

# 目次

|                                                        |                                                           |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 基于时间序列分解的京津冀区域PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 空间分布特征 | 姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)                               |
| 基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析                                     | 周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)                                    |
| 基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测                                    | 杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)                              |
| 海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估                                  | 符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)                                  |
| 京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估                      | 高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)                           |
| 2022年北京市城区PM <sub>2.5</sub> 水溶性离子含量及其变化特征              | 陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)                     |
| 郑州市冬春季PM <sub>2.5</sub> 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估            | 陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)                                  |
| 淄博市供暖前后PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险        | 孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)                    |
| 西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析                           | 李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)                 |
| 天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析                            | 卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)                |
| 基于空间尺度效应的山东省PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化及空间分异地理探测          | 徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)                              |
| 我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势                              | 武婷, 崔焱文, 肖成德, 翟增秀, 韩萌 (2613)                              |
| 廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析                          | 张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)                |
| 景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析                               | 王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江 (2631)                         |
| 白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源                            | 孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)          |
| 北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析                           | 胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)                             |
| 庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价                         | 刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)                      |
| 农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价                                | 王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)                         |
| 黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征                               | 韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)                                   |
| 基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析                               | 金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)                         |
| 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征                                  | 贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)                   |
| 水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响                      | 梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)                                     |
| 银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系                            | 蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)                                 |
| 热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析                              | 张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)                     |
| 市政污水中吗啡来源辨析                                            | 邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)                    |
| 滦河流域生态环境动态遥感评价                                         | 李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)                                  |
| 黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素                                  | 王奕洪, 孙学堂 (2767)                                           |
| 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例                 | 蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)                                   |
| 贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因                               | 李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)                              |
| 2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子                        | 周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)                                   |
| 基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量                           | 崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)                                   |
| 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响                         | 武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)                        |
| 西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响                             | 江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)                              |
| 不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析                              | 黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)              |
| 基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测                         | 胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)                             |
| 不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响                                   | 孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)                |
| 集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性                                    | 周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)                           |
| 控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响                            | 高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)          |
| 生物炭对黄绵土中NO <sub>3</sub> -N运移过程影响及模拟                    | 白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)                         |
| 中国农田土壤重金属污染分析与评价                                       | 杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)                          |
| 城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望                                  | 王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)                  |
| 场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展                                 | 陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)                             |
| 黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析                             | 戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)                |
| 拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价                                | 韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)                              |
| 银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析                           | 于路加, 马海军, 王翠平 (2971)                                      |
| 基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估                         | 陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983) |
| 西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型                       | 唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)                     |
| 贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划                                | 韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)                          |
| 柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应                                | 刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)                    |
| 改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响                               | 肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)                        |
| 生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响                           | 郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)                  |
| 基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应                            | 姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)                              |
| 微塑料对土壤N <sub>2</sub> O排放及氮素转化的影响研究进展                   | 刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)                         |
| 土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响                                | 戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)               |
| 养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征                                    | 宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)                   |
| 聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响                                   | 李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)                        |
| 鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测                           | 俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)                  |
| 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径                                    | 徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)                   |
| 电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析                                | 徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)                                  |

# 粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径

徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡\*

(福建农林大学交通与土木工程学院, 福州 350108)

**摘要:** 随着社会和经济的高速发展, 能源消耗量快速增加, 随之而来的污染问题也日益加剧. 目前的研究主要集中于单一城市或长三角、珠三角和京津冀等中国三大经济圈的道路交通安全节能减排, 缺乏对东南沿海经济圈的相关研究. 粤闽浙三省位于我国东南沿海经济发展的核心地带, 在其经济发展的同时不可避免地带来了能耗及排放问题. 基于长期能源替代规划系统模型, 构建了2015~2035年粤闽浙沿海重点城市道路交通基准情景(BAU)以及现有政策情景(EPS)和改进政策情景(MPS), 其中, EPS和MPS均设置了车辆结构优化情景(VSO)、提高燃油经济性情景(IFE)和年均行驶里程减少情景(RDM). 基于情景模拟, 评估在各项政策和措施的作用下, 粤闽浙沿海重点城市的道路交通安全节能减排潜力. 结果表明, 在一级情景中, 改进政策情景对于节约能耗、碳减排以及污染物减排效果最好, 相比于基准情景2035年其节能力度达75%, 且对CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>的排放削减力度分别达68%、59%、66%、70%和64%; 在二级情景中, 提升燃油经济性的改进情景对于节约能耗(削减30%)效果显著; 车辆结构调整的改进情景(削减36%、30%、36%、26%和40%)和年均行驶里程减少的改进情景(削减37%、37%、36%、37%和36%)对于CO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>减排效果显著.

**关键词:** 粤闽浙沿海重点城市; 长期能源替代规划系统模型(LEAP); 道路交通; 节能减排; 减排路径

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3107-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305249

## Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang

XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, HU Xi-sheng, WANG Zhan-yong, ZHANG Yuan-yuan, ZHANG Lan-yi\*

(College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The rapid development of society and economy has resulted in a substantial increase in energy consumption, consequently exacerbating pollution issues. Current research predominantly focuses on energy-saving and emission reduction in road transportation within individual cities or the three major economic regions of China: the Yangtze River Delta, the Pearl River Delta, and the Beijing-Tianjin-Hebei Region. However, there is a dearth of studies addressing the southeastern coastal economic region. Located at the heart of China's southeastern coastal economic development, the provinces of Guangdong, Fujian, and Zhejiang unavoidably face challenges associated with energy consumption and emissions while pursuing economic growth. To address these challenges, this study employed a LEAP model to construct various scenarios for road transportation in the key coastal cities of Guangdong, Fujian, and Zhejiang from 2015 to 2035. These scenarios included a baseline scenario (BAU), an existing policy scenario (EPS), and an improved policy scenario (MPS). The MPS and EPS encompassed vehicle structure optimization (VSO), improved fuel economy (IFE), and reduced annual average mileage (RDM). By simulating and evaluating these scenarios, the energy-saving and emission reduction potentials of road transportation in the key coastal cities were assessed. The results indicated that, in the primary scenario, the MPS exhibited the most significant improvements in energy-saving, carbon reduction, and pollutant reduction effects. By 2035, the MPS achieved a remarkable 75% energy-saving rate compared to that in the baseline scenario, accompanied by reductions of 68%, 59%, 66%, 70%, and 64% in CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and SO<sub>2</sub> emissions, respectively. In the secondary scenario, the improved scenario of enhancing fuel economy achieved a notable 30% reduction in energy consumption. Additionally, the scenarios involving vehicle structure adjustment (yielding reductions of 36%, 30%, 36%, 26%, and 40%) and annual average mileage reduction (resulting in reductions of 37%, 37%, 36%, 37%, and 36%) demonstrated significant reductions in CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and SO<sub>2</sub> emissions.

**Key words:** key coastal cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang; long-range energy alternatives planning system model(LEAP); road traffic; energy conservation and emission reduction; emission reduction path

交通运输部门是主要的能源消耗以及碳排放和污染物排放领域, 国际能源署指出2020年我国交通运输行业碳排放量达到896 Mt, 比2010年增长了约57.5%, 增速远超其他国家<sup>[1]</sup>. 因此, 我国宣布将提高国家自主贡献力度, 并明确提出争取实现2030年前“碳达峰”, 2060年前“碳中和”的目标<sup>[2]</sup>. 除了碳排放外, 道路交通排放的污染物也不容忽视. 常见的交通尾气污染物主要包含SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>x</sub>和PM<sub>2.5</sub>, 其中SO<sub>2</sub>是化石燃料燃烧后的主要排放物之一, 其通过刺激人体呼吸道的神经末梢, 对人体健康产生严重危害<sup>[3]</sup>, 同时也是形成雾-霾和酸雨的重

要前体物之一<sup>[4]</sup>. 研究交通产生的CO<sub>2</sub>和污染物(CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>)减排问题刻不容缓<sup>[5-8]</sup>.

对于核心城市及城市群道路交通领域能源消

收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-07-21

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2023J01475); 福建省社科规划项目(FJ2022B065); 福建农林大学“杰出青年科研人才”计划项目(社会科学类)(xjq2020S4); 福建省科技创新战略研究联合项目(2022R0137); 福建农林大学科技创新专项基金项目(KFb22101XA); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202310389011); 福建农林大学大学生创新创业训练计划项目(X202310389061, X202310389163)

作者简介: 徐艺诺(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为交通环境影响评价, E-mail: xynfafa@163.com

\* 通信作者, E-mail: lyzhang@fafu.edu.cn

耗、碳排放及污染物排放问题的研究,国内外学者给予了高度关注,围绕其节能减排开展的情景模拟研究也在不断推进,具体表现为:①对于核心城市道路交通减排的相关研究,目前的研究主要集中在北京和天津等地开展<sup>[9,10]</sup>.陈素平等<sup>[10]</sup>基于行驶里程法建立政策减排模型,对天津市减排政策的制定提出建议;李云燕等<sup>[11]</sup>建立CO<sub>2</sub>和污染物排放预测模型,对北京市道路移动源的协同减排效应展开评估.②对于城市群道路交通减排的相关研究,近年来大多数学者将研究区域定位于中国三大经济圈,即京津冀城市群、长三角城市群以及珠三角城市群<sup>[12~15]</sup>.Ma等<sup>[16]</sup>以京津冀城区2005~2014年高速公路客运碳排放历史时空为模型,对3种不同管理情景下的未来碳排放进行了预测;Yang等<sup>[17]</sup>基于多源数据结构,研究长三角城市群交通碳反弹效应的主导因素;Wang等<sup>[13]</sup>利用空间联立方程模型,探明珠三角地区能源强度和碳强度之间的相互作用.③对于道路交通节能减排的相关研究,国内外学者分别从减少能耗量、削减碳排放和降低污染物排放入手<sup>[2,8,18]</sup>.李丹阳等<sup>[19]</sup>构建能源系统模型GTIMES 2.0,对交通领域能源转型路径进行模拟;Zhu等<sup>[20]</sup>采用偏最小二乘回归模型,研究了影响道路货运部门二氧化碳排放的重要因素;庞可等<sup>[21]</sup>构建兰州市道路交通减排政策情景,研究了CO<sub>2</sub>和污染物减排的关键路径.④对于道路交通减排情景模拟的相关研究,现阶段的研究主要通过神经网络模型和长期能源替代规划系统模型(long-range energy alternatives planning system model, LEAP)等进行预测<sup>[18,22]</sup>.Olayode等<sup>[23]</sup>建立南非地区道路交通系统的神经网络模型,对信号交叉口车辆交通流进行预测研究;Deng等<sup>[24]</sup>利用LEAP模型,建立3种情景对“十四五”期间中国交通运输部门进行节能分析.

