

**汽车生命周期温室气体及大气污染物
排放评价报告
2019**

**二〇一九年十二月
中国汽车生命周期排放评价研究工作组**

中国汽车生命周期排放评价研究工作组主要成员

王秉刚	电动汽车产业技术创新战略联盟	专家委员会主任
王全录	美国阿岗国家实验室	高级科学家
侯福深	中国汽车工程学会	副秘书长
郑亚莉	中国汽车工程学会	副部长
赵立金	中国汽车工程学会	部长
杨洁	中国汽车工程学会	部长
马金秋	中国汽车工程学会	项目经理
尹航	生态环境部机动车排污监控中心	总工/研究员
马冬	生态环境部机动车排污监控中心	项目主管/高工
吴烨	清华大学环境学院	教授
王贺武	清华大学车辆与运载学院	副教授
欧训民	清华大学中国车用能源研究中心	副教授
张少君	清华大学环境学院	副教授
何晓旖	美国密歇根大学（安娜堡分校）	博士后
周博雅	中国汽车技术研究中心有限公司汽车测评 管理中心技术管理部	部长
刘永东	中国电力企业联合会	副主任/高级工程师
周丽波	中国电力企业联合会	副处长/高级经济师
田亚峻	北京低碳清洁能源研究院	教授
白向飞	煤炭科学技术研究院有限公司	所长/研究员
丁华	煤炭科学技术研究院有限公司	副所长/副研究员

注：排名顺序不分先后

联系人：郑亚莉，中国汽车工程学会，010-50950081，zhengyl@sae-china.org

前言

当下，机动车保有量持续增长所带来的能源紧缺、温室气体排放和大气污染等问题在我国已日益凸显。根据公安交通管理部门数据，截至 2018 年底，全国机动车保有量达 3.27 亿辆，其中汽车 2.4 亿辆，小型载客汽车首次突破 2 亿辆，2018 年新注册登记的机动车 3172 万辆。根据油气行业统计数据，中国 2018 年已成为世界最大原油进口国，近两年石油对外依存度已超过 70%，从原油消费结构来看，交通运输用油占比约为 50%。交通运输业已成为我国温室气体排放最重要和增长最快的领域之一，约占温室气体排放总量的 10%。根据《中国移动源环境管理年报（2019）》数据，2018 年全国机动车四项污染物排放总量初步核算为 4065.3 万吨，根据城市大气细颗粒物源解析结果显示，移动源已成为北京、上海、杭州、济南、广州、深圳等城市的首要污染来源。

新能源汽车成为我国面向汽车产业节能减排的关键选择，中国汽车工程学会建立了科学统一的汽车生命周期排放评价方法及模型，并发布了客观中立的数据分析结果。由中国汽车工程学会编制完成的《汽车生命周期温室气体及大气污染物排放评价方法》团体标准以及《汽车生命周期温室气体及大气污染物排放评价报告 2018》，对汽油乘用车和纯电动乘用车的燃料周期温室气体和大气污染物排放进行了客观的评价，评价结果肯定了纯电动汽车对温室气体和大气细颗粒物的关键前体物（即挥发性有机化合物和氮氧化物）的减排效果。

2019 年，项目工作组在上一年基础上对研究进行了拓展与更新，

将乘用车和商用车共同纳入研究范围,在全国平均电力的基础上考虑了分区域电网的能源结构和排放特征对结果的影响,并将汽车原材料生产、电池生产、车辆制造等关键材料周期环节纳入评估框架,构建了更为全面系统的汽车生命周期评价体系。本年度报告主要包含三部分内容:第一,基于最新的生命周期清单数据,更新了乘用车车队平均及分级别典型车型的燃料周期温室气体与大气污染物排放结果,并在全中国平均电力水平的基础上,增加区分六大区域电网的纯电动汽车上游排放因子。第二,整合“燃料上游-运行阶段-材料周期”评价模型及清单数据,计算了全国平均电力和六大区域电网电力水平下,各级别典型乘用车的全生命周期温室气体和大气污染物排放结果。第三,选取纯电动公交车和柴油公交车作为典型商用车研究对象,对商用车全生命周期温室气体和大气污染物排放进行了分析评价。

一、乘用车车队平均燃料周期（Well-to-Wheels, WTW）温室气体和大气污染物排放评价

（一）燃料周期上游阶段（Well-to-Pump, WTP）

考虑原油开采、运输及精炼、汽油生产及运输等环节，运用本地化的汽车生命周期排放评价模型计算得到汽油车和柴油车燃料周期上游阶段的温室气体（Greenhouse gases, GHGs）与大气污染物排放因子，如表 1 所示。

对于每升汽油，燃料周期上游阶段温室气体排放量为 920 克二氧化碳当量（g CO₂eq）、挥发性有机化合物（Volatile organic compounds, VOCs）排放量为 2.24 g，氮氧化物（NO_x）排放量为 1.79 g，一次细颗粒物（Primary fine particulate matters, 一次 PM_{2.5}）排放量为 0.14 g，二氧化硫（Sulfur dioxide, SO₂）排放量为 0.73 g。对于每升柴油，燃料周期上游温室气体排放量为 587 g CO₂eq, VOCs 排放量为 1.89 g, NO_x 排放量为 1.75g, 一次 PM_{2.5} 排放量为 0.11 g, SO₂ 排放量为 0.75 g。

表 1 汽油和柴油燃料周期上游阶段的温室气体与大气污染物排放因子

	GHGs (g CO ₂ eq/L)	VOCs (g/L)	NO _x (g/L)	一次 PM _{2.5} (g/L)	SO ₂ (g/L)
汽油	920	2.24	1.79	0.14	0.73
柴油	587	1.89	1.75	0.11	0.75

电力相关排放方面，考虑了能源开采、运输、发电、电力传输等上游环节，采用 2017 年全国平均电力以及区分六大区域电网（华北、华东、东北、华中、西北和南方电网）的电力构成和排放因子，计算得到电力上游过程温室气体和大气污染物排放因子，如表 2 所示。

表 2 全国平均及分电网纯电动车燃料周期上游阶段的温室气体与大气污染物排放因子

	全国 平均	华北	华中	华东	南方	东北	西北
VOCs (g/kWh)	0.061	0.106	0.057	0.072	0.044	0.073	0.095
NO _x (g/ kWh)	0.511	0.895	0.483	0.590	0.357	0.616	0.807
一次 PM _{2.5} (g/ kWh)	0.135	0.236	0.128	0.149	0.090	0.183	0.217
SO ₂ (g/ kWh)	0.271	0.479	0.258	0.301	0.183	0.333	0.439
GHGs (g CO ₂ eq/ kWh)	725	1318	701	840	505	916	1196

（二）运行阶段（Pump-to-Wheels, PTW）

1. 能耗和温室气体排放因子

根据工信部统计数据，2018 年汽油乘用车平均燃料消耗量为 6.6 L/100 km，汽油乘用车的温室气体排放因子根据汽油含碳量计算得到，取 2272 g CO₂eq/L；纯电动乘用车平均能量消耗量为 14.5 kWh/100 km，运行阶段温室气体排放因子为 0 g/km。

