和其他城市深入打好污染防治攻坚战提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 排放源分类

依据文献[38,39],将天津市减污降碳协同效应排放源分为工业源、交通源、建筑源、农业源、生活源和集中式污染治理设施(集中式)这六类.具体排放源分类见表1.

表1 减污降碳协同效应排放源分类

Table 1 Classification of emission sources with 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、烟气脱硝和生物质工业锅炉	工业能源活动、煤炭开采逃逸、油气系统逃逸和生物质工业锅炉
	工业生产过程	工艺过程源、工业溶剂使用和堆场	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、飞机和铁路内燃机	交通运输业能源活动
建筑源	建筑施工	工程机械、建筑涂料和工地扬尘	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、土壤本地和农药使用	农业能源活动、稻田和农用地
	畜禽养殖	畜禽养殖	动物肠道发酵和动物粪便管理系统
生活源	服务业活动	生活源锅炉	服务业能源活动
	居民生活活动	民用燃烧、生物质炉灶、生活溶剂使用、餐饮和人体粪便	除生物质工业锅炉之外的生物质燃烧和居民生活能源活动
集中式	废水处理	废水处理	生活污水处理甲烷排放、工业废水处理甲烷排放和废水处理氧化亚氮排放
	固体处理	固体处理	固体处理

1.2 大气污染物和温室气体排放量核算

大气污染物排放量依据文献[38]进行计算,主要计算公式如下:

$$E = A \times EF \times (1 - \eta) \quad (1)$$

式中, E 为大气污染物排放量, A 为燃料消耗量或产品产量或行政区活动水平, EF 为污染物产生系数, η 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,温室气体的排放量依据文献[39]进行计算,主要计算公式如下:

$$E_{\text{CHG}} = EF_{ijk} \times A_{ijk} \quad (2)$$

式中, E_{CHG} 为温室气体排放量, t ; EF_{ijk} 为第 i 燃料类型第 j 部门活动第 k 技术类型的排放因子, $t \cdot \text{TJ}^{-1}$; A_{ijk} 为第 i 燃料类型第 j 部门活动第 k 技术类型的燃

料消费量, TJ .

1.3 大气污染当量和减污降碳协同排放当量核算

大气污染当量的定义源自文献[40],采用式(3)核算大气污染当量:

$$E_{\text{LAP}} = \alpha E\text{-SO}_2 + \beta E\text{-NO}_x + \gamma E\text{-CO} + \delta E\text{-VOCs} + \varepsilon E\text{-NH}_3 + \zeta E\text{-PM}_{10} \quad (3)$$

式中, E_{LAP} 为大气污染当量, t ; $E\text{-SO}_2$ 为 SO_2 排放量, t ; $E\text{-NO}_x$ 为 NO_x 排放量, t ; $E\text{-CO}$ 为 CO 排放量, t ; $E\text{-VOCs}$ 为 VOCs 排放量, t ; $E\text{-NH}_3$ 为 NH_3 排放量, t ; $E\text{-PM}_{10}$ 为 PM_{10} 排放量, t ; α 、 β 、 γ 、 δ 、 ε 和 ζ 分别为 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 NH_3 和 PM_{10} 的当量系数,无量纲.

减污降碳协同排放当量(以下简称协同排放当

量)综合考虑大气污染物和温室气体的排放量,计算公式如下:

$$Q = \theta E_{LAP} + \kappa E_{GHG} \quad (4)$$

式中, Q 为协同排放当量,t; E_{LAP} 为大气污染当量,t; E_{GHG} 为温室气体排放量,t; θ 和 κ 分别为大气污染物和温室气体的当量系数,无量纲. 当量系数的具体数值见表 2.

1.4 减污降碳协同效应系数

减污降碳协同效应系数(以下简称协同效应系数)可以定量描述大气污染物与温室气体协同效应,参照 Tapio 脱钩模型^[42,43]的表达,本研究定义协同效应系数的表达式如下:

$$S = \frac{\Delta E_{LAP}/E_{LAP}}{\Delta E_{GHG}/E_{GHG}} \quad (5)$$

式中, S 为协同效应系数,无量纲; ΔE_{LAP} 为当年相对于上一年大气污染物减排量,t; E_{LAP} 为上一年大气污染物排放量,t; ΔE_{GHG} 为当年相对于上一年温

表 2 大气污染当量及协同排放当量系数¹⁾

Table 2 Coefficient table of air pollution equivalent and co-emission equivalent

排放物名称	当量系数	当量系数值
SO ₂	α	1/0.95
NO _x	β	1/0.95
CO	γ	1/16.7
VOCs	δ	1/0.95
NH ₃	ε	1/9.09
PM ₁₀	ζ	1/2.18
大气污染当量系数	θ	1
温室气体当量系数	κ	0.003 72

1)SO₂、NO_x、CO、NH₃ 和 PM₁₀ 的当量系数值来自文献[40],VOCs 的当量系数值来自文献[41],大气污染当量和温室气体的当量系数来自文献[30]

室气体减排量,t; E_{GHG} 为上一年温室气体排放量,t. 依据 ΔE_{LAP} 、 ΔE_{GHG} 和协同效应系数的取值范围,可将协同状态特征划分为八类,见表 3.