综上,已有研究可在如下方面进一步深入研究.首先,现有研究在对核心城市的分析中,侧重于内陆地区,较少围绕南部沿海城市展开;其次,已有对城市群的研究中,研究区域大多为中国三大经济圈,即京津冀城市群、长三角城市群和珠三角城市群,缺乏对我国东南沿海经济圈的的研究;再次,从城市角度出发,定量研究交通领域节能减排效应时,多数研究仅考虑能耗或排放,忽视能耗与排放的潜在联系,因而同时对节能减排开展的研究较少;最后,现有文献的情景模拟中,政策情景大多为几个情景的单一模拟,较少研究考虑多情景的集成及其强化.

因此,本研究将进行如下研究:①对东南沿海地区的道路交通减排开展研究;②将“十四五”规

划中提及的粤闽浙沿海城市群中经济较发达且发展前景较好的若干核心城市作为整体,研究该整体区域的交通减排情况;③考虑到道路交通能源消耗量与CO<sub>2</sub>及污染物排放有直接关联,因此同步研究区域道路交通能耗量、碳排放及污染物排放水平;④利用LEAP模型,根据政策设置情景,对情景集成并设置相应强化情景,探究不同路径下节能减排的措施力度.

粤闽浙沿海重点城市,包含福州、泉州、厦门、温州和汕头这5个城市.其中,福州是福建省的省会,厦门是我国改革开放后的四大经济特区之一,泉州是福建省的经济中心之一,温州是浙江省南部的经济文化中心和交通枢纽,汕头则是广东省的省域副中心城市.上述五市的国土总面积约占粤闽浙沿海城市群总面积的45%;GDP占粤闽浙沿海城市群GDP总量的72%;常住人口数占粤闽浙沿海城市群常住人口总量的61%;机动车保有量占粤闽浙沿海城市群机动车保有量总量的77%;此外,自2020年以来,福州、泉州、厦门、温州和汕头GDP持续上升,且增速远超全国同期水平;在经济快速发展的同时,5个城市的常住人口数和机动车保有量同样处于快速上升趋势.综上,福州、泉州、厦门、温州和汕头这5个城市在粤闽浙沿海城市群的社会、经济和环境贡献中占较大优势,且在未来的发展中具有较大潜力.因此,本文将以福州、泉州、厦门、温州和汕头这5个重点城市作为研究对象,设置5个重点城市在2025~2035年的道路交通领域能耗、碳排放和污染物排放的基本情景和优化情景,基于LEAP模型探讨粤闽浙沿海重点城市的减污降碳能力,以期为粤闽浙地区在交通减排领域提供理论支持和指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

粤闽浙沿海重点城市位于我国南部沿海经济发展的核心地带,其南北对接长三角和珠三角,西临长江中游等内陆城市,东与中国台湾省隔海相望,属亚热带海洋性季风气候区.粤闽浙沿海地区重点城市包括福州、泉州、厦门、温州和汕头这5个城市,其面积约占粤闽浙沿海城市群总面积的45%.福州、泉州、厦门、温州和汕头地区生产总值增幅在2011~2021年间分别达到196%、79%、168%、158%和130%.上述重点城市经济发展之迅速,地理位置之优越,使其逐渐成为推动粤闽浙沿海地区发展的核心载体以及粤闽浙三省经济发展的重要增长级.2021年国务院明确指出要发展粤闽浙沿海城市.但

是,在快速发展的进程中,城市能耗量日益上升,温室气体和污染物排放问题日益凸显.因此,需要探究其重点城市道路交通领域存在的能耗及排放问题,关注和把握该区域节能减排的关键路径,以期为推动多城市及区域层面的能耗节约、碳减排及污染物减排贡献力量.

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 LEAP模型

LEAP模型是一种“自下而上”的集成结构模型,涵盖了能源转换部门和能源终端使用部门的能源消费活动<sup>[25]</sup>,在研究能源消耗、气候变化以及预测空气污染的同时,还能够用于研究国家或区域的能源规划政策,通过建模的方式判断不同政策的实施可能带来的影响<sup>[26,27]</sup>.

由于LEAP模型能够通过建模来模拟各情景中

终端部门的活动水平、能源消耗以及温室气体的排放量等<sup>[28]</sup>,因此目前已有不少学者利用该模型进行了情景模拟的相关研究<sup>[26,27,29]</sup>.本研究基于LEAP模型内部算法,将道路交通机动车按照运载对象、规格和燃料等不同分为13类(见表1).其中,第1~12类车型的数据来源于2015~2021年的《福州统计年鉴》《泉州统计年鉴》《厦门统计年鉴》《温州统计年鉴》《汕头统计年鉴》;第13类新能源汽车在相关统计年鉴中未单列,根据本团队前期研究<sup>[30]</sup>以及《新能源汽车产业发展规划》中指出的“我国坚持纯电驱动战略取向;纯电动汽车成为新销售车辆的主流”,考虑用纯电动汽车相关数据代替新能源汽车数据.基于保有量、百公里能耗和年均行驶里程等参数,获取道路交通能源消耗量、CO<sub>2</sub>排放量、CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>及SO<sub>2</sub>大气污染物的排放量.

表1 车型全称及缩写

Table 1 Full name and abbreviation of different vehicles

| 类型 | 中文全称       | 英文全称                                      | 英文缩写  |
|----|------------|-------------------------------------------|-------|
| 1  | 大型载客汽车(柴油) | large-duty diesel passenger vehicle       | LDPV  |
| 2  | 中型载客汽车(汽油) | medium-duty gasoline passenger vehicle    | MGPV  |
| 3  | 中型载客汽车(柴油) | medium-duty diesel passenger vehicle      | MDPV  |
| 4  | 小型载客汽车(汽油) | small-duty gasoline passenger vehicle     | SGPV  |
| 5  | 小型载客汽车(柴油) | small-duty diesel passenger vehicle       | SDPV  |
| 6  | 微型载客汽车(汽油) | miniature-duty gasoline passenger vehicle | MIGPV |
| 7  | 重型载货汽车(柴油) | heavy-duty diesel freight vehicle         | HDFV  |
| 8  | 中型载货汽车(汽油) | medium-duty gasoline freight vehicle      | MGFV  |
| 9  | 中型载货汽车(柴油) | medium-duty diesel freight vehicle        | MDFV  |
| 10 | 轻型载货汽车(汽油) | light-duty gasoline freight vehicle       | LGFV  |
| 11 | 轻型载货汽车(柴油) | light-duty diesel freight vehicle         | LDFV  |
| 12 | 微型载货汽车(汽油) | miniature-duty gasoline freight vehicle   | MIGFV |
| 13 | 新能源汽车(纯电动) | new energy electric vehicle               | NEEV  |

具体方法如下.

(1) 能源消耗测算模型 道路机动车的能源消耗量的计算参数为不同车型机动车保有量、不同车型年均行驶里程以及各类车型的百公里能耗,能源消耗测算模型见式(1):

$$EC_{ij} = P_{ij} \times VKT_i \times FC_{ij} \quad (1)$$

式中,  $EC_{ij}$  为  $i$  类机动车  $j$  类燃料的能源消耗量(以标煤计), 百万 t;  $P_{ij}$  为  $i$  类机动车  $j$  类燃料的保有量, 辆;  $VKT_i$  为  $i$  类机动车的年均行驶里程, km;  $FC_{ij}$  为  $i$  类机动车  $j$  类燃料的百公里能耗, MJ·(100 km)<sup>-1</sup>.

(2) CO<sub>2</sub>排放测算模型 道路机动车 CO<sub>2</sub>排放量的计算参数为能源消耗量和 CO<sub>2</sub>排放因子, 其中 CO<sub>2</sub>排放因子通过已有研究获取<sup>[31]</sup>, CO<sub>2</sub>排放测算模型见式(2):

$$CE = EC_{ij} \times EF_j \quad (2)$$

式中, CE 为道路机动车 CO<sub>2</sub>排放量, 万 t;  $EC_{ij}$  为  $i$

类机动车  $j$  类燃料的能源消耗量(以标煤计), 百万 t;  $EF_j$  为  $j$  类燃料的 CO<sub>2</sub>排放因子, kg·km<sup>-1</sup>.

