环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第45卷 第5期
2024年 5月 15日

目 次

第45卷第5期
2024年5月
环 境 科 学
Environmental Science
Vol.45 No.5
May，2024

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CO_2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.hjkx.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 (CO_2)，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 1054.68，1021.78，and 1007.97 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CO_2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车辆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.

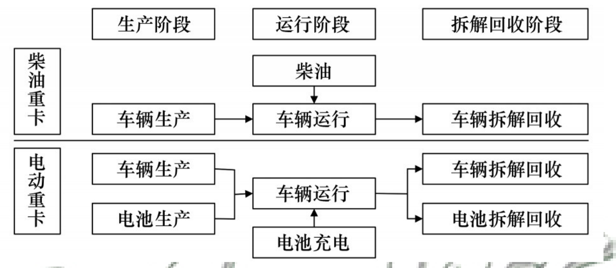


图1 生命周期碳排放阶段划分

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.

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

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

式中，$C_{\mathrm{ep},n}$为目标年n电力碳排放因子[以CO_2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CO_2计，kg·(kW·h)$^{-1}$]；$C_{\mathrm{dp},n}$为目标年n的柴油碳排放因子(以CO_2计，kg·L^{-1})；$C_{\mathrm{dp},y}$为基准年y的柴油碳排放因子(以CO_2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：

$$E_{\mathrm{dhtb}} = \sum M_{\mathrm{d}} K_{id} C_{id} \tag{3}$$

式中，E_{dhtb}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CO_2计，t·t^{-1}).

电动重卡生产阶段碳排放模型：

$$E_{\mathrm{ehtb}} = E_b + E_{\mathrm{ehtv}} \tag{4}$$

其中：$E_{\mathrm{b}} = B_{\mathrm{ht}} \cdot C_{\mathrm{htb}}$，$E_{\mathrm{ehtv}} = \sum M_{\mathrm{e}} K_{ie} C_{ie}$

式中，E_{ehtb}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CO_2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CO_2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：

$$E_{\mathrm{dhto},n} = \frac{L_{\mathrm{d},n} \cdot D_{\mathrm{ad}} \cdot C_{\mathrm{dp},n}}{100 \times 1\,000} \tag{5}$$

式中，$E_{\mathrm{dhto},n}$为n年柴油重卡运行阶段的年CO_2排放量(t)；$L_{\mathrm{d},n}$为n年柴油重卡年运行里程(km)；D_{ad}为

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

电动重卡运行阶段年碳排放模型：

$$E_{ehto,n}=\frac{L_{e,n}\cdot D_{ae}\cdot C_{ep,n}\cdot \mathrm{PMP}_1}{100\times 1\,000} \tag{6}$$

其中：$\mathrm{PMP}_1=\dfrac{1}{\eta\cdot(1-\mathrm{LR})\cdot(1-\mathrm{PR})}$

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[kW·h·(100 km)$^{-1}$]；$C_{ep,n}$为n年电力碳排放因子[以CO_2计，kg·(kW·h)$^{-1}$]；PMP_1为充电边际发电量因子，即电动重卡充电1 kW·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：

$$E_{dhtr,n}=0.277\,8\cdot W_{dsr}\cdot M_d\cdot \mathrm{PMP}_2\cdot C_{ep,n} \tag{7}$$

其中：$\mathrm{PMP}_2=\dfrac{1}{(1-\mathrm{LR})\cdot(1-\mathrm{PR})}$

式中，$E_{dhtr,n}$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(MJ·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 kW·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：

$$E_{ehtr,n}=0.277\,8\cdot(W_bM_b+W_{esr}M_e)\cdot \mathrm{PMP}_2\cdot C_{ep,n} \tag{8}$$

式中，$E_{ehtr,n}$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(MJ·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(MJ·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$\gamma_d<S_d$

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

其中：

$$E_{dhto,X+R_d(\gamma_d)}=\frac{\left[L_d-L_{d,n}\cdot R_d(\gamma_d)\right]\cdot D_{ad}\cdot C_{dp,X+R_d(\gamma_d)}}{100\times 1\,000}$$

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)；$E_{dhto,X+R_d(\gamma_d)}$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，kg·L^{-1}).

