

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 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 _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常淼, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 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 _{2.5} 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, 姚亚芹, 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, 卞伟康, 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 _{2.5} 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, 崔焕文, 肖咸德, 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, 胡敏鹏, 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, 窦红, 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)
郯庐断裂带(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	贺贊, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晓 (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, 邱小琮, 周瑞娟 (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)
滹沱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	王奕淇, 孙学莹 (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, 王琰 (2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔写, 董燕, 张露尹, 王荣耀 (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, 宋垠先, 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	周连昊, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)
控释掺混肥对麦玉轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高伟, 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 ₃ ⁻ -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MCP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、生态风险评价与来源解析	于路加, 马海军, 王翠平 (2971)
基于源导向和蒙特卡洛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质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-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 ₂ 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)
聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	王志超, 李哲, 李嘉辰, 屈忠义, 杨文焕, 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)

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

(贵州大学电气工程学院, 贵阳 550025)

摘要:为精准预测电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益, 以单辆重卡为对象, 通过预测2023~2050年的电力和柴油碳排放因子变化特性, 耦合两类重卡寿命及生命周期行驶里程, 分阶段构建了重卡动态碳排放模型, 深入分析了“2050年净零排放(NZE)情景”、“承诺目标(APS)情景”和“既定政策(STEPS)情景”下两类重卡的碳排放足迹, 并计算碳减排量和碳减排率。结果表明, 电池生产和电池回收是分别导致电动重卡生产阶段和拆解回收阶段碳减排效益不佳的重要因素。电力碳排放因子(以CO₂计)每降低1 g·(kW·h)⁻¹, 电动重卡全生命周期碳排放可减少1.74 t。3种情景下, 两类重卡运行阶段碳排放均占全生命周期碳排放总量的90%以上。碳减排效益由高到低的情景依次为NZE、APS和STEPS, 其对应的全生命周期碳减排量分别为1 054.68、1 021.78和1 007.97 t, 碳减排率分别为54.38%、52.68%和51.97%。

关键词:重卡; 碳排放因子; 动态模型; 情景分析; 碳排放; 全生命周期

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3119-10 DOI: 10.13227/j.hjx.202305123

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, YANG Lang

(Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: To accurately predict the life-cycle carbon reduction benefits of replacing a diesel heavy-duty truck with an electric one, taking a single heavy-duty truck as the object, the variation trend in electric and diesel carbon emission factors from 2023 to 2050 were predicted; coupled with the life spans and life-cycle mileage of the two types of heavy-duty trucks, a dynamic carbon emission model for the heavy-duty trucks was constructed in stages. The carbon footprints of the trucks under the “Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)”, “Announced Pledges Scenario (APS)”, and “Stated Policies Scenario (STEPS)” were analyzed. In addition, the carbon reduction and carbon reduction rate were calculated. The results showed that battery manufacturing and battery recycling were the main factors to impair the improvement of carbon reduction in the production and recycling stages of electric heavy-duty trucks, respectively. For every 1 g·(kW·h)⁻¹ reduction in the electricity carbon emission factor (CO₂), an electric heavy-duty truck could reduce 1.74 t of carbon emissions over its life cycle. Under the three scenarios, the carbon emissions during the operation stage of both types of heavy trucks accounted for more than 90% of the total life-cycle carbon emissions. Carbon reduction benefits from the highest to the lowest were NZE, APS, and STEPS, and their corresponding life-cycle carbon emission reductions were 1 054.68, 1 021.78, and 1 007.97 t, with carbon reduction rates of 54.38%, 52.68%, and 51.97%, respectively.

Key words: heavy-duty truck; carbon emission factor; dynamic model; scenario analysis; carbon emission; life cycle

交通运输碳排放量约占我国碳排放总量的10%, 是CO₂排放量增长最快的行业^[1,2], 降碳可助力实现《巴黎协定》及中国“双碳”目标^[3~5]。在温室气体排放增幅最大的子行业——公路货运中, 重卡排放占整个交通运输碳排放总量的40%, 重卡脱碳是影响气候变化方面的当务之急^[6~8]。然而中国却面临着重型运输减排难题, 电能替代有望成为其突破降碳瓶颈进而推动运输行业深度脱碳的关键^[9~11]。系统评估电动重卡与柴油重卡碳排放, 对挖掘电动重卡减排潜力意义重大。

目前车辆碳排放大都聚焦于乘用车, 重卡领域关注较少。已有重卡碳排放研究多通过划定燃料边界建立燃料生命周期或应用美国阿贡GREET模型对电动重卡与柴油重卡碳排放进行评估^[12~16], 较少考虑车辆生产与回收产生的碳排放, 划定车辆生命周期边界进而建立车辆生命周期可弥补以上不足, 以便对两类重卡碳排放进行更为精确的衡量^[9,11,17,18]。

但相关研究缺少整体考虑, 未系统地对碳排放进行阶段划分, 同时欠缺电动重卡碳减排效益直观表征。此外, 借助敏感性分析可更为深入地探究重卡碳排放^[7,8,11,14,17], 通过重卡技术、中国碳减排政策与电动汽车所占比例等设置情景能预测未来电动重卡对气候影响^[6,7,13,15,19,20]。但已有研究总体上对电动重卡碳减排效益定性讨论及预测考虑不够全面, 多局限于固定年份的能源碳排放因子评估重卡全生命周期碳排放, 忽略了重卡运行年限期间电力及柴油碳排放因子随时间变化所带来的影响, 缺乏生命周期碳排放足迹追踪。

基于此, 本文按生命线对电动重卡与柴油重卡

收稿日期: 2023-05-13; 修订日期: 2023-07-18

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般018); 贵州大学引进人才科研项目(贵大基合字[2022]72号); 国家电投集团贵州金元股份有限公司科技项目(138006JX0120220018)

作者简介: 徐圆圆(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车与碳排放, E-mail:2353112504@qq.com

* 通信作者, E-mail: dhgong@gzu.edu.cn

进行生命周期碳排放阶段划分，综合考虑未来电力、柴油碳排放因子变化和重卡车辆特性，构建两类重卡动态碳排放模型，引入“2050年净零排放(NZE)情景”、“承诺目标(APS)情景”和“既定政策(STEPS)情景”分析两类重卡全生命周期碳排放足迹，并计算碳减排量和碳减排率。

1 材料与方法

1.1 全生命周期碳排放分析框架

重卡生命周期碳排放与汽车类似，边界为制造开始到使用结束^[21]，本文按生命线将其分为生产、运行与拆解回收这3个阶段。设定生产阶段边界为车辆零配件的生产到整车形成；运行阶段边界为车辆出厂到报废结束；拆解回收阶段为报废结束到车辆拆解完成。划分结果如图1所示。