(3) 污染物排放测算模型 道路机动车污染物排放量的计算参数为不同车型机动车保有量、不同车型年均行驶里程以及不同车型不同燃料类型的污染物排放因子.本研究主要研究4种污染物的排放水平: CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>以及SO<sub>2</sub>, 污染物排放测算模型见式(3):

$$EE_k = P_{ij} \times VKT_i \times F_{ijk} \quad (3)$$

式中,  $EE_k$  为第  $k$  种污染物的排放量, kt;  $P_{ij}$  为  $j$  类燃料的  $i$  类机动车保有量, 辆;  $VKT_i$  为  $i$  类机动车的年均行驶里程, km;  $F_{ijk}$  为  $i$  类机动车  $j$  类燃料  $k$  类污染物的排放因子, g·km<sup>-1</sup>.

### 1.2.2 基于PCA-Logistic的保有量预测模型

由于预测年份的机动车保有量尚未进行统计, 而LEAP模型在评估模拟过程中需要输入预测年份

的机动车保有量.因此,参考文献[32]的机动车保有量预测方法,即将主成分分析法和 Logistic 预测方法相结合预测机动车保有量.同时,考虑到新能源汽车近年来发展趋势,参考《新能源汽车产业发展规划》中的新能源汽车比例数据,将其数量考虑到机动车保有量的预测中.具体方法如下.

(1)主成分分析法 主成分分析法(principal component analysis, PCA)是一种线性降维的方法,其原理是将原始数据进行降维处理,以消除数量级或量纲的影响.

PCA 主成分分析法的具体步骤如下.

①处理原始数据 对原始数据进行标准化处理,以消除各个因素在量纲或者数量级上的影响,如式(4):

$$y = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中,  $x$  为指标变量;  $x_{\max}$  为指标变量最大值;  $x_{\min}$  为指标变量最小值.

②计算协方差矩阵 根据①中得到的标准化矩阵计算协方差矩阵,如式(5):

$$c = \frac{1}{n-1} \mathbf{x} \mathbf{x}^T \quad (5)$$

式中,  $n$  为主成分个数;  $\mathbf{x}$  为指标变量矩阵;  $\mathbf{x}^T$  为指标变量矩阵的转置矩阵.

③根据求得的协方差矩阵,计算矩阵的特征值和对应的特征向量

④确定主成分 根据主成分贡献率及累积贡献率确定主成分,一般选取累积贡献率在 85% 以上的作为主成分<sup>[32]</sup>.

(2)Logistic 模型 Logistic 模型是描述因变量随时间变动趋势的模型,能较好地描述某些呈现 S 型曲线增长的现象<sup>[32]</sup>. Logistic 模型微分方程如式(6)及式(7):

$$\frac{dF}{dt} = bF(1-F) \quad (6)$$

$$F(t) = \frac{y(t)}{m} \quad (7)$$

式中,  $b$  为常数;  $F$  为  $t$  时刻市场机动车保有量  $y(t)$  与市场最大保有量  $m$  的比值.

分离变量法求解得式(8):

$$F(t) = \frac{1}{1 + ae^{-bt}} \quad (8)$$

式中,  $a$  为常数.

最终得  $t$  时刻的机动车保有量如式(9):

$$y(t) = m \times F(t) \quad (9)$$

式中,  $y(t)$  为  $t$  时刻市场机动车保有量;  $m$  为市场最大保有量.

以第一主成分值为自变量,机动车保有量为因变量,利用 SPSS 的回归-模型估计模块实现 Logistic 回归分析. Logistic 函数表达式如式(10):

$$y = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \beta_0 \beta_1^x} \quad (10)$$

式中,  $\mu$  为保有量最大值;  $\beta_0$  和  $\beta_1$  为常数;  $x$  为第一主成分值.

### 1.3 数据来源

①燃油经济性数据:不同车型的机动车燃油经济性来源于文献[21];②机动车活动水平数据:机动车年均行驶里程来源于文献[33];不同车辆类型见 1.2.1 节中的数据来源;纯电动乘用车能源消耗率水平数据来源于《电动汽车能源消耗率限值标准研究报告》以及《新能源汽车产业发展规划(2021~2035 年)》;③排放因子数据:机动车 CO<sub>2</sub> 排放因子来源于文献[31,33],并经过团队前期的相关研究对其温度、湿度和海拔等参数进行本地化修正<sup>[34,35]</sup>.本研究的排放仅考虑机动车燃料燃烧产生的直接排放,由轮胎摩擦或发动机蒸发产生的排放不予考虑.

### 1.4 情景设置

“十三五”规划以来,中央和地方均制定了不少节能减排相关政策,其中交通部门的减排措施主要集中在对车辆进行结构优化、大力发展新能源汽车、加强清洁能源的利用、提升燃油经济性、鼓励绿色出行方式等方面.基于《中华人民共和国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》,将情景模拟基准年设置为 2015 年,预测终年设置为 2035 年.从机动车保有量、年均行驶里程、燃油经济性、CO<sub>2</sub> 和污染物的排放因子等主要因素出发,构建情景来评估粤闽浙沿海重点城市道路机动车的能源消耗及 CO<sub>2</sub> 和 4 种污染物(CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 SO<sub>2</sub>)的排放量,具体情景介绍如下.

(1)基准情景 基准情景(business as usual, BAU)是指假设粤闽浙沿海重点城市按照 2015 年的政策继续发展,不考虑 2015 年之后出台的各种新政策措施.该情景也就是无政策情景,是作为一种参考情景与另外两种情景进行对比.在基准情景下,机动车保有量按照预测值正常增长,但不同类型的机动车比例不发生变化,机动车的车队结构、燃油经济性和各类机动车的年均行驶里程均未得到改进.

(2)现有政策情景 现有政策情景(existing policy scenario, EPS)是指以“十四五”规划和 2022 年新出台的政策文件为主,包括 2015 年以后出台的各项交通政策,综合考虑这些措施对研究区客货运交通可能产生的影响,包括《福建省人民政府关

于印发福建省“十四五”节能减排综合工作实施方案的通知》<sup>[36]</sup>、《泉州市人民政府关于印发泉州市“十四五”节能减排综合工作实施方案的通知》<sup>[37]</sup>、《厦门市“十四五”综合交通运输发展规划的通知》<sup>[38]</sup>、《温州市交通运输局等九部门关于印发温州市清洁能源出租汽车推广实施方案的函》<sup>[39]</sup>、《汕头市生态文明建设“十四五”规划》<sup>[40]</sup>、《电动汽车能量消耗率限值》<sup>[41]</sup>、《新能源汽车产业发展规划(2021~2035年)》<sup>[42]</sup>和《中华人民共和国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》<sup>[43]</sup>等.依据以上政策,将现有政策情景进一步

细化为车辆结构优化(vehicle structure optimization, VSO)、提高燃油经济性(improve fuel economy, IFE)和年均行驶里程减少(reduce driving miles, RDM)等3个二级情景.

(3)改进政策情景 改进政策情景(modified policy scenario, MPS)是对未来政策情况的假设情景,即对现有政策情景进行适当改进.如在EPS-RDM情景中,车辆年均行驶里程每年减少1%,在MPS-RDM 2.0情景中措施改进后假设车辆年均行驶里程每年减少3%,其他措施改进方式类似.

不同情景的情景描述及支撑政策见表2.

表2 不同情景设置  
Table 2 Settings of different scenarios

| 一级情景                | 二级情景        | 情景描述                                                                                                                                           | 政策支撑                 |
|---------------------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| BAU                 | 未采取任何节能减排措施 | 到2035年为止,粤闽浙沿海重点城市所有发展均参照2015年的政策,无改进                                                                                                          | 参照2015年的相关政策         |
|                     | VSO         | ①基本淘汰国三以下排放标准汽车,鼓励重型柴油车更新替代;②到2025年,全方式绿色出行率不少于70%;③2025年公共交通占机动化出行比例达到35%;文献[36~40]<br>④2020年以后清洁能源出租汽车占比达到100%                               |                      |
| EPS                 | IFE         | 2025、2030和2035年乘用车的平均油耗分别降至4.0、3.2和2 L·(100 km) <sup>-1</sup> ;2025年纯电动乘用车平均电耗降至12 kW·h·(100 km) <sup>-1</sup> ,2026~2035年降幅同2020~2025年        | 文献[41~43]            |
|                     | RDM         | 2020年后车辆年均行驶里程每年减少1%                                                                                                                           | 文献[21,44]            |
|                     | VSO 2.0     | ①全面淘汰国三以下排放标准汽车,实现重型柴油车全面更新替代;②到2035年,全方式绿色出行率不少于90%;③公共交通占机动化出行比例到2035年达到50%;④2020~2035年清洁能源出租汽车占比达到100%                                      | 在EPS情景设置的基础上强化相应政策力度 |
| MPS <sup>[30]</sup> | IFE 2.0     | 2025、2030和2035年乘用车的平均油耗分别降至3.5、2.5和1.5 L·(100 km) <sup>-1</sup> ;2025年纯电动乘用车平均电耗降至12 kW·h·(100 km) <sup>-1</sup> ,2026~2035年降幅为2020~2025年的1.2倍 | 在EPS情景设置的基础上强化相应政策力度 |
|                     | RDM 2.0     | 2020年后车辆年均行驶里程每年减少3%                                                                                                                           | 在EPS情景设置的基础上强化相应政策力度 |

2 结果与分析

2.1 机动车能源消耗量趋势分析

根据1.4节中所述情景,由式(1)得到重点城市机动车总能源消耗变化趋势,如图1所示.其中,预测年份(2022~2035年)的机动车保有量数据根据式(9)、式(10)及新能源车辆比例获得,且模型的拟合优度均在90%以上,由此可知本研究中的机动车保有量预测值可进行应用.