②$\gamma_d=S_d$

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

其中：

$$E_{dhto,X+R_d(S_d)}=\frac{\left[L_d-L_{d,n}\cdot R_d(S_d)\right]\cdot D_{ad}\cdot C_{dp,X+R_d(S_d)}}{100\times 1\,000}$$

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，kg·L^{-1}).

③$\gamma_d>S_d$

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

其中：

$$E_{\mathrm{dhto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{d}})}=\frac{\left[S_{\mathrm{d}}-R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{d}})\right]\cdot L_{\mathrm{d},n}\cdot D_{\mathrm{ad}}\cdot C_{\mathrm{dp},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{d}})}}{100\times 1\,000}$$

电动重卡全生命周期碳排放模型：

①$\gamma_{\mathrm{e}}<S_{\mathrm{e}}$

$$E_{\mathrm{te}}=E_{\mathrm{ehtb}}+E_{\mathrm{ehto}}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}=E_{\mathrm{ehtb}}+\sum_{i=X}^{X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})-1}E_{\mathrm{ehto},i}+E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})} \tag{12}$$

其中：

$$E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}=\frac{\left[L_{\mathrm{e}}-L_{\mathrm{e},n}\cdot R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})\right]\cdot D_{\mathrm{ae}}\cdot C_{\mathrm{ep},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}\cdot \mathrm{PMP}_1}{100\times 1\,000}$$

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)；$E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})$年电动重卡拆解回收产生的碳排放(t)；$E_{\mathrm{ehto},i}$为$i$年电动重卡年运行碳排放(t)；$E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})$年电动重卡年运行碳排放(t)；$C_{\mathrm{ep},X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})$年的电力碳排放因子[以$CO_2$计，kg·(kW·h)$^{-1}$]．

②$\gamma_{\mathrm{e}}=S_{\mathrm{e}}$

$$E_{\mathrm{te}}=E_{\mathrm{ehtb}}+E_{\mathrm{ehto}}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}=E_{\mathrm{ehtb}}+\sum_{i=X}^{X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})-1}E_{\mathrm{ehto},i}+E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})} \tag{13}$$

其中：

$$E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}=\frac{\left[L_{\mathrm{e}}-L_{\mathrm{e},n}\cdot R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})\right]\cdot D_{\mathrm{ae}}\cdot C_{\mathrm{ep},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}\cdot \mathrm{PMP}_1}{100\times 1\,000}$$

式中，$E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})$年电动重卡拆解回收产生的碳排放(t)；$E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})$年电动重卡年运行碳排放(t)；$C_{\mathrm{ep},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}$为$X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})$年的电力碳排放因子[以$CO_2$计，kg·(kW·h)$^{-1}$]．

③$\gamma_{\mathrm{e}}>S_{\mathrm{e}}$

$$E_{\mathrm{te}}=E_{\mathrm{ehtb}}+E_{\mathrm{ehto}}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}=E_{\mathrm{ehtb}}+\sum_{i=X}^{X+R_{\mathrm{d}}(\gamma_{\mathrm{e}})-1}E_{\mathrm{ehto},i}+E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}+E_{\mathrm{ehtr},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})} \tag{14}$$

其中：

$$E_{\mathrm{ehto},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}=\frac{\left[S_{\mathrm{e}}-R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})\right]\cdot L_{\mathrm{e},n}\cdot D_{\mathrm{ae}}\cdot C_{\mathrm{ep},X+R_{\mathrm{d}}(S_{\mathrm{e}})}\cdot \mathrm{PMP}_1}{100\times 1\,000}$$