表 3 减污降碳协同效应状态特征的划分

Table 3 Division of state characteristics of the synergistic effect status of pollution reduction and carbon reduction

协同状态	ΔE_{LAP}	ΔE_{GHG}	S	特征
协同减排	<0	<0	[0, 0.8)	大气污染物和温室气体均减排,大气污染物减排速度低于温室气体减排速度
	<0	<0	[0.8, 1.2]	大气污染物和温室气体均减排且减排速度相当
	<0	<0	(1.2, +∞)	大气污染物和温室气体均减排,大气污染物减排速度高于温室气体减排速度
协同增排	>0	>0	[0, 0.8)	大气污染物和温室气体均增排,大气污染物增排速度低于温室气体增排速度
	>0	>0	[0.8, 1.2]	大气污染物和温室气体均增排且增排速度相当
	>0	>0	(1.2, +∞)	大气污染物和温室气体均增排,大气污染物增排速度高于温室气体增排速度
不协同	<0	>0	(-∞, 0)	大气污染物减排,温室气体增排
	>0	<0	(-∞, 0)	大气污染物增排,温室气体减排

1.5 STIRPAT 模型

STIRPAT 模型源于 IPAT 等式,IPAT 等式表达式为:

$$I = P \times A \times T \quad (6)$$

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^[44]基于 IPAT 等式,构建了 STIRPAT 模型,其表达式为:

$$I = a \times P^b \times A^c \times T^d \times e \quad (7)$$

式中, a 为常数, P 、 A 和 T 含义同式(6), b 、 c 和 d 分别为 P 、 A 和 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,已被广泛地应用于大气污染物和温室气体排放研究中^[45,46]. 由文献[47,48]可知,人口总数、城镇化率、地区生产总值、能源强度和 CO₂ 排放强度是影响天津市减污降碳的重要因素,因此研究选取人口总数、城镇化率、地区

生产总值、能源强度和 CO₂ 排放强度等 5 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(8):

$$E = \alpha A^a B^b C^c D^d F^f g \quad (8)$$

式中, E 为大气污染物或温室气体排放量,t; A 为人口总数,万人; B 为城镇化率,%; C 为地区生产总值,亿元; D 为能源强度(以标煤计),万 t·亿元⁻¹; F 为 CO₂ 排放强度,万 t·亿元⁻¹, α 为常数项, a 、 b 、 c 、 d 和 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(9):

$$\ln E = \ln \alpha + a \ln A + b \ln B + c \ln C + d \ln D + f \ln F + \ln g \quad (9)$$

在使用 STIRPAT 模型研究大气污染物或温室气体排放时,构建的多元线性回归模型易产生多重共线的问题,为解决这一问题,本研究参照张哲等^[49]的方法,使用偏最小二乘法进行多元线性回归

模型的构建.

1.6 情景设置

依据文献[50],到2025年天津市城镇化率达到85%,地区生产总值年均增长6%左右,能源强度5 a 累计降低15%,CO₂ 排放强度完成国家目标(本研究参照天津市“十三五”完成情况设定为5 a 累计降低22%);依据文献[51],到2025年天津市常住

人口达到1500万人左右.由此可见,天津市“十四五”时期5项参数是确定的,需要对2026~2060年的各项参数进行设定.参照李雪梅等^[47]对天津市、张哲等^[49]对上海市和黄蕊等^[52]对江苏省的预测分析,本研究对天津市2026~2060年基准情景、低碳情景和超低碳情景下的5项参数进行设定.各情景下各参数具体设置如表4.