2. 大气污染物排放因子

国五排放标准的汽油乘用车运行阶段排放因子如表 3 所示。其中，VOCs, NO_x 和一次 PM_{2.5} 排放因子根据生态环境部发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制指南（试行）》计算得到。SO₂ 根据车用燃料的含硫量以及平均油耗计算得到。VOCs 排放包括了尾气排放和蒸发排放（热浸、运行、昼间、驻车等）。对于纯电动乘用车，运行

阶段的大气污染物排放因子为 0 g/km。

表 3 国五汽油乘用车燃料周期运行阶段的大气污染物排放因子

VOCs (g/km)	NO _x (g/km)	一次 PM _{2.5} (g/km)	SO ₂ (g/km)
0.240	0.018	0.003	0.00096

（三）乘用车燃料周期（WTW）的温室气体和大气污染物排放评价

1. 温室气体

根据汽车燃料周期上游排放因子（全国平均电力构成）以及车辆运行阶段温室气体排放因子，考虑汽油乘用车和纯电动乘用车的百公里能耗，分别计算得出其燃料周期温室气体排放因子，得到两类车型的能耗与温室气体排放因子关系如图 1 所示。

可以看出，仅考虑当前汽车燃料周期的情况下，纯电动乘用车和汽油乘用车的温室气体排放因子与相应能耗水平呈线性关系；总体上纯电动乘用车的温室气体排放因子要低于汽油乘用车，但高电耗的纯电动乘用车的温室气体排放因子仍可能高于节能汽油乘用车。

根据车队平均燃料消耗量水平核算，得到对应的汽油乘用车和纯电动乘用车燃料周期（WTW）车队平均的温室气体排放因子，分别在如图 1 中用红色和绿色菱形标记。可以看出，仅考虑汽车燃料周期，纯电动乘用车的车队平均温室气体排放因子可比汽油乘用车降低约 50%。

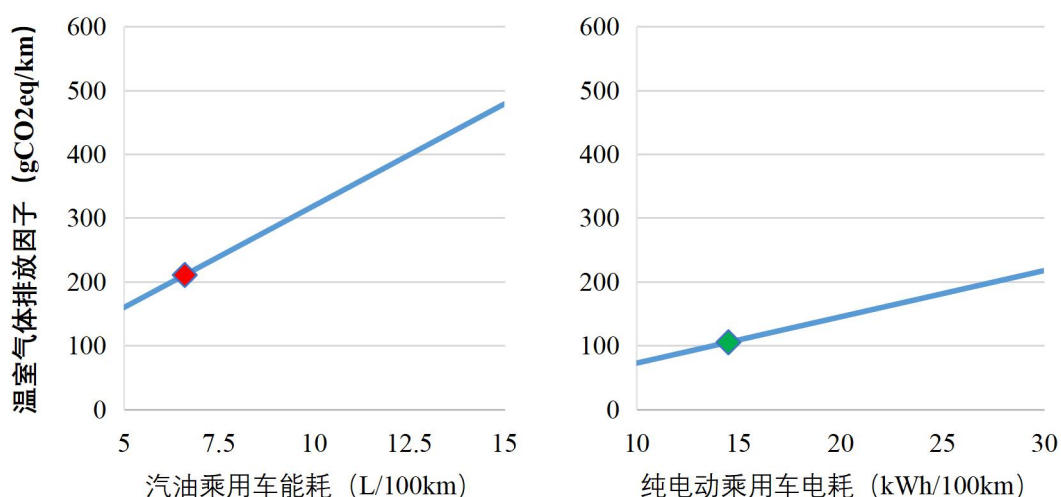


图1 汽油乘用车与纯电动乘用车的能耗与燃料周期的温室气体排放因子

2. 大气污染物

根据前述燃料上游及运行阶段的大气污染物排放因子，计算得到汽油和纯电动乘用车燃料周期的 VOCs、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 SO₂ 的排放因子，如图 2 所示。

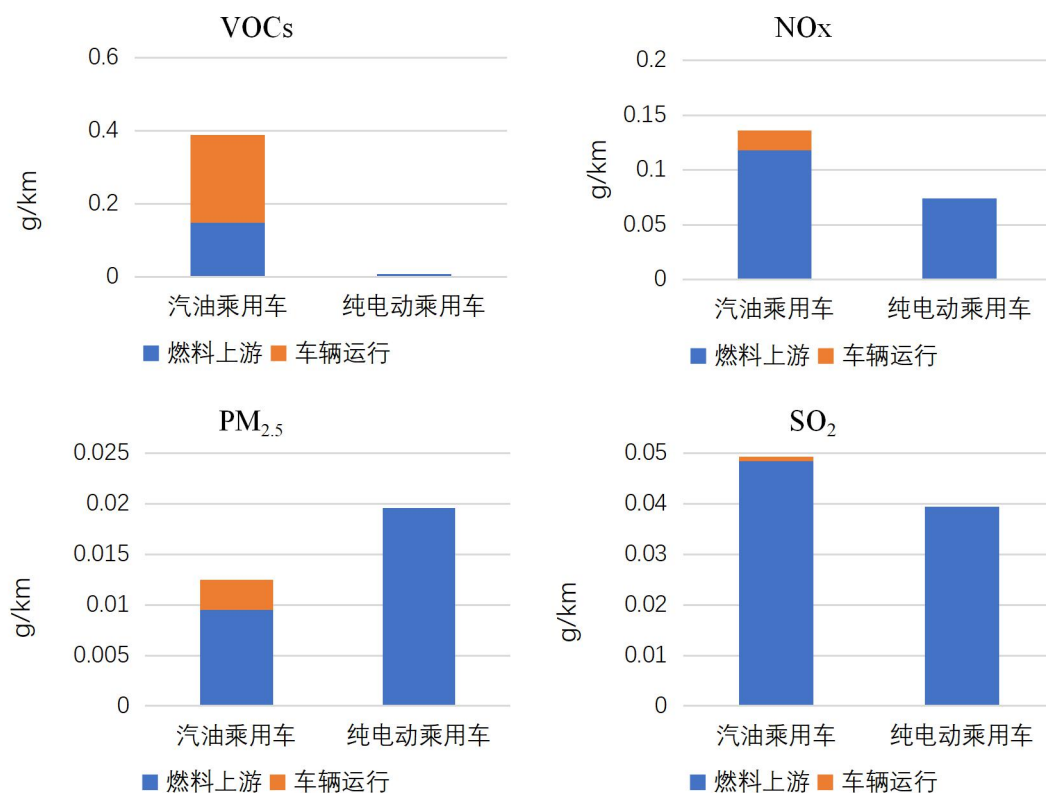


图2 汽油乘用车与纯电动乘用车燃料周期大气污染物排放因子

可以看到，从车队平均的燃料周期大气污染物排放因子来看，纯电动乘用车相比于汽油乘用车，对于形成二次颗粒物的两种关键前体物 VOCs 和 NO_x 具有显著削减作用，削减比例分别为 98%和 46%。而对于一次 PM_{2.5} 尚不具备削减效果，主要由于电力生产过程排放所致。需要说明，PM_{2.5} 的来源包括直接排放（一次 PM_{2.5}）和二次生成（二次 PM_{2.5}），PM_{2.5} 的二次生成是指排放到大气中的气态污染物通过多种化学物理过程被转化为硫酸盐、硝酸盐、铵盐和二次有机气溶胶等细颗粒物。在我国中东部地区，二次 PM_{2.5} 对 PM_{2.5} 的贡献率常常高达 60%，在成霾时二次 PM_{2.5} 所占比例往往更高。因此，削减 VOCs 和 NO_x 对导致灰霾爆发的重要来源——二次 PM_{2.5}——具有重要作用。此外，纯电动乘用车的燃料周期 SO₂ 排放水平相比汽油乘用车也有所降低，降幅为 20%。