在BAU情景下,2015~2020年,由于燃油车保有量的快速增长,且新能源车辆尚未得到广泛普及,道路交通能源消耗量由2015年的11.1×10<sup>6</sup> t(以标煤计,下同)增长到了2020年的15.9×10<sup>6</sup> t,约为2015年的1.4倍.2020年后,随着国家对清洁能源的重视以及新能源车辆的逐渐推广,交通领域能源消耗量增幅逐渐减缓.到2035年,总能耗量达到14.7×10<sup>6</sup> t,虽然仍高于2015年,但是整体处于下降趋势.在EPS情景下,机动车能耗于2020年达到峰值

(15.9×10<sup>6</sup> t)后持续下降,于2035年降至7.3×10<sup>6</sup> t.可见,EPS情景起到了一定的节能效果.其中,该政策情景下的3个具体情景EPS-VSO、EPS-IFE和EPS-RDM相对于BAU情景的节能量分别为15%、30%和14%.由此可见,EPS-IFE情景(提升燃油经济性)对机动车的能源消耗起到了较好节能作用.

虽然EPS情景下的机动车能源消耗量在未来得到了一定控制,但其节能效果仍不足.因此,通过对EPS情景中的各项措施进一步加强实施力度,形成了MPS情景.在MPS情景下,机动车的能源消耗量在2035年达到3.7×10<sup>6</sup> t,相比于BAU情景和EPS情景分别节能约75%和50%,达到了良好的节能效果,且能源消耗量在未来呈现了大幅下降趋势.这是由于在MPS情景下,要求提升车辆结构优化的力度,同时加速燃油经济性的提升和年均行驶里程的减少,减少了高能耗车型的占比,减少了机动车的活动水平,从而降低了其能源消耗量.

所有情景中,MPS情景具有最显著的节能潜

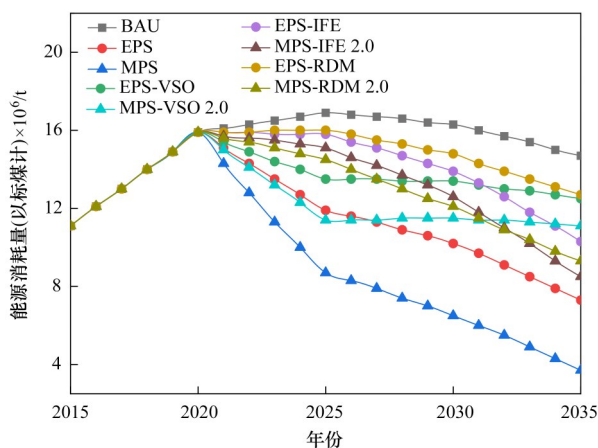


图1 不同情景机动车能源消耗

Fig. 1 Energy consumption of vehicles in different scenarios

力, MPS情景下不同车型能耗分析如图2. 从中可知, SGPV车型的能源消耗量最显著, 这是由于该车型在所有车型中所占比例最大, 约为80%, 其次分别是HDFV和LGFV车型. 其中HDFV车型保有量所占比例较小(约为3%), 但由于其年均行驶里程远超其他车型(75 000 km), 因此其能耗量较大; 而LGFV车型在其保有量与年均行驶里程上均有一定贡献(保有量7%, 年均行驶里程30 000 km), 因此其能源消耗量同样较显著.

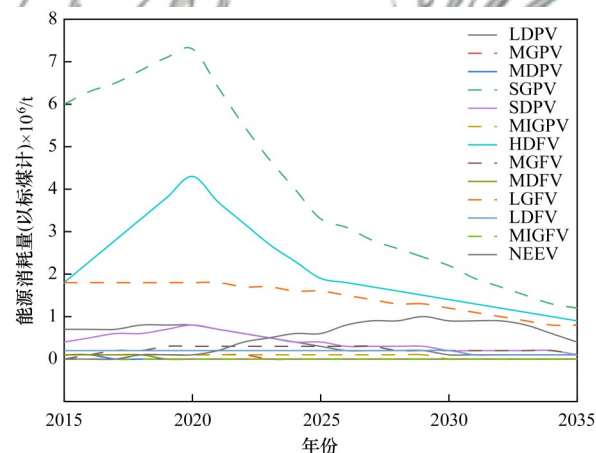


图2 MPS情景不同车型能源消耗

Fig. 2 Energy consumptions of different vehicle types in MPS scenario

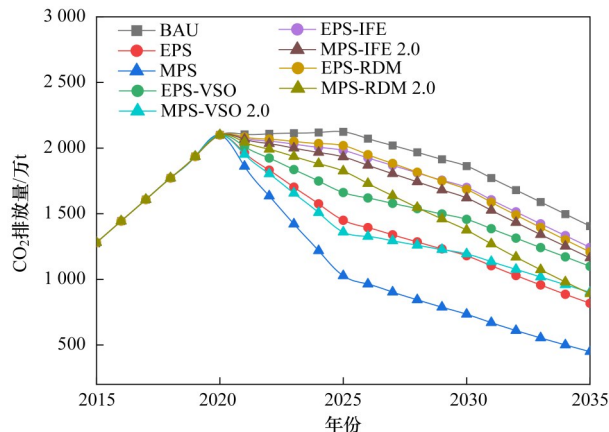
尽管在改进后的政策情景下, 2035年粤闽浙沿海重点城市机动车能耗总量(以标煤计, 下同)降至约 $3.7 \times 10^6$  t, 且绝大部分车型的能耗量降至接近于0的水平, 但是仍存在能耗较高或能耗下降趋势不显著的车型(SGPV和LGFV), 且新能源车辆(NEEV)在2020年后能耗量逐渐上升.

## 2.2 CO<sub>2</sub>及污染物排放量趋势分析

### 2.2.1 CO<sub>2</sub>排放量

根据1.4节中所述情景, 得到不同情景下的粤闽浙沿海重点城市机动车CO<sub>2</sub>排放量. 精度检验参考

文献[21], 引用CHRED 3.0数据库对实际机动车CO<sub>2</sub>排放量进行检验, 模型的平均精度达到89%, 能够较好地模拟重点城市未来的机动车CO<sub>2</sub>排放趋势. 由式(2)得到2015~2035年机动车CO<sub>2</sub>排放量, 如图3所示.

图3 不同情景机动车CO<sub>2</sub>排放Fig. 3 CO<sub>2</sub> emissions of vehicles in different scenarios

CHRED 3.0数据库2015年重点城市道路交通部分CO<sub>2</sub>排放量为1 050万t, 本研究基准年CO<sub>2</sub>排放总量为1 280万t, 两者相比差别不大. 由图3可知, 在所有情景下, 自2015~2020年, 研究区机动车CO<sub>2</sub>排放量呈现迅速上升趋势, 从1 280~2 100万t, 上升了64%; 自2021~2035年, BAU情景下的碳排放量呈现先平稳后下降的趋势, 并于2025年达到峰值(2 124万t). 其他情景下的碳排放量均得到了不同程度的削减, 但削减程度最大的为EPS情景和MPS情景, 该情景下机动车CO<sub>2</sub>排放量分别于2035年降至818万t和449万t, 相比于BAU情景分别削减了约42%和68%. 不同情景下的CO<sub>2</sub>排放量削减率(相比于BAU)见表3.

由表3可知, 在二级情景下, MPS-RDM 2.0情景和MPS-VSO 2.0情景表现出最大的CO<sub>2</sub>削减力度, 其CO<sub>2</sub>排放量分别于2035年降至890万t和901万t, 削减率达到37%和36%. 一级情景及其二级情景下的减排潜力, MPS情景均比EPS情景大. 值得注意的是, MPS-RDM 2.0情景2035年所带来的减排效果远超MPS-IFE 2.0情景, 这是因为MPS-RDM 2.0情景持续降低车辆的年均行驶里程, 而MPS-IFE 2.0情景中, 燃油经济性的提升仅针对乘用车, 对于提升货车的百公里能耗考虑欠缺. 货车的百公里能耗基数大, 保有量同样较大, 因此MPS-IFE 2.0情景的CO<sub>2</sub>削减效果不如MPS-RDM 2.0情景. 将提升燃油经济性和车辆结构优化以及年均行驶里程减少等措施共同实施时, 减排效果会更显著, 这种二级情景间的相互作用带来的隐藏减排潜力也是表3中一级情景

削减率大于二级情景削减率的原因.综合来看,所有情景下,MPS情景的减排潜力最优,图4为MPS情景下汽油车和柴油车CO<sub>2</sub>排放量.