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：

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

碳减排率模型：

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

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℃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
发电量占比/%	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		$8.539\,0\times10^{12}$	$1.113\,6\times10^{13}$	$1.434\,2\times10^{13}$	$1.095\,8\times10^{13}$	$1.610\,9\times10^{13}$	$1.023\,2\times10^{13}$	$1.532\,9\times10^{13}$

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.

$$G_{i,n} = G_{i,2021} \cdot (1 + \alpha_i)^{n-2021}, \quad 2021 \leqslant n \leqslant 2030$$
$$G_{i,n} = G_{i,2030} \cdot (1 + \alpha_i)^{n-2030}, \quad 2030 \leqslant n \leqslant 2050 \tag{17}$$

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

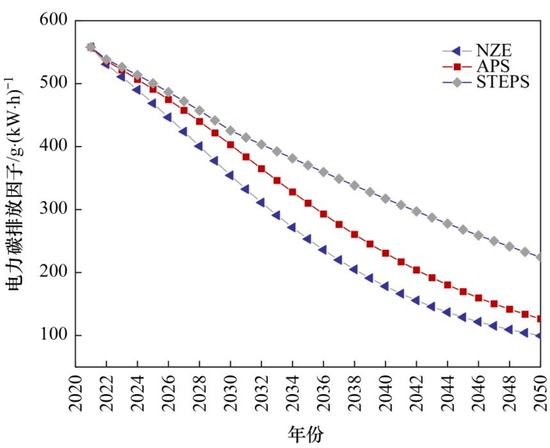
同理用于Zhang等[11]对柴油机每5 a下降3%碳排放量的预测，使用2021年柴油碳排放因子计算2026年柴油碳排放因子，进而通过式(2)可得柴油碳排放因子年下降率为0.61%.

