环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第1期
2024年1月15日

目 次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 ……陈镇,刘润,罗征,薛鑫,汪瑶,赵志军(1)
粤港澳大湾区大气$PM_{2.5}$浓度的遥感估算模型 ……代园园,龚绍琦,张存杰,闵爱莲,王海君(8)
典型输送通道城市冬季$PM_{2.5}$污染与传输变化特征 ……代武俊,周颖,王晓琦,齐鹏(23)
郑州市夏季$PM_{2.5}$中二次无机组分污染特征及其影响因素 ……和兵,杨洁茹,徐艺斐,袁明浩,翟诗婷,赵长民,王申博,张瑞芹(36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析
……彭超,李振亮,向英,王晓宸,汪凌韬,张晟,翟崇治,陈阳,杨复沫,翟天宇(48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 ……陈木兰,李振亮,彭超,邓也,宋丹林,谭钦文(61)
2020年"三连击"台风对我国东部地区O_3污染的影响分析 ……花丛,尤媛,王晴,张碧辉(71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 ……张博韬,景宽,王琴,安欣欣,鹿海峰,王陈婧,王友峰,刘保献(81)
机动车减污降碳综合评价体系综述 ……范朝阳,佟惠,梁晓宇,彭剑飞(93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 ……杨峰,张贵驰,孙佶,谢放尖,揣小伟,孙瑞玲(104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力
……翁淑娟,刘颖颖,唐凤,沙青娥,彭勃,王烨嘉,陈诚,张雪驰,李京洁,陈豪琪,郑君瑜,宋献中(115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 ……张翔宇,胡建坤,马凯,高欣慰,魏月华,韩宏大,李克勋(123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价 ……窦殿程,齐嵘,肖淑敏,苏高新,郭宇新(131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估 ……张成诺,钟琴,栾博文,周涛,顾帆,李祎飞,邹华(140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价
……张楷文,张海燕,孔聪,顾润润,田良良,杨光昕,王媛,陈冈,沈晓盛(151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 ……娄保锋,谢卫民,黄波,刘旻璇(159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的"载-卸"作用 ……李睿,梁作兵,伍祺瑞,杨晨晨,田帝,高磊,陈建耀(173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因 ……张萍,王炜,朱梦圆,国超旋,邹伟,许海,朱广伟(181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 ……陈雯,吴亚,张宏鑫,刘怀庆(194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 ……李军,欧阳宏涛,周金龙(207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 ……李魁明,王晓燕,姚罗兰(218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 ……王耕,张芙榕(228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望 ……田政卿,张勇,刘向,陈生云,柳本立,吴纪华(239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 ……石淞,李文,曲琛,杨子仪(248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 ……徐勇,郑志威,孟禹弛,盘钰春,郭振东,张炎(262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 ……崔嵩,贾朝阳,郭亮,付强,刘东(275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 ……帕茹克·吾斯曼江,艾东,方一舒,张益宾,李牧,郝晋珉(287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 ……石晶,石培基,王梓洋,程番苑(300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 ……胡丹阳,张欢,宿宝巍,张娅璐,王永宏,纪佳辰,杨洁,高超(314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 ……申楷慧,魏识广,李林,储小雪,钟建军,周景钢,赵毅(323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 ……陈坚淇,贾亚男,贺秋芳,江可,陈畅,叶凯(335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 ……李子阳,陈露,赵鹏,周明华,郑静,朱波(343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 ……薛欣欣,任常琦,罗雪华,王文斌,赵春梅,张永发(354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析
……梁涛,赵敬坤,李红梅,王妍,曹中华,张务帅,王孝忠,郭超仪,石孝均,陈新平(364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 ……刘浩然,邢静怡,任文杰(376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测
……解雪峰,郭炜炜,濮励杰,缪源卿,蒋国俊,张建珍,徐飞,吴涛(386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 ……马杰,葛淼,王胜蓝,邓力,孙静,蒋月,周林(396)
铜陵某废弃硫铁矿区土壤重金属污染特征及来源解析 ……李如忠,刘宇昊,黄言欢,吴鸿飞(407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 ……李春艳,王新民,王海,吕晓斌(417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 ……唐乐斌,刘新彩,宋波,马丽钧,黄凤艳(429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 ……胡秀芝,宋毅,王天雨,蒋珍茂,魏世强(439)
生物质炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 ……吴秋产,吴骥子,赵科理,连斌,袁峰,孙淇,田欣(450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 ……马敏东,赵洋尘,朱龙,王伟平,康玉麟,安立会(459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(*Lactuca sativa*)生理生态的影响
……牛佳瑞,邹勇军,简敏菲,黄楚红,李金燕,穆霆,刘淑丽(470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制
……刘泳岐,赵锶禹,任学敏,李玉英,张英君,张浩,韩辉,陈兆进(480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 ……赵群芳,褚龙威,丁原红,王发园(489)
微塑料和菲对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 ……刘沙沙,秦建桥,吴贤格(496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 ……王安林,马瑞,马彦军,吕彦勋(508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 ……郑志玉,郭晓雯,闵伟(520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 ……刘美灵,汪益民,金文豪,王永冉,王嘉和,柴一博,彭丽媛,秦华(530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 ……陈芬,余高,王谢丰,李廷亮,孙约兵(543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 ……梁胜贤,刘春成,胡超,崔二苹,李中阳,樊向阳,崔丙健(555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 ……王秋水,程波,刘悦,邓婕,徐岩,孙朝徽,袁立艳,左嘉,司飞,高丽娟(567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征
……黄福义,周曙仡聃,潘婷,周昕原,苏建强,张娴(576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 ……刘可,童蕾,甘翠,王逸文,张嘉越,何军(584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 ……刘总堂,孙玉凤,费正皓,沙新龙,温小菊,钱彬彬,陈建,谷成刚(594)
CO_2气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb^{2+}吸附性能对比 ……江豪,陈瑞芝,朱自洋,王琳,段文焱,陈芳媛(606)
《环境科学》征订启事(70) 《环境科学》征稿简则(193) 信息(334,554,605)

广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力

翁淑娟[1], 刘颖颖[1], 唐凤[1], 沙青娥[1,2*], 彭勃[1], 王烨嘉[3], 陈诚[1], 张雪驰[4], 李京洁[1], 陈豪琪[1], 郑君瑜[5], 宋献中[2,6*]

(1. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 2. 暨南大学广州区域低碳经济研究基地, 广州 511443; 3. 广东省海洋发展规划研究中心, 广州 510220; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 650011; 5. 香港科技大学(广州)可持续能源与环境学域, 广州 510000; 6. 暨南大学管理学院, 广州 510632)