表3 不同情景CO<sub>2</sub>排放量的削减率/%

| 不同情景        | 2025年 | 2030年 | 2035年 |
|-------------|-------|-------|-------|
| EPS         | -31.7 | -36.7 | -41.8 |
| EPS-VSO     | -21.8 | -21.8 | -21.9 |
| EPS-IFE     | -6.8  | -8.7  | -11.5 |
| EPS-RDM     | -4.9  | -9.6  | -14.0 |
| MPS         | -54.2 | -60.6 | -68.1 |
| MPS-VSO 2.0 | -40.0 | -35.9 | -36.1 |
| MPS-IFE 2.0 | -9.0  | -18.1 | -17.3 |
| MPS-RDM 2.0 | -14.1 | -26.2 | -36.7 |

由图4可知,LGFV、SGPV、HDFV和LDPV这4类车型的CO<sub>2</sub>排放贡献最大.结合图2可知LGFV和SGPV全年能源消耗量最大,因此造成了较高的CO<sub>2</sub>

排放;而HDFV和LDPV由于CO<sub>2</sub>排放因子较大<sup>[45]</sup>,因此也贡献了较多的碳排放量.

在汽油车的排放中,SGPV车型的CO<sub>2</sub>排放贡献最显著.虽然其排放到2035年已有明显下降趋势,但仍达到69万t,约占汽油车和柴油车整体排放量的15%.在柴油车的排放中,HDFV车型2015~2020年的碳排放量位于所有车型之首,但由于MPS情景下的管控措施,2035年其CO<sub>2</sub>排放量降至约233万t,排放贡献率达52%.

2.2.2 污染物排放量

各情景措施不仅对于CO<sub>2</sub>有相对明显的减排效果,其对机动车排放的大气污染物也具有协同减排效应.根据1.4节中所述情景,由式(3)得到不同情景下的机动车4种污染物排放量见图5,对应的削减率(相比于BAU)见表4.

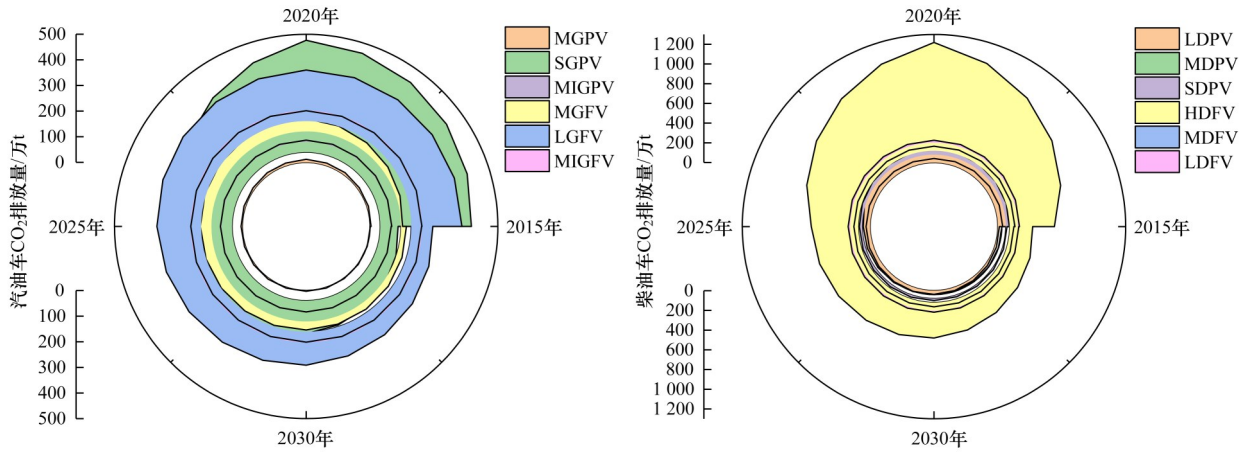


图4 MPS情景不同车型CO<sub>2</sub>排放  
Fig. 4 CO<sub>2</sub> emissions of different vehicle types in MPS scenario

在BAU情景下,粤闽浙沿海重点城市CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>基准年的排放总量分别为378、469.2、5.4和14 kt,并于2015~2020年快速上升,且均在2025年达到排放峰值;各政策情景下,污染物排放量于2020年开始出现不同程度地下降(图5).到2035年,EPS情景下CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>的排放总量分别为259.1、292.1、2.8和9.5 kt,相对于BAU情景削减率分别为31%、38%、48%和32%;MPS情景CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>的排放总量分别为155.3、157.8、1.6和5 kt,相对于BAU情景削减率分别为59%、66%、70%和64%.现有政策(EPS)情景对应的二级情景中,由于污染物排放量计算方法与燃油经济性无关,因此EPS-IFE和MPS-IFE 2.0情景排放无变化;EPS-RDM情景下各污染物的削减率相对其他情景较小,这可能是由于EPS-RDM情景的设置力度较小.值得注意的是,2035年MPS-RDM 2.0情景和MPS-VSO 2.0情景对CO、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>和SO<sub>2</sub>的削减

力度均优于综合情景EPS,这可能是由于MPS-RDM 2.0情景对于车辆年均行驶里程的减幅较大,且该政策能够持续实施;MPS-VSO 2.0情景对于车辆结构的调整力度大,尤其是对于保有量大的SGPV车型.因此MPS-RDM 2.0情景和MPS-VSO 2.0情景成为各污染物减排潜力最大的二级情景.

在改进政策(MPS)情景下,各污染物的主要贡献车型也发生了变化,MPS情景下各污染物的主要车型排放量见图6.从不同污染物来看,对于CO来说,全年排放贡献前3的车型分别为HDFV(39%)、LGFV(28%)和SGPV(15%).其中,LGFV和SGPV车型是由于其采用点燃式的发动机点火方式,使得空气进入发动机内,导致燃料燃烧不充分,因此造成了较高的CO排放.对于NO<sub>x</sub>来说,全年排放贡献率最大的车型为HDFV(2015年48%,2035年79%),这与文献[46]的结论一致;其次为LDPV(2015年38%,2035年9%).对于PM<sub>2.5</sub>来说,全年排放贡献最

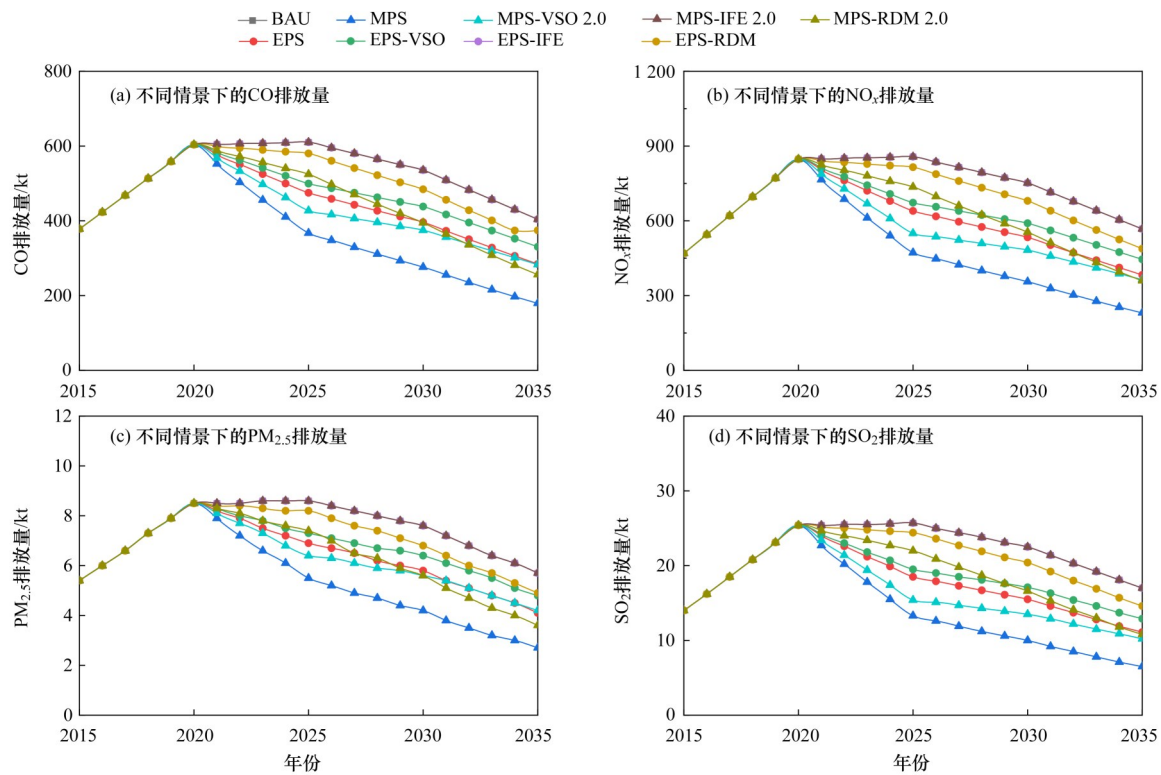


图5 不同情景机动车污染物排放  
Fig. 5 Pollutant emissions of vehicles in different scenarios

表4 不同情景污染物排放量的削减率/%  
Table 4 Reduction rate of pollutant emissions in different scenarios/%

| 污染物种类             | EPS    |        |        | MPS    |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | 2025 年 | 2030 年 | 2035 年 | 2025 年 | 2030 年 | 2035 年 |
| CO                | -26.2  | -31.0  | -35.9  | -44.3  | -53.7  | -61.6  |
| NO <sub>x</sub>   | -38.0  | -43.0  | -48.5  | -54.5  | -65.6  | -72.2  |
| PM <sub>2.5</sub> | -38.4  | -44.7  | -50.9  | -54.7  | -64.5  | -71.9  |
| SO <sub>2</sub>   | -35.0  | -39.6  | -44.1  | -56.0  | -64.0  | -70.6  |

显著的车型同样为LDPV和HDFV.但与NO<sub>x</sub>不同的是,LDPV在2015~2018年的颗粒物排放水平较HDFV更显著(2015~2018年45%).这是由于柴油车的发动机点火方式采用压燃式,且多数柴油车的车龄高于汽油车,其尾气管老化对颗粒物的排放也会造成影响<sup>[47]</sup>,因此其PM<sub>2.5</sub>的排放相对汽油车更显著.但随着2020年后老旧车辆的逐步淘汰以及新能源汽车的快速发展,LDPV的保有量下降,因此其排放大幅下降.对于SO<sub>2</sub>来说,2015~2035年排放最显著的车型为HDFV(全年均值67%),这与文献<sup>[48]</sup>的结论一致.