表4 天津市2026~2060年减污降碳协同效应预测参数设置/%

Table 4 Prediction parameter settings for the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin 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1.4	年均增长0.7	年均减少0.4	年均减少1.4
	城镇化率	年均增长0.27	年均增长0.22	年均增长0.16	年均增长0.10
	地区生产总值	年均增长4.84	年均增长4.24	年均增长3.44	年均增长2.64
	能源强度	5 a 累计降低18	5 a 累计降低21.75	5 a 累计降低26.75	5 a 累计降低31.75
	CO ₂ 排放强度	5 a 累计降低23.8	5 a 累计降低26.8	5 a 累计降低30.8	5 a 累计降低34.8
低碳情景	人口总数	年均增长1.2	年均增长0.5	年均减少0.6	年均减少1.6
	城镇化率	年均增长0.23	年均增长0.19	年均增长0.13	年均增长0.07
	地区生产总值	年均增长4.64	年均增长4.04	年均增长3.24	年均增长2.44
	能源强度	5 a 累计降低23	5 a 累计降低26.75	5 a 累计降低31.75	5 a 累计降低36.75
	CO ₂ 排放强度	5 a 累计降低28.8	5 a 累计降低31.8	5 a 累计降低35.8	5 a 累计降低39.8
超低碳情景	人口总数	年均增长1.0	年均增长0.3	年均减少0.8	年均减少1.8
	城镇化率	年均增长0.20	年均增长0.15	年均增长0.09	年均增长0.04
	地区生产总值	年均增长4.44	年均增长3.84	年均增长3.04	年均增长2.24
	能源强度	5 a 累计降低28	5 a 累计降低31.75	5 a 累计降低36.75	5 a 累计降低41.75
	CO ₂ 排放强度	5 a 累计降低38.8	5 a 累计降低41.8	5 a 累计降低45.8	5 a 累计降低49.8

1.7 数据来源

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和农产品产量,生活源核算所需餐饮业数据和人口数据,模型构建所需要的人口总数、城镇化率、能源强度和CO₂ 排放强度等数据来自历年天津统计年鉴.工业、交通、建筑、农业和生活等能源数据来自历年的中国能源统计年鉴中的“6-2 天津能源平衡表”.模型构建所需要的地区生产总值来自历年的天津市国民经济和社会发展统计公报.“十四五”时期的城镇化率、地区生产总值、能源强度和CO₂ 排放强度来自文献[50];“十四五”时期的人口总数来自文献[51].

2 结果与分析

2.1 大气污染物与温室气体排放源相关性分析

基于公式(1)~(3),可以核算出天津市2011~2020年大气污染物和温室气体的排放量,从近10年的排放占比来看(见表5),大气污染物和温室气体的主要排放源均为工业源.大气污染物的工业源占比范围为58.56%~76.69%,且呈现逐年降低的趋势;温室气体的工业源占比范围为81.99%~85.62%,没有明显变化趋势,排放占比基本保持稳

定.为了解大气污染物和温室气体排放源相关程度,对2011~2020年大气污染物与温室气体的相关性进行分析,结果显示,大气污染物与温室气体的Pearson 相关系数为0.984($P < 0.01$),具有较高的相关性.从排放源相关性分析来看,大气污染物与温室气体的排放源均是工业源,具有同根同源的特点,这说明天津市减污降碳具备协同效应分析的基础.

2.2 预测模型构建

使用偏最小二乘法,基于公式(9)和2011~2020年时期数据,构建大气污染物和温室气体的预测模型如下:

$$E_{LAP} = \exp(4.4048 \ln A - 4.4332 \ln B - 0.408 \ln C + 0.93 \ln D + 0.5516 \ln F - 3.6831) \quad (10)$$

$$E_{GHC} = \exp(-0.1804 \ln A + 7.0832 \ln B + 0.093 \ln C + 0.411 \ln D + 0.229 \ln F - 20.6797) \quad (11)$$

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%,大气污染物的排放平均增加4.48%,温室气体的排放平均减少0.18%;城镇化率每增加1%,大气污染物的排放平均减少4.32%,温室气体的排放平均增加7.30%;地区生产总值每增加1%,大气污染物的排放平均减少0.41%,温室气体的排放平均增加0.09%;能源强度

每降低 1%, 大气污染物的排放平均减少 0.93%, 温室气体的排放平均减少 0.41%; CO₂ 排放强度每降低 1%, 大气污染物的排放平均减少 0.55%, 温室气体的排放平均减少 0.23%。由此可见, 人口总数、能源强度和 CO₂ 排放强度与大气污染物排放成正比, 城镇化率、地区生产总值与大气污染物排放成反比; 城镇化率、地区生产总值、能源强度和 CO₂ 排放强度与温

室气体排放成正比, 人口总数与温室气体排放成反比。大气污染物和温室气体的实际排放量和模拟排放结果见图 1。从中可知, 大气污染物的拟合 R² 为 0.96, P < 0.01, 误差范围为 -6.73% ~ 10.76%; 温室气体的拟合 R² 为 0.93, P < 0.01, 误差范围为 -1.65% ~ 1.16%。大气污染物和温室气体的预测模型准确度较高, 可用于预测分析。