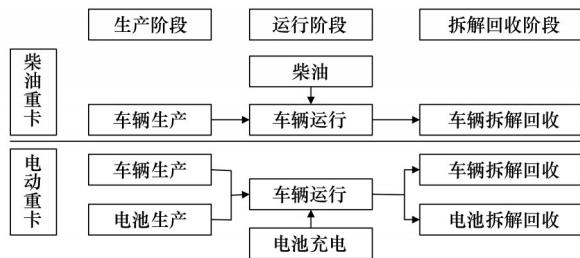


图1 生命周期碳排放阶段划分
Fig. 1 Stages of life-cycle carbon emission

1.2 能源碳排放因子预测模型构建

PMF法广泛应用于土壤重金属源解析、PM_{2.5}来源定量分析等领域^[22,23]，是一种将污染源贡献与污染源组分联系起来的新方法^[24]。本研究参考PMF法并以唐一媛等^[25]建立的模型为基础，结合国际能源署(IEA)对发展中国家的电力需求预测，引入主要的6类发电方式年增长率重构了电力碳排放因子动态模型。Zhang等^[11]预测柴油机碳排放每5a减少3%。而柴油机碳排放主要来自柴油燃烧，因此可将其产生的碳减排转移至柴油，即柴油机的碳减排间接降低了柴油碳排放因子。本研究取年减排率建立未来柴油碳排放因子动态预测模型。以y为基准年，n为目标年的电力碳排放因子测算模型与柴油碳排放因子测算模型，分别如式(1)和式(2)所示。

$$C_{ep,n} = \sum_{i=1}^6 \frac{M_{i,y} (1 + \alpha_{i,n})^{n-y}}{\sum_{i=1}^6 M_{i,y} (1 + \alpha_{i,n})^{n-y}} \cdot C_i \quad (1)$$

$$C_{dp,n} = C_{dp,y} (1 - \omega)^{n-y} \quad (2)$$

式中， $C_{ep,n}$ 为目标年n电力碳排放因子[以CO₂计，kg·(kW·h)⁻¹]； $M_{i,y}$ 为基准年y的第*i*类发电方式发电量(kW·h)； $\alpha_{i,n}$ 为目标年n第*i*种发电方式的年发电量增长率； C_i 为第*i*种发电方式的全生命周期碳排放

因子[以CO₂计，kg·(kW·h)⁻¹]； $C_{dp,n}$ 为目标年n的柴油碳排放因子(以CO₂计，kg·L⁻¹)； $C_{dp,y}$ 为基准年y的柴油碳排放因子(以CO₂计，kg·L⁻¹)， ω 为柴油年均减排率。

1.3 碳排放模型构建

吨位接近的电动重卡与柴油重卡载重量相差不大，故本文不考虑载重量对其碳排放影响，对各阶段碳排放进行建模。

1.3.1 生产阶段碳排放模型

基于重卡生命周期边界，重卡在生产过程中的碳排放随各零配件比例波动而变化。将零配件在生产过程中的温室气体排放纳入重卡生产阶段碳排放，定义了柴油重卡与电动重卡生产阶段碳排放模型，其中电动重卡生产阶段碳排放包括车辆及电池制造，计算如式(3)和式(4)所示。

柴油重卡生产阶段碳排放模型：

$$E_{dhfb} = \sum M_d K_{id} C_{id} \quad (3)$$

式中， E_{dhfb} 为柴油重卡生产阶段碳排放量(t)； M_d 为柴油重卡质量(t)； K_{id} 为柴油重卡第*i*种零配件占重卡质量比例； C_{id} 为柴油重卡第*i*种零配件在生产时的碳排放因子(以CO₂计，t·t⁻¹)。

电动重卡生产阶段碳排放模型：

$$E_{ehfb} = E_b + E_{ehtv} \quad (4)$$

$$\text{其中: } E_b = B_{ht} \cdot C_{htb}, \quad E_{ehtv} = \sum M_e K_{ie} C_{ie}$$

式中， E_{ehfb} 为电动重卡生产阶段碳排放量(t)； E_b 为电池制造所产生的碳排放(t)； E_{ehtv} 为电动重卡车辆生产时产生的碳排放(t)； B_{ht} 为电池的容量(kW·h)， C_{htb} 为电池单位容量在制造时产生的碳排放量[以CO₂计，t·(kW·h)⁻¹]； M_e 为电动重卡车辆质量(t)； K_{ie} 为电动重卡第*i*种零配件占重卡质量比例； C_{ie} 为电动重卡第*i*种零配件在生产时的碳排放因子(以CO₂计，t·t⁻¹)。

1.3.2 运行阶段年碳排放模型

运行阶段电动重卡将碳排放转移至能源上游(发电侧)^[26]，其碳排放对电力碳排放因子变动有着极强的敏感性。综合考虑充电损耗^[27]、电厂内耗与电能输送损失产生的影响，引用边际发电量因子(PMP)^[28]建立电动重卡运行阶段的动态年碳排放模型。而柴油重卡运行阶段碳排放主要来自柴油燃烧，故结合行驶里程及柴油碳排放因子建立动态年碳排放模型^[29]。两类重卡运行阶段的动态年碳排放模型如式(5)和式(6)所示。

柴油重卡运行阶段年碳排放模型：

$$E_{dhto,n} = \frac{L_{d,n} \cdot D_{ad} \cdot C_{dp,n}}{100 \times 1000} \quad (5)$$

式中， $E_{dhto,n}$ 为n年柴油重卡运行阶段的年CO₂排放量(t)； $L_{d,n}$ 为n年柴油重卡车年运行里程(km)； D_{ad} 为

柴油重卡油耗 [$L \cdot (100 \text{ km})^{-1}$] ; $C_{dp,n}$ 为 n 年柴油碳排放因子(以 CO_2 计, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

电动重卡运行阶段年碳排放模型:

$$E_{ehto,n} = \frac{L_{e,n} \cdot D_{ae} \cdot C_{ep,n} \cdot PMP_1}{100 \times 1000} \quad (6)$$

其中: $PMP_1 = \frac{1}{\eta \cdot (1 - LR) \cdot (1 - PR)}$

式中, $E_{ehto,n}$ 为 n 年电动重卡运行阶段的年 CO_2 排放量(t); $L_{e,n}$ 为 n 年电动重卡年运行里程(km); D_{ae} 为电动重卡百公里电耗 [$\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (100 \text{ km})^{-1}$]; $C_{ep,n}$ 为 n 年电力碳排放因子[以 CO_2 计, $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]; PMP_1 为充电边际发电量因子, 即电动重卡充电 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 引起发电侧的发电增量值; η 为电动重卡充电效率; LR 为线损率; PR 为厂用电率。

1.3.3 拆解回收阶段碳排放模型

资源循环利用是节能降碳的一个重要途径, 重卡回收可降低制造阶段的能源消耗及温室气体排放^[30]。有研究发现^[31,32], 柴油卡车发动机与电动卡车电机的差异是导致两类卡车铸铁与铜含量不同的主要因素, 故本文将其视为柴油重卡与电动重卡车辆的重要组成部分, 并假设二者在拆解回收阶段的碳排放无显著差异^[33], 即两类重卡在拆解回收阶段的碳排放差异主要取决于车辆和电池, 且整车在拆解回收阶段只消耗电能^[20]。定义了拆解回收阶段动态碳排放模型如式(7)和式(8)所示。

柴油重卡拆解回收阶段碳排放模型:

$$E_{dhto,n} = 0.2778 \cdot W_{dsr} \cdot M_d \cdot PMP_2 \cdot C_{ep,n} \quad (7)$$