二、典型乘用车全生命周期温室气体和大气污染物排放评价

为了更加全面系统地对比和分析纯电动乘用车与汽油乘用车的生命周期的温室气体和大气污染物排放，本研究分别选取了 A00 级到 C 级乘用车的典型车型进行案例分析。

（一）运行阶段

本研究依据 2018 年 A00 级到 C 级纯电动乘用车分车型的销量数据，分别选取纯电动乘用车每一级别销量领先的车型作为典型车型，同时综合考虑销量、性能等因素，选择了对应级别的汽油乘用车作为典型车型，典型车型相关参数见表 4。

表 4 分级别的典型纯电动乘用车与汽油乘用车基本参数

级别	纯电动乘用车		汽油乘用车	
	电耗(kWh/100km)	车重 (kg)	油耗(L/100km)	车重 (kg)
A00 级	12.2 ^①	1050 ^①	5.1 ^②	936 ^①
A0 级	15.5 ^①	1175 ^①	5.3 ^②	973 ^①
A 级	15.1 ^①	1900 ^①	6.5 ^②	1330 ^①
B 级	15.9 ^①	2120 ^①	7.7 ^②	1480 ^①
C 级	17.3 ^①	2100 ^①	9.0 ^②	1570 ^①

数据来源：①企业官方数据；②工信部，中国汽车燃料消耗量网站

注：车辆实际道路行驶能耗与路况、负载、空调使用、外界温度等因素相关，与上述能耗数值可能存在差异。后续研究在数据可获得的情况下将考虑相关车型实际道路能耗。

本研究选取的汽油乘用车均符合国五排放标准，因此运行阶段的 VOCs、PM_{2.5} 和 NO_x 的排放因子采用表 3 的数据，而温室气体与 SO₂ 的排放因子则根据典型车型油耗和汽油含碳量、含硫量计算得到，如表 5 所示。纯电动乘用车运行阶段的温室气体和大气污染物排放因子均为 0 g/km。

表 5 各级别汽油车型的燃料周期温室气体和二氧化硫排放因子

	A00	A0	A	B	C
GHGs (g CO ₂ eq/km)	115.87	120.42	147.68	174.94	204.48
SO ₂ (g/km)	0.00074	0.00077	0.00094	0.00112	0.00131

（二）材料周期

汽车的材料周期排放主要来自车身材料及部件生产，车辆制造、使用、回收，动力电池生产，车用油液的生产与使用等环节。对于纯电动乘用车而言，各车型所配备的动力电池类型不同，电池质量及材料构成也有所不同。汽油乘用车与纯电动乘用车（以 B 级车为例）的车身部件与材料组成等数据详见附录。

结合材料图谱，可计算得到 A00、A0、A、B、C 五个级别汽油乘用车和纯电动乘用车材料周期排放清单，如表 6 和表 7 所示。通过分析，发现纯电动乘用车材料周期的 GHG 排放相比同级别的汽油乘用车高 30%~120%；VOCs 高 14%以内；NO_x、一次 PM_{2.5} 和 SO₂ 排放分别高 25%，28%和 48%以上。从趋势上看，车辆级别越高，纯电动乘用车和汽油乘用车的材料周期排放差异越大，主要原因是中大型车的车重更大，需要配备容量更大的动力电池用于驱动车辆，而单位重量的动力电池材料周期排放因子显著高于车身其他部件的排放因子。因此，中大型车材料周期排放中，动力电池相关排放占比增加，最终导致材料周期排放显著增加。

表 6 汽油乘用车材料周期排放清单

	A00	A0	A	B	C
GHGs, g CO ₂ eq/车	6,201,131	6,348,080	7,765,934	8,361,671	8,719,113
VOCs, g/车	22,030	22,148	23,289	23,768	24,056
NO _x , g/车	7,179	7,349	8,988	9,676	10,089
一次 PM _{2.5} , g/车	1,563	1,603	1,990	2,153	2,250
SO ₂ , g/车	12,420	12,789	16,353	17,850	18,748

表 7 纯电动乘用车材料周期排放清单

	A00	A0	A	B	C
GHGs, g CO ₂ eq/车	8,112,134	9,251,399	15,181,283	16,552,972	19,644,797
VOCs, g/车	22,210	22,774	25,816	26,690	27,459
NO _x , g/车	8,975	10,314	18,963	18,859	24,831
一次 PM _{2.5} , g/车	2,011	2,297	3,934	4,150	5,049
SO ₂ , g/车	18,385	21,634	38,805	42,130	51,727

（三）全生命周期

通过对燃料周期和材料周期的计算结果进行整合，结合乘用车生命周期行驶里程（取 200,000 km，根据清华大学 EMBEV 模型中乘用车年均行驶里程 13,000 km 和 15 年运行寿命计算得到），得到五种典型的汽油和纯电动乘用车全生命周期的温室气体和大气污染物排放结果，如图 3 和图 4 所示。

1. 温室气体

假定所有车辆均在全国平均电力情况下生产、组装、使用，从车辆级别角度来看，无论是对于汽油乘用车或是纯电动乘用车，A00 级别车辆均具有最小的温室气体排放因子，随着车辆级别的增加（从 A00 至 C），全生命周期的温室气体排放水平依次增加，这是由于较高级别车辆的燃料周期和材料周期温室气体排放水平均高于低级别的车辆。从车辆动力系统角度来看，各级别的纯电动乘用车相比同等级别的汽油乘用车均具有全生命周期的温室气体削减效果，削减比例视车辆级别不同，在 21%~33% 之间。