表 5 天津市 2011 ~ 2020 年大气污染物和温室气体排放占比/%

Table 5 Proportion of air pollutants and greenhouse gas emissions in Tianjin from 2011 to 2020/%

项目	排放源	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
大气污染物	工业源	76.69	75.66	76.32	73.12	68.83	65.27	62.87	60.71	60.29	58.56
	交通源	13.77	14.34	13.82	16.21	19.26	22.06	24.40	27.16	28.70	30.79
	建筑源	2.27	2.47	2.41	2.40	2.83	3.03	3.12	3.38	3.39	3.46
	农业源	1.48	1.49	1.51	1.75	2.10	2.37	2.39	2.62	2.72	2.92
	生活源	5.65	5.88	5.77	6.33	6.73	6.98	6.89	5.76	4.51	3.68
	集中式	0.15	0.16	0.17	0.19	0.25	0.28	0.33	0.37	0.40	0.59
温室气体	工业源	83.91	83.79	85.62	84.91	83.56	82.18	81.99	82.73	83.10	82.82
	交通源	4.77	4.74	3.85	4.06	4.12	4.30	4.48	4.36	4.35	4.00
	建筑源	1.66	1.70	1.69	1.75	1.92	2.16	2.12	1.84	1.80	1.82
	农业源	1.83	1.48	1.36	1.37	1.43	1.52	1.48	1.40	1.25	1.46
	生活源	6.30	6.76	5.93	6.31	7.29	8.09	8.11	7.88	7.74	7.84
	集中式	1.52	1.52	1.55	1.59	1.68	1.75	1.82	1.80	1.77	2.07

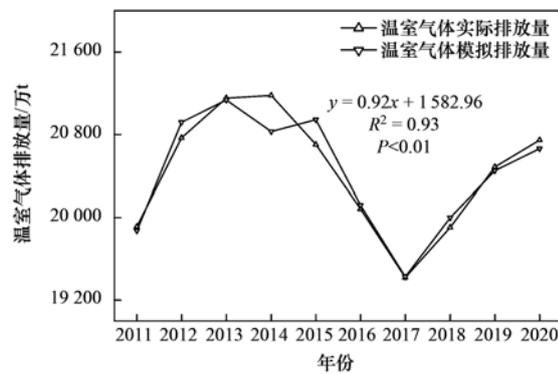
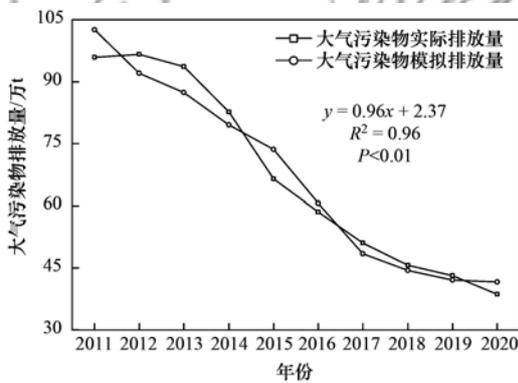


图 1 天津市 2011 ~ 2020 年大气污染物和温室气体实际排放量与模拟排放量

Fig. 1 Actual and simulated emissions of air pollutants and greenhouse gases in Tianjin from 2011 to 2020

2.3 排放总量分析

图 2 是天津市 2011 ~ 2060 年排放总量变化。从中可知, 天津市大气污染物排放量在 2012 年略有升高之后, 逐年下降, 下降趋势于 2055 年前后逐渐减缓; 与 2011 年相比, 2060 年基准情景、低碳情景和超低碳情景下大气污染物减排率依次为 99.47%、99.80% 和 99.95%, 这说明各情景下, 2060 年大气污染物减排率相差很小。天津市温室气体排放量在 2011 ~ 2023 年先升高后下降然后再升高, 于 2023 年之后逐年下降, 天津市温室气体在 2023 年达到峰值, 峰值为 2.09 亿 t, 这说明严格落实天津市“十四五”规划低碳管控要求, 天津市可在 2025 年之前实现碳达峰; 与 2011 年相比, 2060 年基准情景、低碳情景和超低碳情景下温室气体的减排率依次为