3 讨论

粤闽浙沿海重点城市道路交通能源消耗量在基准情景下呈现前期(2015~2020)快速上升、中期(2020~2025)保持稳定和后期(2025~2035)逐年下降的变化趋势.由贾璐宇等<sup>[2]</sup>的研究可知,加大新能源

汽车的市场份额能够有效节约能源消耗量.因此,粤闽浙沿海重点城市的道路交通的能耗量在2015~2020年表现为直线攀升且保持一定时间的高位排放,这可能是由于新能源车辆普及率较低所导致的.随着新能源技术逐步成熟,各地政府对环境治理的重视以及对新能源车辆的激励政策,如《全面推进“电动福建”建设的实施意见(2023~2025年)》、《浙江省新能源汽车产业发展“十四五”规划》等,使得交通能源消耗在2025~2035年实现下降.

粤闽浙沿海重点城市道路交通碳排放量主要由小型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油)贡献.其中,在改进后的政策情景模拟下,柴油车仍贡献了超过50%的碳排放量.造成这种情况的原因是,尽管电动汽车的发展态势良好,但小型载客汽车(汽油)仍是当前和未来10年内我国车辆的主要构成(79.8%),因此该车型对碳排放的贡献率较高

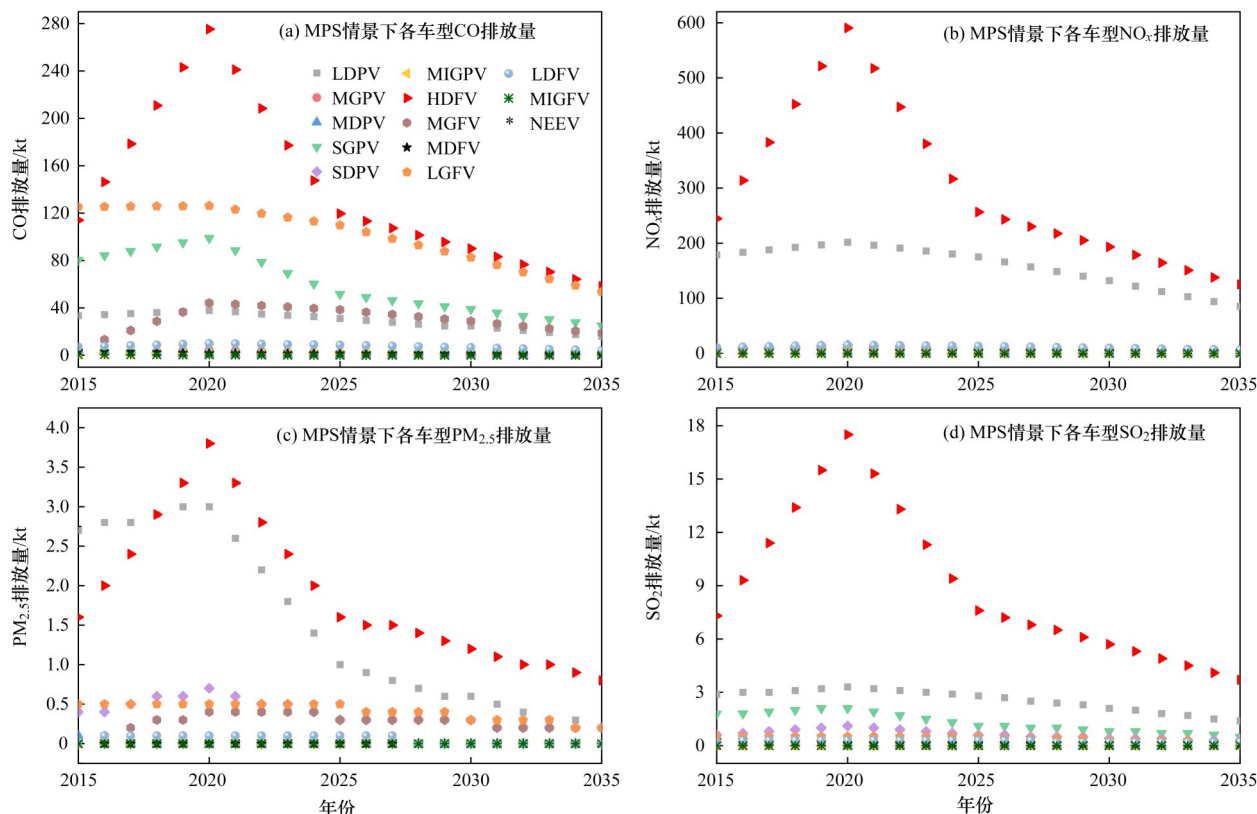


图6 MPS情景各车型污染物排放

Fig. 6 Pollutant emissions of different vehicle types in MPS scenario

(21%)。其次, 尽管重型载货汽车(柴油)的保有量占比不高(3.1%), 但其单车的总碳排放因子远高于其他车型<sup>[49]</sup>, 导致重型载货汽车(柴油)对碳排放的贡献率高达52%。此外, 近年来出台的环境治理政策, 如《福建省柴油货车污染治理攻坚战行动计划实施方案》、《杭州市国四柴油汽车淘汰补助实施细则(试行)》等, 均表明要逐步淘汰重型柴油车, 表明市场上相当大比例的柴油货车仍然是老旧车型。综上, 柴油本身的排放特性以及柴油车老化过程导致的高碳排放可能是导致柴油车碳排放贡献率显著的原因。

粤闽浙沿海重点城市道路交通机动车污染物排放的情景模拟结果显示: 研究区在2035年的 $PM_{2.5}$ 排放量比 $CO$ 、 $NO_x$ 和 $SO_2$ 等污染物的排放量低11 kt~570 kt。这主要是由于 $PM_{2.5}$ 是引发雾-霾的重要污染物, 因此粤闽浙地区对 $PM_{2.5}$ 的治理力度比其他污染物更大, 使得 $PM_{2.5}$ 的治理效果较好<sup>[50]</sup>; 此外, 粤闽浙地区位于我国东南沿海, 海洋性季风能够带走部分颗粒物<sup>[51]</sup>, 这可能是导致研究区 $PM_{2.5}$ 排放水平低于其他污染物的原因之一; 再次, 粤闽浙沿海重点城市主要位于福建省。作为全国首个生态文明试验区, 福建省的森林覆盖率连续60年位居全国第一, 植物对于颗粒物的沉降作用也可能是导致 $PM_{2.5}$ 排放

相对较低的原因<sup>[52]</sup>。

#### 4 对策

(1) 由于小型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油)消耗了超过53%的能源, 相关部门应重点关注这两种车型的能源利用效率, 改善小型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油)的燃油经济性, 严格控制其保有量; 此外, 应鼓励居民优先采用公共交通和电动交通工具, 推进车辆电动化进程; 在物流配送、环卫、工程建设、党政机关、国有企业、景区港区等公共领域进一步推广使用新能源汽车, 提高公共领域车辆电动化比例。

(2) 由于小型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油)是碳排放的主要贡献者, 因此, 在进行机动车碳排放治理时, 应重点减少这两种车型的碳排放量。可以采取以下措施来实现这一目标: 减少小型载客汽车(汽油)和重型载货汽车(柴油)的年均行驶里程、优化道路车队结构、推广低碳燃料以及扩大新能源车辆的市场份额等<sup>[53]</sup>, 以控制研究城市的交通碳排放量。

(3) 由于重型载货汽车(柴油)是 $CO$ 、 $NO_x$ 、 $PM_{2.5}$ 和 $SO_2$ 排放的主要贡献者, 其4种污染物的排放贡献率在所有车型中最高, 分别达到44%、68%、43%

和68%。因此,在进行机动车污染物排放治理时,应重点关注重型载货汽车(柴油)的污染削减工作。通过加快淘汰老旧柴油货车、提升现有柴油车的排放标准,降低柴油车老化排气管道的改造费用以及对重型载货汽车的更新和淘汰提供补贴等方式,可以全面且大量地减少重型载货汽车的污染物排放。

## 5 结论

(1)从能源消耗的角度来看,相较于BAU情景,EPS和MPS情景在2035年分别能够削减51%和75%能耗。其中,在车辆结构调整方面, EPS-VSO和MPS-VSO 2.0情景分别能够降低 $0.2 \times 10^6$  t和 $1.6 \times 10^6$  t能耗;在提升燃油经济性方面, EPS-IFE和MPS-IFE 2.0情景分别能够降低 $4.4 \times 10^6$  t和 $6.2 \times 10^6$  t的能耗;在减少年均行驶里程方面, EPS-RDM和MPS-RDM 2.0情景分别能够降低 $2 \times 10^6$  t和 $5.4 \times 10^6$  t的能耗。由此可见,提升燃油经济性对削减道路交通能耗具有最显著的潜力。