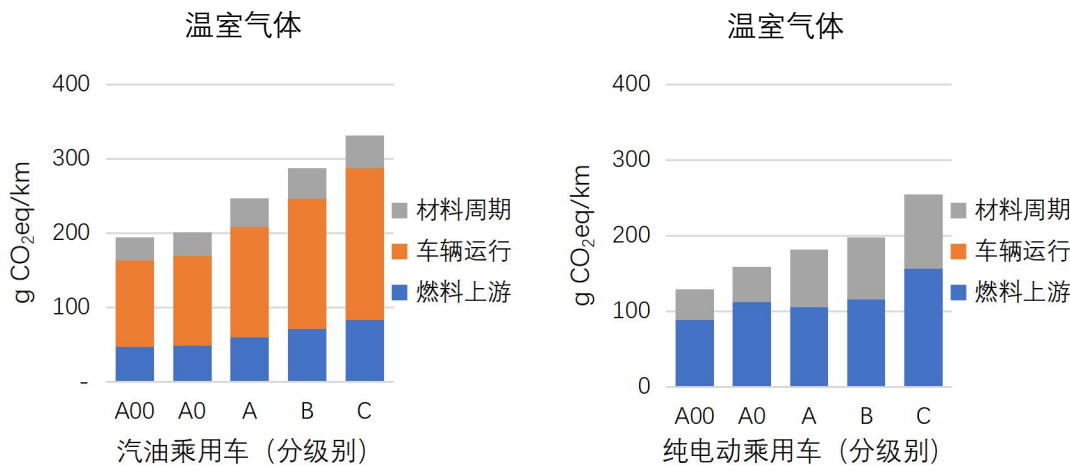
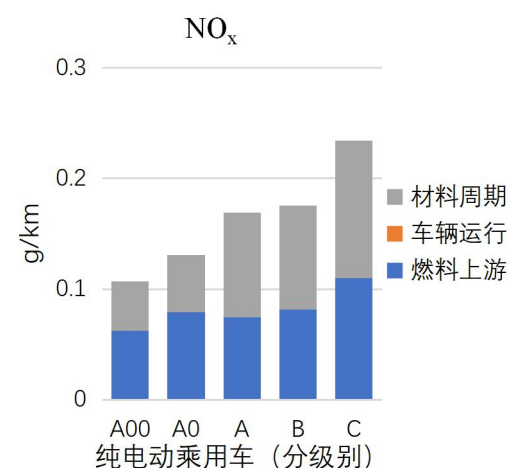
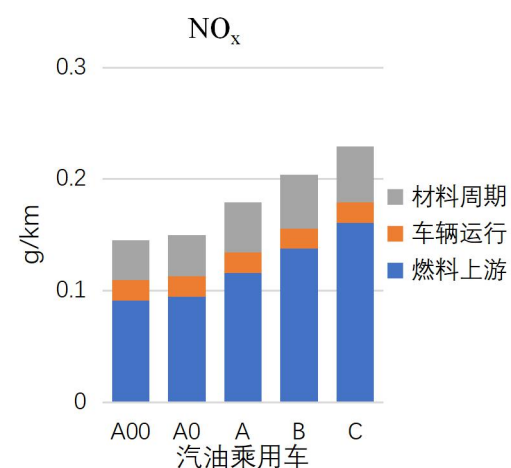
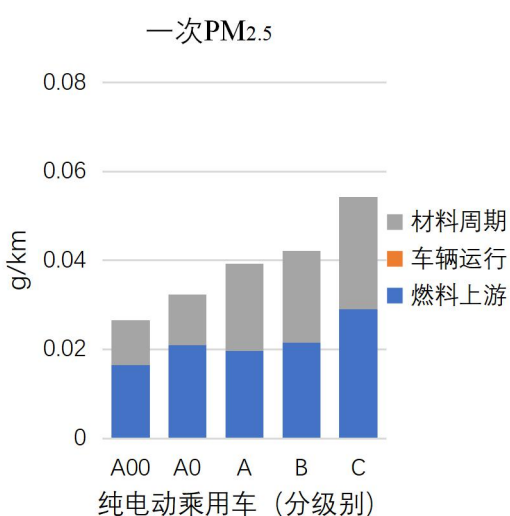
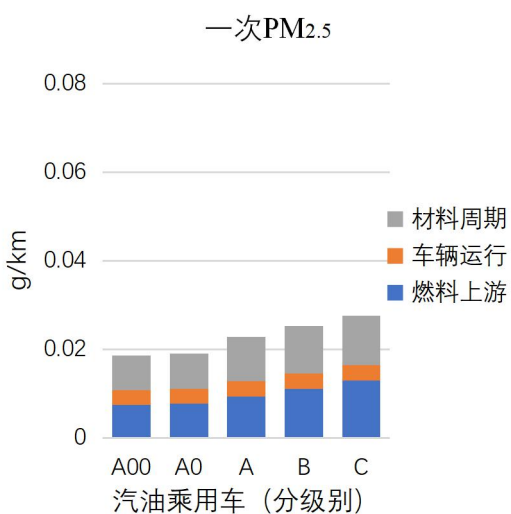
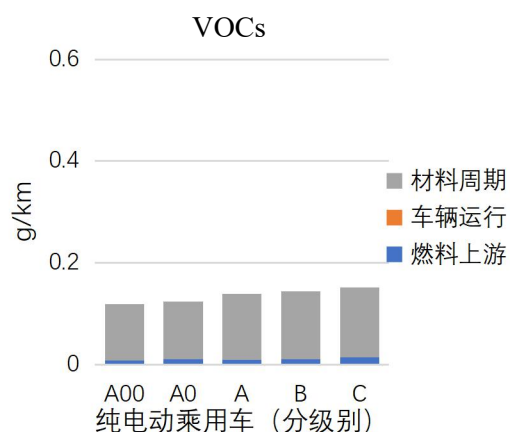
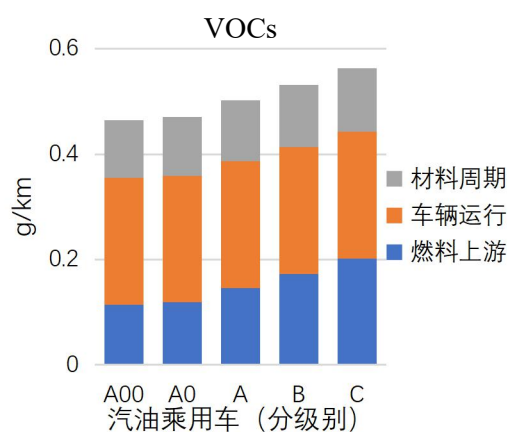


