

doi:10.3969/j.issn.1673-6478.2022.04.018

雄安新区运输工具生命周期环境影响评价研究

李利军¹, 张金宇¹, 李艳丽¹, 吕锦旭²

(1.石家庄铁道大学经济管理学院, 河北 石家庄 050043; 2.中国铁路北京集团有限公司邯郸车务段, 河北 邯郸 056001)

摘要: 本文基于生命周期评价方法, 从燃料周期、道路周期和车辆周期三个角度对雄安新区电力机车、天然气重卡、燃油重卡、纯电动重卡和混合动力重卡的环境影响进行了计算对比, 发现电力机车是最为绿色的运输工具, 天然气重卡在四类重卡中是当前绿色运输工具。通过分析电力结构敏感性发现, 电力机车和纯电动重卡敏感性最高, 随着电力结构的优化, 电力机车仍为最绿色的运输工具, 而纯电动重卡将取代天然气重卡的位置。通过分析车辆寿命和再生材料敏感性发现, 五类运输工具有着不同的敏感性。根据以上计算结果, 为雄安新区移动污染源控制政策和绿色物流发展提出建议: 电力机车始终为最绿色的运输工具, 在运输中应优先选择电力机车。四类重卡中天然气重卡为当前绿色运输工具, 纯电动重卡为未来绿色运输工具, 所以在考虑运输的便利性和门到门的衔接运输中使用天然气重卡, 同时布局纯电动重卡的发展, 随着电力结构的优化, 逐步向纯电动重卡偏移。可以通过增加运输工具使用寿命以及增加车辆和道路再生材料使用比例来降低运输工具生命周期内的能耗和排放。

关键词: 运输工具; 生命周期; 环境影响

中图分类号: U469.7

文献标识码: A

文章编号: 1673-6478 (2022) 04-0089-10

Environmental Impact Assessment of the Life Cycle of Transport Vehicles in Xiong'an New Area

LI Lijun¹, ZHANG Jinyu¹, LI Yanli¹, LV Jinxu²

(1.School of economics and management, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang Hebei, 050043, China; 2.Handan train depot of China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd., Handan Hebei, 056001, China)

Abstract: Based on the life cycle assessment method, the environmental impacts of electric locomotive, natural gas heavy truck, fuel heavy truck, pure electric heavy truck and hybrid heavy truck in Xiong'an New Area are calculated and compared from the perspectives of fuel cycle, road cycle and vehicle cycle. It is found that electric locomotive is the most green means of logistics transportation, and natural gas heavy truck is the current green logistics transportation tool among the four types of heavy trucks. Through the sensitivity analysis of power structure, it is found that the sensitivities of electric locomotive and pure electric heavy truck are the highest. With the optimization of power structure, electric locomotive is still the greenest means of transportation, and pure electric heavy truck will replace natural gas heavy truck. Through the sensitivity analysis of vehicle life and recycled materials, it is found that the five types of transport have different sensitivities. According to the above calculation results, for the control of mobile carbon emission policy and the development of green logistics in Xiong'an New Area, the paper puts forward that electric locomotive is always the greenest means of logistics transportation, and electric locomotive should be preferred in transportation. Among the four types of heavy trucks, the natural gas heavy truck is the current green transportation tool, and the pure electric heavy truck is the

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 河北省省属高校基本科研业务费研究项目资助 (SCT202005)

作者简介: 李利军 (1971-), 男, 河北石家庄人, 博士, 教授, 研究方向为环境经济、生态环境管理。(lilaoshijx@126.com)

通讯作者: 张金宇, (1996-), 女, 河北唐山人, 研究方向为环境经济。(1045499492@qq.com)

future green logistics transportation tool. Therefore, considering the convenience and door-to-door connection of transportation, hybrid heavy truck can be used and the development of pure electric heavy truck also can be laid out. With the optimization of power structure, it could be gradually shifted to pure electric heavy truck. Energy consumption and emissions during the life cycle of means of transport can be reduced by increasing the service life of vehicles and increasing the proportion of vehicles and road recycled materials.

Key words: transport; environmental impact; life cycle

0 引言

2018年,《河北雄安新区规划纲要》出台,明确提出坚持绿色低碳发展,严格控制碳排放,推广绿色低碳的生产生活方式和城市建设运营模式^[1]。《河北雄安新区总体规划(2018—2035年)》明确提出,改善大气环境质量,严格控制移动源污染,施行国内最严格的机动车排放标准^[1]。根据雄安新区环境政策,目前已将重污染行业移出雄安新区,未来雄安新区经济发展主要依赖第三产业。2019年我国物流行业生产总值占第三产业的8.4%,并且处于每年递增的状态^[2]。《河北雄安新区总体规划》明确提出开展绿色物流,大气中新增温室气体量有56.6%是来自于化石燃料的燃烧,2017年全国石油供给量为58 801万吨,有49.74%的石油用于交通运输,我国物流行业消耗的柴油量为11 167万吨,占柴油消费总量的68.04%,消耗的汽油量为6 068万吨,占汽油消费总量的46.48%^[2]。运输工具将能源转化为动力的过程中产生大量的温室气体和污染气体,成为雄安绿色低碳目标实现和绿色物流发展的障碍之一。应在物流运输中选用绿色低碳的运输工具,降低物流运输中的碳排放,促进雄安绿色低碳目标的实现和绿色物流的发展。

本文基于生命周期评价方法,使用混合生命周期清单方法对电力机车、柴油重卡、纯电动重卡、天然气重卡和混合动力重卡的排放进行计算,利用EPS97生命周期影响评价方法对物流运输工具产生的环境影响进行评价,通过评价结果直观地比选出绿色低碳的运输工具,通过对电力结构、再生材料使用和车辆寿命进行敏感性分析,比选出未来雄安新区绿色运输工具并寻找降低运输工具排放的方向。