摘要: 船舶是广东省二氧化碳(CO_2)的重要排放来源,研究广东省船舶CO_2排放的历史变化趋势、驱动因素和减排途径,可为广东省制定碳达峰与碳中和路径提供科学依据. 采用排放因子法估算广东省船舶CO_2排放量,利用对数平均指数法(LMDI)识别排放驱动因素,并结合情景分析法探究船舶CO_2的减排途径. 结果表明:①2006~2020年广东省船舶CO_2排放量从331.94万t增加至639.29万t,其中干散货船和集装箱船是导致排放增加的主要船型. ②2006~2020年广东省船舶CO_2排放的关键正向驱动因素是运输强度(51%)和经济因素(49%),主要负向驱动因素是能源强度(93%)和货类结构(7%). ③到2030年,如果广东省船舶运输保持当前政策(基准情景)发展,将无法实现碳达峰. ④到2060年,同时考虑优化能源结构和降低能源强度(节能低碳情景),相比于基准情景有56.51%的CO_2减排潜力. 可为广东省制定船舶航运行业碳达峰与碳中和管控策略提供科学依据.

关键词: 广东省; 船舶; 二氧化碳; 排放清单; 驱动因素; 情景分析

中图分类号: X16 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2024)01-0115-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202301087

Driving Forces and Mitigation Potential of CO_2 Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China

WENG Shu-juan[1], LIU Ying-ying[1], TANG Feng[1], SHA Qing-e[1,2*], PENG Bo[1], WANG Ye-jia[3], CHEN Cheng[1], ZHANG Xue-chi[4], LI Jing-jie[1], CHEN Hao-qi[1], ZHENG Jun-yu[5], SONG Xian-zhong[2,6*]

(1. Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 2. Research Center of Low Carbon Economy for Guangzhou Region, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 3. Guangdong Marine Development Planning and Research Centre, Guangzhou 510220, China; 4. Guiyang Power China Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang 650011, China; 5. Sustainable Energy and Environment, Hong Kong University of Science and Technology (Guangzhou), Guangzhou 510000, China; 6. School of Management, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Ships are important sources of carbon dioxide (CO_2) emissions in Guangdong Province. The study of historical evolutions, drivers, and projected pathways of CO_2 emissions can provide scientific support for the development of carbon peaking and carbon neutral strategies in Guangdong Province. The emission factor method, log-average index (LMDI) method, and scenario analysis method were adopted to estimate CO_2 emissions, identify the drivers, and explore the mitigation potential from ships in Guangdong Province, separately. The results showed that: ① CO_2 emissions from ships in Guangdong Province increased from 3.319 4 million tons to 6.392 9 million tons from 2006 to 2020, with dry bulk carriers and container ships being the main ship types causing the increase in emissions. ② The positive drivers of CO_2 emissions from ships in Guangdong Province from 2006 to 2020 were transport intensity (51%) and economic factors (49%), and the negative drivers were energy intensity (93%) and cargo class structure (7%). ③ Carbon peaking would not be reached by 2030 if Guangdong Province maintains the current policy (baseline scenario) for ship transportation. ④ Simultaneous optimization of the energy structure and promotion of the energy intensity (energy-efficient and low-carbon scenario) had a 56.51% potential to reduce CO_2 emissions from ships compared to the baseline scenario. This can provide scientific support for Guangdong Province to develop a carbon peaking and carbon neutral control strategy for the shipping industry.

Key words: Guangdong Province; ship; carbon dioxide; emission inventory; driving force; scenario analysis

以二氧化碳(CO_2)为首的温室气体过度排放会造成温室效应,引起气候变暖,是社会可持续发展的重大挑战. 船舶航运是全球贸易的重要支撑,承担全球90%的贸易运输[1],其排放占全球人为CO_2排放总量的2.89%[2],若不采取任何措施,预计到2050年船舶CO_2排放将占全球碳总量的12%~18%[3],并且有可能会持续增加[4]. 我国作为全球CO_2排放量最大的国家,承受着巨大的国际减排压力,目前我国90%的外贸进出口货运需通过船舶运输[5],船舶CO_2减排对我国实现碳达峰与碳中和"双碳"目标具有重要影响. 广东省作为我国经济贸易大省,连续36年进出口贸易量居全国第一[6],省内珠江水运网络发达,船舶运力繁荣的背后也会带来大量的CO_2排放. 掌握广东省船舶CO_2排放情况,识别其驱动因素并研判未来排放趋势,是制定船舶减碳策略的基础.

构建CO_2排放清单是厘清碳排放情况的重要方法,目前我国仅有少数地区建立了船舶CO_2排放清

收稿日期: 2023-01-13; **修订日期**: 2023-03-12
基金项目: 广东省促进经济高质量发展海洋六大产业专项资金重点项目(粤自然资合[2022]47号);暨南大学广州区域低碳经济研究基地自设项目(22JNZS51)
作者简介: 翁淑娟(1999~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染物与温室气体排放特征,E-mail: wsj6399@163.com
* 通信作者,E-mail: shaqinge2021@jnu.edu.cn; tsxz@jnu.edu.cn

单[7~9]. 在广东省,船舶排放清单主要针对二氧化硫等大气污染物[10~12],CO_2排放清单相关研究仅有林楚彬等[13]估算了2010年广东省货船水运的温室气体排放量. 在船舶CO_2排放驱动因素方面,目前仅有两项研究开展了我国船舶碳排放的驱动因素识别,Zhou等[14]用对数平均指数法(LMDI)分析了2010~2016年中国水路运输部门运输结构变化对CO_2排放的影响;马雪菲等[15]研究了中国国际贸易海运CO_2排放的驱动因素,船型上仅局限于远洋运输船舶. 在船舶CO_2排放预测方面,我国已经开展了研究. 例如,周玲玲等[5]采用情景预测法对我国2010~2050年国际海运CO_2排放量进行了预测;纪建悦等[16]基于STIRFDT模型结合情景分析法,预测了我国2008~2040年海洋交通运输业的碳排放量,并据此提出了减排的对策和建议;顾伟红等[17]采用情景模拟预测法,对影响海运碳排放的三大因素的未来发展趋势进行设定,预测未来中国国际海运的温室气体排放. 以上研究时间大多数集中在2010年前后,随着近年来船舶航运快速发展,排放量、驱动因素和预测结果与现阶段的实际情况可能不符,且主要集中在我国国际海运碳排放相关研究. 广东省作为我国航运大省,船舶CO_2排放清单滞后且不完整,排放驱动因素与减排潜力尚不清楚,严重制约双碳策略制定.

