

燃油车和电动车空气污染比较：基于中国环境

樊明 安书伟 韩志立 李云华 王孟
郑州西亚斯学院 河南新郑 450046

摘要：燃油车在行驶过程中自然会造成空气污染，但如果电动车的电力来自煤电，电动车也会造成空气污染，而中国70%的电力来自煤电，因此要基于中国环境比较燃油车和电动车对空气造成的污染，包括污染物排放和碳排放。根据比较，在烟尘/PM细颗粒物排放方面，燃油车明显胜出，在氮氧化物和碳排放方面，二者相差不大。因此，我们可以基于电动车对空气的污染不发生在城市内部而鼓励发展电动车，但不可基于电动车不对空气产生污染而大力发展电动车。

关键词：燃油车；电动车；空气污染；中国

空气污染导致疾病，碳排放导致全球变暖，是当下包括中国在内的全球需共同面对的环境问题。燃油车的尾气排放会导致空气污染，包括污染物排放和碳排放，一直是关注的重点。为此，越来越多的国家采取用电动车替代燃油车的汽车发展政策。2021年7月欧盟提议从2035年开始，全面禁止汽油车和柴油车的销售。德国、瑞士、法国、英国等欧洲多个国家，已经先后列出了禁售燃油车的时间表，分别将于10年内和20年以内，全面禁止采用内燃机动力的汽车上路^[1]。中国停止生产销售燃油车也进入议事日程，有望于2050年以前实现传统燃油车的全面退出^[2]。一些城市实施了鼓励电动车替代燃油车的政策，比如郑州电动车挂绿牌不限行^[3]，北京电动车指标配额多于燃油车，同时新能源小客车配置指标数量的60%优先向“无车家庭”配置^[4]。这类政策制定的重要基础是，电动车对空气污染较轻，甚至公众中有些人以为是零污染的。然而，考虑到如果电动车的电力来源来自煤电，我们显然就不能简单地认为电动车对空气是零污染的，只是污染主要不发生在城市内部，而燃油车的空气污染直接发生在城市内部如果车在城市内部行驶。为此，我们要比较在中国环境下，燃油车和电动车造成的空气污染，包括污染物排放和碳排放。如果电动车行驶所造成的空气污染显著比燃油车轻，且污染不直接发生在城市内部，而燃油车造成的空气污染严重影响了城市内部的空气，在不考虑两种类型的车造成的其

他污染的情况下，则应加大电动车对燃油车替代的力度，为中国尽早实现碳中和以及碳达峰做出贡献。当然，如果比较的结果并非如此，我们也必须客观对待。这一分析比较之所以要基于中国环境是因为，不同国家的发电方式不同。如果发电多采用清洁能源，则从造成的空气污染来说，电动车肯定完胜燃油车。然而，根据2021年《中国统计年鉴》，2020年中国火电占电力可供量的70%，且中国本土的煤污染比较严重，如此比较燃油车和电动车对空气造成的污染就必须基于中国环境。

1 电动车百公里行驶的空气污染

这里所论的电动车百公里行驶的空气污染是指，因电动车百公里行驶消耗电力的生产所造成的空气污染，包括污染物排放和碳排放。如果用煤炭发电造成空气污染而用其他能源发电不造成空气污染，则电动车百公里行驶的空气污染就是指燃煤造成的空气污染，这是本文的假定。

1.1 电动车百公里行驶污染物排放

1.1.1 电动车百公里行驶的电耗

要估计生产电动车百公里行驶消耗的电力所造成的空气污染，首先要估计百公里行驶的电耗。不同功率和不同品牌的电动车在不同的行驶环境，百公里行驶的电耗是不同的。本文选取一些代表性的品牌计算其百公里行驶电耗的均值。2020年1月，《2019新能源车测试盘点》公布了2019年的新能源汽车能耗测评数据^[5]。能耗测试是在完成城市工况续航之后，将测试车辆开往固定充电站进行充电，然后根据充入电量和已行驶里程数，计算该车在城市工况的百公里电耗。城市工况指的是最高时速90公里，平均时速34公里的情况。表1报告了选取的15种主要品牌城市工况百公里电耗，其中包括电耗较低和相对较高的车型。为简单计，我们计算这15种电动车在城