1 建立生命周期环境影响评价模型

1.1 研究对象

2018年保定市货物运输总量为514.6亿吨,其中铁路运输、公路运输、水运、航空运输、管道运

输分别占7.83%、76.96%、13.58%、0.013%、1.655%^[3]。雄安是内陆城市,不临海,无水运。航空运输适合价值高的货物,普通货物运输不考虑航空运输。管道运输局限性大,只适合特定气体、液体物品的运输,顾不考虑。所以在雄安普通货物运输方式主要是公路运输和铁路运输。

铁路运输中主要有电力机车和内燃机车,在运输中电力机车使用占比为88.1%,内燃机车使用占比为11.9%,说明在运输中主要使用电力机车,并且随着发展,内燃机车所占比重在逐年下降,考虑雄安新区目标与政策,在未来雄安铁路建设使用中电力机车使用比例会比平均水平更高,顾只考虑铁路运输中的电力机车。公路运输中轻卡和中卡运量小,运距短,只有重卡与铁路运输有可比性。重卡根据使用的动力燃料可以分为柴油重卡、纯电动重卡、天然气重卡和油气混合动力重卡,选用这四类重卡作为公路运输的研究对象。

电力机车使用《中国铁道年鉴》统计的平均数据,选取四类重卡中具有代表性的车型作为研究对象,车辆油耗使用统计的平均数据,车辆参数见表1。

表 1 车辆参数

Tab.1 Vehicle parameters

	柴油重卡	纯电动重卡	天然气重卡	混合动力重卡
车型	一汽解放新 J9P 重卡	陕汽重卡德龙新 M3000	中国重汽 HOWO T7H 重卡	-
整车重量/t	8.87	10	9.5	8.87
总质量/t	25	25	25	25
牵引质量/t	40	38.355	40	40
排量/L	11.05	-	12.42	-

1.2 研究内容

本文主要研究运输工具的能耗和排放,排放物分为温室气体和常规气体污染物,能源消耗包括一次能源消耗(如化石能源消耗)和二次能源消耗

(如电力), 由于各类气体的排放主要是由于化石燃料的燃烧引起的, 所以本文的能耗主要为化石能源消耗, 为方便对比, 以其低热值表示的能量表示。温室气体主要是指二氧化碳、一氧化二氮等具有温室效应的气体。常规气体污染物主要包括挥发性有机化合物(VOC)、一氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、颗粒物。

1.3 功能单位

目前已有的研究主要是对比公路运输中的两种或多种货车车辆的能耗和排放, 以每千米的能耗和排放作为功能单位, 对于最大货运量、总质量、行驶里程和能耗类似的车辆之间的对比是可行的。但是铁路运输中火车的特点是运量大, 这意味着火车运行单位距离需要的能耗更大, 如果单纯以每千米的排放和能耗作为功能单位与重卡对比, 显然是有失公允的, 为保证重卡与电力机车的可比性, 将运输工具每千米的排放和能耗分到运输的货物中, 即计算运输工具每吨千米的能耗和排放, 即以吨千米($t \cdot km$)作为功能单位。

1.4 研究边界

由于汽车在生产制造和报废中产生的排放较少, 公路是由多方主体使用, 难以将道路建设中的排放均摊到车辆上, 所以对车辆生命周期内排放的研究主要集中在燃料的生产使用上。但是火车体积庞大, 在火车制造中会产生大量的排放和消耗大量的能源, 这些排放和能耗不可忽略。铁路在建设过程中需要消耗大量的资源, 无论是在材料生产阶段还是在材料运输阶段, 都会产生大量的排放, 并且铁路是专门供火车使用的, 所以铁路建设中的能耗和排放也应归属到火车上, 所以为使计算结果具有可比性, 将车辆、燃料、道路在生产制造建设、使用、维护和报废中的能耗和排放作为车辆生命周期内的能耗和排放。

所以从车辆周期、燃料周期和道路周期角度出发, 计算三者在生产阶段、使用阶段、维护阶段、报废阶段的能耗和排放作为运输工具能耗和排放。本文研究与该运输工具生命周期系统直接相关的能耗和排放, 不考虑间接的能耗和排放(如生产设备的制造、厂房的建设等)。

1.5 生命周期清单数据

根据《中国能源统计年鉴 2019》可以得到原油、原煤和天然气的开采效率, 柴油能源转换效率和燃料投入比例, 见表 2, 表 3。

根据《中国电力统计年鉴》, 可以得出我国电力结构和相应的发电效率, 见表 4。

表 2 原油、煤炭和天然气开采效率^[4]

Tab.2 Extraction efficiency of crude oil, coal and natural gas^[4]

原料	原煤	原油	天然气
能源开采效率 /%	98.7	96.9	91.2
原煤 /%	53.78	6.09	1.99
原油 /%	0.003	49.12	0
汽油 /%	0.33	0.88	0.29
柴油 /%	7.11	4.07	1.34
燃料油 /%	0.01	2.16	0.71
天然气 /%	4.76	0	83.29
电力 /%	34	37.68	12.38

表 3 柴油能源转换效率和燃料投入比例^[4]

Tab.3 Diesel energy conversion efficiency and fuel input ratio^[4]

能源	能源转换效率 /%	燃料投入比例				
		原煤 /%	天然气 /%	燃料油 /%	汽油 /%	电力 /%
柴油	86.49	51.09	11.49	1.89	0.12	35.42

表 4 电力结构^[4]

Tab.4 Power structure^[4]

发电方式		比例结构 /%		发电效率 /%
火电		70.99		
—	燃煤	—	91.09	34.5
—	燃气	—	4.45	45.0
—	燃油	—	0.06	32.8
水电		18.59		
核电		3.87		35
风电		4.73		
太阳能		1.82		

我国各类运输工具材料分布情况见表 5。

表 5 车辆主体材料分布

Tab.5 Material distribution of vehicle body

类型	柴油重卡	电动重卡	天然气重卡	混合动力重卡
钢 /%	63.37	67.85	62.3	63.37
铸铁 /%	12.25	2.87	10.9	12.25
塑料 /%	8.95	9.46	11.1	8.95
铸铝 /%	4.95	5.98	4.6	4.95
橡胶 /%	2.69	2.34	2.3	2.69
玻璃 /%	2.63	3.35	2.9	2.63
锻造铝 /%	2.19	0.92	2.2	2.19
铜 /%	1.5	4.53	1.9	1.5
其他 /%	1.47	2.7	1.9	1.47