其中: $PMP_2 = \frac{1}{(1 - LR) \cdot (1 - PR)}$

式中, $E_{dhto,n}$ 为 n 年柴油重卡拆解回收阶段产生的碳排放量(t); W_{dsr} 为每千克柴油重卡拆解回收阶段消耗的能量($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); PMP_2 为用电边际发电量因子, 是拆解与回收重卡车辆每消耗 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电量引起的发电侧的发电增量值。

电动重卡拆解回收阶段碳排放模型:

$$E_{ehto,n} = 0.2778 \cdot (W_b M_b + W_{esr} M_e) \cdot PMP_2 \cdot C_{ep,n} \quad (8)$$

式中, $E_{ehto,n}$ 为 n 年电动重卡拆解回收阶段产生的碳排放量(t); W_b 为电动重卡电池拆解回收阶段耗能($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$); M_b 为电动重卡电池质量(t); W_{esr} 为回收 1 kg 电动重卡车辆所需要的能量($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.3.4 全生命周期碳排放模型

电动重卡运行阶段和拆解回收阶段碳排放与电力碳排放因子密切相关, 而柴油碳排放因子对柴油重卡运行阶段排放有着重大影响。基于电力碳排放因子逐年随电力结构变化, 以及柴油机效率提高和排气后处理系统技术发展, 柴油碳排放因子间接逐

年降低, 考虑到重卡寿命及生命总里程数变化不大, 得出其总排放与两类重卡购入年限、年运行情况和重卡寿命相关。本文提出一种与运行里程相关联的重卡全生命周期碳排放模型, 如式(9)~(14)所示。为方便分析, 模型假设: ①两类重卡购入时间为 X 年, 且均为年初, 即当年的 1 月 1 日; ②每种情景下年运行里程不变, 相同情景下两类重卡实际年运行里程 $L_{d,n}$ 和 $L_{e,n}$ 相同; ③柴油重卡与电动重卡的生命周期行驶里程分别为 L_d 和 L_e ; ④柴油重卡寿命为 S_d , 电动重卡寿命为 S_e ; ⑤对应情景下柴油重卡与电动重卡理论总运行年限分别为 $\gamma_d = L_d / L_{d,n}$ 和 $\gamma_e = L_e / L_{e,n}$; ⑥总运行里程达重卡生命周期行驶里程或理论总运行年限达重卡寿命, 重卡即报废。

柴油重卡全生命周期碳排放模型:

① $\gamma_d < S_d$

$$E_{td} = E_{dhtb} + E_{dhto} + E_{dhtr, X + R_d(\gamma_d)} = E_{dhtb} + \sum_{i=X}^{X + R_d(\gamma_d) - 1} E_{dhto,i} + E_{dhto, X + R_d(\gamma_d)} + E_{dhtr, X + R_d(\gamma_d)} \quad (9)$$

其中:

$$E_{dhto, X + R_d(\gamma_d)} = \frac{[L_d - L_{d,n} \cdot R_d(\gamma_d)] \cdot D_{ad} \cdot C_{dp,X + R_d(\gamma_d)}}{100 \times 1000}$$

式中, E_{td} 为柴油重卡全生命周期碳排放(t); E_{dhto} 为柴油重卡运行阶段总碳排放(t); $R_d()$ 为向下取整函数; $E_{dhtr, X + R_d(\gamma_d)}$ 为 $X + R_d(\gamma_d)$ 年柴油重卡拆解回收产生的碳排放(t); $E_{dhto,i}$ 为 i 年柴油重卡年运行碳排放(t); $E_{dhtr, X + R_d(\gamma_d)}$ 为 $X + R_d(\gamma_d)$ 年柴油重卡年运行碳排放(t); $C_{dp,X + R_d(\gamma_d)}$ 为 $X + R_d(\gamma_d)$ 年的柴油碳排放因子(以 CO_2 计, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

② $\gamma_d = S_d$

$$E_{td} = E_{dhtb} + E_{dhto} + E_{dhtr, X + R_d(S_d)} = E_{dhtb} + \sum_{i=X}^{X + R_d(S_d) - 1} E_{dhto,i} + E_{dhto, X + R_d(S_d)} + E_{dhtr, X + R_d(S_d)} \quad (10)$$

其中:

$$E_{dhto, X + R_d(S_d)} = \frac{[L_d - L_{d,n} \cdot R_d(S_d)] \cdot D_{ad} \cdot C_{dp,X + R_d(S_d)}}{100 \times 1000}$$

式中, $E_{dhtr, X + R_d(S_d)}$ 为 $X + R_d(S_d)$ 年柴油重卡拆解回收产生的碳排放(t); $E_{dhto, X + R_d(S_d)}$ 为 $X + R_d(S_d)$ 年柴油重卡年运行碳排放(t); $C_{dp,X + R_d(S_d)}$ 为 $X + R_d(S_d)$ 年的柴油碳排放因子(以 CO_2 计, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

③ $\gamma_d > S_d$

$$E_{td} = E_{dhtb} + E_{dhto} + E_{dhtr, X + R_d(S_d)} = E_{dhtb} + \sum_{i=X}^{X + R_d(S_d) - 1} E_{dhto,i} + E_{dhto, X + R_d(S_d)} + E_{dhtr, X + R_d(S_d)} \quad (11)$$

其中：

$$E_{\text{dhto}, X+R_d(S_d)} = \frac{[S_d - R_d(S_d)] \cdot L_{d,n} \cdot D_{ad} \cdot C_{dp, X+R_d(S_d)}}{100 \times 1000}$$

电动重卡全生命周期碳排放模型：

$$\textcircled{1} \gamma_e < S_e$$

$$E_{te} = E_{ehtb} + E_{ehto} + E_{ehtr, X+R_d(\gamma_e)} = E_{ehtb} + \sum_{i=X}^{X+R_d(\gamma_e)-1} E_{ehto,i} + E_{ehto, X+R_d(\gamma_e)} + E_{ehtr, X+R_d(\gamma_e)}$$
(12)

其中：

$$E_{ehto, X+R_d(\gamma_e)} = \frac{[L_e - L_{e,n} \cdot R_d(\gamma_e)] \cdot D_{ae} \cdot C_{ep, X+R_d(\gamma_e)} \cdot PMP_1}{100 \times 1000}$$

式中， E_{te} 为电动重卡全生命周期碳排放(t)； E_{ehto} 为电动重卡运行阶段总碳排放(t)； $E_{ehtr, X+R_d(\gamma_e)}$ 为 $X+R_d(\gamma_e)$ 年电动重卡拆解回收产生的碳排放(t)； $E_{ehto,i}$ 为*i*年电动重卡年运行碳排放(t)； $E_{ehto, X+R_d(\gamma_e)}$ 为 $X+R_d(\gamma_e)$ 年电动重卡年运行碳排放(t)； $C_{ep, X+R_d(\gamma_e)}$ 为 $X+R_d(\gamma_e)$ 年的电力碳排放因子[以CO₂计，kg·(kW·h)⁻¹]。

$$\textcircled{2} \gamma_e = S_e$$

$$E_{te} = E_{ehtb} + E_{ehto} + E_{ehtr, X+R_d(S_e)} = E_{ehtb} + \sum_{i=X}^{X+R_d(S_e)-1} E_{ehto,i} + E_{ehto, X+R_d(S_e)} + E_{ehtr, X+R_d(S_e)}$$
(13)