图 3 汽油乘用车与纯电动乘用车全生命周期温室气体排放因子对比

2. 大气污染物

与温室气体主要来自燃料周期不同，大气污染物的生命周期排放中有相当比例来自材料周期。因此，全生命周期大气污染物排放结果与仅考虑燃料周期的结果存在显著差异。



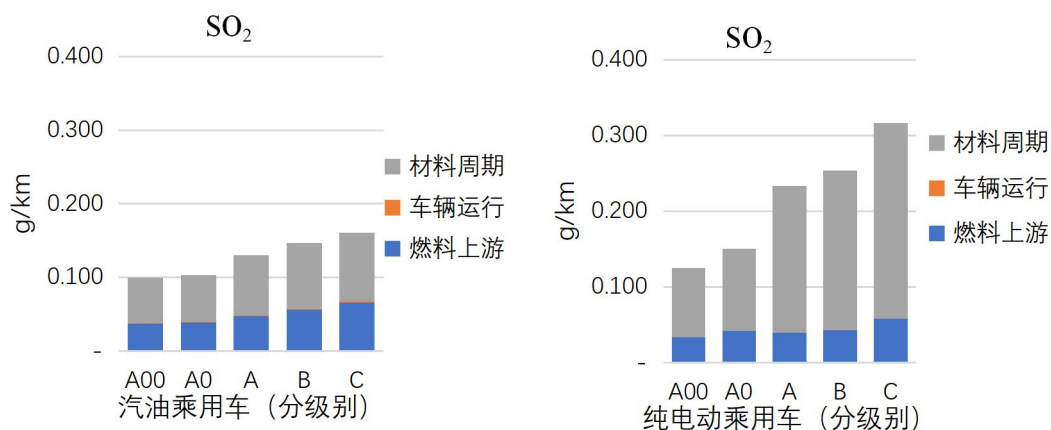


图 4 不同车辆级别的汽油与纯电动乘用车全生命周期大气污染物排放因子

对于 VOCs，相比于汽油乘用车，各级别的纯电动车仍具有显著削减作用，削减比例为 75%左右。对于 NO_x，A00~B 级纯电动乘用车相比同级别的汽油乘用车的削减比例为 6%~26%，C 级纯电动乘用车与汽油乘用车排放因子相当。VOCs 和 NO_x 是大气二次 PM_{2.5} 形成的重要前体物，而 PM_{2.5} 的来源中二次生成部分贡献不容忽视，尤其在我国中东部地区以及灰霾爆发期间。因此，纯电动乘用车的全生命周期 VOCs 和 NO_x 减排效果，对于控制导致城市 PM_{2.5} 污染和灰霾爆发具有重要作用。

此外，纯电动乘用车目前对于一次 PM_{2.5} 和 SO₂ 尚不具备削减效果。车辆全生命周期的一次 PM_{2.5} 排放主要来自上游电力生产和材料周期相关工序的燃烧排放和非燃烧排放，车辆全生命周期的 SO₂ 排放则主要来自材料周期，如含硫化石燃料的使用（工业用煤）和有色金属冶炼（含硫矿石煅烧）。从车型角度对比，无论是汽油乘用车还是纯电动乘用车，A00 级车辆生命周期大气污染物排放量最低，从 A00 级到 C 级车辆的排放依次递增。

3. 分区域电网电力结果

以所选定的典型车辆作为案例分析，本研究进一步探索了我国不同区域电网电力对于结果的影响。其中，燃料周期电力（即电动汽车充电所用电力）分别考虑华北、华东、华中、南方、东北、西北六大区域电网电力，材料周期电力（主要考虑电池生产和车辆组装环节）则根据典型车辆的电池生产商所在地区的电网电力确定。

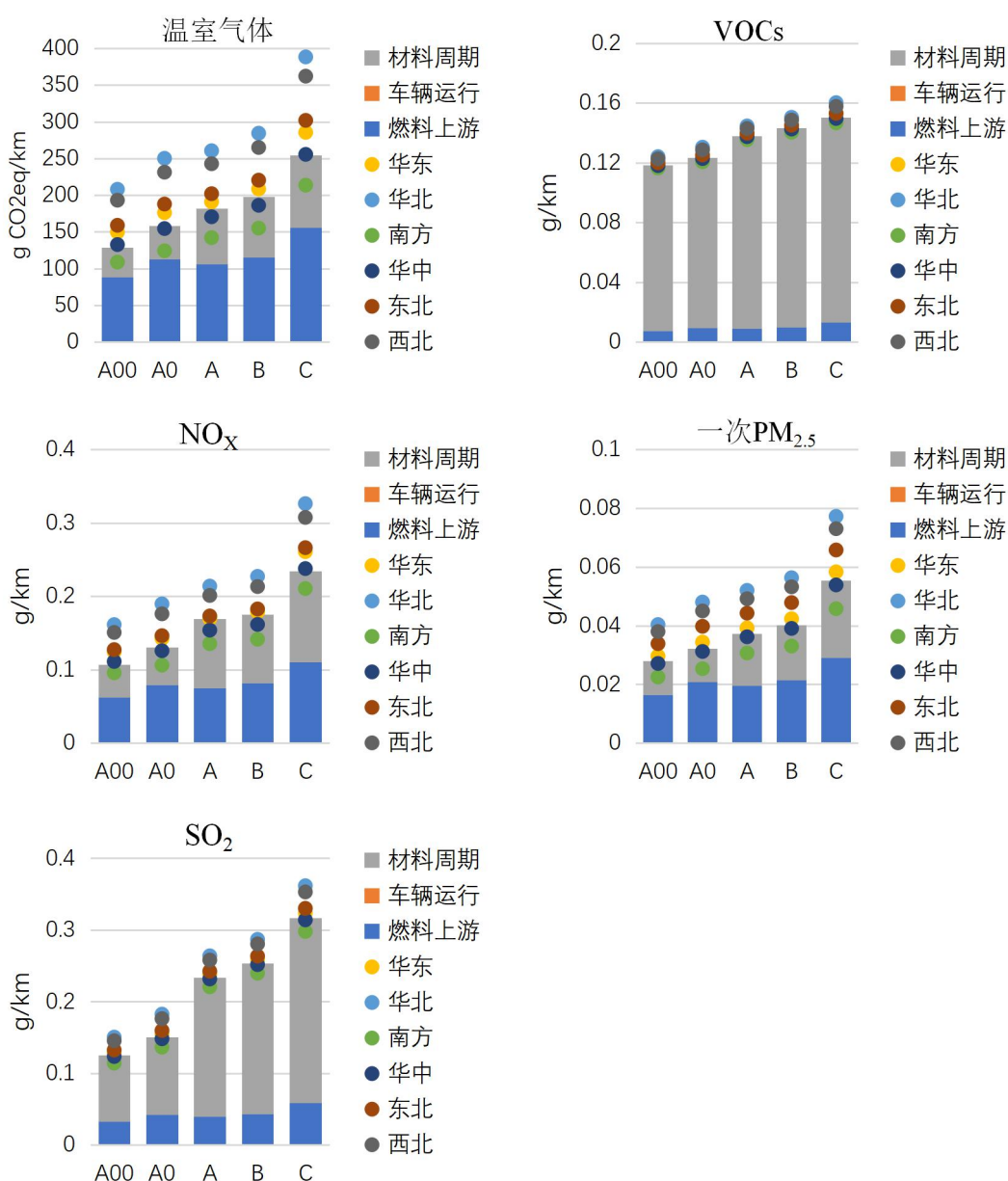


图 5 不同区域电网下纯电动乘用车全生命周期温室气体和大气污染物排放因子

可以看到，电网电力对于温室气体、NO_x、一次 PM_{2.5} 的排放影响较大，主要是由于三种排放物主要来源于车辆的燃料周期。以温室气体为例，使用全国平均电力时，纯电动乘用车相比汽油乘用车具有显著削减效果，削减比例为 21%~33%，而在可再生能源占比较高的南方区域电网下，温室气体的削减比例可上升至 35%~46%。