55.85%、70.29% 和 83.06%, 低碳情景下温室气体的减排率是基准情景下的 1.26 倍, 超低碳情景下温室气体的减排率是基准情景下的 1.49 倍, 主要是因为能源强度和 CO₂ 排放强度的下降是温室气体减排的主要动力, 2060 年基准情景下能源强度和 CO₂ 排放强度分别是低碳情景下的 1.63 倍和 1.68 倍, 同时是超低碳情景下的 2.76 倍和 5.42 倍。天津市协同排放当量在 2012 年略有升高之后逐年下降, 截至 2060 年下降并未呈现逐渐减缓的趋势; 与 2011 年相比, 2060 年基准情景、低碳情景和超低碳情景下协同排放当量减排率依次为 80.46%、86.94% 和 92.59%, 低碳情景下协同排放当量的减排率是基准情景下的 1.08 倍, 超低碳情景下协同排放当量的减排率是基准情景下的 1.15 倍; 协同排放当量是大

气污染物和温室气体共同作用的结果,2017年之前大气污染物起主要作用,贡献率超过50%,所以导致协同排放当量在前期呈现逐年下降趋势,2021年之后温室气体贡献率超过了60%,所以导致协同排放当量在后期下降趋势并未呈现减缓的趋势,这同时说明,天津市“十四五”时期生态文明建设进入了以降碳为重点的战略方向。

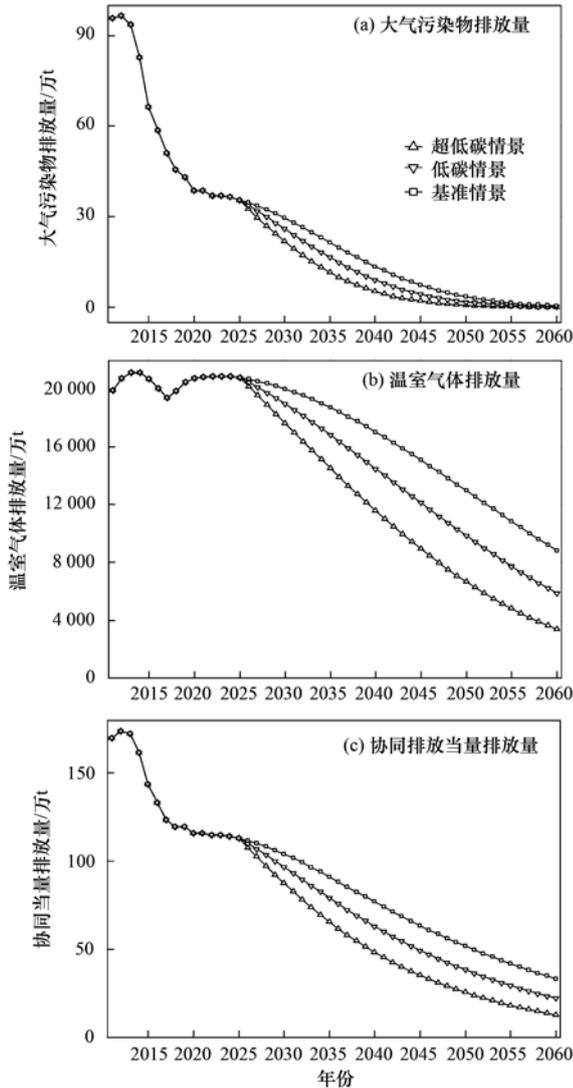


图2 天津市2011~2060年排放总量变化

Fig. 2 Changes in total emissions in Tianjin from 2011 to 2060

2.4 减排量与协同效应系数分析

基于公式(5),分析2011~2060年基准情景、低碳情景、超低碳情景下减排量与协同效应系数,结果见图3。从中可知,2011年和2012年大气污染物和温室气体同时增排,协同效应系数分别为0.18和0.17,介于0~0.8之间,这说明2011年和2012年减污降碳协同状态为协同增排,且大气污染物增排速度低于温室气体增排速度;2013~2014年和2018~2023年大气污染物减排,温室气体增排,协同效应系数均小于0,减污降碳不具有协同效应;