本研究以广东省各类客货运输船舶为研究对象,开展2006~2020年船舶CO_2排放核算,基于自下而上的排放因子法,建立广东省船舶CO_2历史趋势排放清单;在此基础上,采用LMDI法,选取CO_2排放因子、经济因素、能源强度、运输强度和货类结构5个因素,识别船舶CO_2排放的主要驱动因素;使用情景分析法识别广东省船舶CO_2潜在排放路径与减排潜力,以期为广东省制定船舶航运碳达峰与碳中和管控策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 CO_2排放清单核算方法

参照《IPCC国家温室气体清单指南》中的估算方法[18],船舶CO_2排放的计算公式可表达为:

$$C = A \times \mathrm{EF} \tag{1}$$

式中, C为船舶碳排放量,t; A为燃料消耗量,t; EF为排放因子,$\mathrm{t \cdot t^{-1}}$.

燃油消耗量的测算方法包括自上而下和自下而上[3,19]两种方法. 自上而下的方法通过统计燃油消耗量,与排放因子相乘获得,该方法直接简单,计算得到的碳排放量的数据也更加准确,但是由于目前中国(包括广东省)没有完整的船舶燃油消耗的监测系统,且燃油供应商提供的数据也不够完整,统计得到的燃油消耗量数据与实际燃油消耗数据存在较大的偏差[20]. 自下而上的方法是通过船舶使用的燃料类型、发动机类型和船舶的活动过程来测算燃油消耗,该方法建立的测算模型贴近实际,可以较为准确地测算出船舶燃油消耗量,是目前进行船舶CO_2核算普遍使用的方法[7,21].

本研究采用基于引擎功率的自下而上方法[22]对广东省船舶燃油消耗量进行测算:

$$A = \sum_{i,j,k} \mathrm{VAN}_i \times P_i \times \mathrm{LF}_{i,j,k} \times T_{i,k} \times \mathrm{SFC}_{i,j,k} \tag{2}$$

式中,i,j,k分别为船舶类型、引擎等级和行驶模式;A为燃油消耗量,t;VAN_i为第i类船在估算期间的抵离港次数;P_i为第i类船舶引擎功率,kW; $\mathrm{LF}_{i,j,k}$为i型船舶的引擎j在k运作模式下的功率输出负荷;$T_{i,k}$为第i类船舶在第k种行驶模式下的工作时间,h;$\mathrm{SFC}_{i,j,k}$为i型船舶的引擎j在k运作模式下的燃油消耗率,$\mathrm{g \cdot (kW \cdot h)^{-1}}$.

船舶抵离港次数来自广东省城市水利局与海事局调研数据;各类型船舶的引擎功率、负载因子和工作时间来自文献[11];燃油消耗率和CO_2排放因子数据来源于美国环保署报告[23].

1.2 CO_2排放驱动因素分解模型

LMDI模型是Ang[24]基于扩展的Kaya恒等式[25]提出的驱动因素分解模型,该模型避免了大多数驱动因素分解模型存在的残差项和零值问题,被广泛应用于碳排放和能源消费等领域的驱动因素识别[26]. 因此,本研究选用LMDI模型来分析广东省船舶碳排放的驱动因素.

本研究在考虑以往研究[14,15]常用的船舶CO_2排放驱动因素(排放因子、能源强度、运输强度和经济因素)的基础上,通过实地调研了解到货类结构变化对CO_2排放也会产生重要影响,因此将货类结构也纳入驱动因素分解模型,对以往船舶碳排放驱动因素分解模型进行了改进. 本研究基于LMDI法的广东省船舶碳排放驱动因素分解模型为:

$$C = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{T_i} \times \frac{T_i}{T} \times \frac{T}{\mathrm{GDP_w}} \times \mathrm{GDP_w} \tag{3}$$

式中,C_i为i船型产生的CO_2排放量,t; E_i为i船型能源消耗量,t; T_i为i船型的货物周转量,亿$\mathrm{t \cdot km}$; T为船舶总的货物周转量,亿$\mathrm{t \cdot km}$; $\mathrm{GDP_w}$为水运业生产总值,亿元.

2006~2020年广东省货运周转量、客运周转量和GDP数据来自《广东统计年鉴》[27]. 各类船型周转量计算公式为:

$$T_i = M_i \times D_i \tag{4}$$

式中,T_i为i船型的货物周转量,M_i为i船型的货运量,D_i为i船型货物运输的距离. 由于无法直接获取各类

船型的货运量和货物运输距离，本研究采用中国海运贸易各类货物的贸易量的比例作为广东省水路运输的各类货物比例，再将货物比例和货运量相乘得到广东省水运各类货物的货物量．其中，中国海运贸易的数据来源于克拉克森全球海运量和货种分布数据库[28～30]，各类货物的运输距离使用广东省水运货物平均运输距离．

船舶的总货物周转量计算公式为：

$$T=F+\lambda P \tag{5}$$

式中，T 为广东省船舶总的货物周转量，F 为货运周转量，P 为客运周转量，λ 为将客运周转量转换为货运周转量的折算系数，取值为 0.3[31]．

水运业 GDP 采用水运业与广东省 GDP 总量的占比相乘获取，水运业对广东省 GDP 的贡献率为 3.47%[32]，历年 GDP 以 2005 年为不变价处理．

为了更好地表述各个驱动因素，公式(3)还可以进一步表示为：

$$C = \sum_i \mathrm{CE} \times \mathrm{EI}_i \times \mathrm{TS}_i \times \mathrm{TI} \times G \tag{6}$$

式中，CE 为碳排放因子；EI_i 为 i 船型的单位运输周转量能耗，即能源强度；TS_i 为不同船型运输的货物在总运输货物中所占的比例，即货类结构；TI 为经济发展对航运的依赖程度，即运输强度[33]；G 为使用水运业生产总值代表经济发展水平，即经济因素．

由于燃料的 CO_2 排放系数变化一般保持不变[22]，因此，可认为研究时间区域内 CO_2 排放因子较为稳定，即 $\Delta C_{ce}=0$．设船舶 CO_2 排放由基准年 C^0 到目标年的 C^t，根据 Ang 等[34]提出的 LMDI 计算方法，结合公式(6)分解可以得到：

$$\Delta C_{tot} = C^t - C^0 = \Delta C_{ce} + \Delta C_{ei} + \Delta C_{ts} + \Delta C_{ti} + \Delta C_{g} \tag{7}$$

$$\Delta C_{ei} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{\mathrm{EI}_i^t}{\mathrm{EI}_i^0} \tag{8}$$

$$\Delta C_{ts} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{\mathrm{TS}_i^t}{\mathrm{TS}_i^0} \tag{9}$$

$$\Delta C_{ti} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{\mathrm{TI}^t}{\mathrm{TI}^0} \tag{10}$$

$$\Delta C_{g} = \frac{(C_i^t - C_i^0)}{(\ln C_i^t - \ln C_i^0)} \cdot \ln \frac{G^t}{G^0} \tag{11}$$