作者简介：樊明（1957-），男，江苏扬州人，郑州西亚斯学院商学院教授（返聘），河南财经政法大学教授，经济学博士（Ph.D., Northern Illinois University, USA），研究方向：资源环境经济学。

市工况百公里行驶电耗的均值，结果为16.53千瓦时。

表1 电动车百公里行驶电耗

排名	车型名称	年份	城市工况百公里电耗(千瓦时)
1	特斯拉 Model X	2019	20.8
2	奥迪 e-tron	2019	18.9
3	比亚迪唐 EV600	2019	20.9
4	蔚来 ES6	2019	19.6
5	小鹏汽车 G3	2019 (2018款)	14.6
6	威马汽车 EX5	2019	17.9
7	小鹏汽车 G3	2019 (2020款)	17.07
8	比亚迪宋 Pro EV	2019	16.8
9	云度 Π3	2019	13.65
10	比亚迪元 EV535	2019	16
11	云度 Π1	2019	12.09
12	江淮 iEVS4	2019	15.3
13	比亚迪 S2	2019	13.74
14	哪吒 NO1	2019	11.37
15	特斯拉 Model S	2019	19.25
均值			16.53

1.1.2 电力输送过程中的损耗

电力在输配过程中不可避免产生损耗。2021年《中国统计年鉴》报告了从1990到2019年部分年份电力供应量和输配电损失量，见表2。我们采用2019年数据计算电动车百公里行驶全部电耗，即行驶电耗和输配电损耗之和，计算公式为：

$$\text{百公里电耗} = \text{城市工况百公里行驶电耗} / (1 - \text{输配电损耗率})$$

由此计算出2019年城市工况电动车百公里电耗为17.29千瓦时。需要指出的是，中国输配电损耗率在逐年下降，虽然近年来下降的速度有所放缓，见图1，因此在讨论未来电损耗时应予以考虑。

1.1.3 电动车百公里行驶污染物排放

2020年6月中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告》，包含从2011到2019年各年烟尘、二氧化硫和氮氧化物三种主要污染物排放量（克/千瓦时），见表3，显示每千瓦时污染物的排放量下降速度明显，但近年来下降速度明显放缓，见图2。

表2 电力平衡表（单位：亿千瓦时）

年份	1990	1995	2000	2005	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019
可供量	6230	10023	13473	24941	41936	57830	58021	61204	65914	71509	74866
输配电损失量	435	745	937	1706	2568	3100	2988	3063	3196	3352	3330
输配电损耗率	0.070	0.074	0.070	0.068	0.061	0.053	0.051	0.050	0.048	0.047	0.044

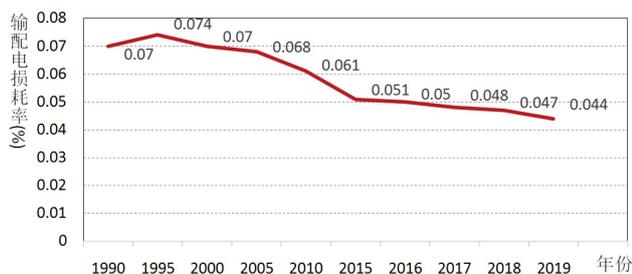


图1 输配电损耗率变化

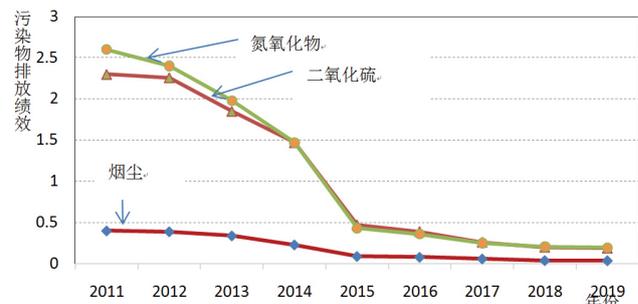


图2 污染物排放绩效变化：2011-2019

表3 电力行业排放绩效：2011-2019

(单位：克/千瓦时)

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
烟尘	0.4	0.39	0.34	0.23	0.09	0.08	0.06	0.04	0.038
二氧化硫	2.3	2.26	1.85	1.47	0.47	0.39	0.26	0.20	0.187
氮氧化物	2.6	2.4	1.98	1.47	0.43	0.36	0.25	0.206	0.195