(2)从机动车产生的碳排放角度来看,相较于BAU情景, EPS和MPS情景在2035年能够分别削减42%和68%的碳排放量。其中,在调整车辆结构方面, EPS-VSO和MPS-VSO 2.0情景分别能够削减22%和36%的碳排放;在提升燃油经济性方面, EPS-IFE和MPS-IFE 2.0情景分别能够削减12%和17%碳排放;在减少车辆年均行驶里程方面, EPS-RDM和MPS-RDM 2.0情景分别能够削减14%碳排放和38%碳排放。因此,调整车辆结构和减少年均行驶里程是降低碳排放的最理想方法。

(3)从机动车产生的污染物排放角度来看,相较于BAU情景, EPS和MPS情景到2035年能够分别削减36%和62%的CO排放、49%和72%的NO<sub>x</sub>排放、51%和72%的PM<sub>2.5</sub>排放以及44%和70%的SO<sub>2</sub>排放。其中,在调整车辆结构方面, EPS-VSO和MPS-VSO 2.0情景分别能够削减18%和30%的CO排放、22%和36%的NO<sub>x</sub>排放、16%和26%的PM<sub>2.5</sub>排放以及24%和41%的SO<sub>2</sub>排放;在减少年均行驶里程方面, EPS-RDM和MPS-RDM 2.0情景分别能够削减14%和37%的CO排放、14%和36%的NO<sub>x</sub>排放、13%和37%的PM<sub>2.5</sub>排放以及14%和37%的SO<sub>2</sub>排放。综上,调整车辆结构和减少年均行驶里程的改进情景具有最显著的减少污染物排放的效果。

## 参考文献:

- [1] IEA. CO<sub>2</sub> emissions by sector, People's Republic of China 1990-2020[DB/OL]. <https://www.iea.org/countries>, 2022-12-30.
- [2] 贾璐宇,王克.碳中和背景下中国交通部门低碳发展转型路径[J].中国环境科学, 2023, 43(6): 3231-3243.  
Jia L Y, Wang K. Low-carbon transition pathways for China's
- transportation sector under the background of carbon neutrality[J]. China Environmental Science, 2023, 43(6): 3231-3243.
- [3] 董宇宁.超重力强化湿法二氧化硫捕集新工艺及其模型化研究[D].北京:北京化工大学, 2022.  
Dong Y N. Study on new wet desulfurization process intensification and its modeling research in rotating packed bed [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [4] 侯美玲,周晓艳,洪松,等.环境规制下京津冀及周边地区SO<sub>2</sub>污染治理效应与路径[J].湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(3): 92-102.  
Hou M L, Zhou X Y, Hong S, et al. Research on the SO<sub>2</sub> control effect and its paths in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas from the perspective of environmental regulation [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2023, 46(3): 92-102.
- [5] Han J K, Yang Y, Yang X Y, et al. Exploring air pollution characteristics from spatio-temporal perspective: a case study of the top 10 urban agglomerations in China [J]. Environmental Research, 2023, 224, doi: 10.1016/j.envres.2023.115512.
- [6] Qian Y, Wang H, Wu J S. Spatiotemporal association of carbon dioxide emissions in China's urban agglomerations [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 323, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116109.
- [7] 陈文婕,吴小刚,肖竹.中国四大经济区域道路交通碳排放预测与减排潜力评估——基于私家车轨迹数据的情景模拟[J].经济地理, 2022, 42(7): 44-52.  
Chen W J, Wu X G, Xiao Z. Carbon emission prediction and emission reduction potential assessment of road traffic in China's four major economic regions: scenario simulation based on private vehicle trajectory data [J]. Economic Geography, 2022, 42(7): 44-52.
- [8] Madueke M, Akpan U, Isihak S. Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: an application of the LEAP model [J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020, 6, doi: 10.1016/j.trip.2020.100172.
- [9] Chen S, Du Z X, Shi X D, et al. MOVES-Beijing-based high spatial and temporal resolution ammonia emissions from road traffic in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2021, 256, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118443.
- [10] 陈素平,赵莎莎,姜洋,等.天津市道路交通减排政策实施效果评估[J].城市交通, 2021, 19(5): 59-65.  
Chen S P, Zhao S S, Jiang Y, et al. Implementation effects of road traffic carbon reduction policies in Tianjin [J]. Urban Transport of China, 2021, 19(5): 59-65.
- [11] 李云燕,宋伊迪.碳中和目标下的北京城市道路移动源CO<sub>2</sub>和大气污染物协同减排效应研究[J].中国环境管理, 2021, 13(3): 113-120.  
Li Y Y, Song Y D. Study on the synergetic emission reduction effect of CO<sub>2</sub> and air pollutants from the mobile source of urban roads in Beijing under the target of carbon neutralization [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2021, 13(3): 113-120.
- [12] Zhang M, Liu X X, Ding Y T. Assessing the influence of urban transportation infrastructure construction on haze pollution in China: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 87, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106547.
- [13] Wang Y N, Yin S W, Fang X L, et al. Interaction of economic agglomeration, energy conservation and emission reduction: evidence from three major urban agglomerations in China [J].

- Energy, 2022, **241**, doi: 10.1016/j.energy.2021.122519.
- [14] Zhao N, Elshareef H, Li B W, *et al.* The efforts of China to combat air pollution during the period of 2015-2018: a case study assessing the environmental, health and economic benefits in the Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding “2+26” regions [J]. Science of the Total Environment, 2022, **853**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158437.
- [15] Wang F, Shan J, Liu J, *et al.* How does high-speed rail construction affect air pollutant emissions? Evidence from the Yangtze River Delta urban agglomeration in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **350**, doi: 10.1016/j.jclepro. 2022. 131471.
- [16] Ma H T, Sun W, Wang S J, *et al.* Structural contribution and scenario simulation of highway passenger transit carbon emissions in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region, China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, **140**: 209-215.
- [17] Yang S S, Duan Z C, Jiang X K. Spatial dynamics and influencing factors of carbon rebound effect in tourism transport: evidence from the Yangtze-River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Environmental Management, 2023, **344**, doi: 10.1016/j.jenvman. 2023.118431.
- [18] Wang J J, Li Y, Zhang Y. Research on carbon emissions of road traffic in Chengdu city based on a LEAP model [J]. Sustainability, 2022, **14**(9), doi: 10.3390/su14095625.
- [19] 李丹阳, 陈文颖. 碳中和目标下全球交通能源转型路径[J]. 气候变化研究进展, 2023, **19**(2): 203-212.
- Li D Y, Chen W Y. Global transportation energy transition pathways towards carbon neutrality [J]. Climate Change Research, 2023, **19**(2): 203-212.
- [20] Zhu L C, Xiong Q. Key influencing factor and future scenario simulation of China's CO<sub>2</sub> emissions from road freight transportation [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, **37**: 11-25.
- [21] 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.
- [22] 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 等. 基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2215-2222.
- Ma S Y, Wei H Y, Ma J, *et al.* Prediction of PAHs content in soil around gas stations in Beijing based on BP neural network [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2215-2222.
- [23] Olayode I O, Tartibu L K, Okwu M O. Prediction and modeling of traffic flow of human-driven vehicles at a signalized road intersection using artificial neural network model: a South African road transportation system scenario [J]. Transportation Engineering, 2021, **6**, doi: 10.1016/j.treng.2021.100095.
- [24] Deng H M, Zhang Y P, Li J, *et al.* Research on energy saving potential and countermeasures in China's transport sector [J]. Energy Reports, 2022, **8** (Suppl 6): 300-311.
- [25] 杜涵蓓, 赵立君, 刘臣伟, 等. 基于 LEAP 模型和 KAYA 模型的主城区碳达峰预测及不确定性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(8): 983-991.
- Du H B, Zhao L J, Liu C W, *et al.* Prediction of peaking carbon dioxide emissions in main city areas based on LEAP model and KAYA model and analyses on its uncertainty [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(8): 983-991.
- [26] Nieves J A, Aristizábal A J, Dyner I, *et al.* Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: a LEAP model application [J]. Energy, 2019, **169**: 380-397.
- [27] Amo-Aidoo A, Kumi E N, Hensel O, *et al.* Solar energy policy implementation in Ghana: a LEAP model analysis [J]. Scientific African, 2022, **16**, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01162.
- [28] 吴唯, 张庭婷, 谢晓敏, 等. 基于 LEAP 模型的区域低碳发展路径研究——以浙江省为例[J]. 生态经济, 2019, **35**(12): 19-24.
- Wu W, Zhang T T, Xie X M, *et al.* Research on regional low carbon development path based on LEAP Model: taking Zhejiang province as an example [J]. Ecological Economy, 2019, **35**(12): 19-24.
- [29] 洪竞科, 李沅潮, 郭德悦. 全产业链视角下建筑碳排放路径模拟: 基于 RICE-LEAP 模型 [J]. 中国环境科学, 2022, **42**(9): 4389-4398.
- Hong J K, Li Y C, Guo S Y. Simulating building carbon emission path with a RICE-LEAP model from the perspective of the whole supply chain [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(9): 4389-4398.
- [30] 戈秋虞, 徐艺诺, 邱荣祖, 等. 基于系统动力学的城市客运交通减碳情景模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 2023, **19**(3): 357-370.
- Ge Q Y, Xu Y N, Qiu R Z, *et al.* Scenario simulation of urban passenger transportation carbon reduction based on system dynamics [J]. Climate Change Research, 2023, **19**(3): 357-370.
- [31] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子 [J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 3122-3130.
- Lü C, Zhang Z, Chen X M, *et al.* Study on CO<sub>2</sub> emission factors of road transport in Chinese provinces [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 3122-3130.
- [32] 刘斌, 赵天舒, 张冉霞. 基于改进 PCA-Logistic 模型对个人汽车保有量预测 [J]. 公路交通科技, 2020, **37**(8): 136-143.
- Liu B, Zhao T S, Zhang R X. Prediction of private car ownership based on improved PCA-Logistic model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, **37**(8): 136-143.
- [33] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [34] Zhang L Y, Lin J, Qiu R Z. Characterizing the toxic gaseous emissions of gasoline and diesel vehicles based on a real-world on-road investigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124957.
- [35] Zhang L Y, Hu X S, Qiu R Z, *et al.* Comparison of real-world emissions of LDGVs of different vehicle emission standards on both mountainous and level roads in China [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, **69**: 24-39.
- [36] 福建省人民政府. 福建省人民政府关于印发福建省“十四五”节能减排综合工作实施方案的通知 [EB/OL]. [https://www.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgk/zsfwj/jgzz/tzggwjzc/202206/t20220617\\_5932061.htm](https://www.fujian.gov.cn/zwgk/zfxxgk/zsfwj/jgzz/tzggwjzc/202206/t20220617_5932061.htm), 2022-06-08.
- [37] 泉州市人民政府办公室. 泉州市人民政府关于印发泉州市“十四五”节能减排综合工作实施方案的通知 [EB/OL]. [www.quanzhou.gov.cn/zfb/xxgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/srmzfxgkml/ghjh/202301/t20230111\\_2836778.htm](http://www.quanzhou.gov.cn/zfb/xxgk/zfxxgkzl/zfxxgkml/srmzfxgkml/ghjh/202301/t20230111_2836778.htm), 2023-01-05.
- [38] 厦门市人民政府办公厅. 厦门市“十四五”综合交通运输发展规划的通知 [EB/OL]. [https://www.xm.gov.cn/zwgk/llfg/sfbwj/202109/t20210924\\_2586376.htm](https://www.xm.gov.cn/zwgk/llfg/sfbwj/202109/t20210924_2586376.htm), 2021-09-24.
- [39] 温州市交通运输局. 温州市交通运输局等九部门关于印发温州市清洁能源出租汽车推广实施方案的函 [EB/OL]. [wzjt.gov.cn/](http://wzjt.gov.cn/)