式中，ΔC_{tot} 为第 t 年与基准年船舶碳排放的变化；ΔC_{ce} 为 CO_2 排放因子；ΔC_{ei} 为能源强度对 CO_2 排放变化的影响；ΔC_{ts} 为货类结构对 CO_2 排放变化的影响；ΔC_{ti} 为运输强度对 CO_2 排放变化的影响；ΔC_{g} 为经济增长对 CO_2 排放变化的影响．上述分解公式中涉及到的 0 值，采用 Ang[35]提到的零值处理方法，用 10^{-20} 替代 0 值．本研究收集了从基准年到目标年的所有年份基础数据，采用连续时序分解，将每一年的驱动分解结果进行求和，从而得到基准年到目标年的驱动因素对碳排放的定量影响．该算法相比于直接采用目标年和基准年两年数据得到的结果更能反映该期间内分解结果的时序变化，更为精准合理．

1.3　CO_2 排放情景预测模型

为了更好地了解广东省船舶碳排放趋势以及减排潜力，本文将碳排放量的公式(3)改写为：

$$\begin{aligned} C &= \sum_i \frac{C_i}{E_i} \times \frac{E_i}{T_i} \times \frac{T_i}{T} \times \frac{T}{\mathrm{GDP_w}} \times \mathrm{GDP_w} \\ &= \mathrm{EC} \times \mathrm{EI} \times T \end{aligned} \tag{12}$$

式中，$\mathrm{EC} = \sum_i \frac{C_i}{E_i}$，为碳排放系数效应，表示总碳排放系数；$\mathrm{EI} = \sum_i \frac{E_i}{T_i} \times \frac{T_i}{T}$，为能源强度与货类结构的综合效应，其中，$\frac{E_i}{T_i}$ 为能源强度，$\frac{T_i}{T}$ 为货类结构；$T = \frac{T}{\mathrm{GDP_w}} \times \mathrm{GDP_w}$ 为运输强度和经济因素的综合效应，其中，$\frac{T}{\mathrm{GDP_w}}$ 为运输强度，$\mathrm{GDP_w}$ 为经济因素．

为估算广东省船舶碳减排潜力，参考 Lin 等[36]的研究，使用以下计算公式：

$$\mathrm{CSP}=C_{\mathrm{BAU}}-C_{\mathrm{SCENARIO}} \tag{13}$$

式中，CSP 为碳减排潜力，C_{BAU} 为基准情景下的碳排放量，t；C_{SCENARIO} 为指定情景下的碳排放量，t．

1.4　广东省船舶 CO_2 排放情景设置

研究设置了 4 种情景：基准情景（baseline scenario，BAU）、节能情景（scenario1，S1）、低碳情景（scenario2，S2）和节能低碳情景（scenario3，S3）．以下分别介绍 4 种情景，具体情景参数设置见表 1．

基准情景：不考虑技术进步和政策调整，只考虑当前现有政策对船舶碳排放的影响，排放驱动因素保持现有发展趋势．

(1)周转量预测参数设置　运输需求和经济发展密切相关，本研究参考王靖添等[37]的研究，未来船舶周转量的变化通过水运周转量相对 GDP 的弹性系数和 GDP 两项参数预测．其中，水运周转量相对 GDP 的弹性系数通过文献[37]获取；GDP 增长率根据权威政策文件获取．中国国务院发展研究中心与世界银行预测，2021～2025 年中国 GDP 年均增长率为 5.9%，2026～2030 年为 5.0%；“十四五”期间广东省规划指出地区生产总值年均增长率为 5% 左右[38]．综合以上因素，本研究设置 2021～2030 年广东省 GDP 年均增长率为 5.5%，2031～2060 以 10 年为阶段，设置 3 个阶段的 GDP 年均增长率，分别为 3.8%、2.5% 和 1.5%．

(2)能源强度预测参数设置　能源强度（船舶单

位运输周转量能耗)参考以往研究设置[39]. 广东省营运船舶单位运输周转量能耗控制目标[40,41]中,“十二五”相较于“十一五”能源强度规划下降率为15%,“十三五”相较于“十二五”能源强度规划下降率调整到6%,可以预见,能源强度进一步降低会越来越困难.

(3)清洁能源替代预测参数设置 广东省目前政策下船舶清洁能源替代主要是液化天然气(liquid nature gas,LNG)替代传统化石燃料. LGN替代率参考马雪菲等[42]的研究,考虑广东省“十四五”期间加快船舶LNG动力改造[43],本研究设置基准情景下,2050年广东省船舶清洁能源替代率(LNG替代传统燃料)为40%,2021 ~ 2060年每10年船舶的清洁能源的替代比例为10%、20%、40%和60%,依据替代比例计算年均增速.

节能情景:考虑船舶发动机燃烧效率提升、船型结构优化、船舶大型化等技术升级,能耗低、能效高的运输技术和船舶得到普及,在运营船舶所占的比例逐渐提升. 参考IMO第四次温室气体研究报告[2]对未来船舶运输能源强度的预测和Liu等[44]的研究,在BAU的基础上,调整能源强度的变化率.

低碳情景:在BAU的基础上,考虑更为激进的船舶航运业能源结构调整,在基准情景LNG替代的基础上,结合国际上氨、氢和生物质燃料等零碳能源替代,加快清洁能源替代率. 依据挪威船级社发布的《2050年海事预测》[45]报告,碳中和燃料必须占国际航运业30% ~ 40%的能源供给才能实现IMO碳减排目标,参考中金公司研究部[46]到2060年航运碳排放情景的设置,设置船舶航运低碳情景的清洁能源替代率,据此分别设置2021 ~ 2060年每10年的清洁能源替代率(LNG燃料与零碳燃料替代传统燃料)分别为20%、40%、70%和90%.

节能低碳情景:在BAU的基础上,同时考虑节能情景和低碳情景下的能源强度和清洁能源替代.