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，



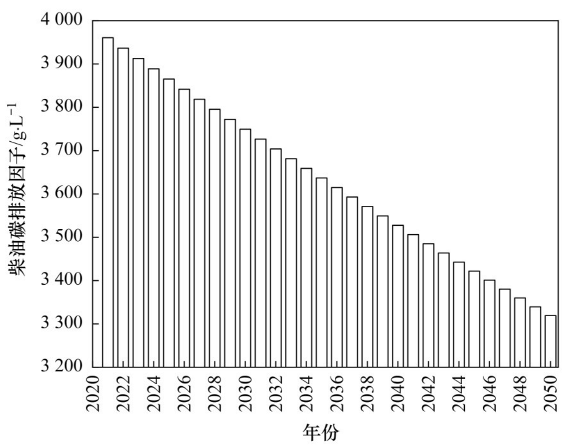
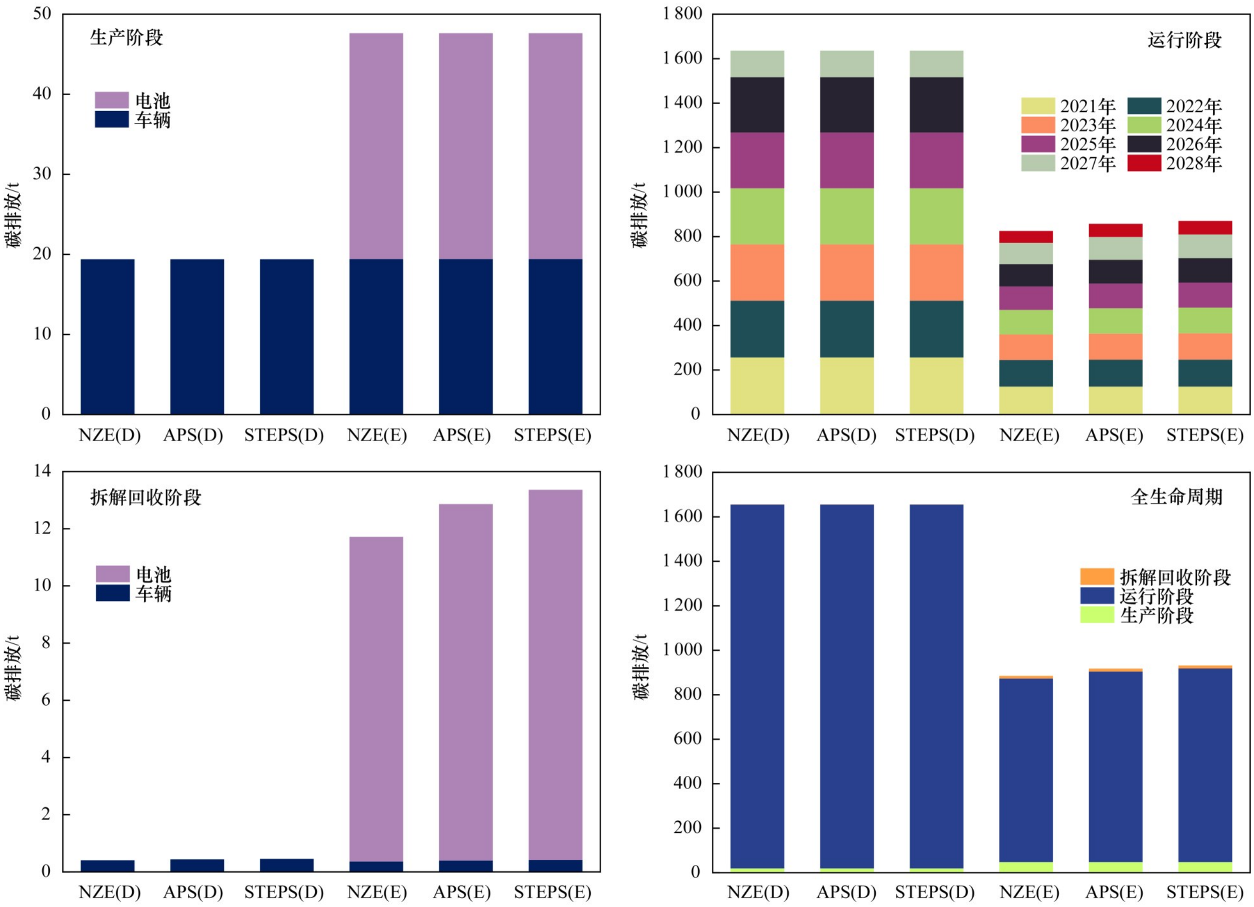


图2 2021~2050年电力和柴油碳排放因子变化趋势

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CO_2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.



D表示柴油重卡,E表示电动重卡

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

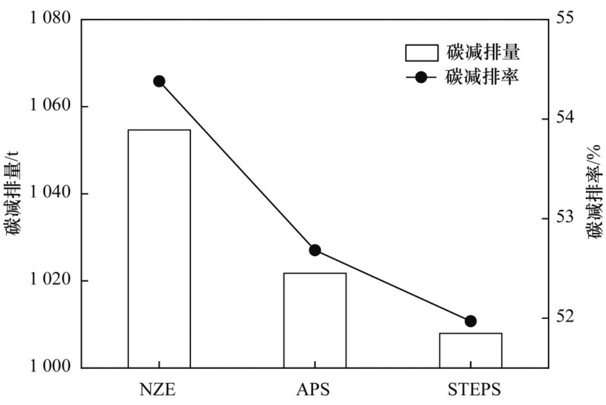


图4 “单车替代”碳减排效益

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在拆解回收阶段中占主导地位.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 kg·kg^{-1}和8.10 kg·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 g·(kW·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 levelized 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 CO_2 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, Brönner 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] 庹雄，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.

[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.

[44] 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.

[45] 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.

HUANJING KEXUE Vol. 45 No. 5
Environmental Science (monthly) May 15, 2024

CONTENTS