建设 1 km 铁路和高等级公路所耗材料和能耗见表 6, 表 7。

表 6 建设 1 km 铁路材料消耗^[5]Tab.6 Material consumption for construction of 1 km railway^[5]

材料 / (t/km)	消耗量 /kg
水泥	3×10^{-3}
电力	7.12×10^{-4}
型钢	2.17×10^{-4}
钢轨	1.72×10^{-4}
砂	8.56×10^{-5}
碎石	4.95×10^{-5}
柴油	2.22×10^{-5}
无缝钢管	1.16×10^{-5}
石灰	9.23×10^{-6}
钢丝	8.36×10^{-6}
钢板	8.31×10^{-6}
膨润土	6.47×10^{-6}

表 7 建设 1 km 公路材料消耗^[6]Tab.7 Material consumption for construction of 1 km highway^[6]

材料	沥青路面			水泥路面	
	结构 1	结构 2	结构 3	结构 1	结构 2
沥青 /t	234.91	322.74	478.29	0	0
水泥 /t	601.33	400.08	0	1 256.92	1 328.36
集料 /t	21 345.69	18 020.44	10 013.85	22 500.81	23 094.58
乳化沥青 /kg	17 345	23 463.75	23 223.13	0	0
钢材 /kg	0	0	0	42 827.66	47 631.59
矿渣 /t	0	0	0	617.76	665.28
搅拌 / (MJ 电力)	2 230 992	3 160 100	4 451 729	36 838.27	38 306.97
运输 / (MJ 柴油)	177 772.6	150 284.6	84 207.4	195 542.74	201 284.53
铺摊压实 / (MJ 柴油)	323 244.9	287 783.2	158 579.5	315 784	319 782.1

1.6 环境影响评价模型

EPS97 方法将影响分为能源与材料消耗、污染和损害三大类，污染类型又分为酸化、气候变化、富营养化、新鲜水水生生态毒、人体毒性、土地利用、海洋生态毒性、海洋沉积毒性、光化学烟雾、平流层臭氧消耗和陆地生态毒性等环境影响类型。根据运输工具在生命周期内的能耗和排放产生的影响，选取化石能耗、酸化 (AP)、富营养化 (EP)、人体毒性 (HTP)、温室效应 (GWP)、光化学烟雾 (POCP) 和气溶胶潜力 (AQP) 七类影响因素。

特征化指将各类气体所造成的影响归入其环境影

响类型中去，以某类气体当量表示，特征化模型为：

$$AP = \sum AP_i \times \rho_i \quad (1)$$

式中： AP 为环境影响类型（某类气体当量）， AP_i 为造成该环境影响的第 i 类气体的重量，kg； ρ_i 为第 i 类气体的环境影响特征化因子。

为使特征化后的数据在数值上有可比性，使加权后的计算结果不受各影响因素大小的影响，对特征化后的数据进行归一化处理，归一化的方法使用 EPS97 中的方法。

$$E_i = EP_i / S_i \quad (2)$$

式中： E_i 为第 i 类影响因素归一化后的结果； EP_i 为第 i 类影响因素特征化后的结果； S_i 为第 i 类影响因素的归一化标准值。

根据 EPS97，以当地人均产生的环境影响作为基准值，计算公式为：

$$S_j = \frac{\sum_i (m_i \times ODP_i)}{N} \quad (3)$$

式中： S_j 为第 j 类影响类型的归一化标准值； m_i 为某地区内第 i 种气体的排放量； ODP_j 为第 i 种气体的第 j 种影响类型的当量因子； N 为所选区域内的人口数量。

在生命周期影响评价中，加权是一步可选的步骤，这是因为权重是基于价值的，而非科学的，得出的结果是主观的，客观性不强，但是绿色运输工具是一个多指标的问题，五类运输工具在各类环境影响中各有优劣，无法直接对各类运输工具产生的环境影响进行综合的评价对比。为了直观、综合地对比各运输工具产生的各类环境影响，对各影响类型进行加权，从而根据量化结果比选运输工具，使用 EPS97 中基于不同影响类别的权重系统：

$$P_i = X_{re} / X_{tar} \quad (4)$$

式中： P_i 为第 i 类影响类型的权重； X_{re} 为当年影响类型的值； X_{tar} 为影响类型 i 的目标。

2 运输工具生命周期清单分析

2.1 能耗对比分析

五类运输工具中每吨公里能耗从高到低依次为纯电动重卡、天然气重卡、油气混合动力重卡、柴油重卡和电力机车，见图 1。这五类运输工具的能耗都集中在了燃料周期，除了电力机车由于道路周期建设中材料和能源消耗大导致燃料周期比重只有 64.46% 外，其他重卡燃料周期比重都在 80% 以上。电力机车能耗最小主要是由电力机车单次装载量大、行驶里程大导致的。而纯电动重卡的能耗最高主要

是由于处于上游的发电过程效率低, 只有 34%。

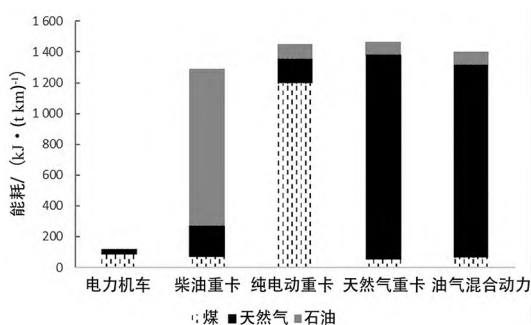


图 1 运输工具化石能耗对比图

Fig.1 Comparison of fossil energy consumption of transportation tools

从能耗角度看, 电力机车的能耗是最低的, 只有 138.26 kJ/(t·km), 其次为柴油重卡, 为 1324.17 kJ/(t·km), 从节能和便利程度上考虑, 电力机车和柴油机车无疑是最优选择。但是从我国化石燃料对外依赖程度来看: 石油进口比重为 71.5%, 液化天然气进口比重为 100%, 而我国煤炭储备丰富, 所以以电力为基础的电力机车和纯电动重卡无疑是最优选择, 可以降低我国石油和天然气对外依赖程度, 其石油和天然气消耗比重小, 主要消耗煤炭, 并且随着我国电力结构的优化, 发电效率会进一步提高, 使 WTP 阶段的能耗降低, 从而使其生命周期内的能耗进一步降低。