表1 不同情景下驱动因素变化率/%

Table 1 Change rates of various contributors under different scenarios/%

情景设置		2021 ~ 2030年	2031 ~ 2040年	2041 ~ 2050年	2051 ~ 2060年
基准情景	周转量	3.17	2.19	1.44	0.86
	能源强度	-1.00	-1.00	-0.50	-0.50
	清洁能源替代	1.05	1.17	2.84	3.97
节能情景	周转量	3.17	2.19	1.44	0.86
	能源强度	-1.50	-1.50	-1.00	-1.00
	清洁能源替代	1.05	1.17	2.84	3.97
低碳情景	周转量	3.17	2.19	1.44	0.86
	能源强度	-1.00	-1.00	-0.50	-0.50
	清洁能源替代	2.21	2.84	6.70	10.40
节能低碳情景	周转量	3.17	2.19	1.44	0.86
	能源强度	-1.50	-1.50	-1.00	-1.00
	清洁能源替代	2.21	2.84	6.70	10.40

2 结果与讨论

2.1 2006 ~ 2020年广东省船舶CO_2历史排放趋势

2006 ~ 2020年广东省船舶CO_2的排放趋势如图1所示. 2006 ~ 2018年船舶CO_2排放量从331.94万t持续快速增长至749.36万t,年平均增长率为7.02%,2018年相比于2006年增加了417.42万t. 这主要是由于2006 ~ 2018年随着国际贸易和省内经济的快速发展,广东省航运快速增长导致CO_2排放的增长. 而在2019 ~ 2020年期间,船舶CO_2排放呈现出下降趋势,2019年和2020年分别相较于2018年下降了95.11万t和110.07万t. 这其中,最主要的原因是2019 ~ 2020年中美贸易战和新冠肺炎疫情对广东省海运产生较大的影响;与此同时,广东省交通运输部发布的港口岸电建设和使用工作方案[47]也促进了船舶CO_2减排.

不同于CO_2排放量总体上升的趋势,船舶CO_2排放的同比增长率总体呈现波动下降的趋势. 2006 ~ 2009年,由于推进《京都议定书》[48],增长率逐渐下降,CO_2排放增速放缓;2009 ~ 2010年,由于美国次贷款危机,世界经济萎缩,对中国的经济需求增加,广东省对外贸易总额从4.17万亿元增长至5.32万亿元[27],货物贸易激增导致碳排放增长率骤升. 2010 ~ 2012年期间,国务院颁布了《“十二五”控制温室气体排放工作方案》[49],广东省人民政府响应国家政策,发布了《“十二五”控制温室气体排放工作实施方案》[50],随着控制温室气体工作方案的实施,碳排放增长率出现较大幅度地下降. 2013 ~ 2018年随着国际贸易和经济发展,碳排放增长率基本稳定. 2019 ~ 2020年,受中美贸易战和新冠肺炎疫情影响,碳排放

增长率显著下降，与碳排放变化一致．

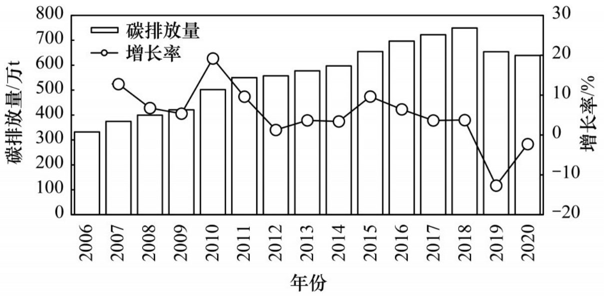

图 1　2006～2020 年广东省船舶 CO_2 排放量和增长率

Fig. 1　CO_2 emissions and annual growth rate from ships in Guangdong Province from 2006 to 2020

图 2 显示了 2006～2020 年广东省各类型船舶对 CO_2 排放占比．总体来看，干散货船和集装箱船是最大的 CO_2 排放源，占总船舶 CO_2 排放量的 65% 以上．干散货船的 CO_2 排放占比最大，约占 37%～40%．其次是集装箱船，占比为 28%～32%．油轮、化学品运载船和矿砂船占比分别为 12%～13%、6%～7%、2%～3%．对碳排放贡献最小的是客轮和气体运载船，合计约占 2% 左右．近 14 年内，广东省船舶排放结构稳定，各类排放源占比变化幅度不超过 4%．其占比结构主要受货物运输量和船舶数量影响，需加强对干散货船和集装货船管控．

尽管每年各船型的排放占比变化不大，但是各类型船舶历年的 CO_2 排放量有较大变化．2006～2020 年，8 种船型的 CO_2 排放总体呈现上升趋势，其中干散货船的排放增幅最大，从 2006 年的 126.97 万 t 增长至 2020 年的 246.24 万 t，排放量增长是 2006 年的近两倍．主要原因是广东省不断推进城镇化建设，加大了对干散货的需求，干散货船承担了最大的水运货运量，船舶数量增长速度快，导致了 CO_2 排放高速增长．

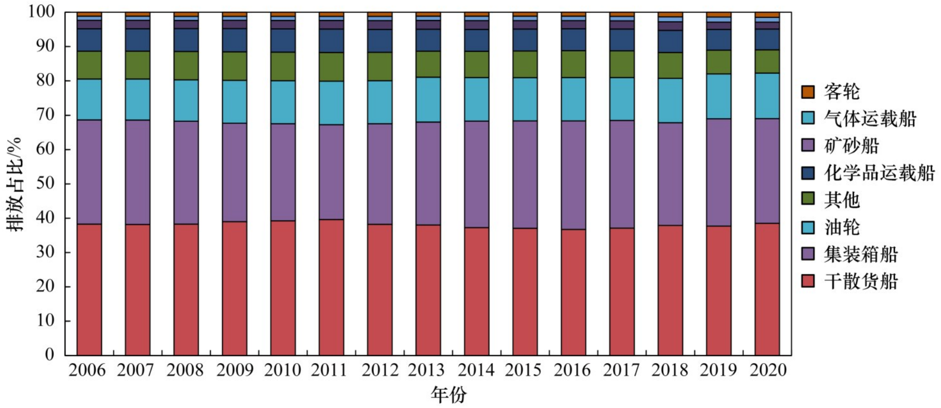

图 2　2006～2020 年广东省各类型船舶 CO_2 排放占比

Fig. 2　Proportion of CO_2 emissions from different types of ships in Guangdong Province from 2006 to 2020

2.2　广东省船舶 CO_2 排放驱动因素

使用 LMDI 模型，对广东省船舶 CO_2 排放进行驱动因素分解，得到能源强度、货类结构、运输强度和经济因素对 CO_2 排放的贡献，如图 3 所示．总体上，运输强度、能源强度和经济因素是广东省船舶 CO_2 排放的主要驱动因素，货类结构对广东省船舶 CO_2 排放的驱动作用较小．4 个驱动因素中，运输强度和经济因素主要呈现出正向驱动作用，促进船舶 CO_2 排放；能源强度和货类结构主要呈现出负向驱动作用，抑制船舶 CO_2 排放．