由于本研究侧重于对城市空气污染的影响，所以基于城市工况百公里行驶电耗计算2019年的污染物排放量，所用公式为：

$$\text{污染物排放} = \text{城市工况电动车百公里电耗 (千瓦时)} \times \text{各污染物千瓦时的排放量}$$

由此计算出电动车百公里行驶有报告的污染物的空气排放量：

$$\text{烟尘} = 17.29 \times 0.038 = 0.66 \text{ 克}$$

$$\text{二氧化硫} = 17.29 \times 0.187 = 3.23 \text{ 克}$$

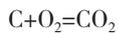
$$\text{氮氧化物} = 17.29 \times 0.195 = 3.37 \text{ 克}$$

1.2 电动车百公里行驶碳排放

碳排放，也称温室气体排放，造成温室效应，使全球气温上升。一般理论认为，全球气候变暖的主要原因是由于人类在自身发展过程中对能源的过度使用和自然

资源的过度开发,造成大气中温室气体的浓度以极快的速度增长所致。这些温室气体有二氧化碳、甲烷、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物、全氟化碳和六氟化硫等六类^[6]。限于数据的可得性,本文侧重分析温室气体中最主要的成分二氧化碳(CO₂)。

根据中国改革和发展委员会提供数据,2019年生产火电1千瓦时平均煤耗为0.36千克标准煤^[7]。煤燃烧的化学反应方程式为:



C=12, CO₂=12+2×16=44,这就意味着每燃烧一千克标准煤向大气释放的二氧化碳为3.67(=44/12)千克。由于我国电力的70%为火力发电,依以下公式可求得电动车在城市工况百公里行驶的碳排放:

电动车百公里行驶碳排放=百公里耗电×千瓦时耗煤×千瓦时二氧化碳排放×火电占比

据此,可计算出电动车百公里行驶碳排放=17.29千瓦时×0.36千克标准煤/千瓦时×3.67千克二氧化碳/千克标准煤×0.7=15.99千克。

2 燃油车百公里行驶的空气污染

2.1 燃油车百公里行驶污染物排放

燃油车排放的主要污染物有一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO₂)和微颗粒物(PM)^[8]。由于难以查找到燃油车百公里行驶空气污染物的排放数值,故采用相应的国家标准作为比较的依据,当然这样做也可能低估如果实际排放达不到国家标准,也可能高估如果实际排放普遍超过国家标准。根据《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(GB18352.6-2016)规定,全国最迟执行轻型汽车国六排放标准时间为:2020年7月1日起执行相对宽松的“国六A阶段”标准,2023年7月1日起执行较严格的“国六B阶段”标准。

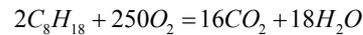
表4 国家第六阶段机动车污染物排放标准

排放物	国六A	国六B
一氧化碳(克/百公里)	70	50
非甲烷烃(克/百公里)	6.8	3.5
氮氧化物(克/百公里)	6.0	3.5
PM细颗粒物(克/百公里)	0.45	0.3
PN细颗粒物(颗/公里)	6×10 ¹¹	6×10 ¹¹

2.2 燃油车百公里行驶碳排放

由于燃油车种类过多,油耗不一,我们采用燃油车百公里平均油耗。2019年所有燃油新车的平均油耗为6.46升/百公里^[9]。一般汽油的密度是800千克/立方米。体积=质量/密度,由此可以计算出1千克汽油等于1.25

升。由此,燃油车百公里油耗为5.192(=6.49/1.25)千克。汽油(C₈H₁₈)燃烧的方程式为:



$2C_8H_{18} = 2 \times (8 \times 12 + 18 \times 1) = 228$, $16CO_2 = 16 \times (12 + 2 \times 16) = 704$,这就意味着每燃烧一千克汽油向大气释放的二氧化碳为3.09(=704/228)千克,由此燃油车行驶百公里平均释放的二氧化碳为16.03(=5.192×3.09)千克。