2.2 温室气体对比分析

五类运输工具中, 电力机车每吨千米的温室气体排放量最低, 只有 13.407 gCO₂ eq, 纯电动货车最高, 每吨千米到达了 132.426 gCO₂ eq, 其次为油气混合动力重卡、天然气重卡和柴油重卡, 分别为 90.65、74.96 和 96.65 gCO₂ eq, 这与三类运输工具的能耗情况类似, 见图 2。

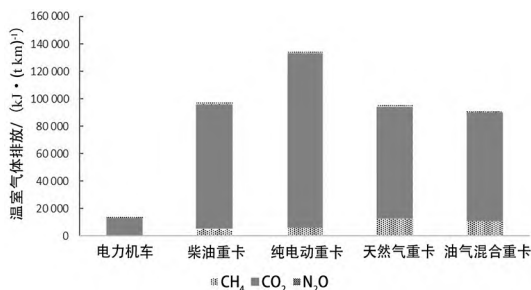


图 2 温室气体排放对比分析

Fig.2 Comparative analysis of greenhouse gas emissions

各类运输工具温室气体的排放主要集中在燃料阶段, 电力机车、柴油重卡、纯电动重卡、天然气

重卡和混合动力重卡的 WTW 阶段的贡献率分别达到了 56.65%、89.43%、85.80%、89.37% 和 88.73%。四类重卡的车辆周期和道路周期温室气体贡献率低, 分别在 6% 和 4% 以下, 这主要是由于公路周转量大。电力机车中车辆周期温室气体贡献率可以忽略不计, 都在 1% 以下, 这主要是由于电力机车运输量大、运输距离远。从碳减排角度看, 根据五类重卡温室气体排放排名, 电力机车和混合动力重卡是最优选择。

2.3 污染气体对比分析

五类运输工具 VOC 的排放从小到大依次为电力机车、混合动力重卡、天然气重卡、纯电动重卡和柴油重卡。电力机车 VOC 的排放主要集中在道路周期, 主要是由于铁路建设中消耗大量的水泥和钢材, 生产这些材料的过程中产生大量的 VOC。四类重卡的 VOC 排放最多的阶段为燃料周期, 其次便为车辆的制造过程, 公路建设过程的排放仅占 6%。燃料周期中由于柴油燃烧并不充分, 所以产生了挥发性有机物, 并且挥发性有机物在车辆百公里的排放中占比小, 所以在车辆尾气处理装置中并不处理挥发性有机物, 这导致柴油重卡的挥发性有机物排放量最高并且燃料周期对运输工具挥发性有机物排放的贡献最高, 达到了 73.6%。纯电动重卡燃料周期中的排放和天然气重卡、混合动力重卡类似, 但是纯电动重卡的动力电池的制造阶段会进行多种化学反应, 产生大量 VOC, 这导致纯电动重卡在车辆周期的 VOC 排放是最高的, 从而使纯电动重卡生命周期 VOC 排放高于天然气重卡和混合动力重卡。

五类运输工具中 CO 的排放从小到大依次为电力机车、纯电动重卡、混合动力重卡、天然气重卡和柴油重卡, 柴油重卡生命周期内的 CO 排放最大, 燃料周期对柴油重卡生命周期内 CO 的排放贡献最大, 达到了 60.18%, 而其他三类重卡贡献最大的阶段都是道路周期或者车辆周期, 这主要是由于柴油在发动机内的燃烧效率低, 碳无法完全氧化, 生成大量的 CO。天然气在发动机内的燃烧是雾化状态, 氧化效率达到了 99%; 在发电过程中发电厂会对排放气体进行处理, 将 CO 氧化为 CO₂, 并且处理装置的效率远远高于柴油重卡的尾气处理装置, 这导致电力机车、天然气重卡和纯电动重卡 CO 排放远远低于柴油重卡, 并且其排放比重向道路周期或车辆周期偏移。电力机车 90.09% 的 CO 排放集中在道路周期, 这是由于铁路建设中使用大量的钢材和水泥, 生产这些材料会产生大量的 CO 排放。

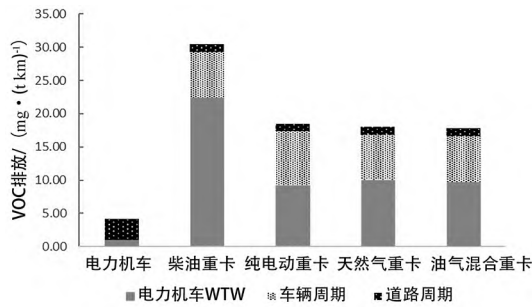


图3 VOC排放对比

Fig.3 Comparison of VOC emission

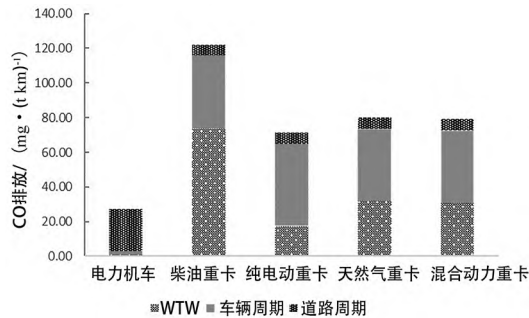


图4 CO排放对比

Fig.4 Comparison of CO emission

五类运输工具中 NO_x 的排放从小到大依次为电力机车、天然气重卡、混合动力重卡、纯电动重卡、柴油重卡，电力机车的 NO_x 主要集中在道路周期和燃料周期，分别为 61.7% 和 36.16%，四类重卡的 NO_x 的排放主要集中在燃料周期。柴油重卡 NO_x 排放量最大，是纯电动重卡和天然气重卡的 2~3 倍，燃料周期中 NO_x 的排放占比最大，达到了 93.08%，这是由于柴油重卡含有大量的氮元素，在柴油燃烧过程中氮元素被氧化为 NO_x ，从而排放大量的 NO_x 。天然气中只含有微量的氮元素，所以 NO_x 排放最低。纯电动重卡 NO_x 在 WTW 阶段与混合动力重卡排放类似，但是其车辆周期 NO_x 贡献率最高，达到了 17.24%，其车辆周期的排放也远高于柴油重卡和天然气重卡，这是由于纯电动重卡的动力电池生产过程复杂，发生多种化学反应，导致 NO_x 排放高。