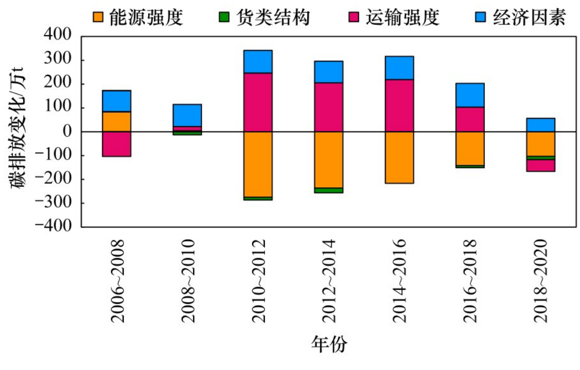

图 3　2006～2020 年广东省船舶 CO_2 排放变化分解结果

Fig. 3　Decomposition results of CO_2 emissions changes for ships in Guangdong from 2006 to 2020

运输强度是航运需求和经济之间的关系，反映经济发展对航运的依赖程度，经济发展对航运的依赖程度越高，运输强度越大，产生的 CO_2 排放就越多．总体上，2006～2020 年运输强度累计增加了碳排放 638.61 万 t，占 CO_2 排放变化的 51%，是促进 CO_2 排放的首要因素．2008～2018 年运输强度从 25 675.39 t·(km·万元)$^{-1}$ 增长至 94 453.45 t·(km·万元)$^{-1}$，对船舶 CO_2 排放表现为促进作用；2006～2008 年和 2018～2020 年度运输强度对船舶 CO_2 排放呈现抑制作用，造成这种现象的原因是在全球经济大萧条、贸易战和疫情影响下，运输强度均呈现下降趋势，2006～2008 年，运输强度从 33 908.64 t·(km·万元)$^{-1}$ 降低至 25 675.39 t·(km·万元)$^{-1}$，2018～2020 年，运输强度从 94 453.45 t·(km·万元)$^{-1}$ 下降至 87 832.54 t·(km·万元)$^{-1}$，广东

省经济发展对船舶运输依赖程度较弱,进而抑制了碳排放.

经济因素对船舶CO_2排放起显著的促进作用,之前的研究也证实了这一点[51]. 2006~2020年经济因素累计增加船舶CO_2排放619.67万t,对船舶碳排放促进的贡献率为49%,是促进船舶碳排放的重要因素.随着经济快速发展和产业全球化,进出口贸易量快速提升,船舶航运能源消耗大幅增加驱动CO_2排放.

能源强度是指船舶单位运输周转量的能源消耗.能源强度变化是碳排放的主要抑制因素,2006~2020年间,能源强度累计减少碳排放887.20万t,对抑制碳排放贡献率为93%,主要是2008年开始中国交通部提出我国船舶单位运输能耗的管控目标,推行船舶大型化等措施,导致船舶的单位运输周转量能耗逐年下降,这与以往研究所得的结论类似[14]. 2006~2008年期间能源强度对碳排放呈现促进作用,主要原因是2008年以后我国才开始实施船舶单位运输周转量能耗的相关控制措施[52].

货类结构是指各类货物周转占总的货物周转量的比值.货类结构2006~2020年累计减少CO_2排放63.73万t,对船舶CO_2排放排放的负向驱动因素贡献率为7%.其中,不同船型对碳排放的驱动效应有所差异.降低CO_2排放的船型主要是集装箱船、客轮、化学品运载船和矿砂船,分别减少CO_2排放70.84、23.19、11.88和6.03万t;增加CO_2排放的船型是干散货船、油轮、气体运载船和其他类型船舶,依次增加20.94、13.37、12.78和1.12万t.总体而言,不同船型对CO_2排放的负向驱动效应大于正向驱动效应,因而整体上呈现弱的抑制效应.

2.3 不同情景下2021~2060广东省船舶CO_2排放路径与减排潜力

广东省2021~2060年船舶CO_2排放量与减排潜力预测结果如图4所示.到2060年,在基准情景(BAU)、节能情景(S1)、低碳情景(S2)和节能低碳情景(S3),广东省船舶CO_2排放量分别为926.46、756.99、493.09和402.89万t.在BAU下,2021~2030年碳排放以较快的速度增长,无法实现2030年碳达峰,达峰年份预计在2056年.其他情景中,S3对CO_2的减排作用最显著,仅有该情景可在2030年碳达峰,到2060年相比于BAU可减少523.57万t排放;S2相较于基准情景,碳排放有一定的降低,但减排效果较不明显;S3相比较于S2减排效果大大提升,说明相较于船舶能源效率的提升,船舶能源的替代对降低碳排放作用更为显著,应加快船舶传统能源向清洁能源的转换.

CO_2减排潜力大小依次为S3 > S2 > S1.总体来说,采取措施控制能源强度和加快清洁能源的替换,对广东省船舶的CO_2减排潜力巨大,到2060年S3减排潜力占BAU排放量的比例可达56.51%.建议广东省制定节能减排的政策目标,将降低船舶单位运输周转量的能耗,确保节能降碳;加快清洁能源的替代,减排前期可将LNG作为过渡性船用燃料替换传统燃油,同时,可加快推进氢和氨、生物燃料等清洁能源的使用和港口岸电的建设,提高清洁能源替代率.建议广东省船舶航运行业除了优化能源结构与提升能源效率之外,还需要考虑部署其他固碳或增汇政策.

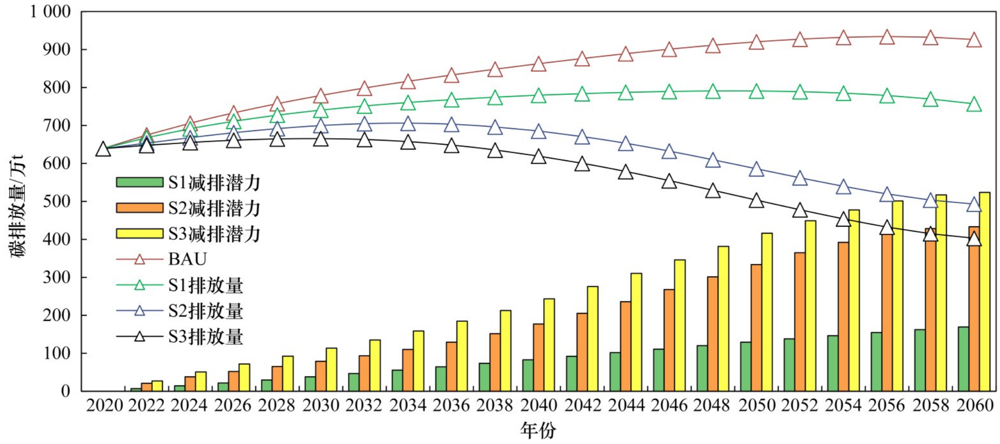

图4 2021~2060年不同情景下广东省船舶CO_2排放量与减排潜力

Fig. 4 Projected CO_2 emissions and mitigation potentials from ships in Guangdong Province under different scenarios from 2021 to 2060

3 结论

(1)2006~2018年广东省船舶CO_2排放量随着经贸发展呈现增长趋势,从331.94万t增加至749.36万t; 2018~2020年受贸易战和新冠肺炎疫情影响呈现相反的趋势,从749.36万t减至639.29万t.各类船

型历年的碳排放占比变化不大，干散货船是最主要的碳排放源，占广东省船舶总排放量的37%以上，其次是集装箱船，占船舶总排放量的28%以上.