从电池产业的地理布局来看，电池生产、组装位于可再生能源占比较高的南方区域电网的典型车型(如本研究涉及的 A 级和 B 级车)，其材料周期的温室气体和大气污染物排放，相比上一章节中基于全国平均电力的评估结果有一定下降，下降比例为~10%（温室气体、NO_x 和一次 PM_{2.5}）和~13%（SO₂）。而位于电池生产、组装位于煤电比例较高的华北地区的典型车型（如 A00 级车），其材料周期排放相比基于全国平均电力的评估结果则有所上升，上升比例为 16%(温室气体、NO_x)，14%（一次 PM_{2.5}）和 21%（SO₂）。

三、典型商用车全生命周期温室气体和大气污染物排放评价

（一）运行阶段

本文选取了一款纯电动公交车和一款柴油公交车作为典型商用车，进行燃料周期的温室气体和大气污染物排放对比与分析，基本参数如表 8 和表 9 所示。

表 8 纯电动商用车基本参数			
电池类型	容量（kWh）	车重(kg)	电耗（kWh/100km）
磷酸铁锂	255	10400	65

表 9 柴油商用车基本参数

发动机型号	车重(kg)	能耗（L/100km）
WP7.240E50	10150	30

运行阶段，根据柴油含碳量计算得到柴油完全燃烧的碳排放因子为 2654 g CO₂e/L，进而根据柴油公交车的能耗（30 L/100 km）计算得到排放因子为 796.2 g CO₂e/km。大气污染物排放符合国 V 柴油车排放标准，VOCs、NO_x 和一次 PM_{2.5} 排放因子参考生态环境部发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制指南（试行）》，SO₂ 排放因子由柴油含硫量和平均能耗计算得到，如表 10 所示。纯电动公交车运行使用阶段温室气体和大气污染物排放因子为 0 g/km。

表 10 国五柴油商用车燃料周期运行阶段的大气污染物排放因子

VOCs (g/km)	NO _x (g/km)	一次 PM _{2.5} (g/km)	SO ₂ (g/km)
0.061	8.310	0.093	0.00504

（二）燃料周期

根据汽车燃料周期上游排放因子以及选定商用车运行阶段温室气体排放因子，得到两类车型的能耗与温室气体排放的关系如图 6 所示。

根据选取的典型商用车燃料消耗量，得到对应的柴油公交车和纯电动公交车的温室气体排放因子，分别用红色和绿色菱形标记。可以看出，仅考虑汽车燃料周期（WTW），该款纯电动公交车的温室气体

排放水平可比柴油公交车降低 52%。

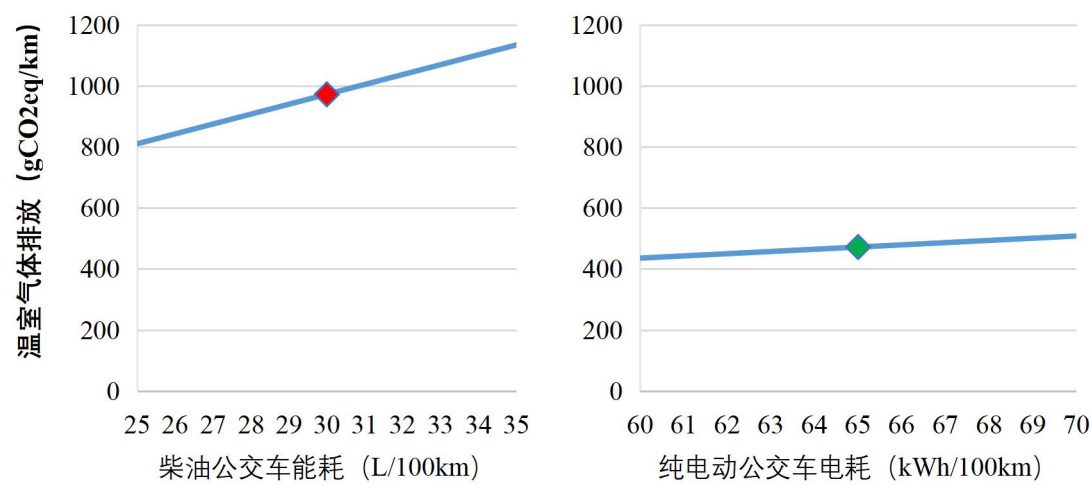


图 6 柴油公交车与纯电动公交车的能耗与燃料周期的温室气体排放因子

（三）材料周期

通过对柴油和纯电动公交车的车辆部件与材料构成图谱以及材料生产能耗，计算得到柴油公交车和纯电动公交车的材料周期温室气体与大气污染物排放，如表 11 所示。

通过对材料周期结果分析可以发现，温室气体方面，纯电动公交车排放因子比同级别的柴油公交车大约高 36%；大气污染物中，纯电动公交车的 NO_x 和一次 PM_{2.5} 排放高于柴油车 30%左右，SO₂ 排放则显著高于柴油公交车（约 71%），这主要由动力电池材料生产过程耗能带来的上游排放（NO_x 和一次 PM_{2.5}）以及直接排放（SO₂）导致；VOCs 方面，纯电动公交车略低于柴油公交车，因为相比柴油车，纯电动公交车减少了车用油液的使用，如发动机油等。

表 11 商用车材料周期排放结果

	柴油公交车	纯电动公交车
GHGs (g CO ₂ eq/车)	35,271,875	47,935,946
VOCs (g/车)	122,625	120,595
NO _x (g/车)	40,050	52,950
一次 PM _{2.5} (g/车)	8,582	11,395
SO ₂ (g/车)	63,386	108,092

（四）全生命周期

根据走访调研，目前我国公交车平均报废年限约为 8 年，年均行驶里程约为 65,000 km，计算得到公交车的生命周期行驶里程为 520,000 km。整合柴油公交车与纯电动公交车的燃料周期排放情况，得到其全生命周期温室气体和大气污染物的排放结果。

研究表明，与柴油公交车相比，纯电动公交车的全生命周期温室气体排放水平降低 46%。大气污染物排放方面，纯电动公交车全生命周期的 VOCs 和 NO_x 的排放水平均显著低于柴油公交车，减排比例分别为 69%和 93%，PM_{2.5} 排放因子与柴油公交车相当，SO₂ 的排放因子约为柴油公交车的两倍。总体而言，纯电动公交车与柴油公交车相比，全生命周期内的温室气体和大部分大气污染物减排方面优势明显。