五类运输工具生命周期内颗粒物排放量从小到大依次为电力机车、混合动力重卡、天然气重卡、柴油重卡和纯电动重卡。燃料周期对纯电动重卡的颗粒物排放贡献最大，贡献率为 77.47%，纯电动重卡颗粒物排放量最大是由于其在发电过程主要依赖于煤炭燃烧，从而产生大量颗粒物。电力生产的颗粒物排放在全类能源中也是最高的，其排放的 60% 的颗粒物直径大于 2.5 微米。柴油重卡的排放主要集中在 WTW 阶段和车辆周期阶段，并且主要为

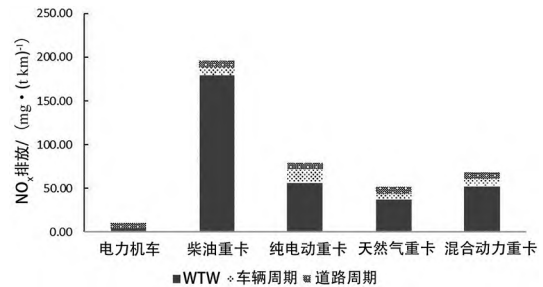
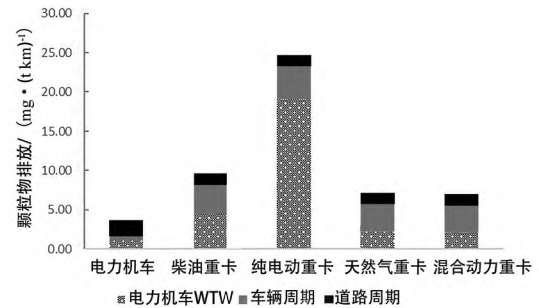
图5 NO_x排放对比Fig.5 Comparison of NO_x emission

图6 颗粒物排放对比

Fig.6 Comparison of particulate emission

$\text{PM}_{2.5}$ ，达到了 68.11%。天然气重卡和混合动力重卡的排放主要集中在车辆周期，这是由于这两类重卡在燃料周期排放的颗粒物少，所以颗粒物排放比重往道路周期偏移。电力机车的颗粒物排放主要集中在道路周期，这是由于道路建设中的钢材和水泥在生产时产生大量的颗粒物。

五类运输工具生命周期内 SO_x 的排放量从小到大依次为电力机车、混合动力重卡、天然气重卡、柴油重卡和纯电动重卡。纯电动重卡 SO_x 的排放主要集中在 WTW 阶段，该阶段 SO_x 的排放占比为 89.2%，车辆周期占比不高，但是该阶段 SO_x 的排放在全类运输工具中也是最高的，这说明纯电动重卡的排放主要是由 WTW 阶段决定的，但是车辆周期的排放也不能忽略。电力机车 SO_x 排放最小，并且其排放主要集中在燃料周期和道路周期，占比分别为 59.11% 和 37.95%。随着车辆电气化程度的增加，燃料周期 SO_x 的排放比重也在增加。天然气中的主要元素是碳和氢，硫含量极低，根据《车用柴油 (VI)》(GB19147—2016)，柴油中的硫含量虽低于 10 ppm，但也略高于天然气，这导致柴油重卡在燃料周期中的排放略高于天然气重卡以及柴油重卡和天然气重卡燃料周期中的排放在全生命周期中 SO_x 的排放比重低于 50%，而车辆阶段中钢铁材料生产会产生大量的 SO_x ，这使得这三类重卡的 SO_x 的排放主要集中在车辆周期。

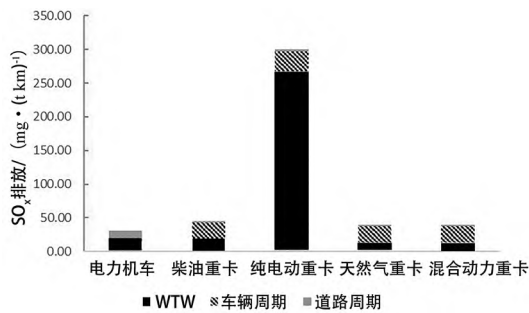


图 7 SO_x 排放对比

Fig.7 Comparison of SO_x emission

电力机车在生命周期中各类污染气体的排放都是最低的,除了 SO_x 的排放略低于其他重卡,其他污染气体的排放都远远低于其他重卡。各类重卡相比各有优劣:纯电动重卡 CO 的排放最少,但 SO_x 和颗粒物的排放是最高的;混合动力重卡在 VOC、颗粒物和 SO_x 的排放是最少的,但其 NO_x 的排放较高;天然气重卡在 NO_x 是最少的,SO_x、VOC 和颗粒物的排放略高于混合动力重卡;柴油重卡的 VOC、CO 和 NO_x 的排放均是最高。