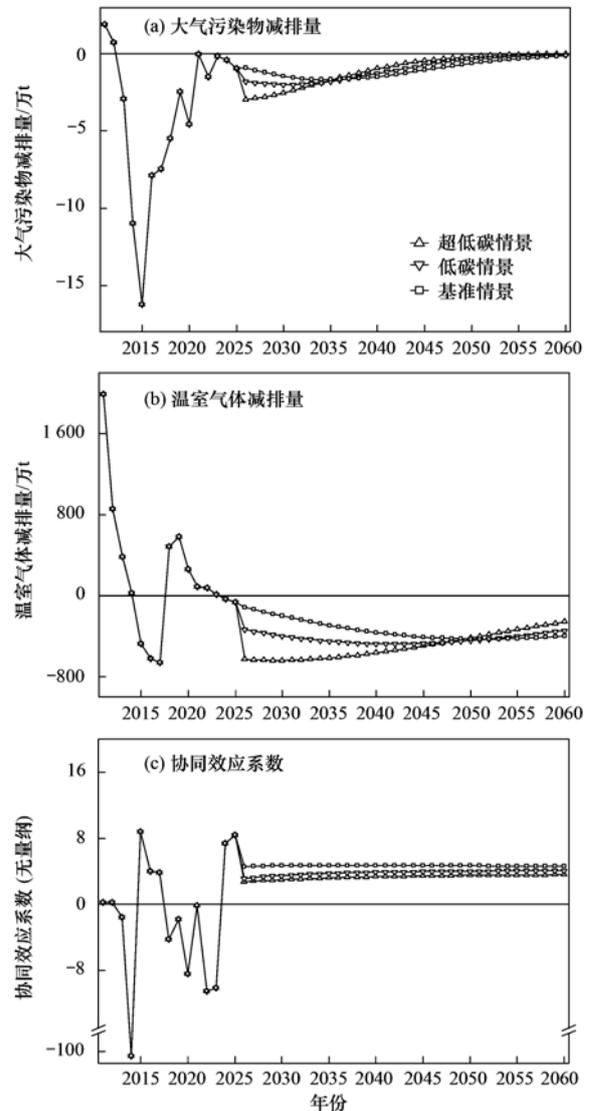


图3 天津市2011~2060年减排量与协同效应系数变化

Fig. 3 Changes in emission reductions and synergy coefficients in Tianjin from 2011 to 2060

2015~2017年和2024~2025年大气污染物和温室气体同时减排,协同效应系数范围为3.86~8.76,均大于1.2,这说明2015~2017年和2024~2025年减污降碳协同状态为协同减排,且大气污染物减排速度高于温室气体减排速度。基准情景、低碳情景和超低碳情景下,2026~2060年大气污染物和温室气体同时减排,2050年之前,相同大气污染物减排量,低碳情景下温室气体减排量是基准情景下的1.42倍,超低碳情景下温室气体减排量是基准情景下的1.85倍。基准情景、低碳情景和超低碳情景下,2026~2060年协同效应系数范围为2.74~4.71,均大于1.2,基准情景下协同效应系数均值是低碳情景下的1.22倍,同时是超低碳情景下的1.41倍。这说明各种情景下,2026~2060年大气污染物和温室气体均减排,大气污染物减排速度高于温室气体减排速度,且随着低碳进程的加快,温室气

体减排速度逐渐增加。

3 讨论

通过以上协同效应分析可知,2011~2012 年大气污染物和温室气体同时增排,2013 年起由于“大气十条”的发布,天津市首先在大气污染物排放末端治理发力,使得大气污染物开始减排。2015 年起,天津市在污染源源头治理也开始发力,尤其是煤炭总量的控制,导致温室气体也开始减排。天津市在 2015~2017 年大气污染物和温室气体同时减排,且大气污染物减排速度高于温室气体减排速度,实现了减污降碳协同增效。2018 年开始,一方面“蓝天保卫战三年行动计划”接力“大气十条”继续推动大气污染治理工作,导致大气污染物持续减排,另一方面,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,使得 2018~2023 年温室气体增排,减污降碳不具有协同效应。然而,“十四五”时期是我国生态文明建设进入以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期,天津市“十四五”规划正是在减污降碳协同增效的原则下制定的,因此,严格落实天津市“十四五”规划目标要求,天津市温室气体在 2014~2023 年波动变化,即处于平台期之后,从 2024 年开始逐年减排,天津市具备在 2023 年实现碳达峰的条件。李雪梅等^[47]研究发现天津市在“低增长强减排”发展模式下,可于 2024 年实现碳达峰,与本研究碳达峰的年份较为接近,因此天津市可在 2025 年之前实现碳达峰;同时,在能源强度和 CO₂ 排放强度持续降低的推动下,大气污染物持续减排,2024~2060 年天津市可实现减污降碳协同增效。可见,天津市当前阶段减污降碳协同增效的关键在于温室气体总量的下降,而温室气体总量下降就需要持续推动能源强度和 CO₂ 排放强度的下降,同时合理控制人口总数、城镇化率和地区生产总值。推动低碳进程越快,温室气体减排量越大,截至 2060 年,基准情景、低碳情景和超低碳情景下温室气体排放量依次为 0.88 亿、0.59 亿和 0.34 亿 t,超低碳情景下天津市更易于在 2060 年之前实现碳中和。