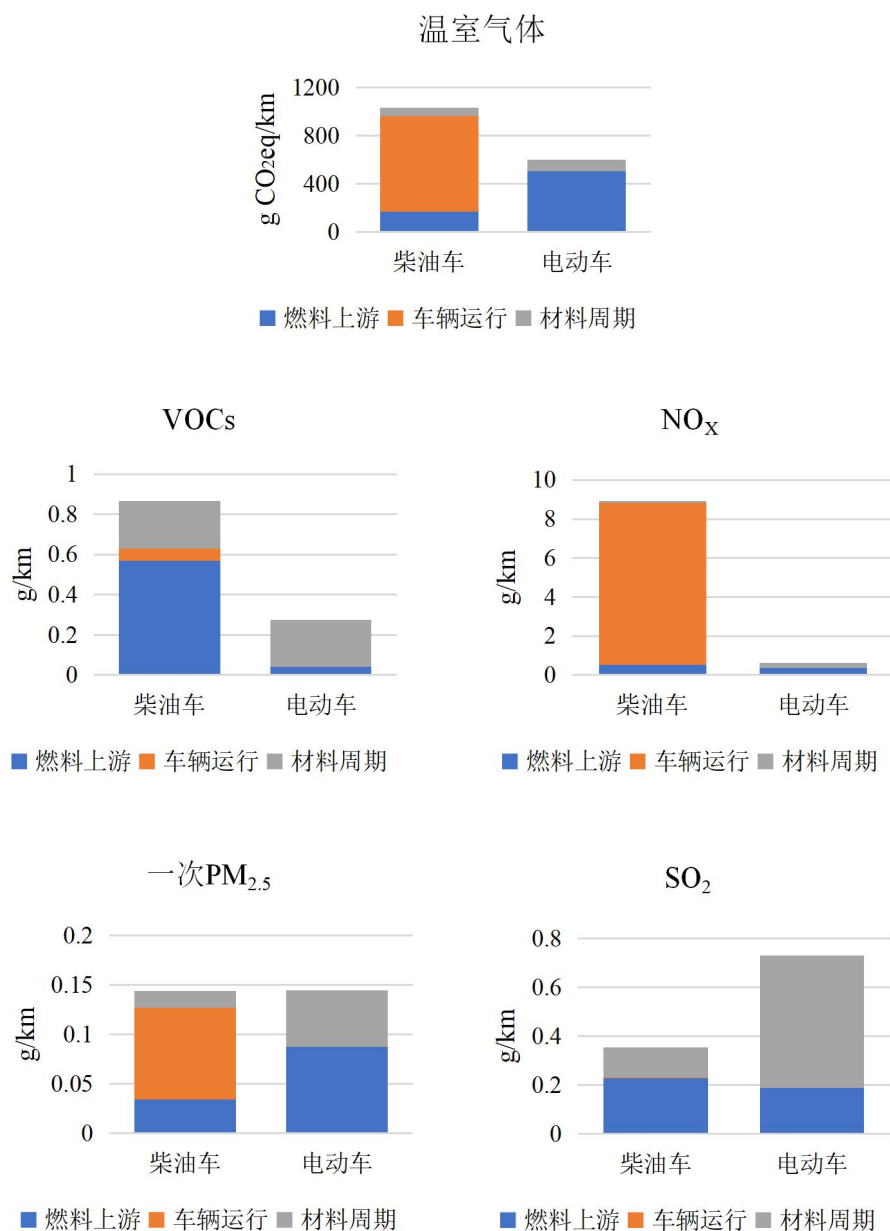


图 7 柴油公交车与纯电动公交车的全生命周期的温室气体与大气污染物排放因子

四、结论与建议

本研究主要结论及政策建议如下：

1. 纯电动车辆具有明显的温室气体减排效果

在全国平均电力水平下，各级别的纯电动乘用车全生命周期温室气体排放相比对应级别的汽油乘用车已显现出明显的减排效果（约为

21%~33%)。从典型商用车车型对比来看，纯电动公交车全生命周期温室气体排放相比对应级别的柴油公交车同样具有明显的减排效果（约为 46%）。因此，加快推广新能源乘用车与公交车，将有效推进实现汽车领域低碳化和绿色发展，为扭转温室气体排放快速增长的局面、实现中国 2030 年左右碳排放达峰并争取尽早达峰的目标做出积极贡献。

2. 纯电动车辆对于导致二次颗粒物形成的重要前体物——VOCs 和 NO_x 具有显著减排效果

全国平均电网电力情况下，纯电动乘用车相比汽油乘用车的全生命周期 VOCs 和 NO_x 均有不同程度减排，其中 VOCs 减排优势十分明显（~75%），NO_x 减排比例视车辆级别不同有所差异。纯电动商用车相比柴油商用车的全生命周期 VOCs 和 NO_x 排放有显著降低，降幅分别为 69%和 93%。因此，纯电动车具有显著的 VOCs 和 NO_x（均为生成二次 PM_{2.5} 的关键前体物）削减效果。目前，纯电动车辆尚不具备一次 PM_{2.5}（即直接排放的细颗粒物）和 SO₂ 的全生命周期减排优势，主要与燃料上游燃煤发电以及电池材料制造过程的排放有关。需要说明的是，我国中东部地区以及成霾期间，大气颗粒物中一次 PM_{2.5} 的贡献率往往低于二次 PM_{2.5}，因此，综合来看推广纯电动车辆对于控制城市 PM_{2.5} 和灰霾污染、推进环境空气质量持续改善、打赢蓝天保卫战具有重要意义。

3. 小型乘用车减排效果优于中大型乘用车

从汽油乘用车和纯电动乘用车不同级别的典型车型分别纵向对

比来看，小型乘用车的生命周期温室气体排放和大气污染物排放均低于中大型乘用车，排放总量整体随着车型级别的上升而增加。以全国平均电力水平下的纯电动乘用车为例，A00 至 C 级车的全生命周期温室气体排放因子分别为 129、159、182、198 和 254 g CO₂eq/km。这其中的一大重要原因是小型车燃油经济性更高，百公里能耗普遍低于中大型车。此外，小型车车重更轻，所用到的车身材料更少，所需要的动力电池容量也更小，因此与车身材料、电池生产组装等相关的能耗和排放更低。

建议未来加快建立新能源汽车能耗标准，控制各级别新能源汽车能源消耗。另一方面，汽车产业应持续推进车辆的小型化发展，同时应鼓励合理优化纯电动车续航里程设置，避免盲目追求续航里程造成的资源浪费和能耗排放增加。

4. 纯电动车辆的生命周期排放具有显著的地区差异性

假设纯电动车辆所用的电力为全国平均电力，则与同级别汽油车相比具有显著的全生命周期温室气体削减效果，削减比例为 21%~33%。而在可再生能源占比较高的南方区域电网下使用纯电动汽车，削减比例可上升至 35%~46%。从电池产业的地理布局来看，电池生产、组装位于可再生能源占比较高的南方电网的典型车型，其材料周期的温室气体和部分大气污染物（NO_x、一次 PM_{2.5} 和 SO₂）排放，相比基于全国平均电力的评估结果下降比例约为 10%~13%。而位于电池生产、组装位于煤电比例较高的华北地区的典型车型，其材料周期排放相比基于全国平均电力的评估结果上升比例为

14%~21%。

因此，从实现上游电力系统清洁化、低碳化的角度，建议全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作，加快推进水电、风电、光伏发电及生物质发电等可再生能源发电，提高可再生能源电力消纳和使用比例。从汽车产业推广与布局角度出发，应加大纯电动车辆在绿色电力占比大且污染较为严重的区域推广应用，同时鼓励纯电动汽车及动力电池制造商在电力结构可再生能源占比较高的区域进行投资生产。