3 运输工具环境影响评价

3.1 特征化结果

根据分类结果、特征化模型和特征化因子,可以计算出运输工具在七类影响类型中的量化结果,如表 8 所示。

表 8 特征化结果

Tab.8 Characterization results

名称	电力机车	柴油重卡	纯电动重卡	天然气重卡	混合动力重卡
化石能耗 /kJ	123.05	1 282.67	1 448.85	1 461.41	1 394.67
酸化 / (mg SO ₂ eq)	37.76	182.19	355.19	76.00	87.62
毒性 / (mg 1, 4 二氯苯 eq)	19.07	248.38	144.38	72.30	92.55
温室效应 / (mg CO ₂ eq)	134 66.5	96 298.3	134 053.4	94 038.6	89 771.1
气溶胶潜力 / (mg PM ₁₀ eq)	3.61	9.45	24.50	7.01	6.94
光化学烟雾潜势 / (mg C ₂ H ₄ eq)	2.58	11.73	19.70	8.00	8.32
富营养化 / (mg PO ₄ eq)	1.39	25.44	10.25	-	8.89

电力机车在各类影响类型中都是最低的,并且比其他四类运输工具低很多,主要得益于电力机车

的运输量和运输距离。柴油重卡、纯电动重卡、天然气重卡和混合动力重卡在七类影响类型中各有优劣,柴油重卡的化石能耗最低,但富营养化影响和人体毒性最高;纯电动重卡的酸化、光化学烟雾、气溶胶潜势和温室效应是最高的;天然气重卡造成的富营养化、光化学烟雾潜势、人体毒性和酸化是最低的,但是能耗是最高的;混合动力重卡造成的温室效应和气溶胶潜力是最低的。

3.2 归一化处理结果

表 9 为我国 2019 年能耗和气体排放量。

表 9 我国 2019 年能耗和气体排放量

Tab.9 China's energy consumption and gas emissions in 2019

	VOC	CO	NO _x	PM	SO _x	CO ₂	能耗(标准煤)
万吨	1 510	1 929	1 233.9	1 088.5	457.3	943 000	487 000

2019 年我国人口数为 14 亿,可以得出其中影响类型的归一化基准值,见表 10。

表 10 归一化基准值

Tab.10 Normalized reference value

能耗	酸化	人体毒性	温室效应	气溶胶潜力	光化学烟雾	富营养化
1.02×10^8	9.44×10^6	1.74×10^7	6.74×10^9	7.77×10^6	7.76×10^5	1.15×10^6

根据特征化模型计算出各类影响类型的大小仅可以判断在同一影响类型下各类运输工具的优劣,但是各影响类型的重要程度却无法判断,无法对多指标进行综合判断。如某类影响类型的量比较大,但是该影响类型的标准基线高,则表示该影响类型的排放对生态造成的影响小,所以不能只根据特征化的结果进行判断,需要根据基线标准进行归一化处理,来确定各影响类型的重要程度,表 11 为归一化结果。

3.3 权重计算

2018 年我国温室气体排放量为 94.3 亿吨,我国化石能耗为 48.7 亿吨标准煤^[2]。2020 年保定市空气质量如表 12 所示。

根据我国《能源生产和消费革命战略 2016—2030》,2030 年能源消耗总量控制在 60 亿吨标准煤以内,其中非环视能源占能源消费总量比重达到 20% 左右^[8]。根据雄安新区规划纲要,假设雄安新区内空气污染物浓度限制标准为一级标准^[9],如表 13 所示。

表 11 归一化结果

Tab.11 Normalization results

名称	电力机车	柴油重卡	纯电动重卡	天然气重卡	混合动力重卡
化石能耗	$1.207\ 07 \times 10^{-6}$	1.26×10^{-5}	1.42×10^{-5}	$1.433\ 56 \times 10^{-5}$	1.37×10^{-5}
酸化	$4.001\ 96 \times 10^{-6}$	1.93×10^{-5}	3.76×10^{-5}	$8.054\ 95 \times 10^{-6}$	9.29×10^{-6}
人体毒性	$1.094\ 03 \times 10^{-6}$	1.43×10^{-5}	8.28×10^{-6}	$4.147\ 82 \times 10^{-6}$	5.31×10^{-6}
温室效应	$1.999\ 34 \times 10^{-6}$	1.43×10^{-5}	1.99×10^{-5}	$1.396\ 17 \times 10^{-5}$	1.33×10^{-5}
气溶胶潜力	$4.645\ 11 \times 10^{-7}$	1.22×10^{-6}	3.15×10^{-6}	$9.015\ 03 \times 10^{-7}$	8.92×10^{-7}
光化学烟雾	$3.331\ 83 \times 10^{-6}$	1.51×10^{-5}	2.54×10^{-5}	$1.031\ 3 \times 10^{-5}$	1.07×10^{-5}
富营养化	$1.217\ 54 \times 10^{-6}$	2.22×10^{-5}	8.95×10^{-6}	$5.838\ 87 \times 10^{-6}$	7.76×10^{-6}

表 12 保定市空气质量 (M3) [7]

Tab.12 Air quality of Baoding (M3) [7]

	SO ₂ /μg	NO ₂ /μg	CO/mg	PM ₁₀ /μg	PM _{2.5} /μg
空气中含量	12	55	1.3	110	59

表 13 我国空气污染物基本项目浓度一级限值

Tab.13 Primary limit value of basic project concentration of air pollutants in China

	SO ₂ /μg	NO ₂ /μg	CO/mg	PM ₁₀ /μg	PM _{2.5} /μg	NO _x /μg
空气含量	20	40	4	40	15	50

根据权重计算公式, 可以得出各类环境影响类型的权重, 如表 14 所示。

表 14 各类环境影响类型权重

Tab.14 Weight of various environmental impact types

	化石能耗	AP	HTP	GWP	气溶胶潜力	POCP	EP
权重	1.014	1.052	1.323	1.153	2.750	0.338	1.375

3.4 量化结果

根据计算出的各影响类型的归一化结果和权重, 可以得出各类运输工具的评比量化结果, 如表 15 所示。

表 15 评比量化结果

Tab.15 Quantitative results of evaluation and comparison

名称	电力机车	柴油重卡	纯电动重卡	天然气重卡	混合动力重卡
	1.33×10^{-5}	1.07×10^{-4}	1.17×10^{-4}	5.86×10^{-5}	6.28×10^{-5}