其中：

$$E_{ehto, X+R_d(S_e)} = \frac{[L_e - L_{e,n} \cdot R_d(S_e)] \cdot D_{ae} \cdot C_{ep, X+R_d(S_e)} \cdot PMP_1}{100 \times 1000}$$

式中， $E_{ehtr, X+R_d(S_e)}$ 为 $X+R_d(S_e)$ 年电动重卡拆解回收产生的碳排放(t)； $E_{ehto, X+R_d(S_e)}$ 为 $X+R_d(S_e)$ 年电动重卡年运行碳排放(t)； $C_{ep, X+R_d(S_e)}$ 为 $X+R_d(S_e)$ 年的电力碳

排放因子[以CO₂计，kg·(kW·h)⁻¹]。

$$\textcircled{3} \gamma_e > S_e$$

$$E_{te} = E_{ehtb} + E_{ehto} + E_{ehtr, X+R_d(S_e)} = E_{ehtb} + \sum_{i=X}^{X+R_d(\gamma_e)-1} E_{ehto,i} + E_{ehto, X+R_d(S_e)} + E_{ehtr, X+R_d(S_e)}$$
(14)

其中：

$$E_{ehto, X+R_d(S_e)} = \frac{[S_e - R_d(S_e)] \cdot L_{e,n} \cdot D_{ae} \cdot C_{ep, X+R_d(S_e)} \cdot PMP_1}{100 \times 1000}$$

1.3.5 碳减排量及碳减排率模型

为直观比较两类重卡的全生命周期碳排放，引入碳减排量与碳减排率^[34]表征电动重卡替代柴油重卡的碳减排效益。假设柴油重卡实际总运行 L_{da} 公里，电动重卡实际共运行 L_{ea} 公里，碳减排量及碳减排率可通过式(15)和式(16)获得。

碳减排量模型：

$$E_{dec} = \left(\frac{E_{td}}{L_{da}} - \frac{E_{te}}{L_{ea}} \right) \cdot L_{ea}$$
(15)

碳减排率模型：

$$\eta_{dec} = \frac{\left(\frac{E_{td}}{L_{da}} - \frac{E_{te}}{L_{ea}} \right)}{E_{td}/L_{da}}$$
(16)

1.4 数据来源与处理

1.4.1 车辆数据来源

应用姜运哲等^[35]所提及的短道运输，选用电厂到煤矿的短途运输作为研究场景。结合2021年电动重卡销量，选择销量第一的汉马科技之华菱之星6×4换电式纯电动牵引车作为研究对象，并以其生产的华菱汉马H7重卡450 PS，6×4牵引车进行对比。本文重卡车辆相关数据来源于贵州某电厂，该电厂提供的重卡参数如表1所示。

表1 重卡参数

Table 1 Heavy-duty truck parameters

参数名称	车辆类型	
	电动重卡	柴油重卡
车辆型号	汉马科技之华菱之星6×4换电式纯电动牵引车HN4253H36C8BEV	华菱汉马H7重卡450 PS, 6×4牵引车HN4252H46C4MS
平均百公里油耗/L	—	60
平均百公里电耗/kW·h	170	—
平均车辆整备质量/t	11	8.5
载重量/t	30	32
电池重量/t	2.98	—
电池容量/kW·h	282	—
充电效率/%	90	—

1.4.2 碳排放清单构建

本文假设无论电池的化学成分或充电容量如

何，电池寿命与车辆寿命相当^[36]。2021年全国线损率为5.26%，厂用电率为4.36%^[37]，柴油排放量每5

a降低3%^[11].重卡在生产阶段与拆解回收阶段的相关参数如表2所示.

各发电方式的碳排放因子^[25]如表3所示,本文假定未来除煤电外,其它发电方式碳排放因子波动不大.

制造重卡使用材料的组成比例和该材料在生产过程中所产生的碳排放将直接影响整个生产阶段的碳排放总量,因此需将整车制造过程中各材料占比

以及各材料在生产过程的碳排放整合成一个整体框架.由文献[20, 34]可知,电动重卡与柴油重卡在生产过程中所需材料(不含电池)成分比例及各材料制造过程中所产生的碳排放如表4所示.

1.4.3 发电量及电力结构

国际能源署(IEA)^[39, 40]对中国2021、2030和2050年的电力结构和发电量统计与预测如表5所示.

表2 碳排放清单

Table 2 Carbon emission inventory

参数名称	重卡类型	
	电动重卡	柴油重卡
电池制造碳排放(以CO ₂ 计) ^[21] /t·(kW·h) ⁻¹	0.10	—
柴油生命周期碳排放因子(以CO ₂ 计) ^[16] /kg·L ⁻¹	—	3.96
全国电力碳排放因子(以CO ₂ 计) ^[37] /kg·(kW·h) ⁻¹	0.56	—
车身回收耗能 ^[38] /MJ·kg ⁻¹	0.37	0.37
电池拆解回收耗能 ^[38] /MJ·kg ⁻¹	31	—
全生命行驶里程 ^[20] /km	820 000	700 000
使用寿命 ^[20] /a	8	7

表3 不同发电方式碳排放因子

Table 3 Carbon emission factors for various power generation methods

发电方式	碳排放因子(以CO ₂ 计)/g·(kW·h) ⁻¹
太阳能光伏	94.80
风能	9.47
核能	3.37
天然气	412.78
煤炭	838.60
水电	22.20

2 结果与分析

情景分析广泛应用于污染物未来排放趋势预测,通过设置多种发展情景,可预测不同情景下碳排放^[41, 42].本文聚焦近年来国际国内环境新形势,借鉴国际能源署(IEA)^[39, 40]设立的3种电力发展情

景,选取2021年为基准年,同时以2030年和2050年为目标年,采用情景分析法对电动重卡与柴油重卡碳排放足迹进行研究.

2.1 情景设定

(1) 2050年净零排放(NZE)情景 为将全球温升控制在1.5°C的目标,需在2050年实现净零排放.可再生能源2030年发电量将占总发电量的60%以上,到2050年,可再生能源发电量将占总发电量的88%.化石燃料的发电量则将在2030年比2021年减少一半以上,到2050年则降为零.