5. 高性能、高能量密度动力电池将显著促进纯电动车生命周期排放削减效果

从材料周期排放来看，与动力电池生产相关的温室气体排放占材料周期排放总量的 47%左右，VOCs、NO_x、PM_{2.5} 和 SO₂ 四类大气污染物分别占 8%、54%、48%、58%左右。因此，动力电池是纯电动汽车全生命周期排放的重要环节。

建议提升电池能量密度，以满足相同续航里程要求的情况下降低电池材料使用量，有效减少电池制造的排放污染；同时，提升动力电池能量密度可降低电池重量，从而降低车辆质量实现能耗经济性的改善，促进燃料周期的排放降低。综上，高性能、高能量密度的电池将对燃料周期和材料周期的减排效果产生协同促进作用。

6. 相关重点工业领域的节能减排将显著促进车辆生命周期排放削减和大气环境质量改善。

与汽油乘用车温室气体排放主要来自燃料上游与车辆运行阶段不同，对于电动汽车，车用材料周期的排放贡献不可忽视。以全国平

均电力水平下的纯电动乘用车为例，车用材料周期排放占比分别达到了 29%~40%（GHGs），91%~94%（VOCs）、39%~56%（NO_x）、35%~48%（一次 PM_{2.5}）与 72%~83%（SO₂）。可以预见，随着未来电力清洁化和车辆燃油经济性的提升，材料周期的排放占比将持续上升。车辆材料周期的排放与车身材料及电池重量直接相关，并涉及多种工业排放源，如金属冶炼、化工、涂装、橡胶、电池制造等。

因此，加快相关重点工业领域的污染物削减，对于降低电动汽车全生命周期排放，促进大气环境质量改善具有重要意义。建议鼓励开展轻量化、模块化、无（低）害化、循环利用等产品生态设计，通过改善工艺、使用环保材料等降低生产过程能源消耗、温室气体及大气污染物排放，加强清洁生产技术应用，实现绿色制造。同时，建议开展动力电池梯级利用及有序回收，提高资源使用率，降低生命周期排放。

五、附录-排放因子的关键数据及来源

1. 本研究计算主要采用清华大学环境学院基于美国阿贡实验室 GREET 模型 2018 版的本地化模型。

2. 2017 年全国平均电力构成根据《中国电力年鉴》中发电量数据计算得到；分电网数据根据 Shen W et al. (2019)结果反算得到。

3. 火电厂平均发电效率：36%（燃煤），40%（燃气）。数据来源：Shen W, et al. (2014), Ke W, et al. (2017)。

4. 天然气开采效率 96.0%，加工效率 97.2%，压缩效率 92.8%。数据来源：Wang R (2015); Argonne (2017)。

5. 煤炭开采效率 97%，运输方式及比例：45%铁路（640 km），15%水路（1500 km），40%公路（500 km）。数据来源：数据来源：Shen W et al. (2014)。

6. 全国及分电网燃煤、燃气电厂排放因子数据来源为清华大学环境学院排放因子数据库，模型方法见 Zhao et al., 2016; Cai et al., 2018。

7. 国五轻型汽油车运行阶段平均排放因子：0.24 g/km(VOC), 0.018 g/km (NO_x), 0.003 g/km (一次 PM_{2.5})。国 V 柴油公交车运行阶段排放因子：0.061g/km(VOC), 8.310g/km (NO_x), 0.093 g/km (一次 PM_{2.5})。数据来源：VOC、NO_x 和一次 PM_{2.5} 排放因子根据生态环境部发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制指南（试行）》计算得到实际道路排放因子。温室气体和 SO₂ 的排放因子则根据平均油耗及汽油/柴油的平均含碳量、含硫量计算得到。

8. 汽油乘用车与纯电动乘用车车辆构成与材料构成数据。

附表 1 乘用车与纯电动乘用车的车辆构成（B 级车）

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
低压蓄电池	16.2		9.9	
动力电池	-		603.9	
车用油液	42.1		32.1	
车身	1463.8		1506.2	
动力系统	362	25%	345	22.9%
传动系统	77	5%	75	5.0%
底盘	350	24%	375	24.9%
牵引电机			31	2.1%
发电机			31	2.1%
电控			27	1.8%
白车身、内饰、外饰等	675	46%	621	41.3%

附表 2 车辆动力系统的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
钢	142.83	40%	173.14	50%
铸铁	103.42	29%	78.64	23%
铝	61.83	17%	47.25	14%
铜	10.49	3%	9.66	3%
塑料	33.63	9%	28.97	8%
橡胶	9.40	3%	7.24	2%

附表 3 车辆传动系统的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
钢	23.07	30.0%	45.26	60.5%
铜	108.48	30.0%	65.19	18.9%
铝	108.48	30.0%	68.98	20.0%
塑料	18.08	5%	0.69	0.2%
橡胶	18.08	5%		
其他				0.4%

附表 4 车辆底盘的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
钢	294.22	84.1%	315.40	84.1%
铸铁	5.31	6.9%	5.16	6.9%
铝	0.77	1.0%	0.75	1.0%
铜	0.92	1.2%	0.90	1.2%
塑料	1.38	1.8%	1.35	1.8%
橡胶	3.38	4.4%	3.29	4.4%
其他	0.46	0.6%	0.45	0.6%

附表 5 车辆发电机与电动机的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
钢			11.34	36.1%
铝			11.34	36.1%
铜			8.73	27.8%

附表 6 车辆电控系统的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
电控				
钢			1.36	5.0%
铝			12.71	46.9%
铜			2.22	8.2%
橡胶			1.00	3.7%
塑料			6.45	23.8%
其他			3.36	12.4%

附表 7 车辆白车身和内外饰的材料构成

	汽油乘用车		纯电动乘用车	
	质量（kg）	占比%	质量（kg）	占比%
钢	461.34	68.3%	424.45	68.3%
铝	4.73	0.7%	4.35	0.7%
铜	12.83	1.9%	11.81	1.9%
玻璃	43.90	6.5%	40.39	6.5%
塑料	122.26	18.1%	112.48	18.1%
橡胶	3.38	0.5%	3.11	0.5%
其他	26.75	4.0%	24.61	4.0%

附表 8 A00-C 级纯电动乘用车动力电池参数

车辆级别	A00	A0	A	B	C
电池类型	LFP	LFP	NMC622	LFP	NCA
电池容量, kWh	21.5	29.2	60.48	70	100
电池质量, kg	185.5	251.9	390.1	603.9	630.6

附表 9 A00-C 级纯电动乘用车动力电池材料组成（单位：kg）

	A00	A0	A	B	C
阳极材料	44.05	59.83	89.98	143.43	136.46
石墨	25.67	34.87	64.50	83.59	107.73
粘合剂	3.67	4.98	8.13	11.95	12.85
铜	19.30	26.22	45.99	62.84	76.56
锻铝	42.82	58.15	95.87	139.41	157.18
电解液	29.93	40.65	41.13	97.44	66.17
塑料	2.78	3.77	6.53	9.04	10.85
钢	1.32	1.79	2.43	4.28	3.90
绝热层	0.86	1.17	1.99	2.81	3.27
乙二醇	9.46	12.85	18.04	30.80	30.03
电子元件	5.62	7.64	15.49	18.31	25.62