核算大气污染物和温室气体采用的排放因子是分别来自文献^[38,39],其是面向全国范围的,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;预测模型的构建是依据 2011~2020 年的数据进行构建的,反映的是过去几年整体的规

律,依据该模型进行预测分析时存在一定的不确定性。

4 结论

(1) 天津市大气污染物和温室气体的主要排放源均为工业源,大气污染物和温室气体的 Pearson 相关系数为 0.984 ($P < 0.01$),具有较高的相关性,天津市大气污染物和温室气体具有同根同源的特点。

(2) 基于构建的 STIRPAT 模型,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%,大气污染物的排放平均增加 4.48%,温室气体的排放平均减少 0.18%;城镇化率每增加 1%,大气污染物的排放平均减少 4.32%,温室气体的排放平均增加 7.30%;地区生产总值每增加 1%,大气污染物的排放平均减少 0.41%,温室气体的排放平均增加 0.09%;能源强度每降低 1%,大气污染物的排放平均减少 0.93%,温室气体的排放平均减少 0.41%;CO₂ 排放强度每降低 1%,大气污染物的排放平均减少 0.55%,温室气体的排放平均减少 0.23%。

(3) 从排放总量看,天津市协同排放当量在 2012 年略有升高之后逐年下降,与 2011 年相比,2060 年基准情景、低碳情景和超低碳情景下协同排放当量减排率依次为 80.46%、86.94% 和 92.59%。

(4) 从减排量与协同效应系数看,天津市 2011 和 2012 年大气污染物和温室气体同时增排,协同效应系数分别为 0.18 和 0.17;2013~2014 年和 2018~2023 年大气污染物减排,温室气体增排,协同效应系数均小于 0;2015~2017 年以及 2024~2025 年大气污染物和温室气体同时减排,协同效应系数范围为 3.86~8.76;各情景下,2026~2060 年大气污染物和温室气体同时减排,协同效应系数范围为 2.74~4.71。天津市具备在 2024 年进入减污降碳协同增效阶段的条件。

(5) 天津市推动减污降碳协同增效最关键的是严格控制温室气体排放总量,持续推动能源强度和 CO₂ 排放强度的下降,合理控制人口总数、城镇化率和地区生产总值,低碳进程越快,温室气体减排量越大,更易完成“双碳”目标。

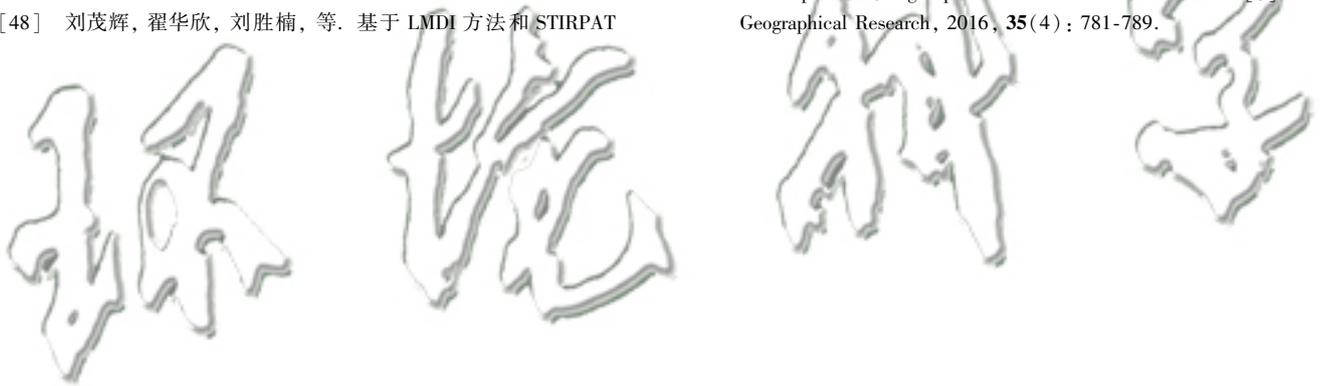
参考文献:

- [1] 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/TJSLNHJZKGB653/202109/t20210902_5577540.html, 2021-06-15.
- [2] Ayres R U, Walter J. The greenhouse effect: damages, costs and abatement[J]. *Environmental and Resource Economics*, 1991, 1(3): 237-270.
- [3] IPCC. TAR climate change 2001: mitigation[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Haines A, McMichael A J, Smith K R, *et al.* Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: overview and implications for policy makers [J]. *The Lancet*, 2009, **374**(9707): 2104-2114.
- [8] 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.
- [9] 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.
Zhou 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.
- [10] 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, 180.
Zhou Y, Zhang H W, Cai B F, *et al.* Synergetic reduction of local pollutants and CO₂ from cement industry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(12): 164-168, 180.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3386-3395.
Pang K, Zhang Q, Ma C Y, *et al.* Forecasting of emission co-reduction of greenhouse gases and pollutants for the road transport sector in Lanzhou based on the LEAP model[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3386-3395.
- [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, 何彧, 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] 杨添棋, 王洪昌, 张辰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO₂ 协同减排效益评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(11): 5315-5325.
Yang T Q, Wang H C, Zhang C, *et al.* Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of structural adjustment measures in the “2+26” cities in the Jing-Jin-Ji and its surroundings [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5315-5325.
- [19] 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.
- [20] 刘茂辉, 刘胜楠, 李婧, 等. 天津市减污降碳协同效应评估与预测[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(8): 3940-3949.
Liu M H, Liu S N, Li J, *et al.* Evaluation and prediction of the synergistic effect of pollution reduction and carbon reduction in Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(8): 3940-3949.
- [21] 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 CO₂ and air pollutant emissions by promoting new energy vehicles; a case of Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(5): 1873-1883.
- [22] 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.
- [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.
Huang Y, Jiao J D, Guo H X, *et al.* Assessment of co-control effects for CO₂ and air pollutants in transport sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(7): 20-29.
- [24] 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.
- [25] 高玉冰, 毛显强, Corsetti C, 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 C, *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.
- [26] 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, 43.
- 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, 43.
- [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_{2.5} 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_{2.5} in Guangdong province to achieve the WHO-II air quality target from the perspective of synergistic control with CO₂ [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] 毛显强, 曾桢, 刘胜强, 等. 钢铁行业技术减排措施硫、氮、碳协同控制效应评价研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(5): 1253-1260.
- Mao X Q, Zeng A, Liu S Q, *et al.* Assessment of SO₂, NO_x and CO₂ co-control effects by technological reduction measures in iron & steel industry [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(5): 1253-1260.
- [36] 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]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25**(S2): 333-336.
- [37] 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 Z, *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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 国务院. 中华人民共和国环境保护税法实施条例[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-12/30/content_5251797.htm, 2017-12-30.
- [41] 财政部, 国家发展改革委, 环境保护部. 挥发性有机物排污收费试点办法(财税[2015]71号)[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%8C%A5%E5%8F%91%E6%80%A7%E6%9C%89%E6%9C%BA%E7%89%A9%E6%8E%92%E6%B1%A1%E6%94%B6%E8%B4%B9%E8%AF%95%E7%82%B9%E5%8A%9E%E6%B3%95/17912260?fr=aladdin>, 2015-06-18.
- [42] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证[J]. *工业技术经济*, 2019, **38**(8): 32-40.
- Wang F T, Fang K, Yu C. Decoupling between industrial energy-related carbon emissions and economic growth and its driving factors in Beijing, Tianjin and Hebei urban agglomeration-empirical study based on Tapio decoupling and LMDI model [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2019, **38**(8): 32-40.
- [43] 王凌青, 王雪平, 方华军, 等. 青藏高原典型区域资源环境与社会经济耦合分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(6): 2510-2518.
- Wang L Q, Wang X P, Fang H J, *et al.* Coupling relationship between resource environment and social economy development in

- typical regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2510-2518.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 罗红成, 廖琪, 容誉. 湖北省能源消费 CO₂ 与大气污染物协同减排研究[J]. *环境污染与防治*, 2022, **44**(2): 266-271, 277.
- Luo H C, Liao Q, Rong Y. Research on synergistic emission reduction between CO₂ and air pollutants of energy consumption in Hubei Province [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2022, **44**(2): 266-271, 277.
- [47] 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.
- [48] 刘茂辉, 翟华欣, 刘胜楠, 等. 基于 LMDI 方法和 STIRPAT 模型的天津市碳排放量对比分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, **13**(1): 63-70.
- Liu M H, Zhai H X, Liu S N, *et al.* Comparative analysis of carbon emissions in Tianjin based on LMDI method and STIRPAT model [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(1): 63-70.
- [49] 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.
- [50] 天津市人民政府. 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[EB/OL]. http://www.tj.gov.cn/zwgk/szfwj/tjsrmzf/202102/t20210208_5353467.html, 2021-02-07.
- [51] 天津市发展和改革委员会. 天津市人口发展“十四五”规划[EB/OL]. http://fzgg.tj.gov.cn/zwgk_47325/zcfg_47338/zcwjx/fgwj/202111/t20211103_5673072.html, 2021-10-21.
- [52] 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.



CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)