从各类影响类型的综合量化结果中看, 电力机车产生的影响最低, 其次为天然气重卡和混合动力重卡, 这两类重卡由于燃料类型相似, 所以两者评分接近, 但由于混合动力重卡中使用了少量的柴油, 所以其氮氧化物的排放高于天然气重卡, 而氮氧化物会造成人体毒性、酸化、光化学烟雾和富营养化

等影响, 所以混合动力重卡的得分高于天然气重卡。最后为柴油重卡和纯电动重卡, 纯电动重卡生命周期内造成的酸化、气溶胶潜力、光化学烟雾和温室效应都是最高的, 并且气溶胶潜力的权重达到了 2.75, 这使得纯电动重卡的评价量化结果最差。

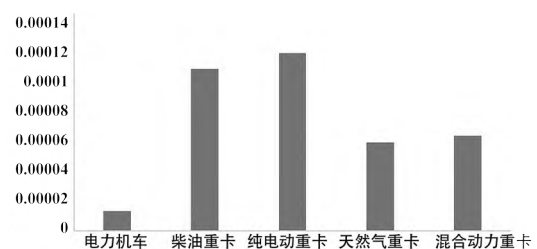


图 8 运输工具评价量化结果对比

Fig.8 Comparison of quantitative evaluation results of means of transport

综合量化结果显示运输工具各类影响的优劣, 从综合量化结果中可以看出, 电力机车最优, 同样在各类环境影响类型中也是最小的。天然气重卡排第二, 但是并非各类影响都优于其他重卡, 其能耗、温室效应和气溶胶潜力要高于混合动力重卡。同样纯电动重卡虽然结果最差, 但是并非各类影响都比其他运输工具差, 其造成的人体毒性和富营养化要远低于柴油重卡。

所以从综合量化角度和各类环境影响类型角度来看, 电力机车是最优的, 其能耗和排放是最低的, 对环境影响是最小的。进行长距离运输时, 不考虑便利性的情况下, 电力机车是最绿色的运输工具, 对于最后一公里、门到门运输时, 天然气重卡是最绿色的选择。

3.5 敏感性分析

纯电动重卡对电力结构最为敏感, 当火电比例降低到 0% 时, 纯电动重卡的量化结果降低了 86.33%, 其次为电力机车, 降低了 58.55%, 天然

气重卡和混合动力重卡不敏感, 仅降低了 5.41% 和 5.15%, 柴油重卡最不敏感, 降低了 3.56%。当电力结构为 65% 以下时, 纯电动重卡的得分将低于柴油重卡, 当电力结构为 30% 以下时, 纯电动重卡将优于天然气重卡和混合动力重卡。无论电力结构怎么变化, 电力机车都是最优的, 天然气重卡和混合动力重卡始终优于柴油重卡, 并且三者最终结果变动不大。根据我国能源发展政策和电力机构优化方向, 如图 10 所示, 火电占比在逐年下降, 而水电、核电、太阳能发电和风电比例在逐年提高, 根据火电比重变化趋势, 未来火电比重将下降到 30% 以下, 这将使纯电动重卡的量化结果优于当前的天然气重卡, 成为重卡中最为绿色的物流运输工具。根据雄安新区政策, 雄安建设是千年大计, 所以当前在公路运输中选用天然气重卡, 当火电下降到 30% 以下时, 纯电动重卡将替代天然气重卡的地位, 所以应提前做好纯电动重卡替代天然气重卡的准备。

卡时, 由于新增动力电池生产和报废的排放, 车辆寿命至少提升 45% 才能保证车辆排放不增加, 车辆寿命提升至 100% 可降低排放 3.62%^[10]。

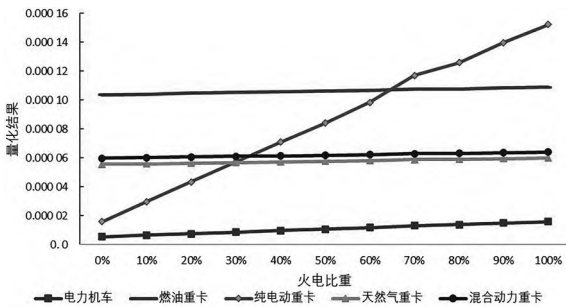


图 9 电力结构敏感性分析

Fig.9 Sensitivity analysis of power structure

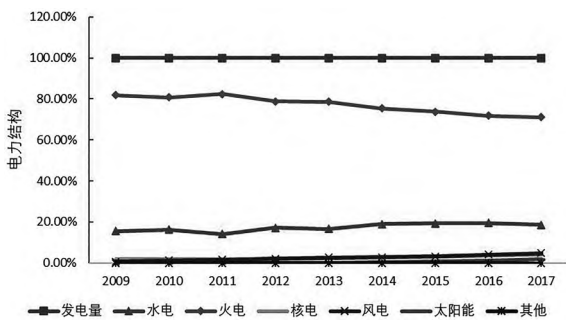


图 10 我国历年电力结构变化

Fig.10 Changes of power structure in China over the years

当车辆寿命增加一倍时, 天然气重卡和混合动力重卡的敏感度最高, 综合排放降低 7%, 纯电动重卡和柴油重卡的敏感度类似, 降低了 3.62% 和 3.96%, 电力机车敏感度最低, 只降低了 1.17%。在公路运输中选用天然气重卡后, 可以通过提升车辆寿命进一步降低重卡的排放, 在未来选择纯电动重