3 细颗粒物对空气质量的影响

当下PM2.5、PM10等颗粒物对空气的污染成为热门话题。下面我们分析,细颗粒物对空气质量的影响。中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台每日发布空气污染物指数,包括PM2.5、PM10、SO₂、NO₂、O₃、CO六个与空气质量相关的空气质量指数AQI(Air Quality Index)。数据发布的网址为: <https://aqicn.org/city/china/zhengzhou/yanchang/>。图3为数据发布的截图样本,其中左图为在观察点郑州水厂(Water Supply Company)各项污染指数和天气指数的实时数据,右图为14个观察点在郑州的分布。为了获得观察当天每半个钟点的数据,我们每半个钟点实施截屏以保存数据。

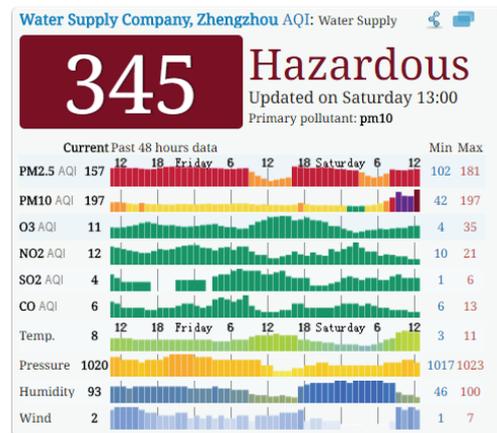


图3 空气污染指数发布截图

美国EPA使用nowcast系统，将原始污染物读数（以 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 或ppb表示）转换为AQI。中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台所发布的空气污染物指数也是AQI，这就意味着不同污染物所对空气质量的负面影响已经“指数化”，可以相互比较。为此我们可以采用这种经过指数化的污染指数来分析比较各污染物对空气质量影响的程度。需要提醒的是，AQI越高，代表空气质量越差。

AQI的生成值得关注。所发布的“个体污染物”空气质量指数，如PM2.5，是对应于PM2.5单独的AQI，记为AQIPM2.5。而空气质量指数AQI是取这些指数的最大值，即如果要计算整体AQI（又称复合AQI），则需要取所有单个AQI的最大值：

$$AQI = \max(AQIPM2.5, AQIPM10, AQIO3, \dots)$$

表5报告了2021年3月21日在高污染天气（AQI均值为796.00）和4月17日低污染天气（AQI均值为344.26）基于数个观察点六项污染物空气质量指数以及AQI的均值显示，PM2.5、PM10是导致空气质量问题的最主要的因素，远远高于其他污染物对空气质量的影响。这就意味着，PM2.5、PM10所代表的细颗粒物决定空气质量的基本面。

表5 各污染物空气质量指数均值

	AQI	PM25	PM10	O ₃	NO ₂	SO ₂	CO
低污染调查日	344.26	153.98	329.04	30.22	10.28	5.26	5.95
高污染调查日	796.00	796.00	251.77	20.68	13.06	8.83	6.19

资料来源：<https://aqicn.org/city/china/zhengzhou/yanchang/>

4 电动车、燃油车百公里空气污染比较

根据以上分析，我们可以基于获得的数据对电动车、燃油车行驶百公里对空气的污染进行比较，包括污染物排放和碳排放。燃油车采用2023年实施的国六B标准，表6报告了比较的结果。在烟尘/PM细颗粒物排放方面，燃油车明显胜出。在氮氧化物方面，二者相差不大，在碳排放方面，指标几乎相等。综合起来，就电动车和燃油车的污染物排放来说，燃油车胜出。其实这个不难理解，主要由于中国70%的电是煤电，而用煤发电造成的烟尘排放明显要高于燃油造成的烟尘排放。上一部分的分析表明，烟尘/PM细颗粒物是决定空气质量的基本面。虽然部分指标的数据缺失使得电动车和燃油车污染物排放的比较难以全面地进行，但确定了在烟尘/PM细颗粒

物的排放方面，燃油车胜出，也就可以理解为，就两种车造成的污染物对空气质量的影响来说，燃油车比电动车对空气质量的负面影响要低。

表6 电动车与燃油车污染物及数值

污染物名称	电动车/ 百公里	燃油车/ 百公里	比较结果
烟尘/PM细颗粒物	0.657克	0.3克	燃油车胜出
氮氧化物	3.23克	3.5克	指标接近
二氧化硫	3.37克		
非甲烷烃		3.5克	
一氧化碳		50克	
碳排放	15.99千克	16.03千克	几乎相等