(2) 承诺目标(APS)情景 假设各国政府的所有气候承诺按时履行.可再生能源发电量将从2021年占总发电量的28%增加到2030年的49%,并在

表4 重卡车辆材料分布及材料碳排放因子(不含电池)

Table 4 Material distribution of heavy-duty truck vehicles and material carbon emission factors (excluding batteries)

项目名称	钢	铸铁	塑料	铸铝	橡胶	玻璃	锻造铝	铜	其他
柴油重卡组成/%	63.37	12.25	8.95	4.95	2.69	2.63	2.19	1.50	1.47
电动重卡组成/%	67.85	2.87	9.46	5.98	2.34	3.35	0.92	4.53	2.70
碳排放因子(以CO ₂ 计)/t·t ⁻¹	2.50	0.88	2.40	2.62	2.76	1.62	2.62	2.50	2.24

表5 IEA对中国电力结构和发电量统计与预测

Table 5 Statistics and predictions on China's power generation structure and power capacity from IEA

项目	2021年	STEPS情景		APS情景		NZE情景	
		2030年	2050年	2030年	2050年	2030年	2050年
太阳能光伏	3.82	13.25	27.29	14.49	33.93	14.91	34.71
风能	7.68	13.87	23.11	14.41	27.09	17.40	27.81
核能	4.78	5.78	8.44	6.56	9.31	7.35	9.52
天然气	3.41	3.10	2.40	2.89	2.06	4.04	4.62
煤炭	62.89	47.08	21.76	44.36	9.42	37.85	4.85
水电	17.41	16.93	16.99	17.30	18.19	18.45	18.50
总发电量/kW·h	8.539 0×10 ¹²	1.113 6×10 ¹³	1.434 2×10 ¹³	1.095 8×10 ¹³	1.610 9×10 ¹³	1.023 2×10 ¹³	1.532 9×10 ¹³

2050年达到80%。化石燃料发电量则将从2021年占总发电量的62%降低到2030年的47%，并在2050年进一步下降到26%。

(3) 既定政策(STEPS)情景 无新政策出台，全球能源需求将在2030年前以每年约0.8%的速度增长，这一增长需求基本由可再生能源满足。

以上情景为国际能源署(IEA)^[39,40,43]对中国设置的3种电力发展情景，代表了不同的电力结构变化，反映了不同的电力碳排放因子变化趋势，将其应用于本研究进行分析可更全面地预测重卡全生命周期碳排放。

2.2 能源碳排放因子预测

IEA^[39,40]对全球电力需求进行预测，指明不同情景下电力需求趋势不同，相同情景下现在到2030年及2030年到2050年的电力需求增长趋势不同。本研

究以2021年和2030年各发电方式发电量为基准值，固定各发电方式年发电量增长率，将基准值与本年度发电量增加值之和作为下一年度发电量现值，预测计算下一年度发电量。目标年n，第*i*类发电方式的发电量如式(17)所示。

$$\begin{aligned} G_{i,n} &= G_{i,2021} \cdot (1 + \alpha_i)^{n-2021}, \quad 2021 \leq n \leq 2030 \\ G_{i,n} &= G_{i,2030} \cdot (1 + \alpha_i)^{n-2030}, \quad 2030 \leq n \leq 2050 \end{aligned} \quad (17)$$

式中， $G_{i,n}$ 为目标年n，第*i*类发电方式的发电量； $G_{i,2021}$ 为2021年第*i*类发电方式的发电量； $G_{i,2030}$ 为2030年第*i*类发电方式的发电量。

将式(17)应用于IEA对中国2030年及2050年发电量预测中，依次得到了2021~2030年及2030~2050年各发电方式发电量的年增长率，如表6所示。

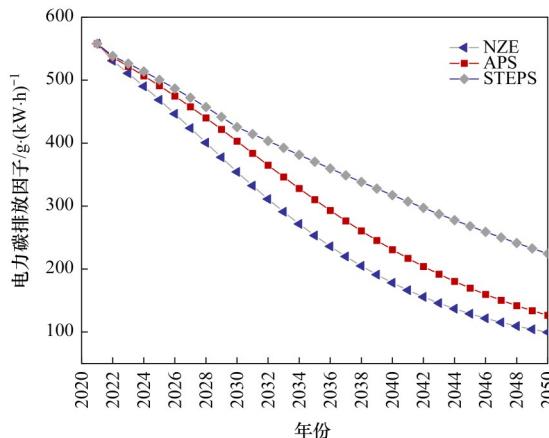
表6 不同情景下各发电方式发电量年增长率预测/%

Table 6 Predictions of annual growth rate for power generation under various generation methods based on different scenarios/%

类型	2021~2030年			2031~2050年		
	NZE情景	APS情景	STEPS情景	NZE情景	APS情景	STEPS情景
太阳能光伏	18.68	19.22	18.25	6.42	6.36	5.00
风能	11.73	10.26	9.99	4.44	5.20	3.89
核能	7.01	6.48	5.18	3.34	3.73	3.21
天然气	3.97	0.92	1.91	2.7	0.22	-0.01
煤炭	-3.57	-1.10	-0.26	-7.95	-5.67	-2.56
水电	2.69	2.73	2.68	2.03	2.19	1.29

同理用于Zhang等^[11]对柴油机每5 a下降3%碳排放量的预测，使用2021年柴油碳排放因子计算2026年柴油碳排放因子，进而通过式(2)可得柴油碳排放因子年下降率为0.61%。

将以上发电方式的年增长率与柴油碳排放因子的年下降率代入先前建立的能源排放因子测算模型[式(1)和式(2)]得到未来柴油碳排放因子及NZE、APS和STEPS这3种情景下的电力碳排放因子变化趋势，如图2所示。



从图2可以看出，两类能源碳排放因子均逐年降低，其中电力碳排放因子降幅从小到大依次为STEPS情景、APS情景及NZE情景。NZE情景碳排放因子下降曲线在2041年后趋于平滑，主要原因是低生命周期碳排放因子发电方式中风电、核电和水电的发电量占比增长变缓。

2.3 电动重卡与柴油重卡全生命周期碳排放对比

通过式(3)~(6)、式(9)和式(12)计算NZE、APS和STEPS情景下两类重卡的全生命周期碳排放，

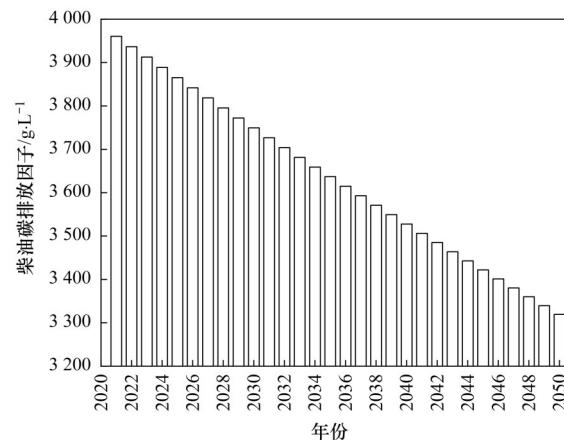


图2 2021~2050年电力和柴油碳排放因子变化趋势

Fig. 2 Trends in electricity and diesel carbon emission factors from 2021 to 2050

结果如图3所示。

由图3可知,生产阶段和拆解回收阶段两类重卡碳排放类似,但相比于柴油重卡,电动重卡增加了电池生产与拆解回收环节产生的碳排放,而该碳排放却占两阶段碳排放的主导,致使电动重卡在生产阶段和拆解回收阶段的碳排放远高于柴油重卡,分别为柴油重卡的2.46倍和28.67~29.35倍,电池生产和电池回收分别成为生产阶段及拆解回收阶段碳减排效益不佳的主要原因;图3中两类重卡生产阶段产生的碳排放不受情景影响是由于本文参考以往研究,将两类重卡在该阶段产生的碳排放分摊至各组成材料的生产过程中。运行阶段,电力和柴油碳排放因子逐年降低使得两类重卡碳排放均呈逐年下降趋势,其中电动重卡年碳排放降幅大于柴油重卡是因为电力碳排放因子相