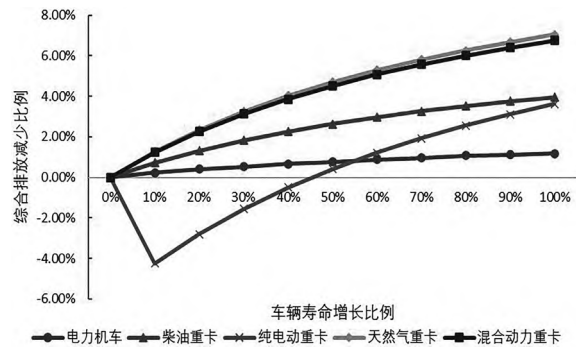


图 11 车辆寿命敏感性分析

Fig.11 Sensitivity analysis of vehicle life

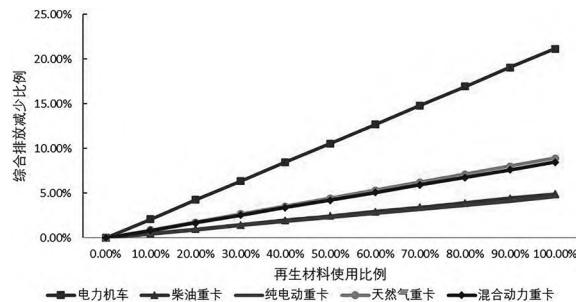


图 12 再生材料使用比例敏感性分析

Fig.12 Sensitivity analysis of proportion of recycled materials

当再生材料使用比例达到 100% 时, 电力机车最为敏感, 综合排放降低了 21.15%, 其次为天然气重卡和混合动力重卡, 降低了 8.91% 和 8.46%, 柴油重卡和纯电动重卡最不敏感, 降低了 4.92% 和 4.57%。在物流运输中使用电力机车这一绿色运输工具后, 可以通过增加再生材料使用比例来大幅度降低电力机车的排放。

4 结语

(1) 从运输工具生命周期的能耗和排放来看, 电力机车的能耗和排放远低于其他四类重卡, 是当前最为绿色的运输工具。其他四类重卡则各有优劣: 纯电动重卡 CO 的排放最少, 但 SO_x 和颗粒物的排放是最高的; 混合动力重卡在 VOC、颗粒物和 SO_x 的排放是最少的, 但其 NO_x 的排放较高; 天然气重卡在 NO_x 是最少的, 但 SO_x、VOC 和颗粒物的排放略高于混合动力重卡; 柴油重卡的 VOC、CO 和 NO_x 的排放是最高的。结合雄安新区当前空气质量和未来空气质量目标, 电力机车是最绿色的物流运

输工具，其次为天然气重卡，纯电动重卡最差。所以当前货物运输中应优选电力机车，当考虑便利性问题和与铁路运输进行衔接时，应优选天然气重卡。

(2) 纯电动重卡和电力机车对电力结构最为敏感，当火电比重为 0% 时，两者的敏感度分别为 86.33% 和 58.55%。当火电比重降为 65% 以下时，纯电动重卡环境影响量化结果将小于柴油重卡，当火电比重为 30% 时，纯电动重卡的排放足迹量化结果将小于天然气重卡和混合动力重卡。根据我国能源政策，我国火电比例逐年降低，纯电动重卡的绿色程度将逐步提高，将逐步取代天然气重卡的位置，所以应当布局纯电动重卡的发展，随着我国电力结构的优化，逐步向纯电动重卡偏移。

(3) 天然气重卡和混合动力重卡对车辆寿命敏感度最高，当车辆寿命增加一倍时，环境影响降低 7%，在公路运输中选用天然气重卡后，可以通过提升车辆寿命进一步降低天然气重卡的排放。

(4) 电力机车对再生材料使用最为敏感，当再生材料使用比例达到 100% 时，环境影响降低 21.15%，在物流运输中使用电力机车这一最绿色运输工具前，可以通过增加再生材料使用比例来大幅

度降低电力机车的环境影响。

参考文献：

- [1] 中共河北省委河北省人民政府. 河北雄安新区规划纲要[N]. 河北日报, 2018-04-22 (002) .
- [2] 刘爱华, 叶植. 中国统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 275-293.
- [3] 朱德连. 保定经济统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 31-53.
- [4] 刘文华. 中国能源统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 149-229.
- [5] 杨洁, 王洪涛, 周君. 铁路运输生命周期评价初探[J]. 环境科学研究, 2013, 26 (09) : 1029-1034.
- [6] 徐剑, 王随原, 黄颂昌. 公路全寿命周期能耗分析与节能策略[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016
- [7] 宋凌璐, 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[C]//《环境工程》编辑部. 环境工程2017增刊2. 北京: 工业建筑杂志社, 2017: 6.
- [8] 杜祥琬. 能源生产和消费革命战略[N]. 中国财经报, 2017-06-03 (002) .
- [9] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准 GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [10] 吕锦旭. 基于碳足迹原理的雄安绿色运输工具比选研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.



(上接第 69 页)

行为进行实时监控，通过流量、液位等掌控船舶排污状态，整合辖区监视监测设备，实现实时全面覆盖。同时推动清洁能源在船舶中的使用，加快港口岸电设备设施的建设和船舶相关设施的改造，提高岸电使用效率。

参考文献：

- [1] 董良飞, 张志杰. 长江航运船舶生活污水污染现状评价[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 1999 (S1) : 75-76.
- [2] 刘晓东, 姚琪, 王鹏, 等. 太湖流域内河船舶污染负荷估算[J]. 环境科学与技术, 2009, 32 (12) : 129-131.
- [3] 交通运输部推进建设港口和船舶污染物处置设施[J]. 中国海

事, 2016 (09) : 79.

- [4] Corbett J, Winebrake E, Green P, et al. Mortality from ship emissions: a global assessment, [J]Environmental science & technology, 2007.
- [5] 金陶胜, 殷小鸽, 许嘉, 等. 天津港运输船舶大气污染物排放清单[J]. 海洋环境科学, 2009, 28 (06) : 623-625.
- [6] 刘静, 王静, 宋传真, 等. 青岛市港口船舶大气污染排放清单的建立及应用[J]. 中国环境监测, 2011 (03) : 50-53.
- [7] 邢辉, 段树林, 黄连忠, 等. 辽宁省港口邻近区域海运废气排放测算[J]. 环境科学研究, 2016, 029 (001) : 29-35.
- [8] 邱学刚, 徐建设, 蒋兆明. 国内航行船舶船载AIS设备使用现状[J]. 中国船检, 2018 (05) : 42-46.
- [9] 姚鑫, 牟军敏, 张行健. 基于AIS数据的长江口船舶排放清单研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17 (04) : 1510-1514.