因此，从电动车和燃油车污染物排放就当下来说，我们首先要破除一种有所偏颇的认知：燃油车在行驶时会造成空气污染，电动车是无空气污染的。其次，我们可以基于电动车对空气的污染不发生在城市内部而鼓励发展电动车，但不可基于电动车不对空气产生污染而大力发展电动车，尤其是碳排放，因为碳排放对大气温度的影响主要是基于大范围内空气中的碳含量，而不是城市内部。

这里有必要介绍本研究团队的另一项研究：汽车尾气对城市空气质量的影响。相关论文将在本刊下一期发表，这里仅简要报告结论：基于对由主要污染物决定的空气质量指数与车流量关系的分析发现，车流量对AQIPM2.5有较为显著的影响，尤其在天气污染较轻的情况下，但天气的影响可能更大。车流量对其他污染物排放的关系有待进一步研究，至少基于所用数据不能肯定车流量对空气质量存在统计上的显著影响。2020年2-3月新冠病毒大流行导致车流量明显减少，但对空气质量的改善只有有限的帮助，且难以排除工厂普遍停工的影响。就郑州所实施单双号限行来说，对提高空气质量的作用并不显著。在过去的数年，工业污染物排放的大量减少可能是包括郑州在内的空气质量提升的重要原因。这项研究的基本结论是，汽车尾气对城市空气质量的影响过去可能被过度夸大了。

需要指出的是，受限于数据的可得性，除了比较不全面外，比较还有所简化。比如我们一直用“标准煤”作为发电用煤用以比较，但实际使用的煤并非“标准煤”，一般认为国产的煤大多污染较重，这就是说用煤电让电动车行驶百公里所造成的污染可能要比表6报告的数值要高，然而我们并找不到准确的数值来进行比较。关于燃油车所导致的污染是基于2023年执行的国六B标

准, 当下以及2023年后标准是否能得到有效的执行, 我们也缺少准确的数据。更重要的是, 未来无论是用煤电还是汽油燃烧, 排放量都在持续降低。随着中国清洁能源的发展, 电力的70%来自煤电也会逐渐改变, 因此从电动车和燃油车行驶所导致的空气污染来说, 比较是动态的。

从这个意义上来说, 本研究更具有方法论上的意义。希望有关方面一方面收集更多的数据进行更全面的比较, 另一方面, 经常根据新的数据及时进行比较, 以为基于电动车和燃油车行驶所造成的空气污染, 制定更为科学合理的两种车使用的政策。

参考文献:

- [1]余鹏. 欧盟2035年禁售燃油车, 德国准备咋办? [N]. 北京晚报, 2022-07-06. <https://mq.mbd.baidu.com/r/M0NAY3Og8M?f=cp&u=4a490da01b6ed901>.
- [2]周菊. 中国禁售燃油车时间表出炉 2050年燃油车应全面退出[J]. 商业文化, 2019(18): 79-81.
- [3]邱瑾. 明年底, 郑州所有公交车、出租车、环卫车都将替换成新能源车! [N]. 大河报, 2019-04-22. <https://www.dahebao.cn/news/1398952?cid=1398952>.
- [4]北京市人民政府. 北京摇号新政2021年1月实施2021年新能源指标60%优先给“无车家庭”[N]. 北京日报, 2020-12-07. http://www.beijing.gov.cn/zhengce/zcjd/202012/t20201207_2158173.html
- [5]许博. 电瓶车续航测试软件, 2019年新能源车测试盘点续航&能耗篇[J/OL] (2020-01-13) [2022-10-24]. <https://mr.mbd.baidu.com/r/ONf2OVabo4?f=cp&u=e505595cc3893403>.
- [6]环保科普|哪些气体属于温室气体? 二氧化碳当量是什么意思[N]. 潇湘晨报, 2022-05-18. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1733173436895867449&wfr=spider&for=pc>.
- [7]中华人民共和国统计局. 中国电力统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [8]张衔, 王庆龙. 中国汽车尾气控制政策的减排效果研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020(5): 98-109.
- [9]车亮. 电动车和燃油车, 谁的碳排放更高? [J/OL] (2021-07-22) [2022-10-24]. <https://mi.mbd.baidu.com/r/ONfjJ29a90?f=cp&u=c53ffe40f7616956>.