较于柴油碳排放因子下降更快;3种情景下电动重卡碳排放均从峰值125.63 t开始下降,2027年NZE情景下降至95.42 t,APS情景下降至103.05 t,STEPS情景下降至106.31 t,柴油重卡碳排放则不受情景影响从256.65 t下降到2026年的248.95 t;2027年柴油重卡和2028年电动重卡运行碳排放骤降的主要原因是车辆寿命到期导致该年未能达到正常的年运行里程。3种情景下两类重卡全生命周期碳排放由高到低均为运行阶段、生产阶段和拆解回收阶段,其中运行阶段能源消耗产生的碳排放皆占全生命周期碳排放的90%以上,为两类重卡碳排放的主要来源。研究还发现电动重卡碳排放对电力碳排放因子具有极强的敏感性,电力碳排放因子(以CO₂计)每降低1 g·(kW·h)⁻¹,电动重卡驶完生命周期行驶里程碳排放可减少1.74 t。

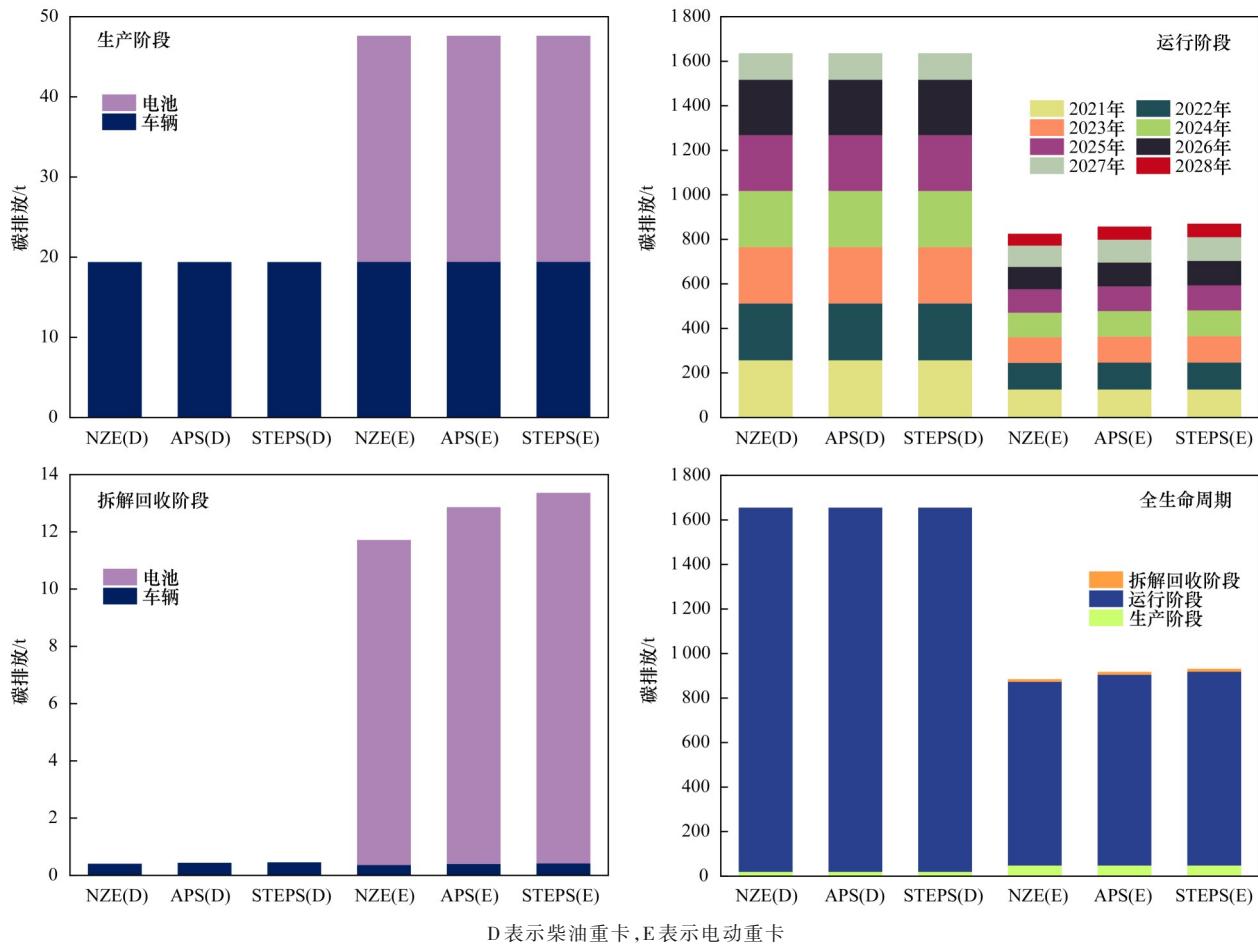


图3 不同情景下两类重卡全生命周期碳排放

Fig. 3 Life-cycle carbon emissions of two types of heavy-duty trucks under different scenarios

鉴于两类重卡生命周期行驶里程所存在的差异,将全生命周期碳排放均分至生命周期行驶里程中,以此获得了单辆电动重卡替代单辆柴油重卡(单车替代)的每公里碳减排量,进而得到了“单车替代”的碳减排率,并以电动重卡生命周期行驶里程为基准评估了“单车替代”产生的全生命周期碳

减排量,结果如图4所示。

从图4可以看出,3种情景下,“单车替代”均具有较好的减排效益。减排效益由高到低依次为NZE情景、APS情景和STEPS情景,对应的百公里碳减排量分别为0.129、0.125和0.123 t,全生命周期碳减排量分别为1 054.68、1 021.78和

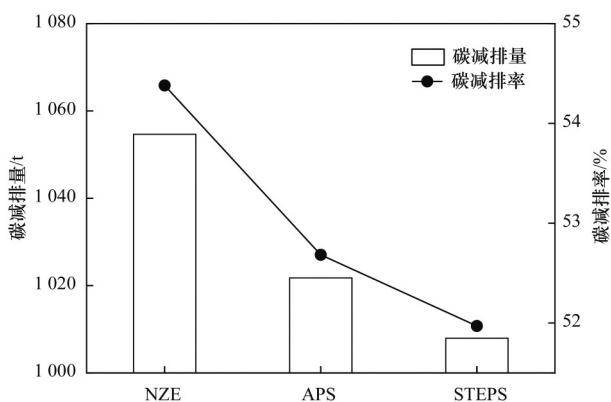


图4 “单车替代”碳减排效益

Fig. 4 Carbon reduction benefits of a single electric heavy-duty truck replacing a diesel one

1 007.97 t, 碳减排率分别为 54.38%、52.68% 和 51.97%.