- wenzhou. gov. cn/art/2019/8/28/art\_1229134109\_607380. html, 2019-08-23.
- [40] 汕头市发展和改革局. 汕头市生态文明建设“十四五”规划 [EB/OL]. [https://www.shantou.gov.cn/stsfj/gkmlpt/content/2/2171/post\\_2171430.html#3312](https://www.shantou.gov.cn/stsfj/gkmlpt/content/2/2171/post_2171430.html#3312), 2023-01-03.
- [41] GB/T 36980-2018, 电动汽车能量消耗率限值[S].
- [42] 国务院办公厅. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035年) [EB/OL]. [https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm), 2020-11-02.
- [43] 国务院. 中华人民共和国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.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm), 2021-03-13.
- [44] 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 等. 辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 665-673.
- Jin J X, Sun S D, Wang P, *et al.* Vehicle emission inventory and scenario analysis in Liaoning from 2000 to 2030[J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 665-673.
- [45] 周俐峻, 郁建桥, 唐果, 等. 基于PEMS的机动车尾气碳排放特征初探[J]. 环境科技, 2023, 36(1): 12-15.
- Zhou L J, Yu J Q, Tang G, *et al.* Preliminary study on characteristics of carbon dioxide emission from vehicle exhaust based on PEMS [J]. Environmental Science and Technology, 2023, 36(1): 12-15.
- [46] 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 等. 基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3581-3590.
- Pan Y J, Li Y, Chen J H, *et al.* Method for high-resolution emission inventory for road vehicles in Chengdu based on traffic flow monitoring data[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3581-3590.
- [47] 张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 等. 天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4467-4474.
- Zhang G T, Yin B H, Bai W Y, *et al.* Size distribution and source appointment of road particles during winter in Tianjin [J]. Environmental Science, 2022, 43(9): 4467-4474.
- [48] 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 等. 2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 643-652.
- Li Y, Shi J C, Chen J H, *et al.* Trends in vehicle emissions in Sichuan province, 2010-2017[J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 643-652.
- [49] 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 等. 机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3771-3778.
- Yu M Y, Wang Q, Fu M L, *et al.* Emission factors of carbonaceous aerosol and stable carbon isotope for in-use vehicles [J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3771-3778.
- [50] 徐勇, 郭振东, 郑志威, 等. 2000~2021年成渝城市群PM<sub>2.5</sub>时空变化及驱动机制多维探测[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3724-3737.
- Xu Y, Guo Z D, Zheng Z W, *et al.* Spatio-temporal variation and multi-dimensional detection of driving mechanism of PM<sub>2.5</sub> concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2000 to 2021 [J]. Environmental Science, 2023, 44(7): 3724-3737.
- [51] 程敏. 基于HJ-1卫星的重庆市都市功能区气溶胶光学厚度反演研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2016.
- Cheng M. Inversion of the optical thickness of aerosol-based HJ-1 satellite metropolitan ribbon city of Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2016.
- [52] 王占永, 陈昕, 胡喜生, 等. 植物屏障影响路边大气颗粒物分布机理及研究方法的进展[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 1047-1058.
- Wang Z Y, Chen X, Hu X S, *et al.* Mechanism and research methods of roadside green barriers affecting the distribution of atmospheric particulate matter: a review [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(5): 1047-1058.
- [53] 蒋自然, 金环环, 王成金, 等. 长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2972-2980.
- Jiang Z R, Jin H H, Wang C J, *et al.* Measurement of traffic carbon emissions and pattern of efficiency in the Yangtze River economic belt (1985-2016) [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2972-2980.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                       |                                                                |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| Spatial Distribution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition                       | YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>                    | (2487) |
| Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest                                                                                                    | ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>             | (2497) |
| Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model                                                                                           | YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>           | (2507) |
| Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model                                                                     | FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>      | (2516) |
| Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020          | GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>                        | (2525) |
| Water-soluble Inorganic Ion Content of PM <sub>2.5</sub> and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022                                              | CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>              | (2537) |
| Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> Between Winter and Spring in Zhengzhou                           | TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>                | (2548) |
| Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City                 | SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>                  | (2558) |
| Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution               | LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>             | (2571) |
| Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin                                    | LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>            | (2581) |
| Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect | XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>                  | (2596) |
| Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China                                                       | WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>             | (2613) |
| Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang                       | ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>        | (2622) |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis                                                                                 | WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>            | (2631) |
| Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season                                    | MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>               | (2640) |
| Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing                                                        | HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>              | (2651) |
| Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)                           | LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>                     | (2665) |
| Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)                                                        | WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>          | (2678) |
| Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River                                     | WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>            | (2686) |
| Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets                                     | JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>          | (2694) |
| Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water                                      | HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>                | (2707) |
| Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir   | MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>                   | (2715) |
| Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals                                                             | MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>      | (2727) |
| Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System                                                  | ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>              | (2741) |
| Source Apportionment of Morphine in Wastewater                                                                                                                        | SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>        | (2748) |
| Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing                                                                                 | LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>            | (2757) |
| Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin                                                                 | WANG Yi-qi, SUN Xue-ying                                       | (2767) |
| Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin                        | CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>              | (2780) |
| Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau                                               | LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>                     | (2793) |
| Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021                                                  | ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>               | (2806) |
| Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios                                                                   | CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>                 | (2817) |
| Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration                      | WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>            | (2828) |
| Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China                                             | JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>                  | (2840) |
| Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses                                                                    | HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>          | (2848) |
| Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm                                    | HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>          | (2859) |
| Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields                                               | SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>                | (2871) |
| Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity                                                                                    | ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> | (2881) |
| Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System                                            | GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>             | (2891) |
| Effect of Biochar on NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation                                                                    | BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>                 | (2905) |
| Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis                                                                           | YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>                | (2913) |
| Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust                                                                                           | WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>      | (2926) |
| Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site                                                                    | CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>         | (2939) |
| Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong                                                 | DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>                 | (2952) |
| Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin                                                                                | HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>         | (2962) |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City                            | YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping                           | (2971) |
| Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models                                       | CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>          | (2983) |
| Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China | TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>               | (2995) |
| Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province                                                                        | WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>          | (3005) |
| Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China                                                   | LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>          | (3016) |
| Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice                                                             | XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>       | (3027) |
| Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper                                               | ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>     | (3037) |
| Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis                                                                                       | JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>             | (3047) |
| Advances in the Effects of Microplastics on Soil N <sub>2</sub> O Emissions and Nitrogen Transformation                                                               | LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>             | (3059) |
| Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin                                                      | DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>                  | (3069) |
| Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay                                                                                   | SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>         | (3078) |
| Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils                                                                                       | WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>              | (3088) |
| Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China                                        | YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>              | (3098) |
| Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang                                                    | XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>               | (3107) |
| Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck                                                                  | XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>   | (3119) |