(2)2006 ~ 2018年，广东省船舶CO_2排放驱动因素中，运输强度和经济因素的促进作用较为显著，贡献率分别为51%和49%；能源强度和货类结构主要呈现抑制作用，能源强度贡献率为93%.

(3)到2030年，如果广东省船舶运输业保持当前政策基准情景，将无法实现碳达峰，必须采取行动.

(4)到2060年，在基准情景、低碳情景、节能情景和节能低碳情景下，广东省船舶CO_2排放量依次为926.46、756.99、493.09和402.89万t，要实现双碳目标需同时靠优化能源结构和提升能源效率.

参考文献：

[1] Christodoulou A, Woxenius J. Sustainable short sea shipping[J]. Sustainability, 2019, **11**(10), doi: 10.3390/su11102847.

[2] Faber J, Hanayama S, Zhang S, *et al*. Fourth IMO GHG study 2020[R]. London: International Maritime Organization (IMO), 2020.

[3] Buhaug Ø, Corbett J J, Endresen Ø, *et al*. Second IMO GHG study 2009[R]. London: International Marine Organization (IMO), 2009.

[4] Eyring V, Köhler H W, Lauer A, *et al*. Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, **110**(D17), doi: 10.1029/2004JD005620.

[5] 周玲玲，顾阿伦，叶薇倩，等. 中国未来国际海运CO_2排放量预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, **52**(8): 1125-1129.
Zhou L L, Gu A L, Ye W Q, *et al*. Prediction of China's international shipping CO_2 emissions[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, **52**(8): 1125-1129.

[6] 陈万灵，何传添，刘胜. 广东对外经济贸易发展研究报告(2019 ~ 2020)[M]. 北京：社会科学文献出版社, 2020.

[7] Weng J X, Shi K, Gan X F, *et al*. Ship emission estimation with high spatial-temporal resolution in the Yangtze River estuary using AIS data[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119297.

[8] Song S. Ship emissions inventory, social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port[J]. Atmospheric Environment, 2014, **82**: 288-297.

[9] 徐文文，殷承启，许雪记，等. 江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2595-2606.
Xu W W, Yin C Q, Xu X J, *et al*. Vessel emission inventories and emission characteristics for inland rivers in Jiangsu Province[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2595-2606.

[10] Li C, Yuan Z B, Ou J M, *et al*. An AIS-based high-resolution ship emission inventory and its uncertainty in Pearl River delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 1-10.

[11] 叶斯琪，郑君瑜，潘月云，等. 广东省船舶排放源清单及时空分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 537-547.
Ye S Q, Zheng J Y, Pan Y Y, *et al*. Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in Guangdong Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(3): 537-547.

[12] 张礼俊，郑君瑜，尹沙沙，等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 886-891.
Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, *et al*. Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River delta region[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 886-891.

[13] 林楚彬，赵黛青，蔡国田，等. 广东货船水运的温室气体排放和低碳发展对策[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(12): 1340-1348.
Lin C B, Zhao D Q, Cai G T, *et al*. Greenhouse gas emissions from cargo vessels and low-carbon shipping strategies in Guangdong Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(12): 1340-1348.

[14] Zhou D Q, Huang F, Wang Q W, *et al*. The role of structure change in driving CO_2 emissions from China's waterway transport sector[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, **171**, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105627.

[15] 马雪菲，杨华龙，邢玉伟. 中国国际贸易海运CO_2排放特征及驱动因素研究[J]. 资源科学, 2018, **40**(10): 2132-2142.
Ma X F, Yang H L, Xing Y W. Study on characteristics and driving factors of CO_2 emissions from China's international maritime transportation sector[J]. Resources Science, 2018, **40**(10): 2132-2142.

[16] 纪建悦，孔胶胶. 基于STIRFDT模型的海洋交通运输业碳排放预测研究[J]. 科技管理研究, 2012, **32**(6): 79-81.
Ji J Y, Kong J J. Prediction research on carbon emissions of marine transportation based on STIRFDT model[J]. Science and Technology Management Research, 2012, **32**(6): 79-81.

[17] 顾伟红，徐瑞华. 中国国际海运温室气体排放预测[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, **37**(1): 97-101.
Gu W H, Xu R H. Forecast greenhouse gas emissions from China's international shipping[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, **37**(1): 97-101.

[18] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, *et al*. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Tokyo: IGES, 2006.

[19] Penman J, Kruger D, Galbally I E, *et al*. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2000.

[20] Miola A, Ciuffo B. Estimating air emissions from ships: meta-analysis of modelling approaches and available data sources[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(13): 2242-2251.

[21] Yang L, Zhang Q J, Zhang Y J, *et al*. An AIS-based emission inventory and the impact on air quality in Tianjin port based on localized emission factors[J]. Science of the Total Environment, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146869.

[22] Smith T W P, Jalkanen J P, Anderson B A, *et al*. Third IMO GHG Study 2014[R]. London: International Marine Organization (IMO), 2015.

[23] Bailey K. Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories[R]. Washington: U. S. Environmental Protection Agency, 2009.

[24] Ang B W, Liu F L, Chew E P. Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis[J]. Energy Policy, 2003, **31**(14): 1561-1566.

[25] Yoichi K. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: interpretation of proposed scenarios[R]. Paris: IPCC, 1989.

[26] 徐国泉，蔡珠，封士伟. 基于二阶段LMDI模型的碳排放时空差异及影响因素研究——以江苏省为例[J]. 软科学, 2021, **35**(10): 107-113.
Xu G Q, Cai Z, Feng S W. Spatial and temporal differences and

influencing factors of carbon emissions based on the analysis of the two-stage LMDI model——an empirical study on Jiangsu Province [J]. Soft Science, 2021, **35**(10): 107-113.

[27] 广东省统计局. 广东统计年鉴(2007 ~ 2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2021.

[28] Clarksons Research. December 2011 China intelligence monthly [R]. London: Clarksons Research, 2012.

[29] Clarksons Research. December 2016 China intelligence monthly [R]. London: Clarksons Research, 2017.

[30] Clarksons Research. December 2020 China intelligence monthly [R]. London: Clarksons Research, 2021.