2.4 模型碳排放结果对比

研究对象差异会直接影响模型的输入参数变化, 进而导致计算结果出现较大偏差. 为与相关研究进行有效对比, 保守起见, 将模型在 STEPS 情景下的碳排放结果与已有模型在相同输入参数下的碳排放结果进行比较, 结果如表 7 所示, 负值表示拆

解回收产生的碳减排量.

由表 7 可知, 本模型与已有模型在各阶段碳排放趋势一致, 从大到小均为运行阶段、生产阶段、拆解回收阶段, 两类重卡在运行阶段碳排放皆占全生命周期碳排放 90% 以上, 且电池产生的碳排放占主导地位. 不同模型得到的碳排放结果各异, 这主要是由于模型自身设定的初始值不同导致, 模型 2 和模型 3 分别将两类重卡的车辆生产以固定排放值(以 CO_2 计) $8.18 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $8.10 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 进行分析, 忽略了两类重卡组成结构的差异以及各组成材料生产加工过程中产生碳排放的不同, 致使两类重卡在车辆生产阶段皆出现了较高的碳排放结果. 本模型充分考虑该点不足, 使得车辆在生产阶段的碳排放计算更为合理. 此外, 本模型逐年累计得到的柴油重卡运行阶段碳排放最低, 这与未来能源碳排放因子变化趋势一致, 模型 1 计算的电动重卡运行阶段碳排放比本模型低, 是因为该模型未考虑线损率、厂用电率以及充电效率对上游发电量产生的影响. 综上所述, 与模型 1~模型 3 相比, 本模型对两类重卡全生命周期的碳排放计算更为精确.

表7 不同模型碳排放结果对比/t
Table 7 Comparison of carbon emissions for different models/t

项目	柴油重卡				电动重卡					
	生产阶段	运行阶段	拆解回收阶段	全生命周期	车辆生产阶段	电池生产阶段	运行阶段	车辆拆解回收阶段	电池拆解回收阶段	全生命周期
模型 1 ^[11]	23.09	1 663.45	0.76	1 687.30	19.96	4.88	777.85	0.71	22.15	825.56
模型 2 ^[44]	69.53	1 663.45	-11.82	1 721.17	65.60	45.54	912.27	-11.15	-6.06	1 006.20
模型 3 ^[45]	68.00	1 663.45	-11.56	1 719.89	64.16	39.76	912.27	-10.91	-7.55	997.73
本模型	19.39	1 635.82	0.46	1 655.67	19.42	28.20	870.55	0.42	12.95	931.54

3 结论

(1) 将能源碳排放因子与重卡寿命和生命周期行驶里程耦合, 分阶段构建了电动重卡与柴油重卡的动态碳排放模型.

(2) 电池产生的碳排放在电动重卡生产阶段和拆解回收阶段中占比分别为 59.21% 和 96.88%, 导致电动重卡在两阶段碳排放分别为柴油重卡的 2.46 倍和 28.67 倍~29.35 倍.

(3) “2050 年净零排放(NZE)情景”、“承诺目标(APS)情景”和“既定政策(STEPS)情景”下, 两类重卡运行阶段碳排放皆占全生命周期碳排放 90% 以上, 该阶段以中间向两端辐射的方式提升了整体碳减排效益, 电力碳排放因子(以 CO_2 计)每降低 $1 \text{ g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, 电动重卡全生命周期碳排放可减少 1.74 t.

(4) 3 种情景下, 电动重卡均具有较好的碳减排效益, 碳减排效益由高到低依次为 NZE 情景、APS 情景和 STEPS 情景, 全生命周期碳减排量分别为 1 054.68、1 021.78 和 1 007.97 t, 碳减排率分别为 54.38%、52.68% 和 51.97%.

参考文献:

- [1] 冯谦, 刘保献, 杨妍妍, 等. 基于远程监测的北京市柴油车实际道路 NO_x 与 CO_2 排放特征 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(8): 4418-4426.
Feng Q, Liu B X, Yang Y Y, et al. Characteristics of actual road NO_x and CO_2 emissions from diesel vehicles in Beijing based on remote monitoring [J]. China Environmental Science, 2023, 43(8): 4418-4426.
- [2] 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.
Lv C, Zhang Z, Chen X M, et al. Study on CO_2 emission factors of road transport in Chinese provinces [J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3122-3130.
- [3] Lanz L, Noll B, Schmidt T S, et al. Comparing the leveled cost of electric vehicle charging options in Europe [J]. Nature

- Communications, 2022, **13** (1), doi: 10.1038/S41467-022-32835-7.
- [4] Zhang R S, Hanaoka T. Cross-cutting scenarios and strategies for designing decarbonization pathways in the transport sector toward carbon neutrality [J]. Nature Communications, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/S41467-022-31354-9.
- [5] Wang K X, Zavaleta V G, Li Y, et al. Life-cycle CO₂ mitigation of China's class-8 heavy-duty trucks requires hybrid strategies [J]. One Earth, 2022, **5**(6): 709-723.
- [6] Zhang X Z, Hao X, Liu Y, et al. Contribution of potential clean trucks in carbon peak pathway of road freight based on scenario analysis: a case study of China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, **379**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134669.
- [7] Khanna N, Lu H Y, Fridley D, et al. Near and long-term perspectives on strategies to decarbonize China's heavy-duty trucks through 2050 [J]. Scientific reports, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-99715-w.
- [8] Xue X Y, Li J X, Sun X, et al. Assessing decarbonization pathways of China's heavy-duty trucks in a well-to-wheels perspective [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2023, **28**(7): 862-876.
- [9] Inkinen T, Hämäläinen E. Reviewing truck logistics: solutions for achieving low emission road freight transport [J]. Sustainability, 2020, **12**(17), doi: 10.3390/su12176714.
- [10] Yang X , Nielsen C P, Song S J, et al. Breaking the hard-to-abate bottleneck in China's path to carbon neutrality with clean hydrogen [J]. Nature Energy, 2022, **7**(10): 955-965.
- [11] Zhang X Z, Lin Z H, Crawford C, et al. Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040 [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, **102**, doi: 10.1016/j.trd.2021.103152.
- [12] Gunawan T A, Monaghan R F D. Techno-econo-environmental comparisons of zero-and low-emission heavy-duty trucks [J]. Applied Energy, 2022, **308**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118327.
- [13] Gustafsson M, Svensson N, Eklund M, et al. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of heavy-duty transports: Influence of electricity carbon intensity [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, **93**, doi: 10.1016/j.trd.2021.102757.
- [14] Shamsi H, Munshed M, Tran M K, et al. Health cost estimation of traffic-related air pollution and assessing the pollution reduction potential of zero-emission vehicles in Toronto, Canada [J]. Energies, 2021, **14**(16), doi: 10.3390/en14164956.
- [15] Liu X Y, Elgowainy A, Vijayagopal R, et al. Well-to-wheels analysis of zero-emission plug-in battery electric vehicle technology for medium-and heavy-duty trucks [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(1): 538-546.
- [16] Liu F Q, Zhao F Q, Liu Z W, et al. China's electric vehicle deployment: energy and greenhouse gas emission impacts [J]. Energies, 2018, **11**(12), doi: 10.3390/en11123353.
- [17] 李利军, 张金宇, 李艳丽, 等. 雄安新区运输工具生命周期环境影响评价研究[J]. 交通节能与环保, 2022, **18**(4): 89-98.
Li L J, Zhang J Y, Li Y L, et al. Environmental impact assessment of the life cycle of transport vehicles in Xiong'an New Area [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2022, **18**(4): 89-98.
- [18] Wolff S, Seidenfus M, Brönnér M, et al. Multi-disciplinary design optimization of life cycle eco-efficiency for heavy-duty vehicles using a genetic algorithm[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **318**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128505.
- [19] Gustafsson M, Svensson N, Eklund M, et al. Well-to-wheel climate performance of gas and electric vehicles in Europe [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, **97**, doi: 10.1016/j.trd.2021.102911.
- [20] 李艳丽, 吕锦旭, 李晓越. 碳中和背景下低碳运输工具比选研究[J]. 交通节能与环保, 2021, **17**(4): 1-8, 30.
Li Y L, Lv J X, Li X Y. Comparison and selection of low-carbon transportation vehicles in the context of carbon neutrality [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, **17**(4): 1-8, 30.
- [21] Hao H, Cheng X, Liu Z W, et al. Electric vehicles for greenhouse gas reduction in China: a cost-effectiveness analysis [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, **56**: 68-84.
- [22] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan Mining Area [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [23] 庚雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气PM_{2.5}污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2284-2293.
Tuo X, Yang L X, Zhang W, et al. Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [24] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市PM_{2.5}中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2343-2354.
He B W, Nie S S, Li Y L, et al. Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [25] 唐一媛, 毛保华, 周琪, 等. 电动汽车运行阶段碳排放因子影响因素研究[J]. 交通节能与环保, 2022, **18**(3): 17-22.
Tang Y Y, Mao B H, Zhou Q, et al. Impact analysis on carbon emission factor in operations of electric vehicle [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2022, **18**(3): 17-22.
- [26] Abdul-Manan A F N, Gordillo Zavaleta V, Agarwal A K, et al. Electrifying passenger road transport in India requires near-term electricity grid decarbonisation [J]. Nature communications, 2022, **13**(1), doi: 10.1038/S41467-022-29620-X.
- [27] 付佩, 兰利波, 陈颖, 等. 面向2035的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2365-2374.
Fu P, Lan L B, Chen Y, et al. Life cycle prediction assessment of energy saving and new energy vehicles for 2035 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2365-2374.
- [28] 武光华, 李宏胜, 李飞, 等. 考虑时间相关性的电动汽车全生命周期碳排放量预测[J]. 储能科学与技术, 2022, **11**(7): 2206-2212.
Wu G H, Li H S, Li F, et al. Research on the prediction of carbon emissions in the whole life cycle of electric vehicles considering time correlation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, **11**(7): 2206-2212.
- [29] 金嘉欣, 孙世达, 王苋, 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.
- [30] Qiao Q Y, Zhao F Q, Liu Z W, et al. Electric vehicle recycling in China: economic and environmental benefits [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, **140**, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.09.003.
- [31] 宋凌珺, 葛帅, 冯莉原. 电动卡车与燃油卡车全生命周期能耗与排放对比研究[J]. 环境工程, 2017, **35**(S2): 409-413, 460.
- Song L J, Ge S, Feng L Y. Comparative life cycle energy consumption and emissions assessment of electric and diesel trucks [J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(S2): 409-413, 460.
- [32] Qiao Q Y, Zhao F Q, Liu Z W, et al. Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China[J]. Applied Energy, 2017, **204**: 1399-1411.
- [33] 胡煜晗, 靳雅娜, 张世秋. 电动汽车替代燃油车的气候和健康影响及社会成本——基于单车视角的成本效益分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, **57**(5): 916-926.
- Hu Y H, Jin Y N, Zhang S Q. Climate, Health impacts, and social costs of electric vehicles in China: a cost-benefit analysis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, **57**(5) : 916-926.
- [34] 赵子贤, 邵超峰, 陈珏. 中国省域私人电动汽车全生命周期碳减排效果评估[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(9): 2076-2085.
- Zhao Z X, Shao C F, Chen J. Effects of private electric vehicles on carbon emission reduction in China during whole life cycle [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(9): 2076-2085.
- [35] 姜运哲, 宋承斌, 周怡博, 等. 典型场景下换电重卡的技术经济性分析[J]. 工业技术经济, 2022, **41**(2): 154-160.
- Jiang Y Z, Song C B, Zhou Y B, et al. Technical and economic analysis of battery replacement heavy truck in typical scenarios[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2022, **41**(2) : 154-160.
- [36] Hawkins T R, Singh B, Majeau - Bettez G, et al. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles[J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, **17**(1): 53-64.
- [37] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2022[EB/OL]. <https://www.cec.org.cn/menu/index.html?743>, 2022-07-07.
- [38] Li S H, Li J, Li N N, et al. Evaluation of environmental impacts of traction motor production and disposal [J]. Transactions of Tianjin University, 2013, **19**(6): 413-418.
- [39] International Energy Agency. World energy outlook 2021[EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>, 2021-10-01.
- [40] International Energy Agency. World energy outlook 2022[EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, 2022-10-01.
- [41] 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 等. 中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力[J]. 环境科学, 2023, **44**(11): 5915-5923.
- Liang X M, Wu P Z, Chen L G, et al. Emission trends and reduction potential of VOCs from printing industry in China [J]. Environmental Science, 2023, **44**(11): 5915-5923.
- [42] 袁潮清, 胡玲, 张玉龙. 基于EBC框架的中国光伏产业减排情景分析[J]. 系统工程, 2023, **41**(6): 52-61.
- Yuan C Q, Hu L, Zhang Y L. Scenario analysis of China's photovoltaic industry emission reduction based on EBC framework [J]. Systems Engineering, 2023, **41**(6): 52-61.
- [43] 李晨曦, 伍浩松. 国际能源署发布新版能源展望报告[J]. 国外核新闻, 2022, (11): 28-31.
- Yeow L W, Yan Y T, Cheah L. Life cycle greenhouse gas emissions of alternative fuels and powertrains for medium-duty trucks: a Singapore case study [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, **105**, doi: 10.1016/j.trd.2022.103258.
- [44] Yang L, Hao C X, Chai Y N. Life cycle assessment of commercial delivery trucks: diesel, plug-in electric, and battery-swap electric [J]. Sustainability, 2018, **10**(12), doi: 10.3390/su10124547.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, et al. (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, et al. (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, et al. (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, et al. (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, et al. (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, et al. (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, et al. (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, et al. (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, et al. (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, et al. (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, et al. (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, et al. (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, et al. (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality : A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, et al. (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, et al. (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, et al. (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, et al. (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, et al. (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, et al. (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, et al. (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, et al. (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, et al. (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, et al. (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, et al. (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, et al. (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, et al. (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, et al. (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, et al. (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, et al. (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, et al. (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, et al. (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, et al. (2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, et al. (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China : A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, et al. (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, et al. (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, et al. (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, et al. (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, et al. (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, et al. (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, et al. (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals : A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, et al. (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, et al. (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, et al. (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, et al. (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, et al. (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, et al. (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, et al. (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, et al. (3119)