[31] 张克勇, 刘县美, 郭丕斌, 等. 京津冀交通部门CO_2排放的时空差异及影响因素[J]. 系统工程, 2019, **37**(5): 12-20.
Zhang K Y, Liu X M, Guo P B, *et al*. Spatial-temporal differeces of CO_2 emissions of transport sector in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Systems Engineering, 2019, **37**(5): 12-20.

[32] 余丹亚, 杨利兵. 浅析广东省水运业对国民经济发展贡献[J]. 当代经济, 2018, (21): 14-15.

[33] 喻洁, 达亚彬, 欧阳斌. 基于LMDI分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析[J]. 中国公路学报, 2015, **28**(10): 112-119.
Yu J, Da Y B, Ouyang B. Analysis of carbon emission changes in China's transportation industry based on LMDI decomposition method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, **28**(10): 112-119.

[34] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy, 2005, **33**(7): 867-871.

[35] Ang B W, Liu N. Handling zero values in the logarithmic mean Divisia index decomposition approach[J]. Energy Policy, 2007, **35**(1): 238-246.

[36] Lin B Q, Moubarak M. Estimation of energy saving potential in China's paper industry[J]. Energy, 2014, **65**: 182-189.

[37] 王靖添, 闫琰, 黄全胜, 等. 中国交通运输碳减排潜力分析[J]. 科技管理研究, 2021, **41**(2): 200-210.
Wang J T, Yan Y, Huang Q S, *et al*. Analysis of carbon emission reduction potential of China's transportation [J]. Science and Technology Management Research, 2021, **41**(2): 200-210.

[38] 广东省人民政府.《广东省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》[EB/OL]. https://www.gd.gov.cn/zwgk/wjk/qbwj/yf/content/post_3268751.html, 2021-04-25.

[39] Hao H, Geng Y, Li W Q, *et al*. Energy consumption and GHG emissions from China's freight transport sector: scenarios through 2050[J]. Energy Policy, 2015, **85**: 94-101.

[40] 中华人民共和国中央人民政府. 公路水路交通运输节能减排"十二五"规划[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2012/content_2076113.htm, 2011-06-27.

[41] 中华人民共和国中央人民政府."十三五"节能减排综合工作方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm, 2017-01-05.

[42] 马雪菲. 中国国际海上货物运输CO_2排放驱动因素分析及减排对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.

[43] 广东省交通运输厅.《广东省水运"十四五"发展规划》[EB/OL]. http://td.gd.gov.cn/zwgk_n/jslyxxgk/fzgh/content/post_3757427.html, 2021-12-30.

[44] Liu L, Wang K, Wang S S, *et al*. Assessing energy consumption, CO_2 and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050 [J]. Energy Policy, 2018, **116**: 382-396.

[45] DNV. Maritime forecast to 2050[R]. Energy Transition Outlook, 2018.

[46] 杨鑫, 张文杰, 曾韬, 等. 绿色交通: 新能源风劲潮涌, 碳中和任重道远[R]. 北京: 中国国际金融股份有限公司, 2021.

[47] 广东省交通运输厅. 广东省交通运输厅关于广东省十三届人大二次会议第1666号代表建议答复的函[EB/OL]. http://td.gd.gov.cn/ztzl/jytabl/content/mpost_2621578.html, 2019-06-25.

[48] Breidenich C, Magraw D, Rowley A, *et al*. The Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change[J]. American Journal of International Law, 1998, **92**(2): 315-331.

[49] 中华人民共和国生态环境部."十二五"控制温室气体排放工作方案[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwgk/2012-01/13/content_2043645.htm, 2011-12-01.

[50] 广东省人民政府."十二五"控制温室气体排放工作实施方案[EB/OL]. http://www.gd.gov.cn/gkmlpt/content/0/141/post_141033.html#7, 2012-08-20.

[51] 苗安康, 袁越, 吴涵, 等. 中国省域碳达峰路径与政策[J]. 环境科学, 2023, **44**(8): 4623-4636.
Miao A K, Yuan Y, Wu H, *et al*. Pathway and policy for China's provincial carbon emission peak [J]. Environmental Science, 2023, **44**(8): 4623-4636.

[52] 中华人民共和国交通运输部. 关于加快发展现代交通业的若干意见[EB/OL]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/kjs/202006/t20200623_3316685.html, 2008-01-02.

HUANJING KEXUE
Vol. 45 No. 1
Environmental Science (monthly)
Jan. 15, 2024

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning ······ CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, *et al.* (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric $PM_{2.5}$ Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ······ DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, *et al.* (8)
Variation Characteristics of $PM_{2.5}$ Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter ······ DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, *et al.* (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou ······ HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, *et al.* (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter ······ PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, *et al.* (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022 ······ CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, *et al.* (61)
Analysis of O_3 Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China ······ HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, *et al.* (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer ······ ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, *et al.* (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction ······ FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, *et al.* (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model ······ YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, *et al.* (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO_2 Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China ······ WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, *et al.* (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant ······ ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, *et al.* (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years ······ DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, *et al.* (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment ······ ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, *et al.* (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment ······ ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, *et al.* (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment ······ LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, *et al.* (159)
"Load-Unload" Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary ······ LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, *et al.* (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir ······ ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, *et al.* (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City ······ CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, *et al.* (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang ······ LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region ······ LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years ······ WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect ······ TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, *et al.* (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone ······ SHI Song, LI Wen, QU Chen, *et al.* (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China ······ XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, *et al.* (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin ······ CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, *et al.* (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model ······ Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, *et al.* (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model ······ SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, *et al.* (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain ······ HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, *et al.* (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors ······ SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, *et al.* (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region ······ CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, *et al.* (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area ······ LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, *et al.* (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations ······ XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, *et al.* (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing ······ LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, *et al.* (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils ······ LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model ······ XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, *et al.* (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented ······ MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, *et al.* (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China ······ LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, *et al.* (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City ······ LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, *et al.* (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials ······ TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, *et al.* (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety ······ HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, *et al.* (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic ······ WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, *et al.* (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks ······ MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, *et al.* (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of *Lactuca sativa* ······ NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, *et al.* (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum ··· LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, *et al.* (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil ······ ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, *et al.* (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities ······ LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial *Haloxylon ammodendron* Forest ······ WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, *et al.* (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity ······ ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function ······ LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, *et al.* (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper ······ CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, *et al.* (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water ······ LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, *et al.* (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County ······ WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, *et al.* (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks ······ HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, *et al.* (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas ······ LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, *et al.* (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw ······ LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, *et al.* (594)
Comparison of Pb^{2+} Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO_2 Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid ······ JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, *et al.* (606)